



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGARUH FLUKS SISA PADA
TRANSFORMATOR 1-FASA TERHADAP ARUS *INRUSH***

Rizqy Alif Sandeputra
NRP 2212 100 184

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Ir. Arif Musthofa, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**EFFECT OF RESIDUAL FLUX ON
INRUSH CURRENT OF 1-PHASE TRANSFORMER**

Rizqy Alif Sandeputra
NRP 2212 100 184

Advisors

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Ir. Arif Musthofa, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

**PENGARUH FLUKS SISA PADA
TRANSFORMATOR 1-FASA TERHADAP
ARUS INRUSH**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyutujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

Ir. Arif Musthofa, MT.
NIP. 196608111992031004



PENGARUH FLUKS SISA PADA TRANSFORMATOR 1-FASA TERHADAP ARUS *INRUSH*

Nama : Rizqy Alif Sandeputra
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRAK

Pada studi ini dilakukan analisis pengaruh fluks sisa terhadap arus *inrush* pada transformator 1-fasa 1 kVA yang memiliki dua bentuk potongan inti yang berbeda. Metode yang digunakan dalam studi ini adalah simulasi berbasis perangkat lunak *simulink* dan eksperimen secara langsung. Berdasarkan eksperimen secara langsung, hasil yang didapatkan adalah nilai arus *inrush* pada transformator dengan cara potong A lebih besar dibandingkan dengan transformator dengan cara potong B. Sedangkan dari simulasi berbasis perangkat lunak *simulink*, hasil yang didapatkan adalah nilai arus *inrush* pada transformator dengan cara potong A lebih besar daripada transformator dengan cara potong B. Hasil yang didapatkan pada eksperimen secara langsung adalah besarnya nilai arus *inrush* lebih besar dari simulasi berbasis perangkat lunak *simulink*. Dari perbedaan tersebut dianalisis mengenai pengaruh fluks sisa terhadap arus *inrush*.

Kata Kunci: Arus *Inrush*, Fluks Sisa, Transformator 1-Fasa

Halaman ini sengaja dikosongkan

EFFECT OF RESIDUAL FLUX ON INRUSH CURRENT OF 1-PHASE TRANSFORMER

Name : Rizqy Alif Sandeputra
Advisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Advisor II : Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRACT

In this study analyzed the effect of residual flux on inrush current of 1-phase 1kVA transformer which has two different core topologies. the method used in this study is based on simulation using Simulink and experiment. Based on experiment, the results obtained are the value of inrush current on transformer A is bigger than transformer B. Based on simulation using Simulink, the results obtained are the value of inrush current on transformer A is bigger than transformer B. The result of experiment is the value of inrush current is bigger than simulation using simulink. From that differences analyzed the effect of residual flux on inrush current.

Key Words: 1-Phase Transformator, Inrush Current, Residual Flux

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Halaman

| | |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL | |
| PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR | |
| HALAMAN PENGESAHAN | |
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | iii |
| KATA PENGANTAR | v |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| | |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Batasan Masalah | 3 |
| 1.3 Sistematika Penulisan | 3 |
| | |
| BAB 2 TRANSFORMATOR | 5 |
| 2.1 Konstruksi Transformator | 5 |
| 2.2 Transformator Ideal | 6 |
| 2.3 Transformator Tidak Ideal | 7 |
| 2.3.1 Rangkaian Ekuivalen Transformator. | 8 |
| 2.3.2 Parameter Transformator | 10 |
| 2.4 Arus <i>Inrush</i> Pada Transformator | 12 |
| 2.5 Rugi Pada Transformator | 14 |
| 2.5.1 Rugi Histerisis | 14 |
| 2.5.2 Rugi Tembaga | 15 |
| 2.5.3 Rugi Arus Pusar | 15 |
| | |
| BAB 3 EKSPERIMEN PENGUKURAN ARUS <i>INRUSH</i> DAN PEMODELAN TRANSFORMATOR MENGUNAKAN SIMULINK-MATLAB | 17 |
| 3.1 Pengujian Transformator Satu Fasa 1 kVA | 17 |
| 3.1.1 Pengujian Tanpa Beban | 20 |
| 3.1.1.1 Hasil Pengujian Cara Potong A | 21 |
| 3.1.1.2 Hasil Pengujian Cara Potong B | 22 |
| 3.1.2 Pengujian Hubung Singkat | 23 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.1.2.1 | Hasil Pengujian Cara Potong A | 24 |
| 3.1.2.2 | Hasil Pengujian Cara Potong B | 26 |
| 3.2 | Kurva Karakteristik Tanpa Beban | 27 |
| 3.3 | Kurva Magnetisasi | 33 |
| 3.4 | Eksperimen Pengukuran Arus <i>Inrush</i> | 38 |
| 3.4.1 | Alat Yang Digunakan Untuk Pengukuran. | 38 |
| 3.4.1.1 | Sumber Satu Fasa | 39 |
| 3.4.1.2 | Kapasitor Demagnetisasi | 40 |
| 3.4.1.3 | Komponen Pensaklaran | 40 |
| 3.4.1.4 | Perangkat Keras Akuisisi Data dan Perangkat Lunak LabVIEW | 42 |
| 3.5 | Pemodelan Transformator Satu Fasa Menggunakan <i>Simulink-MATLAB</i> | 43 |
| BAB 4 ANALISIS HASIL EKSPERIMEN DAN SIMULASI | | 47 |
| 4.1 | Eksperimen Arus <i>Inrush</i> | 47 |
| 4.1.1 | Pengujian Alat | 47 |
| 4.1.2 | Proses Akuisisi Data | 48 |
| 4.1.3 | Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa Dengan Cara Potong A | 48 |
| 4.1.3.1 | Arus <i>Inrush</i> Pada Sudut Penyalaan 0° . | 48 |
| 4.1.3.2 | Arus <i>Inrush</i> Pada Sudut Penyalaan 90° . | 51 |
| 4.1.4 | Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa Dengan Cara Potong B | 53 |
| 4.1.4.1 | Arus <i>Inrush</i> Pada Sudut Penyalaan 0° | 54 |
| 4.1.4.2 | Arus <i>Inrush</i> Pada Sudut Penyalaan 90° . | 56 |
| 4.2 | Simulasi Arus <i>Inrush</i> | 60 |
| BAB 5 PENUTUP | | |
| 5.1 | Kesimpulan | 67 |
| 5.2 | Saran | 67 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 69 |
| RIWAYAT HIDUP | | 71 |

DAFTAR GAMBAR

| | Hal | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Transformator tipe inti | 6 |
| Gambar 2.2 | Transformator tipe cangkang lilitan tidak saling menumpuk (a); transformator tipe cangkang lilitan saling menumpuk (b) | 6 |
| Gambar 2.3 | Rangkaian ekivalen tranformator | 9 |
| Gambar 2.4 | Diagram pengujian transformator hubung singkat | 11 |
| Gambar 2.5 | Diagram pengujian transformator tanpa beban | 12 |
| Gambar 2.6 | Fenomena hubungan arus <i>inrush</i> akibat pengaruh fluks | 14 |
| Gambar 3.1 | Transformator satu fasa dengan cara potong A; tampak atas (a), tampak samping (b), dan tampak depan (c) | 18 |
| Gambar 3.2 | Bentuk inti transformator satu fasa dengan cara potong A | 18 |
| Gambar 3.3 | Transformator satu fasa dengan cara potong B; tampak atas (a), tampak depan (b), dan tampak samping (c) | 19 |
| Gambar 3.4 | Bentuk inti transformator satu fasa dengan cara potong B | 19 |
| Gambar 3.5 | Rangkaian pengujian tanpa beban | 20 |
| Gambar 3.6 | Rangkaian pengujian hubung singkat | 24 |
| Gambar 3.7 | Kurva karakteristik tanpa beban pada transformator dengan cara potong A | 30 |
| Gambar 3.8 | Kurva karakteristik tanpa beban pada transformator dengan cara potong B | 30 |
| Gambar 3.9 | Kurva magnetisasi transformator dengan cara potong A | 37 |
| Gambar 3.10 | Kurva magnetisasi transformator dengan cara potong B | 38 |
| Gambar 3.11 | Rangkaian pengukuran arus <i>inrush</i> dan proses demagnetisasi | 39 |
| Gambar 3.12 | Panel Sumber tiga fasa tampak depan (a), tampak dalam (b) | 39 |
| Gambar 3.13 | Kapasitor demagnetisasi | 40 |

| | Hal | |
|-------------|---|----|
| Gambar 3.14 | Rangkaian pensaklaran | 41 |
| Gambar 3.15 | Rangkaian <i>zero crossing</i> | 41 |
| Gambar 3.16 | DAQ 9246 | 42 |
| Gambar 3.17 | DAQ 9223, tampak bawah (a), dan tampak depan (b) | 43 |
| Gambar 3.18 | Diagram SIMULINK untuk pemodelan transformator satu fasa | 44 |
| Gambar 3.19 | <i>Flowchart</i> variabel pada simulasi transformator satu fasa | 46 |
| Gambar 4.1 | Arus <i>inrush</i> sebesar 31 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 0° | 49 |
| Gambar 4.2 | Arus <i>inrush</i> sebesar 32 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 0° | 49 |
| Gambar 4.3 | Arus <i>inrush</i> sebesar 29 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 0° | 50 |
| Gambar 4.4 | Arus <i>inrush</i> sebesar 31.5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 0° | 50 |
| Gambar 4.5 | Arus <i>inrush</i> sebesar 44 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 0° | 51 |
| Gambar 4.6 | Arus <i>inrush</i> sebesar 1,5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 90° | 52 |
| Gambar 4.7 | Arus <i>inrush</i> sebesar 2,3 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 90° | 52 |
| Gambar 4.8 | Arus <i>inrush</i> sebesar 3,5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 90° | 53 |
| Gambar 4.9 | Arus <i>inrush</i> sebesar 5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 90° | 53 |
| Gambar 4.10 | Arus <i>inrush</i> sebesar 2,9 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut | 54 |

| | Hal |
|-------------|--|
| | penyalaaan 90° |
| Gambar 4.11 | Arus <i>inrush</i> sebesar 8 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 0° |
| Gambar 4.12 | Arus <i>inrush</i> sebesar 7 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 0° |
| Gambar 4.13 | Arus <i>inrush</i> sebesar 7,5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 0° |
| Gambar 4.14 | Arus <i>inrush</i> sebesar 8 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 0° |
| Gambar 4.15 | Arus <i>inrush</i> sebesar 8 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 0° |
| Gambar 4.16 | Arus <i>inrush</i> sebesar 2 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 90° |
| Gambar 4.17 | Arus <i>inrush</i> sebesar 3 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 90° |
| Gambar 4.18 | Arus <i>inrush</i> sebesar 3 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 90° |
| Gambar 4.19 | Arus <i>inrush</i> sebesar 2 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 90° |
| Gambar 4.20 | Arus <i>inrush</i> sebesar 2 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaaan 90° |
| Gambar 4.21 | Hasil simulasi arus <i>inrush</i> pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaaan 0° |
| Gambar 4.22 | Hasil simulasi arus <i>inrush</i> pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaaan 90° |

| | Hal |
|--|-----|
| Gambar 4.23 Hasil simulasi arus <i>inrush</i> pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaan 0° | 62 |
| Gambar 4.24 Hasil simulasi arus <i>inrush</i> pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaan 90° | 62 |

DAFTAR TABEL

| | | Hal |
|-------------|--|-----|
| Tabel 3.1 | Spesifikasi transformator | 17 |
| Tabel 3.2 | Ukuran inti transformator dengan cara potong A | 18 |
| Tabel 3.3 | Ukuran inti transformator dengan cara potong B | 20 |
| Tabel 3.4 | Hasil pengujian tanpa beban untuk cara potong A | 21 |
| Tabel 3.5 | Hasil pengujian tanpa beban untuk cara potong B | 22 |
| Tabel 3.6 | Hasil pengujian hubung singkat untuk cara potong A | 25 |
| Tabel 3.7 | Hasil pengujian hubung singkat untuk cara potong B | 26 |
| Tabel 3.8 | Hasil pengujian tanpa beban untuk transformator dengan cara potong A | 27 |
| Tabel 3.9 | Hasil pengujian tanpa beban untuk transformator dengan cara potong B | 28 |
| Tabel 3.10a | Arus magnetisasi dan arus rugi inti pada transformator dengan cara potong A | 31 |
| Tabel 3.10b | Arus magnetisasi dan arus rugi inti pada transformator dengan cara potong B | 32 |
| Tabel 3.11a | Kerapatan medan magnet (B) dengan intensitas medan magnet (H) transformator dengan cara potong A | 34 |
| Tabel 3.11b | Kerapatan medan magnet (B) dengan intensitas medan magnet (H) transformator dengan cara potong B | 36 |
| Tabel 3.12 | Spesifikasi sumber daya satu fasa | 38 |
| Tabel 3.13 | Parameter yang dibutuhkan | 43 |
| Tabel 4.1 | <i>Setting probe</i> osiloskop | 47 |
| Tabel 4.2 | Hasil eksperimen arus <i>inrush</i> pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90° | 51 |
| Tabel 4.3 | Hasil eksperimen arus <i>inrush</i> pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90° | 57 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan suatu peralatan listrik yang sangat penting dalam sistem kelistrikan. Fungsi dari transformator adalah untuk menaikkan (*step up*) level tegangan yang dibangkitkan dari suatu sistem pembangkitan sehingga dapat ditransmisikan pada jarak jauh. Fungsi lain dari transformator adalah untuk menurunkan (*step down*) level tegangan dari sistem transmisi menuju ke sistem distribusi, sehingga daya listrik bisa tersalurkan ke beban-beban, seperti rumah tangga, perkantoran hingga industri [1]. Oleh karena fungsi transformator yang sangat penting dalam sistem kelistrikan, maka dibutuhkan sistem proteksi pada transformator agar transformator terlindungi dari gangguan eksternal.

Untuk merancang sistem proteksi pada transformator, perlu memerhatikan beberapa fenomena-fenomena karakteristik pada transformator tersebut. Salah satu fenomena karakteristik yang terjadi pada transformator yang perlu diperhatikan adalah arus inrush (*inrush current*). Fenomena arus inrush pada transformator telah dibahas dalam beberapa literatur [2-7]. Arus inrush merupakan arus yang memiliki magnitudo tinggi yang terbangkitkan ketika inti transformator mencapai titik saturasi pada saat energisasi. Fenomena arus inrush pada transformator ini dapat memengaruhi keandalan dari suatu transformator saat dilakukan proses energisasi pertama kali dan dalam keadaan tidak berbeban. Arus inrush juga dapat menyebabkan penurunan kualitas pada transformator, menimbulkan kegagalan koordinasi proteksi pada sistem pengamanan transformator, menyebabkan penurunan kualitas daya pada sistem, dan dapat menurunkan kekuatan isolasi belitan pada transformator [8]. Arus inrush yang tinggi salah satu penyebabnya adalah adanya fluks sisa pada inti transformator yang terjadi saat proses pengisian daya (energisasi) atau penyambungan transformator ke sistem pada waktu sebelum-sebelumnya. Fluks sisa merupakan hal yang sulit dihindari pada sebuah transformator dan proses hilangnya fluks sisa ini belum bisa ditentukan waktunya. Melalui pengaruh kurva B-H pada inti transformator, fenomena arus inrush ini dapat dianalisis [9]. Sehingga, dapat diperkirakan arus *inrush* yang muncul.

Berdasarkan uraian di atas, studi tugas akhir ini mengangkat judul, “Pengaruh Fluks Sisa Pada Transformator 1-Fasa Terhadap Arus

Inrush“. Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah berawal pada besarnya arus inrush pada saat transformator dienergisasi kembali setelah berhenti beroperasi. Besarnya arus inrush tersebut dipengaruhi oleh besarnya fluks sisa yang terdapat pada inti transformator. Fluks sisa pada transformator ini belum bisa diketahui besarnya, sehingga perlu adanya pengukuran pada fluks sisa pada inti transformator agar arus *inrush* yang muncul pada transformator bisa diprediksi atau diestimasi.

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui besarnya fluks sisa pada inti suatu transformator. Penelitian ini juga dilakukan untuk mengetahui perbandingan pengaruh potongan inti transformator terhadap besarnya nilai arus *inrush*. Penelitian tugas akhir ini memiliki manfaat sebagai referensi dalam mempertimbangkan waktu yang diperlukan untuk memberikan energisasi pada transformator. Disamping itu, penelitian tugas akhir ini juga dapat menjadi referensi dalam mempertimbangkan pemilihan maupun perancangan konstruksi pada transformator. Penelitian tugas akhir ini juga diharapkan dapat menjadi referensi dalam mengembangkan penelitian mengenai transformator.

Metode penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini, yaitu mengumpulkan parameter-parameter yang digunakan dalam pembahasan tugas akhir ini. Parameter-parameter ini dapat diperoleh dari literature dan objek transformator yang akan diamati. Parameter-parameter yang diperlukan dalam simulasi penelitian ini didasarkan pada data transformator yang akan diuji yaitu, ukuran dari transformator, cara pemotongan inti transformator, tegangan yang diberikan pada belitan primer, jenis material inti, impedansi transformator dan jumlah lilitan. Sedangkan parameter-parameter yang diperlukan dalam pengujian transformator yaitu, kapasitas daya transformator, dan arus rating transformator.

Langkah selanjutnya adalah memodelkan transformator kedalam perangkat lunak yang dapat mengetahui besarnya arus inrush. Parameter-parameter pada transformator yang telah diuji kemudian dimasukkan kedalam simulasi tersebut sehingga antara permodelan dan eksperimen dapat sesuai.

Hasil olah data simulasi kemudian dibandingkan dengan metode eksperimen laboratorium. Eksperimen laboratorium dilakukan untuk mengukur arus inrush pada transformator satu fasa dengan kapasitas 1 kVA. Analisis akhir dilakukan dengan membandingkan hasil analisis

dari metode simulasi dan metode eksperimen sehingga dapat ditarik kesimpulan yang akan menjawab permasalahan.

1.2 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah transformator satu fasa, arus *inrush*, fluks sisa dan cara potong inti.

1.3 Sistematika penulisan

Pada laporan tugas akhir bab 1 membahas mengenai latar belakang penelitian tugas akhir ini, kemudian rumusan masalah yang diangkat kedalam tugas akhir, tujuan yang ingin dicapai, metode penelitian, sistematika penelitian dan manfaat dari penelitian ini.

Kemudian pada bab2 tugas akhir ini menerangkan mengenai tinjauan pustaka ataupun teori transformator dan karakteristiknya yang digunakan dalam pengerjaan penelitian tugas akhir ini.

Selanjutnya pada bab 3 tugas akhir ini menjelaskan mengenai metode yang dilakukan dalam mencari parameter-parameter transformator, arus saturasi pada transformator, kurva magnetisasi pada transformator dan kurva perbandingan antar fluks magnetisasi dan arus magnetisasi. Kemudian pada bab ini juga dijelaskan mengenai pemodelan transformator menggunakan perangkat lunak untuk dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Pada bab 4 tugas akhir ini menguraikan mengenai analisis data hasil simulasi dan eksperimen terkait dengan pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi dan arus *inrush*.

Kemudian pada bab 5 dijabarkan mengenai kesimpulan hasil studi yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TRANSFORMATOR

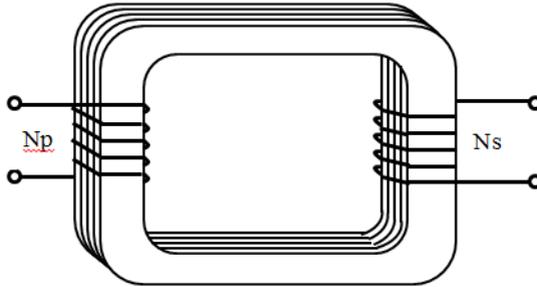
Transformator merupakan peralatan listrik yang terdiri atas dua atau lebih lilitan kawat yang membungkus inti feromagnetik. Jika pada salah satu dari lilitan kawat tersebut diberikan sumber tegangan bolak-balik, maka suatu fluks bolak-balik akan dihasilkan yang amplitudinya bergantung pada besar tegangan dan frekuensi yang dikeluarkan oleh sumber tegangan tersebut serta bergantung dengan banyaknya jumlah lilitan pada inti transformator tersebut. Lilitan pada sisi sumber tegangan dan lilitan pada sisi yang lain tidak terhubung secara fisik, namun terhubung secara magnetic. Dengan adanya fluks bolak-balik yang dihasilkan pada sisi yang terhubung sumber, maka akan muncul fluks gandeng (*mutual flux*) diantara lilitan tersebut. Fluks gandeng tersebut akan menginduksi lilitan di sisi yang lain sehingga muncul tegangan yang nilainya bergantung pada banyaknya jumlah lilitan dan besarnya fluks gandeng (*mutual flux*) serta frekuensinya.

Prinsip kerja transformator yaitu, transformator hanya membutuhkan keberadaan fluks gandeng yang berubah terhadap waktu yang menghubungkan dua sisi lilitan. Mekanisme kerja tersebut dapat terjadi pada dua lilitan yang dikopel melalui udara. Namun kopel antar lilitan dapat dibuat lebih efektif menggunakan inti berbahan feromagnetik. Penggunaan inti yang berbahan feromagnetik disebabkan karena banyak fluks mengalir yang dapat dibatasi pada jalur hubung antar lilitan yang ditentukan dan memiliki permeabilitas tinggi.

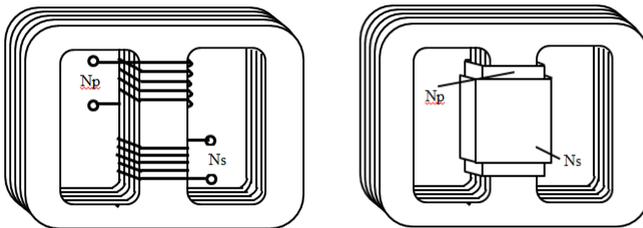
2.1 Konstruksi Transformator

Transformator dibagi kedalam 2 tipe jika dilihat berdasarkan konstruksinya, yaitu tipe inti (*core-form*) dan tipe cangkang (*shell-form*). Pada tipe inti (*core-form*), belitan digulung mengelilingi dua lengan sebuah inti magnetik yang berbentuk persegi. Dalam konstruksi tipe inti, setiap belitan terdiri atas dua bagian, yaitu kumparan primer pada satu sisi lengan transformator, dan kumparan sekunder pada sisi lengan transformator yang lain. Konstruksi tipe inti dapat dilihat pada gambar 2.1. Sedangkan pada tipe cangkang (*shell-form*), belitan digulung mengelilingi satu buah lengan dari transformator yang memiliki tiga buah lengan inti magnetic. Dalam konstruksi tipe cangkang, terdapat dua macam tipe belitan, yaitu belitan primer dan sekunder yang digulung mengelilingi lengan tengah dari inti berlengan tiga yang bervariasi dan

tidak saling menumpuk seperti pada gambar 2.2 a, serta belitan primer dan sekunder yang digulung saling menumpuk pada satu lengan saja, seperti pada gambar 2.2 b.



Gambar 2.1 Transformator tipe inti



Gambar 2.2 Transformator tipe cangkang lilitan tidak saling menumpuk (a); transformator tipe cangkang lilitan saling menumpuk (b)

2.2 Transformator Ideal

Sifat-sifat transformator yang disebut sebagai transformator ideal pernah dijelaskan dalam sebuah hipotesis. Transformator yang dinyatakan sebagai transformator ideal adalah transformator yang memiliki sifat tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain di dalam transformator, sehingga daya listrik pada kumparan sekunder sama dengan daya listrik pada kumparan primer. Dengan kondisi tersebut, menandakan bahwa efisiensi pada transformator ideal adalah 100 persen. Hipotesis ini menggunakan asumsi antara lain resistansi lilitan diabaikan, semua fluks dibaasi pada inti dan terhubung pada dua sisi lilitan (fluks bocor diabaikan), tidak ada rugi inti, dan permeabilitas

inti sangat tinggi. Sifat-sifat tersebut hampir didekati namun tidak pernah secara nyata tercapai dalam aplikasi praktis transformator.

Jika hipotesis transformator ideal tersebut dapat diasumsikan, besar tegangan yang dihubungkan pada kumparan primer sama dengan gaya gerak listrik yang berubah terhadap waktu. Gaya gerak listrik tersebut memengaruhi besar fluks yang dihasilkan yang berubah terhadap waktu. Secara sistematis, kondisi ini dapat ditulis dalam persamaan 2.1.

$$V_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Fluks yang dihasilkan pada kumparan primer mengalir melalui inti dan menginduksi kumparan sekunder, sehingga gaya gerak listrik muncul pada kumparan sekunder yang sebanding dengan nilai tegangan sekunder.

$$V_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Jika fluks yang dihasilkan pada kumparan primer diasumsikan sama dengan yang dihasilkan pada kumparan sekunder, maka:

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{d\phi_2}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

2.3 Transformator Tidak Ideal

Dalam praktiknya, transformator tidak dapat mengubah daya secara sempurna. Ada faktor-faktor yang menyebabkan kondisi tersebut terjadi. Faktor tersebut adalah pengaruh resistansi kumparan, fluks bocor, dan arus eksitasi karena permeabilitas inti yang terbatas, bahkan nonlinier. Tidak seluruh fluks yang dihasilkan mengalir melalui kumparan sekunder. Ada beberapa bagian fluks yang mengalir pada suatu kumparan namun tidak mengalir ke kumparan yang lain namun mengalir bebas ke udara sehingga disebut fluks bocor. Kerugian daya lain yang terjadi saat transformator beroperasi adalah rugi inti. Rugi inti dipengaruhi oleh resistansi inti dan reaktansi magnetik yang terjadi pada inti transformator.

Permeabilitas rangkaian magnetik yang terbatas memengaruhi nilai arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya gerak magnet untuk mempertahankan fluks yang dibutuhkan transformator agar beroperasi. Arus dan gaya gerak magnet yang dibutuhkan sebanding dengan kerapatan fluks (B) yang terjadi pada inti transformator. Pernyataan ini berasal dari,

$$B = \mu H; B = \frac{\phi}{A} \quad (2.5)$$

dimana H adalah intensitas medan magnet atau gaya magnetisasi, dan A adalah luas permukaan dari inti ferromagnetik. Untuk mendapatkan nilai H , diperoleh dari rumus,

$$H = i \frac{T_1}{l} \quad (2.6)$$

dimana l merupakan panjang jalur magnetik dari suatu inti transformator. Sehingga,

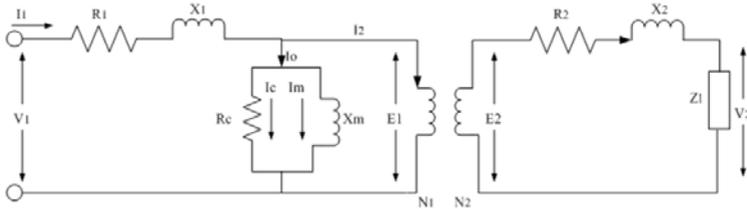
$$\phi = \int B \cdot dS = A\mu \frac{iT_1}{l} \quad (2.7)$$

Jika kondisi saturasi tidak diabaikan dalam operasi suatu transformator tidak ideal, maka untuk menghasilkan tegangan, arus yang dibutuhkan harus menyesuaikan dengan ketidaklinieran inti pada transformator tersebut. Arus yang dibutuhkan tersebut juga dipengaruhi oleh reaktansi induktif yang dihasilkan dari rangkaian magnetisasi. Sehingga, arus magnetisasi didapatkan dari tegangan sumber dibagi dengan reaktansi magnetisasi. Rangkaian magnetisasi ini dapat menjadi rugi-rugi yang perlu diperhatikan karena rangkaian magnetisasi tersebut dapat mendisipasikan daya yang bergantung pada kerapatan fluks yang beroperasi.

2.3.1 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Model rangkaian ekuivalen transformator perlu diperhatikan pada praktik transformator dalam kondisi nyata yang tidak ideal. Rangkaian ekuivalen tersebut diperoleh dengan memerhatikan aspek yang kompleks. Rangkaian ekuivalen ini digunakan untuk menganalisis suatu transformator yang dalam kondisi nyata, perlu memerhatikan rugi-rugi belitan dan komponen magnetisasi inti, seperti resistansi inti dan

reaktansi magnetisasi. Rangkaian ekivalen pada transformator dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen transformator

Dengan menggunakan rangkaian ekivalen itu hubungan penjumlahan vektor dapat dapat diketahui sebagai berikut:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.8)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \quad (2.9)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{ atau } E_1 = a E_2 \quad (2.10)$$

Dari persamaan 2.9 dan 2.10 diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \quad (2.11)$$

Karena,

$$\frac{I'_2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \text{ atau } I_2 = a I'_2 \quad (2.12)$$

Maka,

$$E_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_2 + a^2 I'_2 X_2 \quad (2.13)$$

Sehingga,

$$V_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_2 + a^2 I'_2 X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.14)$$

Ketika rangkaian disederhanakan, maka akan menjadi:

$$R_{eq} = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_2 \quad (2.15)$$

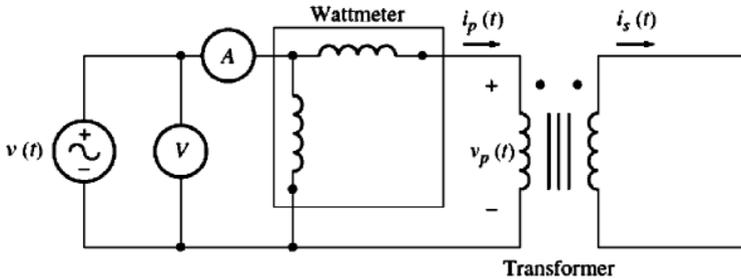
$$X_{eq} = X_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot X_2 \quad (2.16)$$

Dimana: V_1 = Tegangan Primer (V)
 V_2 = Tegangan Sekunder (V)
 E_1 = ggl primer (V)
 E_2 = ggl sekunder (V)
 R_1 = Hambatan Primer (Ω)
 R_2 = Hambatan Sekunder (Ω)
 I_1 = Arus Primer (A)
 I_2 = Arus Sekunder (A)
 X_1 = Reaktansi primer (Ω)
 X_2 = Reaktansi sekunder (Ω)
 N_1 = Jumlah lilitan primer
 N_2 = Jumlah lilitan sekunder
 Z_L = Impedansi beban (Ω)
 a = Konstanta

2.3.2 Parameter Transformator

Rangkaian ekivalen pada transformator dapat diketahui atau dicari dengan cara mengetahui parameter-parameter pada transformator. Parameter-parameter tersebut dapat diketahui dengan cara melakukan pengujian hubung singkat (*short circuit test*) dan pengujian tanpa beban (*open circuit test*). Pengukuran hubung singkat dilakukan untuk mengetahui parameter yang terdapat pada belitan transformator dan pengujian tanpa beban dilakukan untuk mengetahui parameter yang terdapat pada inti transformator.

Pengujian hubung singkat pada transformator dilakukan untuk menentukan nilai dari R_{eq} dan X_{eq} . Pengujian hubung singkat dilakukan dengan menghubungkan sisi sekunder transformator dengan impedansi yang bernilai sangat kecil hingga nilainya mendekati nol, sehingga hanya impedansi $Z_{cq} = R_{cq} + jX_{cq}$ yang membatasi nilai arus. Ketika pengujian hubung singkat dilakukan, besarnya nilai tegangan yang diberikan harus dijaga pada nilai yang kecil sebab nilai R_{cq} dan X_{cq} relatif kecil sehingga arus yang timbul tidak melebihi nilai nominal dari rating transformator. Tegangan di sisi sekunder pada pengujian hubung singkat yang relatif kecil menyebabkan tegangan jatuh pada R_c dan / atau X_m sangat kecil juga, sehingga nilainya dapat diabaikan. Oleh karena itu, nilai tegangan yang diperoleh merupakan tegangan pada Z_{cq} . Diagram pengujian hubung singkat pada transformator dapat dilihat melalui gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram pengujian transformator hubung singkat

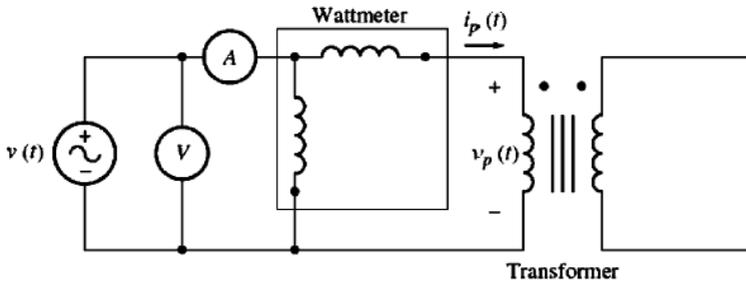
Berdasarkan diagram pengujian transformator hubung singkat di atas, diperoleh rumus sebagai berikut:

$$R_{eq} = \left| \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \right| \cos \theta \quad (2.17)$$

$$X_{eq} = \left| \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \right| \sin \theta \quad (2.18)$$

Dimana: R_{eq} = Resistansi ekuivalen (Ω)
 X_{eq} = Reaktansi ekuivalen (Ω)
 V_{sc} = Tegangan primer hubung singkat (V)
 I_{sc} = Arus primer hubung singkat (A)

Sedangkan pengujian kondisi tanpa beban digunakan untuk mendapatkan nilai dari parameter inti pada transformator, yaitu R_c dan X_m . Dalam keadaan tanpa beban, jika kumparan primer dihubungkan dengan tegangan V_p , maka hanya I_o yang mengalir dari pengukuran daya yang masuk (P_p). Karena nilai impedansi lilitan di kumparan primer jauh lebih kecil dibandingkan nilai impedansi inti, maka nilai impedansi lilitan pada pengujian ini dapat diabaikan. Diagram pengujian transformator tanpa beban dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram pengujian transformator tanpa beban

Berdasarkan diagram pengujian transformator tanpa beban di atas, diperoleh rumus sebagai berikut:

$$R_c = 1 / \left| \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \right| \cos \theta \quad (2.19)$$

$$X_m = 1 / \left| \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \right| \sin \theta \quad (2.20)$$

Dimana: R_c = Resistansi inti (Ω)

X_m = Reaktansi magnetisasi (Ω)

V_{oc} = Tegangan primer tanpa beban (V)

I_{oc} = Arus primer tanpa beban (A)

2.4 Arus *Inrush* Pada Transformator

Ketika sumber tegangan bolak-balik dihubungkan ke transformator untuk pertama kalinya, maka akan muncul aliran arus magnetisasi yang melewati belitan yang terhubung oleh sumber tegangan tersebut meskipun belitan yang berada di sisi lainnya tidak terhubung. Arus tersebut diartikan sebagai arus *inrush*. Arus *inrush* dibutuhkan untuk proses energisasi pada transformator untuk pertama kalinya sehingga menghasilkan fluks pada inti ferromagnetik. Arus tersebut adalah arus transien yang bernilai 10 sampai 20 kali lebih besar daripada nilai arus nominal transformator. Arus ini dibutuhkan hingga nilai maksimum fluks mencapai kondisi tunak (*steady-state*) dan inti menjadi jenuh (saturasi).

Arus *inrush* dibagi menjadi dua bagian, yaitu arus magnetisasi, yaitu arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti

transformator, dan arus rugi inti, yaitu arus yang diperlukan untuk rugi histerisis dan rugi arus eddy terjadi. Arus *inrush* timbul pada transformator ketika fluks sisa tidak memenuhi nilai sesaat fluks dalam kondisi *steady-state*, terutama pada titik-titik gelombang tegangan tertentu. Laju perubahan fluks sesaat pada transformator memiliki nilai yang sebanding dengan jatuh tegangan sesaat pada belitan yang terhubung sumber. Selama transformator dioperasikan secara terus-menerus, nilai fluks puncak berada pada level negative saat tegangan berada pada titik nol. Namun, selama energisasi, fluks tersebut harus bermula pada titik nol. Sehingga, untuk menaikkan tegangan nol, fluks magnet tersebut akan mencapai nilai puncak yang nilainya berkali-kali lipat dibandingkan dengan pada saat dalam kondisi normal. Akibat ketidaklinieran karakteristik kurva magnetisasi, pada kondisi saturasi, jumlah gaya gerak magnet yang tidak sebanding diperlukan untuk membangkitkan fluks magnet. Sehingga, arus belitan yang diperlukan untuk membuat gaya gerak magnet dapat menumbulkan fluks pada inti transformator akan meningkat dibandingkan pada saat kondisi normal. Fenomena hubungan arus *inrush* akibat adanya pengaruh fluks dapat dilihat pada gambar 2.6.

Nilai puncak arus *inrush* adalah sebuah fungsi yang terdiri atas tegangan suplai, kerapatan medan magnet sisa, dan kerapatan medan magnet saturasi, resistansi belitan primer dan induktansi transformator. Berdasarkan pada studi [10], nilai puncak arus *inrush* dapat diperoleh berdasarkan parameter-parameter transformator ketika dalam keadaan beroperasi. Sehingga, secara matematis, nilai arus *inrush* dapat diperoleh melalui persamaan:

$$i_{max} = \frac{\sqrt{2}V_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \cdot \left(\frac{2B_n + B_r + B_s}{B_n} \right) \quad (2.21)$$

Dimana:

V_m = tegangan terhubung maksimum (Volt)

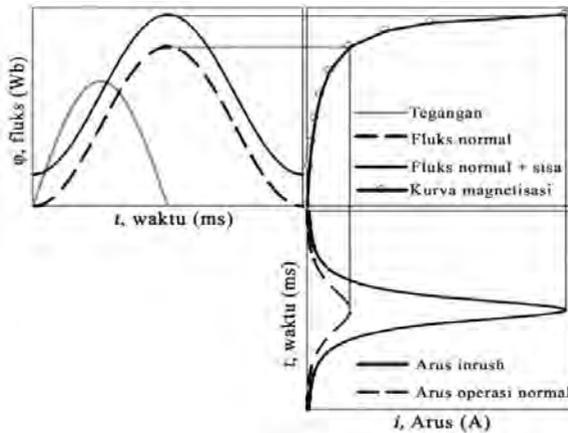
L = induktansi transformator (Henry)

R = resistansi total transformator (Ohm)

B_n = kerapatan medan magnet normal transformator (Wb/m²)

B_r = kerapatan medan magnet sisa transformator (Wb/m²)

B_s = kerapatan medan magnet jenuh transformator (Wb/m²)



Gambar 2.6 Fenomena hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks

Kerapatan medan magnet normal diperoleh pada saat transformator beroperasi dalam keadaan normal. Sedangkan kerapatan medan magnet sisa (B_r) dan kerapatan medan magnet jenuh (B_s) diperoleh dari permeabilitas inti transformator. Sehingga, pada jenis material yang berbeda, nilai arus *inrush* dapat dimungkinkan berbeda. Di samping itu, kedua parameter tersebut juga didasarkan pada kurva magnetisasi, terutama untuk memperoleh nilai B_r yang tampak pada saat intensitas medan magnet bernilai nol. Gambar 2.6 menunjukkan keberadaan fluks sisa maupun fluks sementara (*remanent flux*) dapat menambah nilai fluks normal. Pernyataan ini berdasarkan pada persamaan 2.21. Oleh sebab uraian persamaan 2.21 dan gambar 2.6, kurva magnetisasi dan keberadaan fluks pada transformator memiliki keterkaitan dengan nilai arus inrush.

2.5 Rugi Pada Transformator

Rugi-rugi pada transformator terbagi menjadi dua bagian, yaitu rugi histerisis dan rugi tembaga.

2.5.1 Rugi Histerisis

Histeresis merupakan fluks magnet yang tertinggal atau tersisa karena kenaikan atau penurunan nilai magnetisasi. Kurva histeresis dapat dipengaruhi dan menunjukkan karakteristik bahan magnetik suatu inti. Rugi histerisis muncul fenomena histeresis yang terjadi pada

material inti. Rugi histerisis akan meningkatkan nilai arus eksitasi. Dengan nilai arus yang meningkat, maka nilai rugi akan semakin besar. Besar rugi histerisis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_h = k_h \cdot f^2 \cdot B_{max}^n \quad (2.22)$$

Dimana: P_h = Rugi arus histerisis [w/kg]
 k_h = Konstanta material inti
 f = frekuensi [Hz]
 B_{max} = Nilai puncak medan magnet [T]
 n = Nilai eksponensial, tergantung material dan B_{max}

2.5.2 Rugi Tembaga

Rugi tembaga disebabkan oleh adanya nilai resistansi sebuah konduktor yang digunakan sebagai belitan. Nilai rugi tembaga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_{cu} = I_{cu}^2 \cdot R_{cu} \quad (2.23)$$

Dimana: P_{cu} = Rugi konduktor (Watt)
 I_{cu} = Arus pada kumparan (Ampere)
 R_{cu} = Resistansi kumparan (Ohm)

2.5.3 Rugi Arus Pusar (*Eddy Current*)

Arus pusar (*eddy current*) adalah arus yang terdapat pada inti yang disebabkan oleh tegangan yang terinduksi oleh fluks. Arus pusar yang mengalir pada inti transformator mempunyai nilai resistansi yang dapat menghasilkan panas. Panas yang terjadi secara terus menerus pada inti transformator dapat mengakibatkan kerusakan fisik pada material inti. Secara matematis nilai rugi arus pusar dapat diperoleh melalui persamaan:

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{max}^2 \quad (2.24)$$

Dimana: P_e = Rugi arus pusar [w/kg]
 k_e = Konstanta material inti
 f^2 = frekuensi
 t = ketebalan material [m]
 B_{max}^2 = Nilai puncak medan magnet [T]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

EKSPERIMEN PENGUKURAN ARUS *INRUSH* DAN PEMODELAN TRANSFORMATOR MENGUNAKAN SIMULINK-MATLAB

Pada bab ini, metodologi penelitian yang digunakan terdiri dari simulasi transformator satu fasa menggunakan perangkat lunak dan eksperimen pengukuran arus *insruh* pada transformator satu fasa. Simulasi transformator dilakukan dengan menggunakan Simulink pada *software* MATLAB dan eksperimen pengukuran arus *inrush* dilakukan dengan perlengkapan peralatan untuk memperoleh nilai dan bentuk gelombang arus inrush.

3.1 Pengujian Transformator Satu Fasa 1 kVA

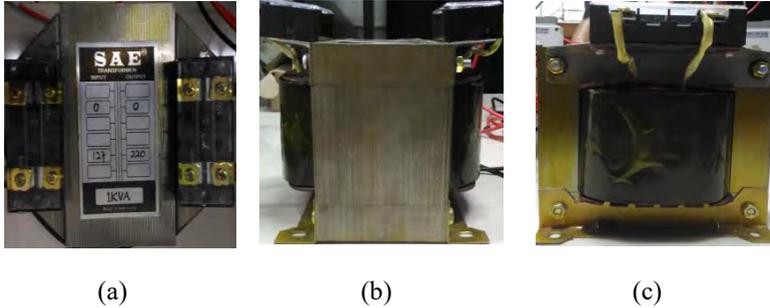
Dalam penelitian tugas akhir ini, transformator yang digunakan sebagai objek penelitian adalah transformator satu fasa dengan kapasitas daya 1 kVA. Pada penelitian tugas akhir ini, terdapat dua transformator dengan beda topologi pemotongan inti, yaitu transformator dengan cara potong A dan transformator dengan cara potong B.

Kedua transformator yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini memiliki beberapa parameter yang sama, yaitu jumlah belitan, besarnya arus, dimensi inti serta tegangan yang terukur pada masing-masing belitan. Spesifikasi transformator tersebut dapat dilihat pada table 3.1 di bawah ini.

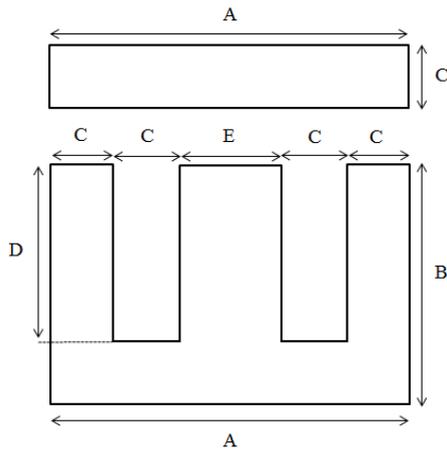
Tabel 3.1 Spesifikasi transformator

| Spesifikasi Transformator | |
|----------------------------------|-------------|
| Fasa | 1 Fasa |
| Kapasitas Daya | 1000 VA |
| Tegangan Primer | 220 V |
| Tegangan Sekunder | 127 V |
| Jumlah Belitan Primer | 255 Belitan |
| Jumlah Belitan Sekunder | 147 Belitan |
| Frekuensi | 50 Hz |

Penampakan transformator satu fasa dengan cara potong A ditunjukkan pada gambar 3.1. Spesifikasi dimensi dan bentuk potongan inti hasil pengukuran fisis dapat dilihat pada gambar 3.2 dan tabel 3.2.



Gambar 3.1 Transformator satu fasa dengan cara potong A; tampak atas (a), tampak samping (b), dan tampak depan (c)



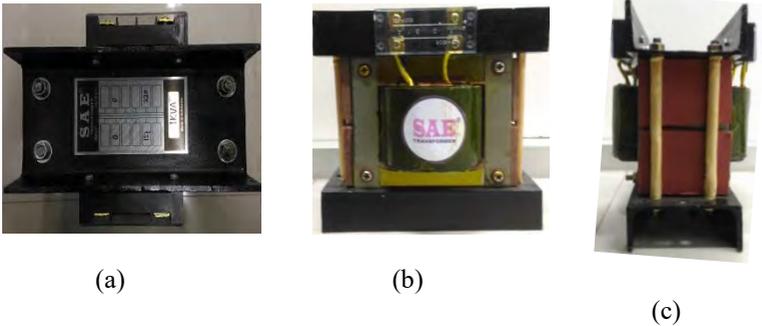
Gambar 3.2 Bentuk inti transformator satu fasa dengan cara potong A

Tabel 3.2 Ukuran inti transformator dengan cara potong A

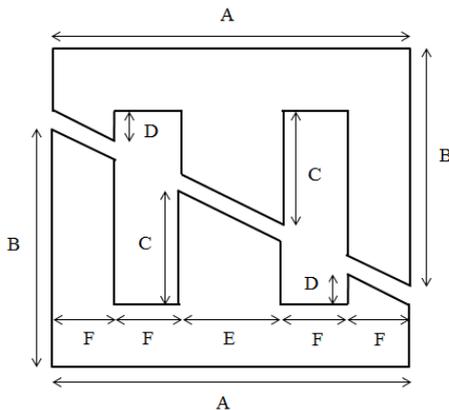
| Dimensi potongan inti | Ukuran |
|-----------------------|--------|
| A | 15 cm |
| B | 10 cm |
| C | 2,5 cm |

| Dimensi potongan inti | Ukuran |
|-----------------------|--------|
| D | 7,5 cm |
| E | 5 cm |
| Ketebalan | 8,5 cm |

Sedangkan untuk penampakan transformator satu fasa dengan cara potong B ditunjukkan pada gambar 3.3. Spesifikasi dimensi dan bentuk potongan inti hasil pengukuran fisis dapat dilihat pada gambar 3.4 dan tabel 3.3.



Gambar 3.3 Transformator satu fasa dengan cara potong B; tampak atas (a), tampak depan (b), dan tampak samping (c)



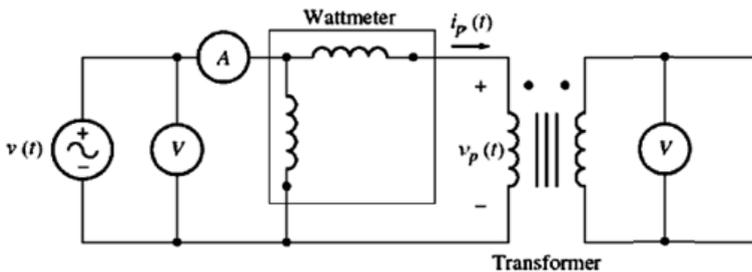
Gambar 3.4 Bentuk inti transformator satu fasa dengan cara potong B

Tabel 3.3 Ukuran inti transformator dengan cara potong B

| Dimensi potongan inti | Ukuran |
|-----------------------|--------|
| A | 15 cm |
| B | 10 cm |
| C | 5 cm |
| D | 1.2 cm |
| E | 5 cm |
| F | 2.5 cm |
| Ketebalan | 8.5 cm |

Untuk mengetahui parameter-parameter dari transformator, sehingga rangkaian eivalen pada transformator dapat diketahui, dilakukan pengujian tanpa beban (open circuit test) untuk mendapatkan nilai resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi (X_m), serta pengujian hubung singkat (short circuit test) untuk mendapatkan nilai resistansi ekivalen (R_{eq}) dan reaktansi ekivalen (X_{eq}).

3.1.1 Pengujian Tanpa Beban (*Open Circuit Test*)



Gambar 3.5 Rangkaian pengujian tanpa beban

Pengujian tanpa beban atau hubung terbuka merupakan salah satu pengujian pada transformator untuk menentukan nilai-nilai parameter yang terdapat pada inti transformator. Parameter-parameter yang dimaksud adalah nilai resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi (X_m). Dalam keadaan tidak berbeban, bila belitan primer dihubungkan dengan tegangan sumber (V_p), maka hanya arus pada belitan primer (I_p)

yang mengalir dari daya yang terukur (P_p). Karena nilai impedansi pada belitan primer jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai impedansi inti, maka nilai impedansi belitan pada pengujian ini dapat diabaikan. Diagram pengujian tanpa beban pada transformator dapat dilihat pada gambar 3.5.

Untuk melakukan pengujian tanpa beban pada transformator harus memenuhi langkah-langkah sebagai berikut:

1. Sumber tegangan bolak-balik dihubungkan ke sisi belitan primer transformator,
2. Voltmeter, amperemeter dan wattmeter harus terhubung pada sisi primer seperti pada gambar 3.5 untuk mendapatkan nilai tegangan, arus, dan daya primer,
3. Pada sisi sekunder juga harus dihubungkan dengan voltmeter untuk mendapatkan nilai tegangan sekunder,
4. Tegangan suplai yang terhubung dengan sisi primer dinaikkan hingga tegangan sekunder mencapai tegangan nominalnya,
5. Ketika tegangan sekunder telah mencapai nominalnya, maka pengujian hubung terbuka telah selesai dilakukan dan didapatkan nilai V_{oc} , I_{oc} , dan P_{oc} pada sisi primer transformator.

3.1.1.1 Hasil Pengujian Untuk Cara Potong A

Hasil yang didapatkan pada pengujian tanpa beban pada transformator ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3.4 Hasil pengujian tanpa beban untuk cara potong A

| Data pengujian | Nilai |
|-----------------------|--------------|
| Tegangan (V_{oc}) | 218 V |
| Arus (I_{oc}) | 0.15 A |
| Daya (P_{oc}) | 24.5 W |

Dari data pengujian pada tabel 3.4 dapat diketahui parameter inti transformator, yaitu resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi (X_m) melalui perhitungan berikut ini. Pertama adalah mencari nilai faktor daya sebagai berikut.

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{oc}} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{24.5 \text{ W}}{218 \text{ V} \cdot 0.15 \text{ A}} \\
 &= 0.75 \text{ lagging}
 \end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai faktor daya, kemudian dicari nilai dari admitansi sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Y_E &= \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\cos^{-1}(PF) & (3.2) \\
 &= \frac{0.15 \text{ A}}{218 \text{ V}} \angle -\cos^{-1}(0.75) \\
 &= 0.000688 \angle -41.4^\circ \text{ S} \\
 &= 0.00052 - j0.00046 \text{ S}
 \end{aligned}$$

Kemudian dari nilai admitansi diatas diperoleh nilai Rc dan Xm sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{1}{0.00052 \text{ S}} = 1900 \ \Omega \\
 X_m &= \frac{1}{0.00046 \text{ S}} = 2200 \ \Omega
 \end{aligned}$$

3.1.1.2 Hasil Pengujian Untuk Cara Potong B

Hasil yang didapatkan pada pengujian tanpa beban pada transformator ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3.5 Hasil pengujian tanpa beban untuk cara potong B

| Data pengujian | Nilai |
|-----------------------|--------------|
| Tegangan (Voc) | 218 V |
| Arus (Ioc) | 0.68 A |
| Daya (Poc) | 25 W |

Dari data pengujian pada tabel 3.5 dapat diketahui parameter inti transformator, yaitu resistansi inti (Rc) dan reaktansi magnetisasi (Xm)

melalui perhitungan berikut ini. Pertama adalah mencari nilai faktor daya sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 PF = \cos \theta &= \frac{P_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{oc}} & (3.3) \\
 &= \frac{25 \text{ W}}{218 \text{ V} \cdot 0,68 \text{ A}} \\
 &= 0.16 \text{ lagging}
 \end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai faktor daya, kemudian dicari nilai dari admitansi sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Y_E &= \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\cos^{-1}(PF) & (3.4) \\
 &= \frac{0.68 \text{ A}}{218 \text{ V}} \angle -\cos^{-1}(0.16) \\
 &= 0.000311926 \angle -80.79^\circ \text{ U} \\
 &= 0.00049924 - j0.003079 \text{ U}
 \end{aligned}$$

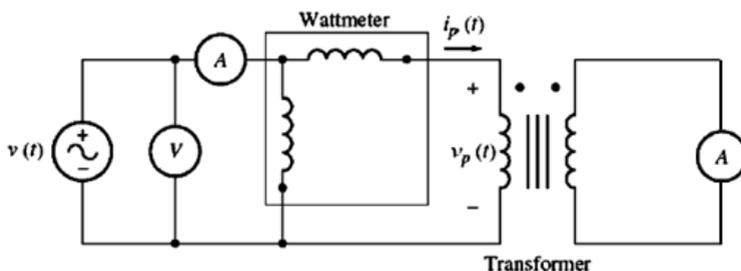
Kemudian dari nilai admitansi diatas diperoleh nilai Rc dan Xm sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{1}{0.00049924 \text{ U}} = 2003 \Omega \\
 X_m &= \frac{1}{0.003079 \text{ U}} = 324 \Omega
 \end{aligned}$$

3.1.2 Pengujian Hubung Singkat (*Short Circuit Test*)

Pengujian hubung singkat merupakan salah satu pengujian pada transformator untuk menentukan nilai-nilai parameter yang terdapat pada belitan transformator. Parameter-parameter yang dimaksud adalah nilai resistansi ekivalen (R_{eq}) dan reaktansi ekivalen belitan (X_{eq}). Pengujian hubung singkat pada transformator dilakukan dengan menghubungkan sisi sekunder transformator dengan impedansi yang nilainya sangat kecil hingga mendekati nol, sehingga hanya impedansi $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ yang membatasi arus. Ketika pengujian hubung singkat dilakukan, nilai tegangan yang diberikan pada sisi primer

transformator harus dijaga pada nilai yang kecil karena nilai dari R_{eq} dan X_{eq} yang relatif kecil, sehingga arus yang muncul tidak melebihi nilai nominal dari arus rating transformator. Tegangan di sisi sekunder pada pengukuran hubung singkat yang relatif kecil menyebabkan tegangan jatuh pada R_c dan X_m sangat kecil pula, sehingga nilainya dapat diabaikan. Oleh karena itu tegangan yang diperoleh merupakan tegangan pada Z_{eq} . Diagram pengukuran hubung singkat pada transformator dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut ini.



Gambar 3.6 Rangkaian pengujian hubung singkat

Untuk melakukan pengujian tanpa beban pada transformator harus memenuhi langkah-langkah sebagai berikut:

1. Sumber tegangan bolak-balik dihubungkan ke sisi belitan primer transformator,
2. Voltmeter, amperemeter dan wattmeter harus terhubung pada sisi primer seperti pada gambar 3.6 untuk mendapatkan nilai tegangan, arus, dan daya primer,
3. Pada sisi sekunder dihubungkan amperemeter secara seri untuk mengetahui arus sekunder yg muncul,
4. Tegangan suplai yang terhubung dengan sisi primer dinaikkan hingga arus sekunder mencapai arus nominalnya,
5. Ketika arus sekunder telah mencapai nominalnya, maka pengujian hubung singkat telah selesai dilakukan dan didapatkan nilai V_{sc} , I_{sc} , dan P_{sc} pada sisi primer transformator.

3.1.2.1 Hasil Pengujian Untuk Cara Potong A

Hasil yang didapatkan pada pengujian tanpa beban pada transformator satu fasa dengan cara potong A dapat dilihat pada tabel 3.6 sebagai berikut:

Tabel 3.6 Hasil pengujian hubung singkat untuk cara potong A

| Data pengujian | Nilai |
|-----------------------|-------|
| Tegangan (V_{sc}) | 10 V |
| Arus (I_{sc}) | 4.5 A |
| Daya (P_{sc}) | 44 W |

Dari data pengujian pada tabel 3.6 dapat diketahui parameter inti transformator, yaitu resistansi ekivalen belitan (R_{eq}) dan reaktansi ekivalen belitan (X_{eq}) melalui perhitungan berikut ini. Pertama adalah mencari nilai faktor daya sebagai berikut.

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{sc}}{V_{sc} \cdot I_{sc}} \quad (3.5)$$

$$= \frac{44 \text{ W}}{10 \text{ V} \cdot 4,5 \text{ A}}$$

$$= 0.98 \text{ lagging}$$

Setelah didapatkan nilai faktor daya, kemudian dicari nilai dari impedansi sebagai berikut.

$$Z_E = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle -\cos^{-1}(PF) \quad (3.6)$$

$$= \frac{10 \text{ V}}{4.5 \text{ A}} \angle -\cos^{-1}(0.98)$$

$$= 2.22 \angle 11.5^\circ \Omega$$

$$= 2,1754 - j0.4426 \Omega$$

Kemudian dari nilai impedansi yang telah melalui perhitungan diatas diperoleh nilai R_{eq} dan X_{eq} sebagai berikut.

$$R_{eq} = 2,17 \Omega$$

$$X_{eq} = 0,44 \Omega$$

3.1.2.2 Hasil Pengujian Untuk Cara Potong B

Hasil yang didapatkan pada pengujian tanpa beban pada transformator dengan cara potong B adalah sebagai berikut:

Tabel 3.7 Hasil pengujian hubung singkat untuk cara potong B

| Data pengujian | Nilai |
|-----------------------|--------|
| Tegangan (V_{sc}) | 10 V |
| Arus (I_{sc}) | 4.5 A |
| Daya (P_{sc}) | 34.5 W |

Dari data pengujian pada tabel 3.7 dapat diketahui parameter inti transformator, yaitu resistansi ekivalen belitan (R_{eq}) dan reaktansi ekivalen belitan (X_{eq}) melalui perhitungan berikut ini. Pertama adalah mencari nilai faktor daya sebagai berikut.

$$\begin{aligned} PF = \cos \theta &= \frac{P_{sc}}{V_{sc} \cdot I_{sc}} & (3.7) \\ &= \frac{34,5 \text{ W}}{10 \text{ V} \cdot 4,5 \text{ A}} \\ &= 0.766 \text{ lagging} \end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai faktor daya, kemudian dicari nilai dari impedansi sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Z_E &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle -\cos^{-1}(PF) & (3.8) \\ &= \frac{10 \text{ V}}{4.5 \text{ A}} \angle -\cos^{-1}(0.766) \\ &= 2.22 \angle 40,003^\circ \Omega \\ &= 1,7005 - j1,427077 \Omega \end{aligned}$$

Kemudian dari nilai impedansi diatas diperoleh nilai R_{eq} dan X_{eq} sebagai berikut.

$$R_{eq} = 1,7005 \Omega$$

$$X_{eq} = 1,427077 \Omega$$

3.2 Kurva Karakteristik Tanpa Beban

Kurva karakteristik tanpa beban menggambarkan hubungan antara arus magnetisasi dengan tegangan primer. Untuk mendapatkan kurva ini dilakukan pengujian tanpa beban pada transformator. Hasil pengujian tanpa beban untuk transformator dengan cara potong A dapat dilihat pada tabel 3.8 dan hasil pengujian untuk transformator dengan cara potong B dapat dilihat pada tabel 3.9.

Tabel 3.8 Hasil pengujian tanpa beban untuk transformator dengan cara potong A

| V _p (Volt) | I _p (Ampere) | V _p (Volt) | I _p (Ampere) |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0.025 | -10 | -0.025 |
| 20 | 0.037 | -20 | -0.037 |
| 30 | 0.045 | -30 | -0.045 |
| 40 | 0.052 | -40 | -0.052 |
| 50 | 0.056 | -50 | -0.056 |
| 60 | 0.06 | -60 | -0.06 |
| 70 | 0.064 | -70 | -0.064 |
| 80 | 0.068 | -80 | -0.068 |
| 90 | 0.071 | -90 | -0.071 |
| 100 | 0.074 | -100 | -0.074 |
| 110 | 0.078 | -110 | -0.078 |
| 120 | 0.08 | -120 | -0.08 |
| 130 | 0.084 | -130 | -0.084 |
| 140 | 0.087 | -140 | -0.087 |
| 150 | 0.091 | -150 | -0.091 |
| 160 | 0.095 | -160 | -0.095 |
| 170 | 0.1 | -170 | -0.1 |
| 180 | 0.11 | -180 | -0.11 |
| 190 | 0.115 | -190 | -0.115 |
| 200 | 0.121 | -200 | -0.121 |
| 210 | 0.135 | -210 | -0.135 |
| 220 | 0.15 | -220 | -0.15 |

| Vp (Volt) | Ip (Ampere) | Vp (Volt) | Ip (Ampere) |
|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 230 | 0.17 | -230 | -0.17 |
| 240 | 0.195 | -240 | -0.195 |
| 250 | 0.23 | -250 | -0.23 |
| 260 | 0.27 | -260 | -0.27 |
| 270 | 0.31 | -270 | -0.31 |
| 280 | 0.36 | -280 | -0.36 |
| 290 | 0.42 | -290 | -0.42 |
| 300 | 0.47 | -300 | -0.47 |
| 310 | 0.54 | -310 | -0.54 |
| 320 | 0.62 | -320 | -0.62 |
| 330 | 0.7 | -330 | -0.7 |
| 340 | 0.79 | -340 | -0.79 |
| 350 | 0.89 | -350 | -0.89 |
| 360 | 0.97 | -360 | -0.97 |
| 370 | 1.2 | -370 | -1.2 |
| 380 | 1.25 | -380 | -1.25 |

Tabel 3.9 Hasil pengujian tanpa beban untuk transformator dengan cara potong B

| Vp (Volt) | Ip (Ampere) | Vp (Volt) | Ip (Ampere) |
|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 | -0 |
| 10 | 0,05 | -10 | -0,05 |
| 20 | 0,085 | -20 | -0,085 |
| 30 | 0,115 | -30 | -0,115 |
| 40 | 0,14 | -40 | -0,14 |
| 50 | 0,165 | -50 | -0,165 |
| 60 | 0,194 | -60 | -0,194 |
| 70 | 0,22 | -70 | -0,22 |
| 80 | 0,245 | -80 | -0,245 |
| 90 | 0,27 | -90 | -0,27 |
| 100 | 0,30 | -100 | -0,30 |
| 110 | 0,33 | -110 | -0,33 |
| 120 | 0,35 | -120 | -0,35 |
| 130 | 0,385 | -130 | -0,385 |
| 140 | 0,41 | -140 | -0,41 |
| 150 | 0,45 | -150 | -0,45 |

| Vp (Volt) | Ip (Ampere) | Vp (Volt) | Ip (Ampere) |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 160 | 0,47 | -160 | -0,47 |
| 170 | 0,50 | -170 | -0,50 |
| 180 | 0,54 | -180 | -0,54 |
| 190 | 0,57 | -190 | -0,57 |
| 200 | 0,60 | -200 | -0,60 |
| 210 | 0,64 | -210 | -0,64 |
| 220 | 0,68 | -220 | -0,68 |
| 230 | 0,71 | -230 | -0,71 |
| 240 | 0,75 | -240 | -0,75 |
| 250 | 0,79 | -250 | -0,79 |
| 260 | 0,83 | -260 | -0,83 |
| 270 | 0,87 | -270 | -0,87 |
| 280 | 0,92 | -280 | -0,92 |
| 290 | 0,96 | -290 | -0,96 |
| 300 | 1,00 | -300 | -1,00 |
| 310 | 1,05 | -310 | -1,05 |
| 320 | 1,10 | -320 | -1,10 |
| 330 | 1,16 | -330 | -1,16 |
| 340 | 1,25 | -340 | -1,25 |
| 350 | 1,30 | -350 | -1,30 |
| 360 | 1,40 | -360 | -1,40 |
| 370 | 1,54 | -370 | -1,54 |
| 380 | 1,60 | -380 | -1,60 |

Hasil yang didapat dari pengujian tanpa beban pada transformator cara potong A dapat dilihat pada gambar 3.7.

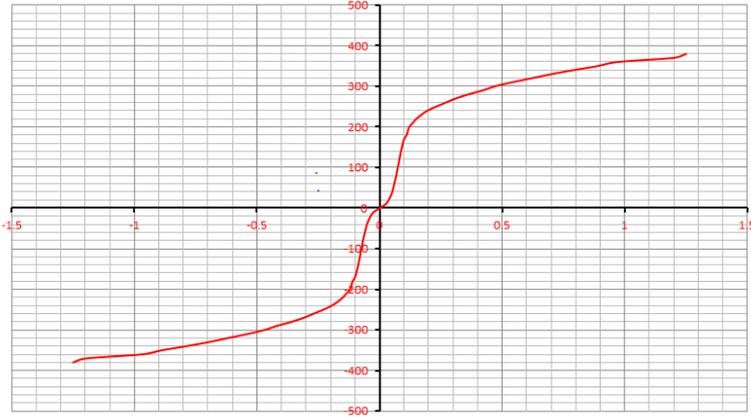
Pada pengujian tanpa beban ini, tegangan primer dinaikkan setiap 10 Volt dari 0 Volt hingga 380 Volt. Dari pengujian tersebut, kemudian didapatkan nilai arus primer (I_p). Setelah didapatkan nilai arus primer, kemudian diperoleh arus magnetisasi dan arus rugi inti melalui persamaan berikut ini.

$$PF = \frac{P_p}{V_p \cdot I_p} \quad (3.9)$$

$$\theta = \cos^{-1}(PF) \quad (3.10)$$

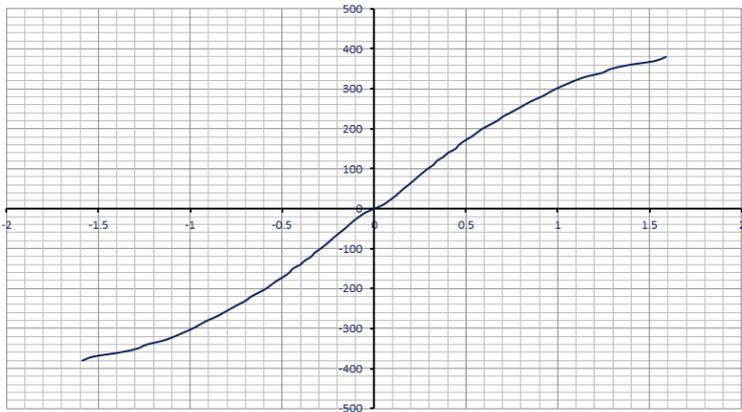
$$I_c = I_p \cos \theta \quad (3.11)$$

$$I_m = \sqrt{I_p^2 - I_c^2} \quad (3.12)$$



Gambar 3.7 Kurva karakteristik tanpa beban pada transformator dengan cara potong A

Sedangkan hasil yang didapat dari pengujian tanpa beban pada transformator cara potong A dapat dilihat pada gambar 3.8 sebagai berikut.



Gambar 3.8 Kurva karakteristik tanpa beban pada transformator dengan cara potong B

Dari persamaan 3.9, 3.10, 3.11 dan 3.12 didapatkan nilai arus magnetisasi (I_m) dan arus rugi inti (I_c) yang disajikan dalam tabel 3.10 sebagai berikut.

Tabel 3.10a Arus magnetisasi dan arus rugi inti pada transformator dengan cara potong A

| Vp (Volt) | Im (Ampere) | Ic (Ampere) |
|------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0.024269322 | 0.006 |
| 20 | 0.03482456 | 0.0125 |
| 30 | 0.040311289 | 0.02 |
| 40 | 0.044133321 | 0.0275 |
| 50 | 0.045956501 | 0.032 |
| 60 | 0.046157941 | 0.038333333 |
| 70 | 0.048781897 | 0.041428571 |
| 80 | 0.048659531 | 0.0475 |
| 90 | 0.050408333 | 0.05 |
| 100 | 0.050596443 | 0.054 |
| 110 | 0.052951248 | 0.057272727 |
| 120 | 0.052915026 | 0.06 |
| 130 | 0.054586341 | 0.063846154 |
| 140 | 0.056180467 | 0.066428571 |
| 150 | 0.058146367 | 0.07 |
| 160 | 0.059882698 | 0.07375 |
| 170 | 0.064437948 | 0.076470588 |
| 180 | 0.07608272 | 0.079444444 |
| 190 | 0.080521586 | 0.082105263 |
| 200 | 0.086362246 | 0.08475 |
| 210 | 0.101882786 | 0.088571429 |
| 220 | 0.117546369 | 0.093181818 |
| 230 | 0.13964037 | 0.096956522 |
| 240 | 0.165369956 | 0.103333333 |

| Vp (Volt) | Im (Ampere) | Ic (Ampere) |
|------------------|--------------------|--------------------|
| 250 | 0.203066492 | 0.108 |
| 260 | 0.244103237 | 0.115384615 |
| 270 | 0.284888976 | 0.122222222 |
| 280 | 0.334160347 | 0.133928571 |
| 290 | 0.394239737 | 0.144827586 |
| 300 | 0.44312025 | 0.156666667 |
| 310 | 0.51318059 | 0.168064516 |
| 320 | 0.593105901 | 0.180625 |
| 330 | 0.673635478 | 0.19030303 |
| 340 | 0.764341259 | 0.199705882 |
| 350 | 0.865284382 | 0.208285714 |
| 360 | 0.929375869 | 0.277777778 |
| 370 | 1.15832175 | 0.313513514 |
| 380 | 1.203020207 | 0.339473684 |

Tabel 3.10b Arus magnetisasi dan arus rugi inti pada transformator dengan cara potong B

| Vp (Volt) | Im (Ampere) | Ic (Ampere) |
|------------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0.04899 | 0.01 |
| 20 | 0.08139 | 0.0245 |
| 30 | 0.11111 | 0.02967 |
| 40 | 0.13555 | 0.035 |
| 50 | 0.16008 | 0.04 |
| 60 | 0.18745 | 0.05 |
| 70 | 0.21424 | 0.05 |
| 80 | 0.23846 | 0.05625 |
| 90 | 0.26399 | 0.05667 |
| 100 | 0.29172 | 0.07 |
| 110 | 0.32288 | 0.06818 |
| 120 | 0.34276 | 0.07083 |
| 130 | 0.3777 | 0.07462 |

| Vp (Volt) | Im (Ampere) | Ic (Ampere) |
|------------------|--------------------|--------------------|
| 140 | 0.4024 | 0.07857 |
| 150 | 0.44222 | 0.08333 |
| 160 | 0.46178 | 0.0875 |
| 170 | 0.49215 | 0.08824 |
| 180 | 0.52845 | 0.11111 |
| 190 | 0.55918 | 0.11053 |
| 200 | 0.58788 | 0.12 |
| 210 | 0.62883 | 0.11905 |
| 220 | 0.66965 | 0.11818 |
| 230 | 0.69871 | 0.12609 |
| 240 | 0.73951 | 0.125 |
| 250 | 0.77956 | 0.128 |
| 260 | 0.81901 | 0.13462 |
| 270 | 0.85854 | 0.14074 |
| 280 | 0.90884 | 0.14286 |
| 290 | 0.94848 | 0.14828 |
| 300 | 0.98869 | 0.15 |
| 310 | 1.03803 | 0.15806 |
| 320 | 1.08839 | 0.15938 |
| 330 | 1.1484 | 0.16364 |
| 340 | 1.2391 | 0.16471 |
| 350 | 1.28865 | 0.17143 |
| 360 | 1.38831 | 0.18056 |
| 370 | 1.52833 | 0.18919 |
| 380 | 1.58778 | 0.19737 |

3.3 Kurva Magnetisasi

Setelah didapatkan nilai tegangan primer (V_p) dan arus magnetisasi (I_m), kemudian dengan menggunakan persamaan matematis,

$$H = \frac{N_p \cdot I}{l} \quad (3.13)$$

Dimana:

H = Intensitas medan magnet (A/m)

Np = Belitan primer

I = Arus (A)

l = Panjang inti (m)

dan dengan menggunakan persamaan matematis,

$$B = \int \frac{Ns}{A} \cdot V(t) \quad (3.14)$$

Dimana:

B = Kerapatan medan magnet (Wb/m²)

Ns = Belitan sekunder

$V(t)$ = Tegangan fungsi waktu

H = Luas penampang inti (m²)

didapatkan kurva magnetisasi untuk transformator tersebut. Kurva magnetisasi merupakan kurva antara kerapatan medan magnet (B) dengan intensitas medan magnet (H). Untuk mendapatkan nilai dari kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet, dilakukan perhitungan manual menggunakan rumus pada persamaan 3.13 dan 3.14. Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 3.11a dan 3.11b.

Tabel 3.11a Kerapatan medan magnet (B) dengan intensitas medan magnet (H) transformator dengan cara potong A

| Vp (Volt) | B (Wb/m ²) | H (m ²) |
|-----------|------------------------|---------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 700000 | 40.71498 |
| 20 | 1400000 | 58.42278 |
| 30 | 2100000 | 67.62749 |
| 40 | 2800000 | 74.03945 |
| 50 | 3500000 | 77.09808 |
| 60 | 4200000 | 77.43602 |
| 70 | 4900000 | 81.83805 |

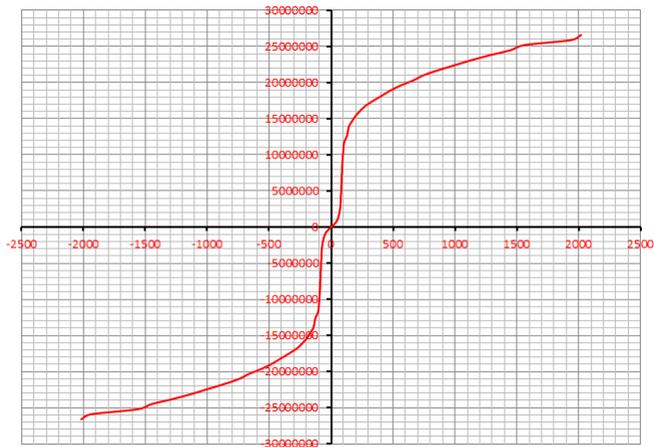
| Vp (Volt) | B (Wb/m²) | H (m²) |
|------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 80 | 5600000 | 81.63277 |
| 90 | 6300000 | 84.56661 |
| 100 | 7000000 | 84.88219 |
| 110 | 7700000 | 88.83269 |
| 120 | 8400000 | 88.77192 |
| 130 | 9100000 | 91.57577 |
| 140 | 9800000 | 94.25013 |
| 150 | 10500000 | 97.54818 |
| 160 | 11200000 | 100.4611 |
| 170 | 11900000 | 108.1031 |
| 180 | 12600000 | 127.6388 |
| 190 | 13300000 | 135.0856 |
| 200 | 14000000 | 144.884 |
| 210 | 14700000 | 170.9218 |
| 220 | 15400000 | 197.1995 |
| 230 | 16100000 | 234.2651 |
| 240 | 16800000 | 277.4299 |
| 250 | 17500000 | 340.6708 |
| 260 | 18200000 | 409.5153 |
| 270 | 18900000 | 477.9387 |
| 280 | 19600000 | 560.598 |
| 290 | 20300000 | 661.389 |
| 300 | 21000000 | 743.3925 |
| 310 | 21700000 | 860.928 |
| 320 | 22400000 | 995.0132 |
| 330 | 23100000 | 1130.112 |
| 340 | 23800000 | 1282.283 |
| 350 | 24500000 | 1451.628 |
| 360 | 25200000 | 1559.15 |
| 370 | 25900000 | 1943.237 |
| 380 | 26600000 | 2018.225 |

Tabel 3.11b Kerapatan medan magnet (B) dengan intensitas medan magnet (H) transformator dengan cara potong B

| Vp (Volt) | B (Wb/m²) | H (m²) |
|------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 10 | 700000 | 83.28265 |
| 20 | 1400000 | 138.3674 |
| 30 | 2100000 | 188.8828 |
| 40 | 2800000 | 230.4425 |
| 50 | 3500000 | 272.1328 |
| 60 | 4200000 | 318.6582 |
| 70 | 4900000 | 364.2128 |
| 80 | 5600000 | 405.374 |
| 90 | 6300000 | 448.7771 |
| 100 | 7000000 | 495.9224 |
| 110 | 7700000 | 548.8953 |
| 120 | 8400000 | 582.6876 |
| 130 | 9100000 | 642.0906 |
| 140 | 9800000 | 684.0816 |
| 150 | 10500000 | 751.7683 |
| 160 | 11200000 | 785.0315 |
| 170 | 11900000 | 836.66 |
| 180 | 12600000 | 898.3568 |
| 190 | 13300000 | 950.6085 |
| 200 | 14000000 | 999.3918 |
| 210 | 14700000 | 1069.012 |
| 220 | 15400000 | 1138.407 |
| 230 | 16100000 | 1187.815 |
| 240 | 16800000 | 1257.167 |
| 250 | 17500000 | 1325.254 |
| 260 | 18200000 | 1392.318 |
| 270 | 18900000 | 1459.519 |
| 280 | 19600000 | 1545.03 |
| 290 | 20300000 | 1612.416 |

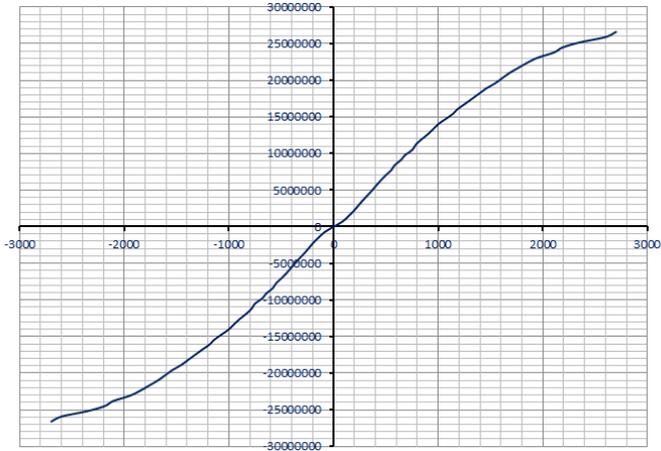
| Vp (Volt) | B (Wb/m ²) | H (m ²) |
|-----------|------------------------|---------------------|
| 300 | 21000000 | 1680.766 |
| 310 | 21700000 | 1764.659 |
| 320 | 22400000 | 1850.268 |
| 330 | 23100000 | 1952.28 |
| 340 | 23800000 | 2106.472 |
| 350 | 24500000 | 2190.701 |
| 360 | 25200000 | 2360.124 |
| 370 | 25900000 | 2598.169 |
| 380 | 26600000 | 2699.226 |

Dari hasil pada tabel 3.11a, didapatkan kurva magnetisasi transformator dengan cara potong A dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3.9 Kurva magnetisasi transformator dengan cara potong A

Dari hasil pada tabel 3.11b, didapatkan kurva magnetisasi transformator dengan cara potong B dapat dilihat pada gambar 3.10 berikut ini.



Gambar 3.10 Kurva magnetisasi transformator dengan cara potong B

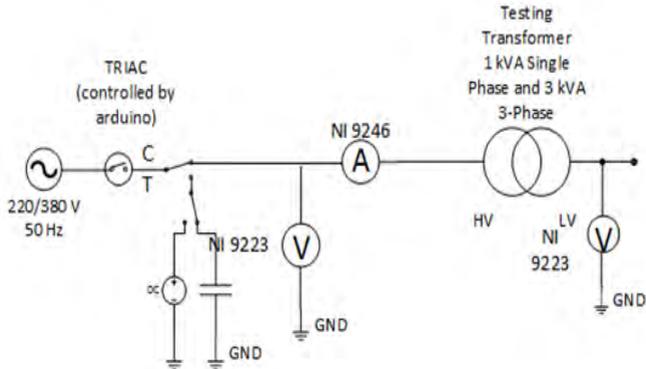
3.4 Eksperimen Pengukuran Arus *Inrush*

Eksperimen pengukuran arus *inrush* dalam penelitian tugas akhir ini menggunakan perlengkapan perangkat keras. Proses pengukuran arus *inrush* dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap pengukuran dan tahap demagnetisasi. Pada tahap pengukuran, akan diperoleh nilai dan bentuk dari arus *inrush* tersebut. Sedangkan tahap demagnetisasi dilakukan setelah setiap kali tahap pengukuran dilakukan. Tahap demagnetisasi dilakukan agar didapatkan hasil nilai arus *inrush* yang sesuai dengan kondisi awal transformator saat pertama kali dienergisasi. Tahap demagnetisasi pada penelitian tugas akhir menggunakan kapasitor. Pengukuran lanjut dilakukan setelah demagnetisasi selesai untuk mengetahui pengaruh demagnetisasi terhadap arus *inrush*.

3.4.1 Alat Yang Digunakan Untuk Pengukuran

Alat yang digunakan untuk pengukuran arus *inrush* menggunakan rangkaian seperti pada gambar 3.11. Berdasarkan rangkaian pada gambar 3.11, alat yang digunakan terdiri dari transformator 1 fasa 1 kVA, sumber AC 3 fasa, kapasitor demagnetisasi, komponen pensaklaran, alat pengambilan data, yakni DAQ 9246 dan DAQ 9223, dan sumber DC. Sedangkan perangkat lunak yang digunakan dalam

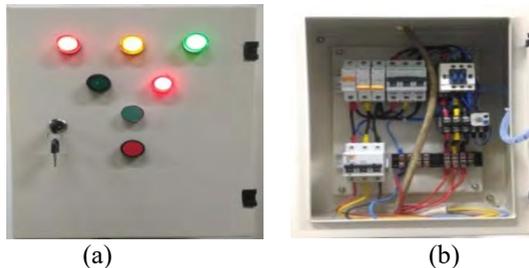
penelitian tugas akhir ini adalah perangkat lunak *LabVIEW* sebagai *human interface* pada proses akuisisi data.



Gambar 3.11 Rangkaian pengukuran arus *inrush* dan proses demagnetisasi

3.4.1.1 Sumber Satu Fasa

Sumber daya yang digunakan pada pengukuran ini adalah sumber daya AC tiga fasa 380 Volt (fasa-fasa) yang diambil satu fasa 220 Volt (fasa-netral), pada frekuensi 50 Hz. Sumber daya yang digunakan pada pengukuran ini memiliki kapasitas arus yang besar untuk dapat memperoleh nilai arus *inrush* yang tinggi. Spesifikasi sumber AC tiga fasa ditunjukkan dalam Tabel 3.12. Bentuk dari sumber yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Panel Sumber tiga fasa tampak depan (a), tampak dalam (b)

Tabel 3.12 Spesifikasi sumber daya satu fasa

| Spesifikasi | |
|----------------|--------------|
| V(L-N)/V(L-L) | 220/380 Volt |
| Kapasitas arus | 5 kA |

3.4.1.2 Kapasitor Demagnetisasi

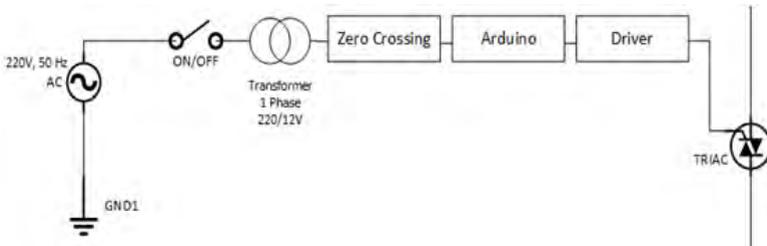
Pada modul peralatan ini dipasang *shunt capacitor* yang memiliki fungsi demagnetisasi fluks yang ada di dalam transformator uji. 1 buah kapasitor 39uF seperti pada Gambar 3.13 dipasang secara paralel terhadap sistem yang dikendalikan oleh saklar manual. Saklar dinyalakan ketika sistem tidak beroperasi, yaitu setelah proses pengukuran arus *inrush* pada transformator. Saklar dinyalakan dalam waktu tertentu untuk proses demagnetisasi transformator uji.



Gambar 3.13 Kapasitor demagnetisasi

3.4.1.3 Komponen Pensaklaran

Komponen pensaklaran digunakan untuk mendapatkan sudut tegangan agar tepat pada sudut 0° dan 90° . Tegangan dengan sudut 0° akan menghasilkan nilai arus *inrush* yang maksimal. Sedangkan untuk tegangan dengan sudut 90° tidak akan timbul arus *inrush*. Oleh karena itu, sudut tegangan tersebut digunakan untuk dibandingkan hasilnya. Rangkaian untuk pensaklaran dapat dilihat pada gambar 3.14.

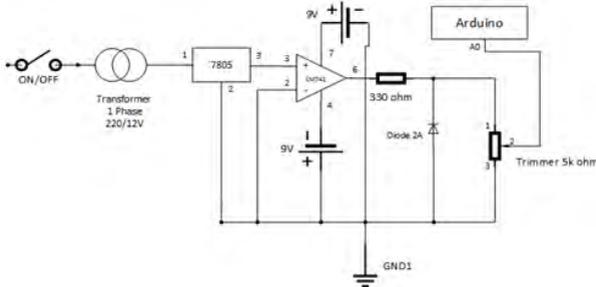


Gambar 3.14 Rangkain pensaklaran

Dari gambar 3.14 di atas, komponen pensaklaran terbagi menjadi 3 bagian, yaitu:

a. Rangkaian *zero crossing*

Rangkaian *zero crossing* berfungsi untuk mendeteksi titik persimpangan nol dari tegangan masukan sistem. Rangkaian *zero crossing* ini terdiri dari sebuah saklar, transformator 220/12 V, IC voltage regulator 7805, LM741, baterai 9 Vdc, resistor, dioda 2A, dan resistor trimmer 5 k Ω .



Gambar 3.15 Rangkaian *zero crossing*

b. Arduino-Uno

Dalam modul peralatan ini, arduino uno melakukan peran *delay time*. Arduino uno diprogram untuk melakukan fungsi *latch* setelah *delay time* tertentu. Dengan kata lain, arduino uno digunakan untuk mengatur sudut penyalan input dari sistem ke transformator uji.

c. Rangkaian *driver* dan TRIAC

Rangkaian *driver* berfungsi sebagai *trigger* TRIAC setelah mendapat umpan dari arduino. Rangkaian ini terdiri dari resistor dan transistor BJT 2N2219 yang berfungsi sebagai rangkaian *switching*,

Optocoupler MOC3021 yang bertugas men-*trigger gate* TRIAC setelah mendapat umpan dari rangkaian switching, serta rangkaian *snubber* yang berfungsi untuk melindungi *optocoupler* dari interferensi perubahan polaritas sinyal. Setelah mendapatkan masukan pada *gate* dari *optocoupler*, TRIAC dalam kondisi *forward* sehingga tegangan sumber AC dapat mengalir ke transformator uji.

3.4.1.4 Perangkat Keras Akuisisi Data dan Perangkat Lunak *LabVIEW*

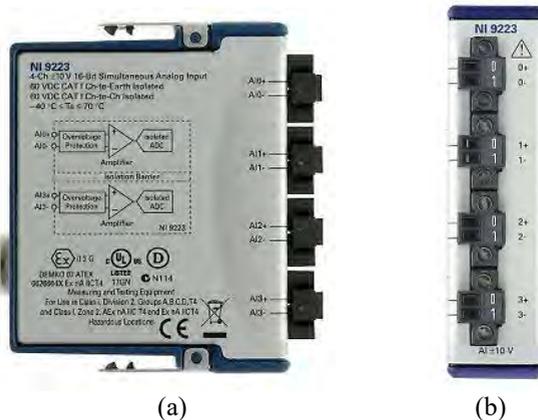
Perangkat keras untuk akuisisi data yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah DAQ 9223 dan DAQ 9246 dari *National Instrument*. DAQ 9246 berfungsi untuk merekam arus yang terbangkitkan pada saat sistem menyala. Sebelum masuk ke dalam DAQ, dipasang transformator arus (*Current Transformer*) dengan rasio 250/5 sebagai proteksi untuk DAQ 9246. Rekaman yang diakuisisi oleh DAQ 9246 akan dikirim ke *personal computer* dengan perangkat lunak *LabVIEW* sebagai *human interface*-nya. Setelah proses akuisisi data selesai, dilakukan pengolahan data menggunakan perangkat lunak *DIAdem* yang merupakan sebuah fitur pengolahan data dari perangkat lunak *LabVIEW*. Bentuk dari DAQ 9246 dapat dilihat pada gambar 3.16.



Gambar 3.16 DAQ 9246
(sumber: zone.ni.com)

Sedangkan DAQ 9223 berfungsi untuk merekam tegangan sumber. *Probe* DAQ 9223 dipasang secara paralel terhadap tegangan input sistem, sehingga dapat diamati kondisi penyalaan pada tegangan sumber. Seperti DAQ 9246, rekaman dikirim ke *personal computer* dengan perangkat lunak *LabVIEW* sebagai *human interface*-nya dan

diolah menggunakan perangkat lunak *DIAdem*. Bentuk dari DAQ 9233 dapat dilihat pada gambar 3.17.



(a) (b)
Gambar 3.17 DAQ 9223, tampak bawah (a), dan tampak depan (b)
 (sumber: *sine.ni.com*)

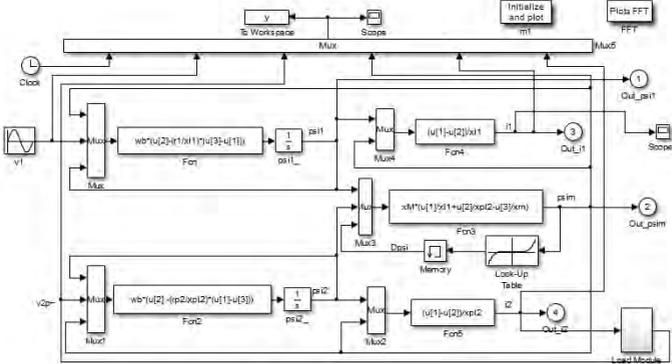
3.5 Pemodelan transformator satu fasa menggunakan *SIMULINK-MATLAB*

Untuk pemodelan transformator satu fasa, dibutuhkan parameter-parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.13 berikut.

Tabel 3.13 Parameter yang dibutuhkan

| Parameter | Keterangan |
|-----------|-----------------------------------|
| Vrated | Tegangan rating rms |
| Srated | Daya aktif rating |
| Frated | Frekuensi rating (Hz) |
| Zb | Impedansi <i>base</i> sisi primer |
| wb | Frekuensi <i>base</i> |
| Vpk | Tegangan rating puncak |
| NpbyNs | Rasio belitan |
| r1 | Resistansi belitan primer |
| rp2 | Resistansi belitan sekunder |
| x11 | Reaktansi bocor belitan primer |
| x12 | Reaktansi bocor belitan sekunder |
| xm | Reaktansi magnetisasi |

Dari parameter pada tabel 3.13, kemudian dimasukkan ke dalam *script* MATLAB dan kemudian disimulasikan. Setelah itu, kemudian disimulasikan dalam diagram SIMULINK. Diagram SIMULINK yang digunakan adalah sebagai berikut ditunjukkan pada gambar 3.18.



Gambar 3.18 Diagram SIMULINK untuk pemodelan transformator satu fasa

Dari gambar 3.18 dapat menjadi tiga bagian, yaitu bagian sisi primer transformator, bagian sisi sekunder transformator dan inti transformator.

Dalam kasus ini, akan diambil fluks *linkage* total dari dua belitan sebagai variabel kondisi. Untuk keadaan dari variable kondisi tersebut, persamaan tegangan dapat ditulis sebagai berikut:

$$v_1 = i_1 r_1 \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_1}{dt} \quad (3.15)$$

$$v_2' = i_2' r_2' \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_2'}{dt} \quad (3.16)$$

Dimana $\psi_1 = \omega_b \lambda_1$, $\psi_2 = \omega_b \lambda_2$ dan ω_b merupakan frekuensi *base* yang mana merupakan reaktansi terhitung. Fluks *linkage* per detik dari belitan dapat ditulis menjadi persamaan,

$$\psi_1 = \omega_b \lambda_1 = x_{l1} i_1 + \psi_m \quad (3.17)$$

$$\psi_2' = \omega_b \lambda_2' = x_{l2}' i_2' + \psi_m \quad (3.18)$$

$$\psi_m = \omega_b L_{m1} (i_1 + i_2') = x_{m1} (i_1 + i_2') \quad (3.19)$$

Untuk mencari arus i_1 dan arus i_2' dapat digunakan persamaan 3.17 dan 3.18, sehingga menjadi,

$$i_1 = \frac{\psi_1 - \psi_m}{x_{l1}} \quad (3.20)$$

$$i_2' = \frac{\psi_2' - \psi_m}{x_{l2}'} \quad (3.21)$$

Kemudian, persamaan 3.20 dan persamaan 3.21 disubstitusikan ke dalam persamaan 3.19. Sehingga akan didapatkan persamaan matematis,

$$\frac{\psi_m}{x_{m1}} = \frac{\psi_1 - \psi_m}{x_{l1}} + \frac{\psi_2' - \psi_m}{x_{l2}'} \quad (3.22)$$

$$\psi_m = x_M \left(\frac{\psi_1}{x_{l1}} + \frac{\psi_2'}{x_{l2}'} \right) \quad (3.23)$$

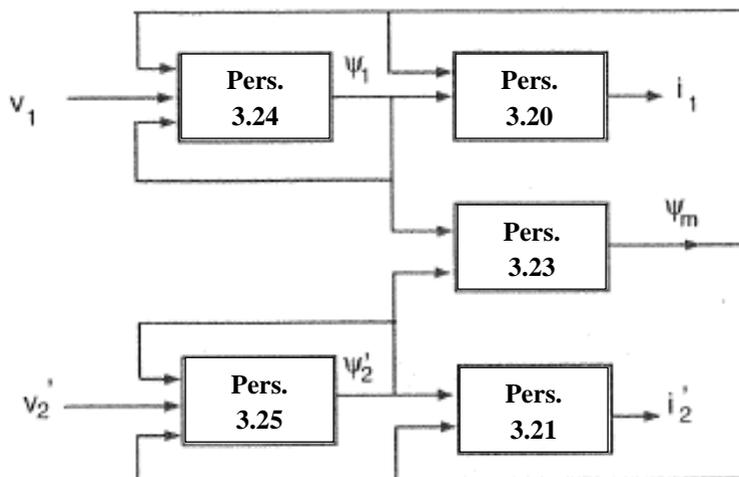
Dengan menggunakan persamaan 3.20 dan 3.21 untuk menggantikan arus, persamaan 3.15 dan persamaan 3.16 dapat dijabarkan menjadi persamaan integral dari dua fluks *linkage* total, yaitu,

$$\psi_1 = \int \left\{ \omega_b v_1 - \omega_b r_1 \left(\frac{\psi_1 - \psi_m}{x_{l1}} \right) \right\} dt \quad (3.24)$$

$$\psi_2' = \int \left\{ \omega_b v_2' - \omega_b r_2' \left(\frac{\psi_2' - \psi_m}{x_{l2}'} \right) \right\} dt \quad (3.25)$$

Persamaan 3.20, 3.21, 3.23, 3.24, dan 3.25 merupakan persamaan model dinamika dasar dari transformator satu fasa dimana ketidaklinieran magnetisasi dan rugi inti dapat ditambahkan jika dibutuhkan. Pada model ini, fluks *linkage* merupakan variabel internal, tegangan terminal merupakan tegangan masukan yang diperlukan, dan

arus belitan merupakan keluaran utama. Sehingga, dari persamaan-persamaan di atas dapat diimplementasikan seperti pada gambar 3.19.



Gambar 3.19 Diagram variabel pada simulasi transformator satu fasa.

BAB 4

ANALISIS HASIL EKSPERIMEN DAN SIMULASI

4.1 Eksperimen Arus *Inrush*

Untuk pengujian arus *inrush* pada transformator satu fasa, digunakan modul pengujian seperti pada gambar 3.11.

4.1.1 Pengujian Alat

Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh besaran arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan 2 sudut penyalan yang berbeda, yaitu sudut penyalan 0° dan 90° . Sudut penyalan yang berbeda dimaksudkan untuk perbandingan magnitudo arus *inrush*. Secara teoritis, arus *inrush* akan mencapai nilai maksimumnya pada saat sudut penyalan 0° dan akan mencapai nilai minimum pada saat 90° .

Untuk memastikan bahwa modul arus *inrush* dapat bekerja seperti yang diharapkan, modul harus terlebih dahulu dilakukan kalibrasi. Kalibrasi pada modul menggunakan osiloskop *BK Precision 2542* dengan pengaturan pada *probe* dan osiloskop dapat dilihat pada table 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 *Setting probe* osiloskop

| CH | <i>Probe set</i> | Osiloskop | <i>Real Value</i> |
|-----|------------------|-----------|--|
| CH1 | 10 × | 5V/div | $5 \times 10 = 50V/div$ |
| CH2 | 10mV/A | 200mV/div | $\left(\frac{200mV}{10mV}\right) \times A = 20A/div$ |

Langkah awal kalibrasi adalah memperkirakan waktu tunda (*delay time*) total yang diperlukan komponen pensaklaran untuk bekerja. Dari percobaan kalibrasi didapatkan nilai *delay time* dari output SSR hingga rangkaian *zero crossing* sebesar ± 500 us.

Langkah berikutnya adalah memprediksi waktu tunda (*delay time*) dari output rangkaian *zero crossing* hingga output arduino. Dari percobaan kalibrasi didapatkan nilai *delay time* dari output rangkaian *zero crossing* hingga arduino sebesar ± 100 us.

Dan langkah selanjutnya adalah memperkirakan *delay time* dari keluaran arduino hingga keluaran TRIAC. Sehingga didapatkan *delay time* sebesar ± 900 us. Sehingga untuk dapat memberikan *trigger* yang tepat pada TRIAC, arduino diprogram untuk memberikan *delay time*

sebesar $20\text{ ms} - 900\text{ us} = 19,1\text{ ms}$. Dengan kata lain, modul arus *inrush* bekerja setelah 1 *cycle* untuk proses sinkronisasi. Untuk memahami lebih lanjut tentang proses sinkronisasi.

4.1.2 Proses Akuisisi Data

Akuisisi data pada penelitian tugas akhir ini menggunakan osiloskop untuk mengambil gambar sinyal dari arus *inrush*. Pada proses akuisisi data dari transformator satu fasa. Proses akuisisi data dibagi ke dalam 2 kondisi untuk setiap transformator uji, yakni pengujian sudut penyalan 0° dan pengujian sudut penyalan 90° . Perilaku yang diberikan untuk transformator satu fasa dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Pada kondisi tidak beroperasi, sebelum dan sesudah energisasi, transformator uji di lakukan proses demagnetisasi selama 5 menit.
- Pada kondisi beroperasi, modul peeralatn pengujian dibiarkan tetap menyala selama 3 menit.

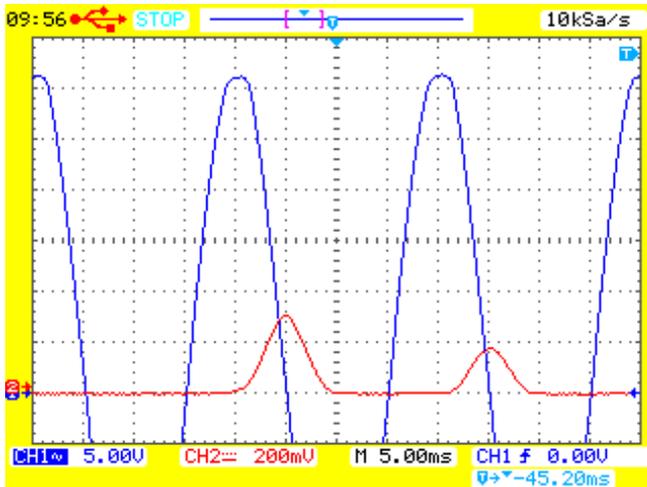
4.1.3 Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa Dengan Cara Potong A

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan data tegangan jala-jala input (V_{in}) dan arus yang masuk pada transformator satu fasa dengan cara potong A (I_{load}). Hasil eksperimen dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu dengan sudut penyalan 0° dan sudut penyalan 90° .

4.1.3.1 Arus *Inrush* Pada Sudut Penyalan 0°

Sebelum dimulai pengujian pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 0° , *Arduino-Uno* diprogram sehingga mendapatkan pensaklaran yang tepat pada kondisi *zero crossing*. Setelah itu, transformator dihubungkan dengan modul pengujian arus *inrush*. Setelah semua terpasang dengan baik, tombol panel daya diaktifkan.

Pada eksperimen pertama, didapatkan arus *inrush* sebesar 31 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div . Sedangkan arus tanpa beban nya adalah $0,28\text{ A}$ dan arus nominalnya adalah $4,54\text{ A}$. Hasil eksperimen pertama dapat dilihat pada gambar 4.1.



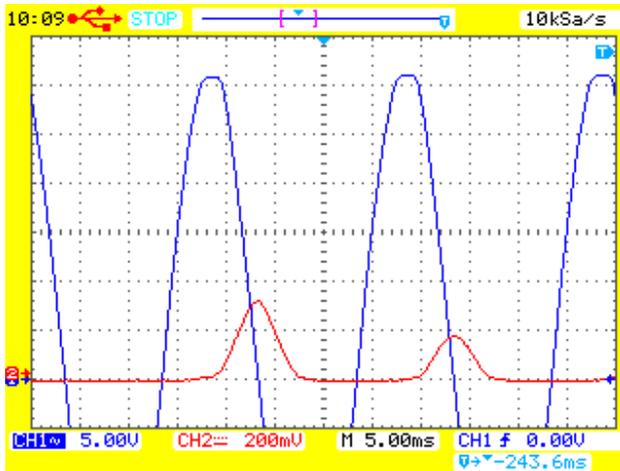
Gambar 4.1 Arus *inrush* sebesar 31 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 0°

Setelah dilakukan eksperimen pertama, transformator dilakukan proses demagnetisasi untuk menghilangkan fluks sisa pada inti transformator. Setelah dilakukan proses demagnetisasi, kemudian dilakukan eksperimen yang kedua.

Pada eksperimen kedua, didapatkan arus *inrush* sebesar 32 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa bebannya adalah 0,28 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,54 A. Hasil eksperimen kedua dapat dilihat pada gambar 4.2.

Setelah dilakukan eksperimen kedua, transformator kembali dilakukan proses demagnetisasi untuk menghilangkan fluks sisa pada inti transformator. Setelah dilakukan proses demagnetisasi, kemudian dilakukan eksperimen yang ketiga.

Pada eksperimen ketiga, didapatkan arus *inrush* sebesar 29 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa bebannya adalah 0,28 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,54 A. Hasil eksperimen ketiga dapat dilihat pada gambar 4.3.



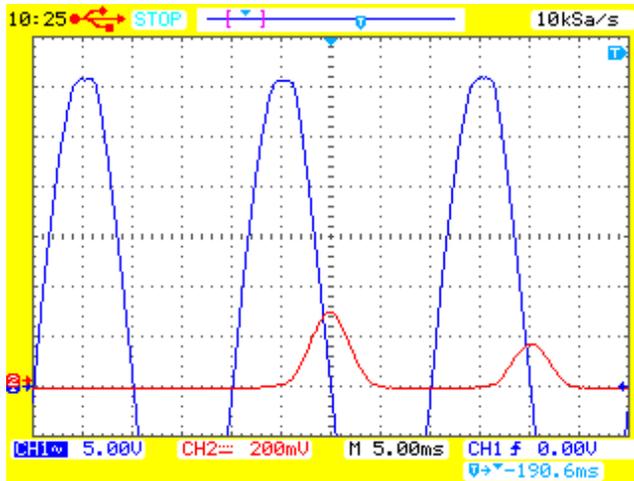
Gambar 4.2 Arus *inrush* sebesar 32 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 0°

Setelah dilakukan eksperimen ketiga, transformator kembali dilakukan proses demagnetisasi untuk menghilangkan fluks sisa pada inti transformator. Setelah dilakukan proses demagnetisasi, kemudian dilakukan eksperimen yang keempat.

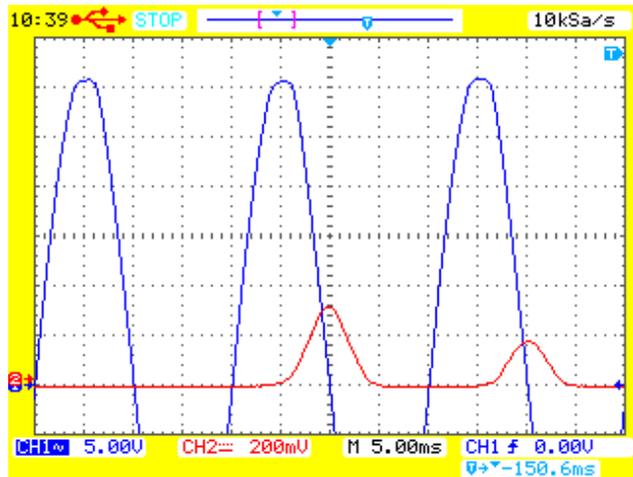
Pada eksperimen keempat, didapatkan arus *inrush* sebesar 31.5 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa beban nya adalah 0,28 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,54 A. Hasil eksperimen keempat dapat dilihat pada gambar 4.4.

Setelah dilakukan eksperimen keempat, transformator kembali dilakukan proses demagnetisasi untuk menghilangkan fluks sisa pada inti transformator. Setelah dilakukan proses demagnetisasi, kemudian dilakukan eksperimen yang kelima.

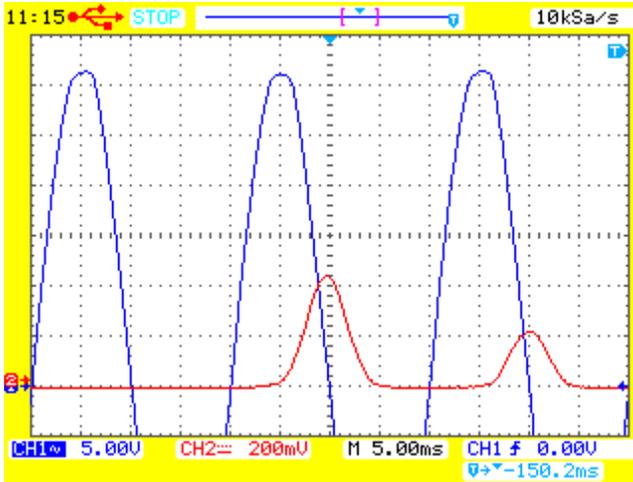
Pada eksperimen kelima, didapatkan arus *inrush* sebesar 44 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa beban nya adalah 0,28 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,54 A. Hasil eksperimen kelima dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.3 Arus *inrush* sebesar 29 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 0°



Gambar 4.4 Arus *inrush* sebesar 31.5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 0°



Gambar 4.5 Arus *inrush* sebesar 44 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 0°

4.1.3.2 Arus *Inrush* Pada Sudut Penyalan 90°

Sebelum dimulai pengujian pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90° , *Arduino-Uno* diprogram sehingga mendapatkan pensaklaran yang tepat pada kondisi penyalan 90° . Setelah itu, transformator dihubungkan dengan modul pengujian arus *inrush*. Setelah semua terpasang dengan baik, tombol panel daya diaktifkan.

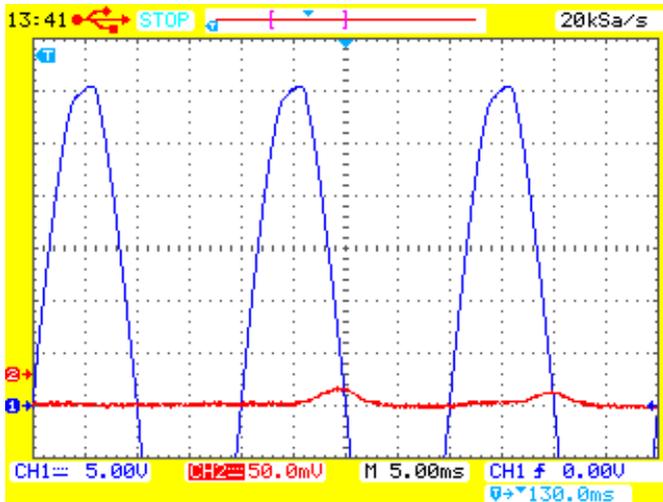
Proses pengujian arus *inrush* dengan sudut penyalan 90° sama dengan pengujian arus *inrush* dengan kondisi *zero crossing*. Setelah dilakukan pengujian, transformator dihubungkan dengan kapasitor untuk dilakukan proses demagnetisasi agar fluks sisa yang terdapat pada inti transformator hilang.

Pada eksperimen pertama didapatkan arus *inrush* sebesar 1,5 A. kemudian eksperimen kedua didapatkan arus *inrush* sebesar 2,3 A. pada eksperimen ketiga didapatkan arus *inrush* sebesar 3,5 A. Pada percobaan keempat didapatkan arus *inrush* sebesar 5,0 A. Dan pada eksperimen kelima didapatkan arus *inrush* sebesar 2,9 A. Untuk kelima eksperimen tersebut didapatkan arus tanpa beban sebesar 0,28 A dan arus nominal sebesar 4,54 A. Untuk hasil kelima eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10. Dari hasil tersebut jika

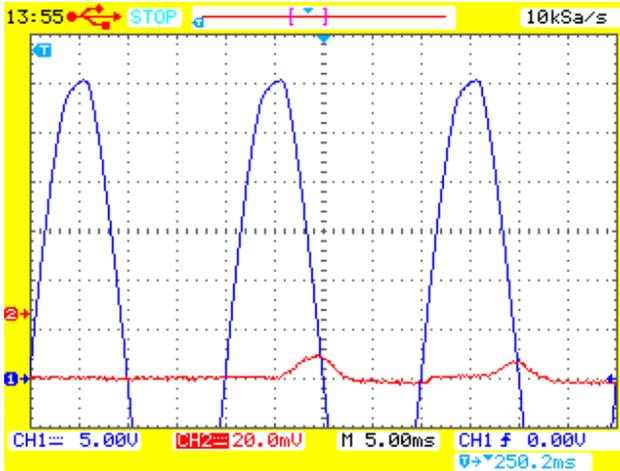
dipersembahkan dalam bentuk tabel akan menjadi seperti pada tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4.2 Hasil eksperimen arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 90°

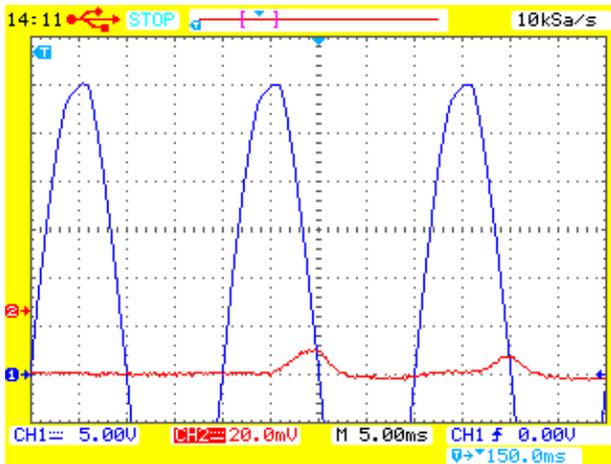
| Pengujian ke- | <i>Inrush Peak</i> | Arus No Load (I_{nl}) | Arus Nominal (I_n) |
|---------------|--------------------|---------------------------|------------------------|
| 1 | 1,5 A | 0,28 A | 4,54 A |
| 2 | 2,3 A | 0,28 A | 4,54 A |
| 3 | 3,5 A | 0,28 A | 4,54 A |
| 4 | 5 A | 0,28 A | 4,54 A |
| 5 | 2,9 A | 0,28 A | 4,54 A |



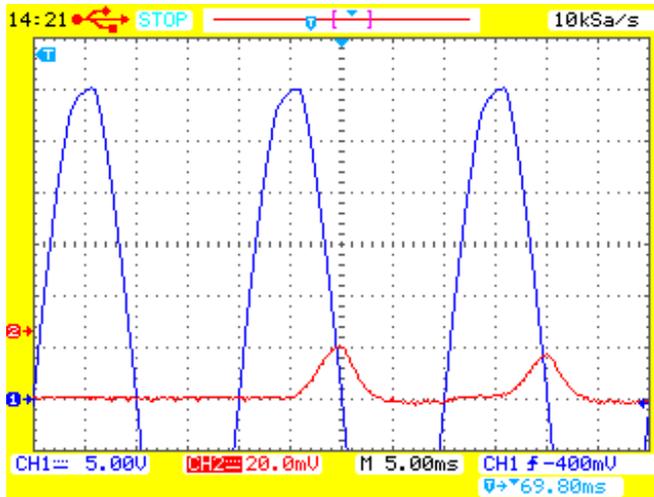
Gambar 4.6 Arus *inrush* sebesar 1,5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalaan 90°



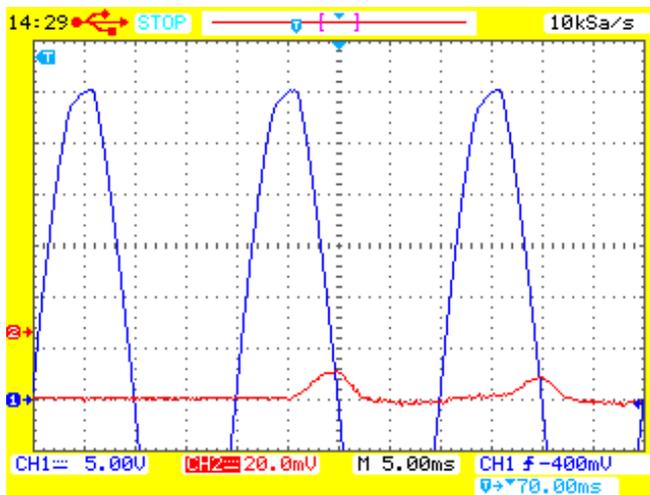
Gambar 4.7 Arus *inrush* sebesar 2,3 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90°



Gambar 4.8 Arus *inrush* sebesar 3,5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90°



Gambar 4.9 Arus *inrush* sebesar 5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90°



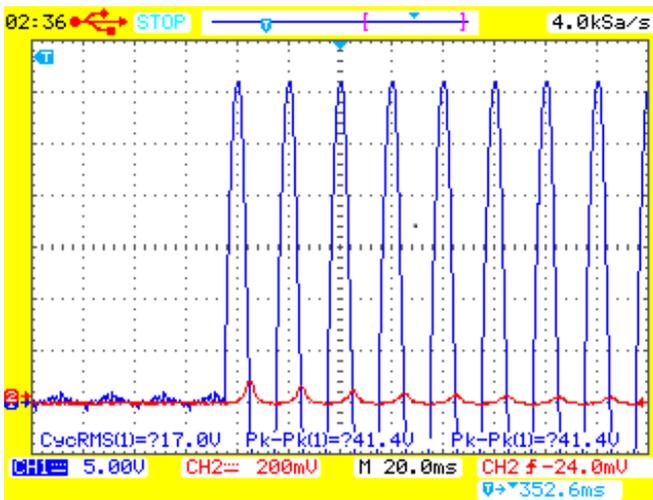
Gambar 4.10 Arus *inrush* sebesar 2,9 A pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90°

4.1.4 Hasil Pengujian Transformator Satu Fasa Dengan Cara Potong B

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan data tegangan jala-jala input (V_{in}) dan arus yang masuk pada transformator satu fasa dengan cara potong B (I_{load}). Hasil eksperimen dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu dengan sudut penyalaan 0° dan sudut penyalaan 90° .

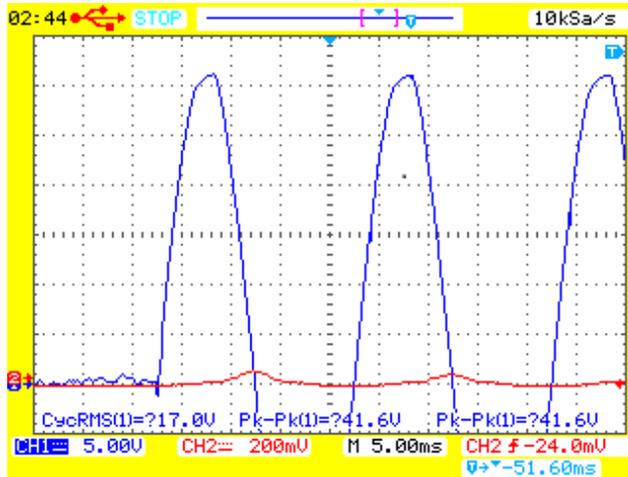
4.1.4.1 Arus *Inrush* Pada Sudut Penyalaan 0°

Pada eksperimen pertama, didapatkan arus *inrush* sebesar 31 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa beban nya adalah 0,68 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,5 A. Hasil eksperimen pertama dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Arus *inrush* sebesar 8 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaan 0°

Pada eksperimen kedua, didapatkan arus *inrush* sebesar 7 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa beban nya adalah 0,68 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,5 A. Hasil eksperimen kedua dapat dilihat pada gambar 4.12.

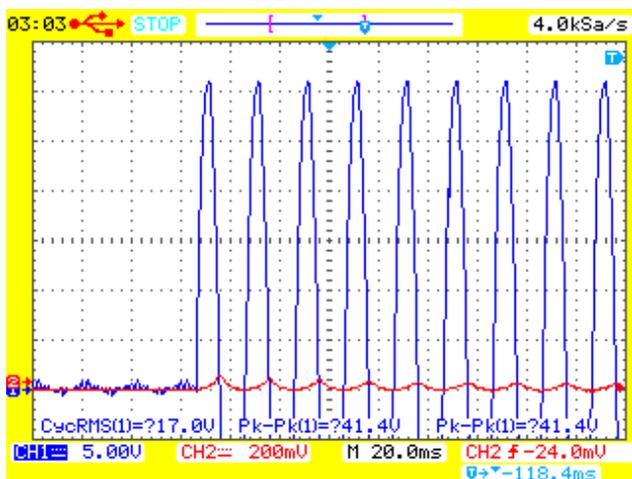


Gambar 4.12 Arus *inrush* sebesar 7 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 0°

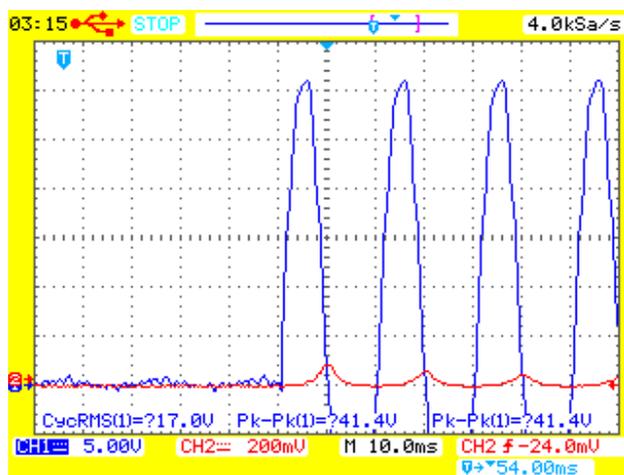
Pada eksperimen ketiga, didapatkan arus *inrush* sebesar 7,5 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa beban nya adalah 0,68 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,5 A. Hasil eksperimen ketiga dapat dilihat pada gambar 4.13.

Pada eksperimen keempat, didapatkan arus *inrush* sebesar 8 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa beban nya adalah 0,68 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,5 A. Hasil eksperimen keempat dapat dilihat pada gambar 4.14.

Pada eksperimen kelima, didapatkan arus *inrush* sebesar 8 Ampere. Hasil ini didapatkan mengacu pada *setting probe* tabel 4.1 dimana setiap kotak dari osiloskop bernilai 20 A/div. Sedangkan arus tanpa beban nya adalah 0,68 A sedangkan arus nominalnya adalah 4,5 A. Hasil eksperimen kelima dapat dilihat pada gambar 4.15.



Gambar 4.13 Arus *inrush* sebesar 7,5 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 0°



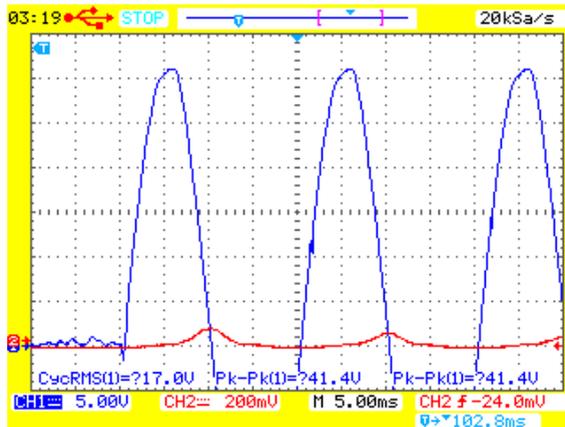
Gambar 4.14 Arus *inrush* sebesar 8 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 0°

4.1.4.2 Arus *Inrush* Pada Sudut Penyalaan 90°

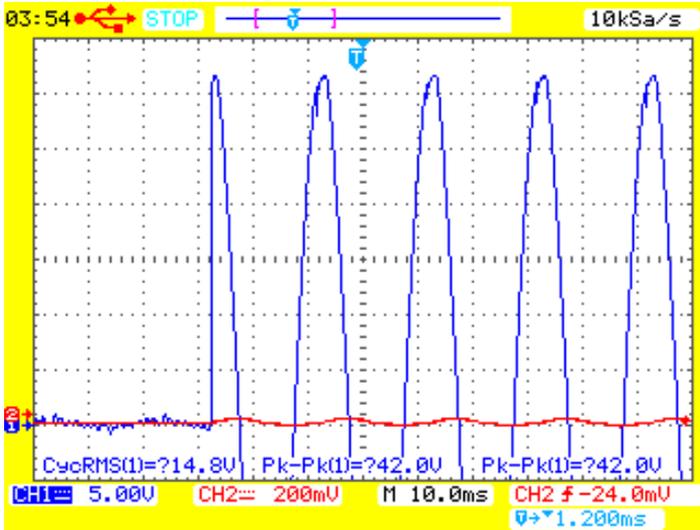
Pada eksperimen pertama didapatkan arus *inrush* sebesar 1,5 A. kemudian eksperimen kedua didapatkan arus *inrush* sebesar 2,3 A. pada eksperimen ketiga didapatkan arus *inrush* sebesar 3,5 A. Pada percobaan keempat didapatkan arus *inrush* sebesar 5,0 A. Dan pada eksperimen kelima didapatkan arus *inrush* sebesar 2,9 A. Untuk kelima eksperimen tersebut didapatkan arus tanpa beban sebesar 0,68 A dan arus nominal sebesar 4,5 A. Untuk hasil kelima eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20. Dari hasil tersebut jika dipersembahkan dalam bentuk tabel akan menjadi seperti pada tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.3 Hasil eksperimen arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaan 90°

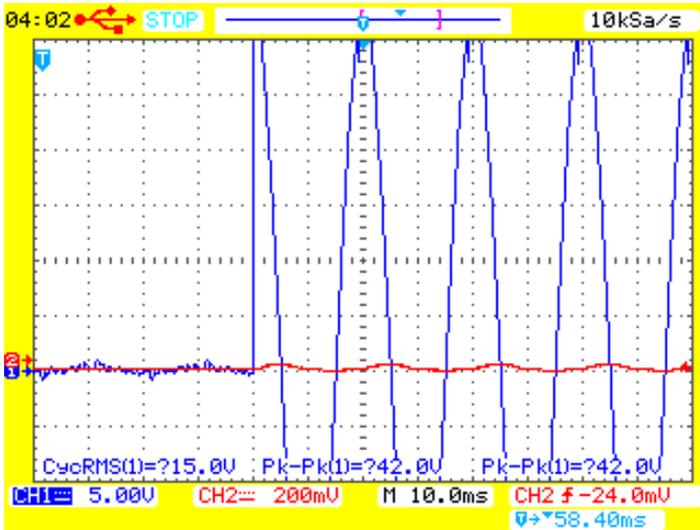
| Pengujian ke- | <i>Inrush Peak</i> | Arus No Load (I_{nl}) | Arus Nominal (I_n) |
|---------------|--------------------|---------------------------|------------------------|
| 1 | 2 A | 0,68 A | 4,5 A |
| 2 | 3 A | 0,68 A | 4,5 A |
| 3 | 3 A | 0,68 A | 4,5 A |
| 4 | 2 A | 0,68 A | 4,5 A |
| 5 | 2 A | 0,68 A | 4,5 A |



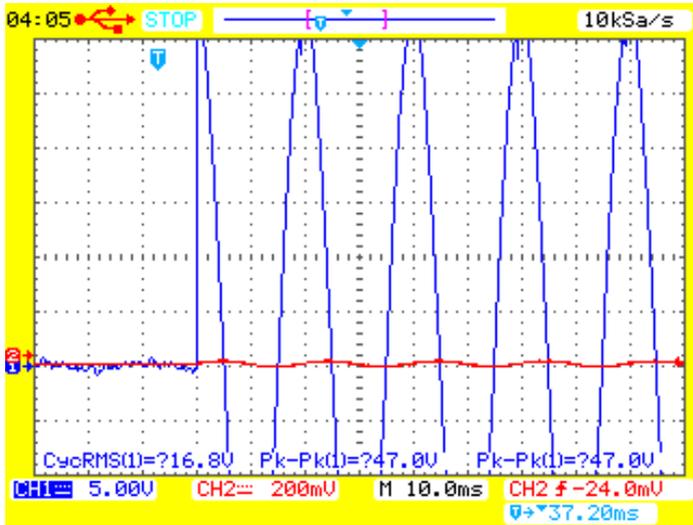
Gambar 4.15 Arus *inrush* sebesar 8 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalaan 0°



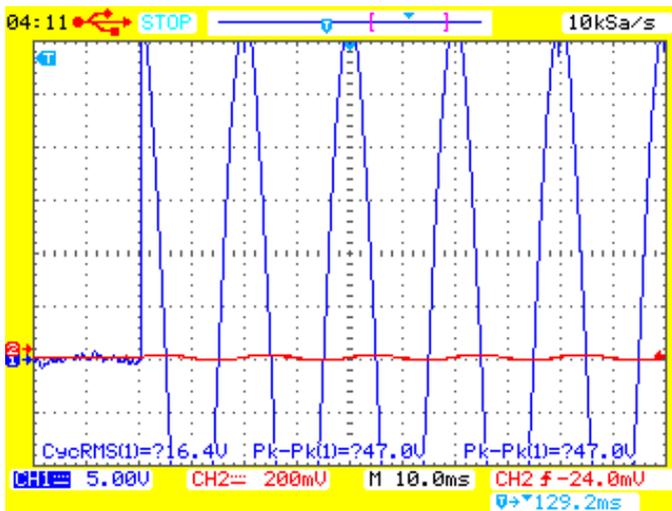
Gambar 4.16 Arus *inrush* sebesar 2 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90°



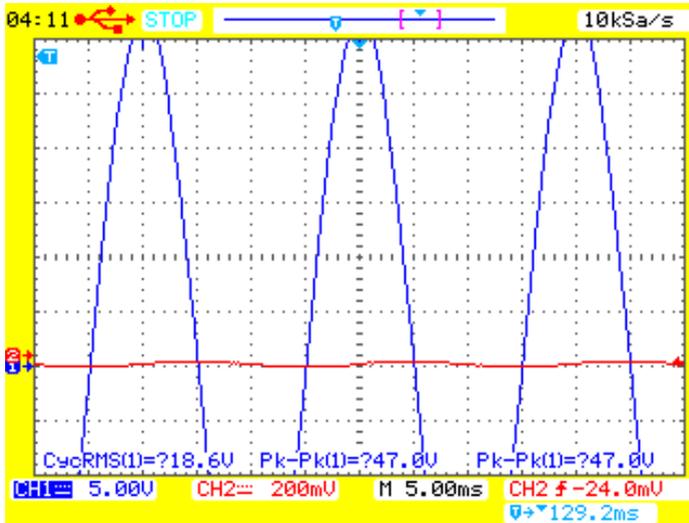
Gambar 4.17 Arus *inrush* sebesar 3 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90°



Gambar 4.18 Arus *inrush* sebesar 3 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90°



Gambar 4.19 Arus *inrush* sebesar 2 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90°



Gambar 4.20 Arus *inrush* sebesar 2 A pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90°

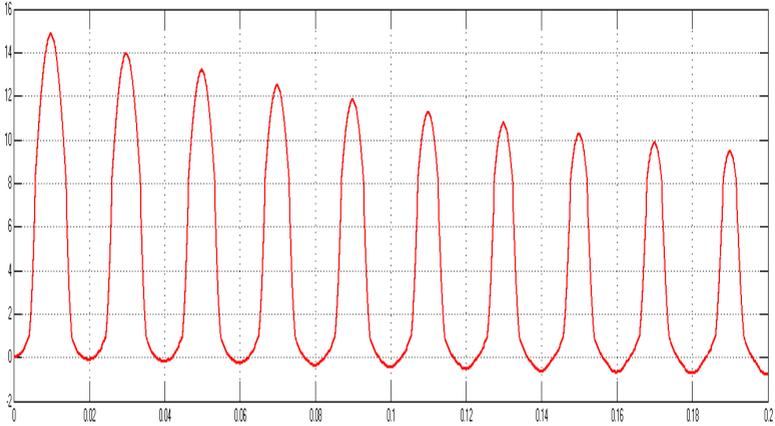
4.2 Simulasi Arus *Inrush*

Untuk simulasi menggunakan *simulink*, parameter-parameter pada transformator satu fasa, yaitu reaktansi magnetisasi dan resistansi belitan dan reaktansi belitan dimasukkan ke dalam *script* dari *MATLAB* yang memodelkan transformator satu fasa. Hasil dari simulasi arus *inrush* menggunakan *simulink* untuk transformator dengan cara potong A untuk sudut penyalan 0° ditunjukkan pada gambar 4.21.

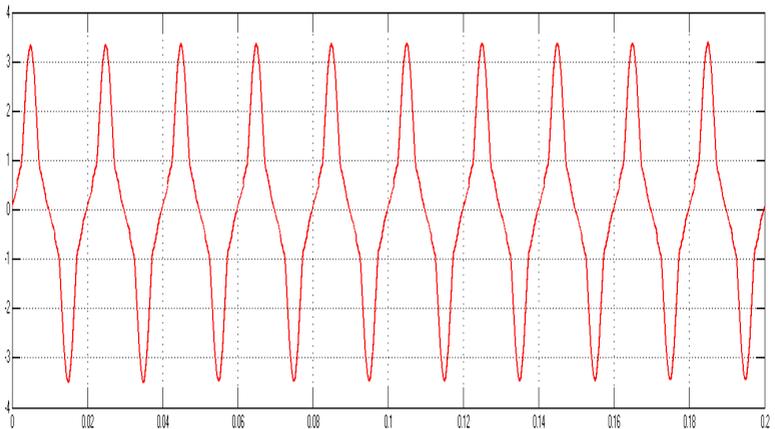
Sedangkan hasil simulasi arus *inrush* menggunakan *Simulink* untuk transformator dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90° ditunjukkan pada gambar 4.22.

Untuk simulasi menggunakan *simulink*, parameter-parameter pada transformator satu fasa, yaitu reaktansi magnetisasi dan resistansi belitan dan reaktansi belitan dimasukkan ke dalam *script* dari *MATLAB* yang memodelkan transformator satu fasa. Hasil dari simulasi arus *inrush* menggunakan *simulink* untuk transformator dengan cara potong B untuk sudut penyalan 0° ditunjukkan pada gambar 4.23.

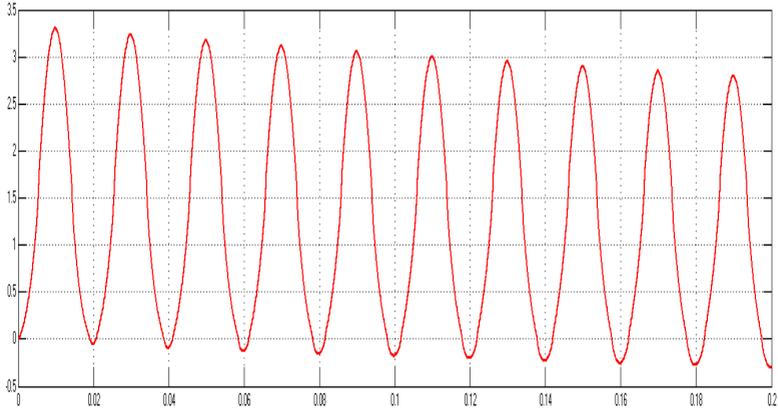
Sedangkan hasil simulasi arus *inrush* menggunakan *Simulink* untuk transformator dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90° ditunjukkan pada gambar 4.24.



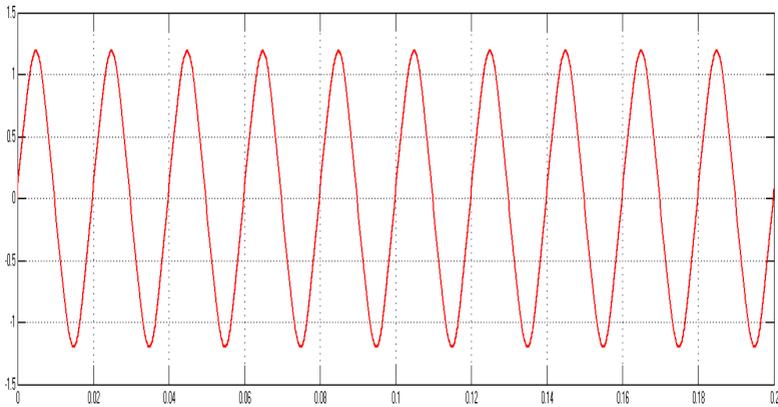
Gambar 4.21 Hasil simulasi arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 0°



Gambar 4.22 Hasil simulasi arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan cara potong A untuk sudut penyalan 90°



Gambar 4.23 Hasil simulasi arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 0°



Gambar 4.24 Hasil simulasi arus *inrush* pada transformator satu fasa dengan cara potong B untuk sudut penyalan 90°

Dari hasil simulasi transformator dengan cara potong A pada sudut penyalan 0° yang ditunjukkan pada gambar 4.21 didapatkan arus *inrush* sebesar 15 Ampere. Hal ini berbeda jauh dengan hasil yang didapatkan

dari pengujian yang besarnya mencapai 25 Ampere hingga 44 Ampere. Namun, jika dilihat dari perbandingan yang hasil pengujian dan hasil simulasi, didapatkan bahwa arus *inrush* memiliki karakteristik yang sama.

Dari hasil simulasi transformator dengan cara potong A pada sudut penyalan 90° yang ditunjukkan pada gambar 4.22 didapatkan arus *inrush* sebesar 3,2 Ampere. Hasil simulasi juga berbeda dengan hasil pengujian yang mencapai nilai 1,5 A hingga 3,5 A. Namun, jika dilihat dari perbandingan yang hasil pengujian dan hasil simulasi, didapatkan bahwa arus *inrush* memiliki karakteristik yang sama. Pada simulasi ini, transformator bekerja pada keadaan saturasi sehingga gelombang yang dihasilkan tidak berbentuk sinusoidal murni.

Dari hasil simulasi transformator dengan cara potong B pada sudut penyalan 0° yang ditunjukkan pada gambar 4.23 didapatkan arus *inrush* sebesar 3,5 Ampere. Hasil simulasi juga berbeda dengan hasil pengujian yang mencapai nilai 7 A hingga 8 A. Namun, jika dilihat dari perbandingan yang hasil pengujian dan hasil simulasi, didapatkan bahwa arus *inrush* memiliki karakteristik yang sama.

Dari hasil simulasi transformator dengan cara potong B pada sudut penyalan 90° yang ditunjukkan pada gambar 4.24 didapatkan arus *inrush* sebesar 1,5 Ampere. Hasil simulasi juga berbeda dengan hasil pengujian yang mencapai nilai 2 A hingga 3 A. Namun, jika dilihat dari perbandingan yang hasil pengujian dan hasil simulasi, didapatkan bahwa arus *inrush* memiliki karakteristik yang sama.

Terdapat konstanta yang mempengaruhi besarnya arus *inrush* antara hasil pengujian dengan hasil simulasi. Hal ini dapat dilihat dari karakteristik dari arus *inrush* antara hasil pengujian dengan hasil simulasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil eksperimen dan kesimpulan, ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil. Pertama adalah tipe potongan inti yang berbeda menyebabkan arus *inrush* yang berbeda juga. Parameter atau elemen penyusun kurva magnetisasi dapat mempengaruhi nilai arus *inrush*. Hasil yang didapatkan adalah arus *inrush* pada transformator dengan cara potong A lebih besar daripada arus *inrush* pada transformator dengan cara potong B.

Kedua adalah perbedaan sudut penyalan pada saat energisasi transformator juga menghasilkan arus *inrush* yang berbeda. Dengan sudut penyalan 0° didapatkan arus *inrush* yang mencapai nilai maksimal. Sedangkan dengan sudut penyalan 90° tidak akan muncul fenomena arus *inrush*.

Ketiga adalah hasil dari arus *inrush* menggunakan simulasi *simulink* lebih kecil daripada hasil dari eksperimen. Hal ini berarti terdapat fluks sisa pada hasil dari eksperimen. Fluks sisa yang terdapat pada eksperimen dapat diestimasi menggunakan pemodelan transformator satu fasa pada *simulink*.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, perlu digunakan suatu alat yang dapat mengukur besarnya nilai fluks. Dari nilai fluks yang dapat terukur tersebut dapat diestimasi besarnya nilai arus *inrush* dari suatu transformator. Sehingga tidak perlu menggunakan perangkat lunak untuk mengestimasi besarnya fluks yang terdapat pada inti transformator.

Untuk metode demagnetisasi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini hanya mengamati perubahan nilai arus *inrush*. Penelitian lebih lanjut mengenai perubahan fluks akibat metode demagnetisasi dapat dilakukan untuk pengembangan teknologi demagnetisasi sehingga besarnya arus *inrush* dapat diperkecil nilainya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen. J. "*Electric Machinery Fundamentals : Fourth Edition*," McGraw-Hill Education, New York, 2005.
- [2] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "*Investigation of magnetizing inrush current in transformers. II. Harmonic analysis*," IEEE Trans. Power Del., vol. 8, no. 1, pp. 255-263, Jan. 1993.
- [3] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "*Investigation of magnetizing inrush current in transformers. I. Numerical simulation*," IEEE Trans. Power Del., vol. 8, no. 1, pp. 246-254, Jan. 1993.
- [4] K. Yabe, "*Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers*," IEEE Trans. Power Del., vol. 12, no. 3, pp. 1109-1118, Jul. 1997.
- [5] P. L. Mao and R. K. Aggarwal, "*A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network*," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 4, pp. 654-660, Oct. 2001.
- [6] J. J. Rico, E. Acha, and M. Madrigal, "*The study of inrush current phenomenon using operational matrices*," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 2, pp. 231-237, Apr. 2001.
- [7] A. A. Adly, "*Computation of inrush current forces on transformer windings*," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 4, pp. 2855-2857, Jul. 2001.
- [8] J. H. Brunke and K. J. Frohlic, "*Elimination of Transformer inrush current by controlled switching – Part I: Theoretical considerations*," IEEE Trans. Power Del., vol 16, no. 2, pp 276-280, Apr. 2001.
- [9] M. Jamali, M. Mirzaie, and S. Asghar Gholamian, "*Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions*," ISSN 1392-1215 ©2011.
- [10] Chee-Mun Ong, "*Dynamic Simulation of Electrical Machinery Using MATLAB™/SIMULINK*," Prentice Hall PTR, New Jersey, 1998

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Rizqy Alif Sandeputra, lahir di Kota Surabaya, 15 Juni 1994. Riwayat pendidikan penulis dimulai di SD Integral Luqman Al-Hakim Surabaya, lulus pada tahun 2006. Kemudian lulus dari SMP Daar El-Salam Bogor pada tahun 2009 dan lulus dari SMAN 2 Kota Bekasi pada tahun 2012. Pendidikannya ia lanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2012. Dalam program sarjana-nya tersebut, penulis mengambil konsentrasi di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga dan focus pada riset mengenai karakteristik transformator. Selama kuliah penulis pernah menjadi Kepala Biro Relasi dan Jaringan di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS pada periode 2014-2015. Dan sekarang penulis sedang diamanahi menjadi Koordinator Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro ITS periode semester genap 2015-2016. Penulis pernah menjadi Juara II pada Lomba Esai Pekan Raya AKK, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia. Penulis dapat dihubungi melalui email rizqy.sandeputra@gmail.com.