



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**KARAKTERISTIK ARUS *INRUSH* PADA
TRANSFORMATOR 1 KVA 1 FASA DAN 3 KVA 3 FASA
BERBASIS EKSPERIMEN**

Muhammad Irfan Islami
NRP 2212 100 055

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

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**CHARACTERISTIC OF INRUSH CURRENT ON 1 PHASE 1
KVA TRANSFORMER AND 3 PHASE 3 KVA
TRANSFORMER BASED ON EXPERIMENT**

Muhammad Irfan Islami
NRP 2212 100 055

Advisor

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

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

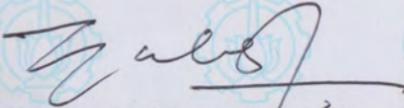
**KARAKTERISTIK ARUS *INRUSH* PADA
TRANSFORMATOR 1 KVA 1 FASA DAN 3 KVA 3
FASA BERBASIS EKSPERIMEN**

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**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1



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

Dosen Pembimbing 2



Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001

**SURABAYA
JUNI, 2016**

KARAKTERISTIK ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 1 KVA 1 FASA DAN 3 KVA 3 FASA BERBASIS EKSPERIMEN

Muhammad Irfan Islami
2211100055

Dosen Pembimbing 1 : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

Dosen Pembimbing 2 : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Arus *inrush* merupakan arus transien yang terjadi ketika peralatan listrik yang menggunakan prinsip elektromagnetik melakukan starting. Kesalahan operasi rele proteksi, penurunan kekuatan isolasi merupakan beberapa dampak yang dapat diberikan oleh arus *inrush*. Maka diperlukan studi lebih lanjut tentang bagaimana karakteristik arus *inrush* untuk memahami bagaimana fenomena arus *inrush* sehingga dampak yang ditimbulkan oleh arus *inrush* dapat diminimalisir.

Pada penelitian ini membahas tentang pengujian berbasis eksperimen untuk mengetahui bagaimana karakteristik arus *inrush* pada 1 fasa dari kedua transformator uji, yakni transformator 1 kVA 1 fasa dan 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalaaan sebesar 0 derajat dan 90 derajat dan efek fluks residu pada transformator 1 kVA 1 fasa.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio arus *inrush* terhadap arus nominal masing-masing transformator uji pada transformator 1 kVA 1 fasa jauh lebih tinggi dibandingkan pada transformator 3 kVA 3 fasa. Hal ini disebabkan arus *inrush* yang mengalir pada transformator 3 kVA 3 fasa adalah resultan dari 3 fasa yang berada dalam 1 inti. Selain itu semakin besar jumlah fluks residu semkin besar pula arus *inrush* yang dihasilkan.

Kata kunci : Arus *Inrush*, Pengujian, Eksperimen, Transformator

CHARACTERISTIC OF INRUSH CURRENT ON 1 PHASE 1 KVA TRANSFORMER AND 3 PHASE 3 KVA TRANSFORMER BASED ON EXPERIMENT

Muhammad Irfan Islami
2211100055

Lecture Counsellor 1 : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

Lecture Counsellor 2 : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

Inrush current is a transient that occur whenever an electrical equipment which is using electromagnetic principle, on starting state. Fault operation on protection relay, degradation of insulation quality are some of impact that caused by inrush current. It is necessary for further studies about characteristic of inrush current to understand the phenomenon so the impacts that caused by inrush current can be reduced.

Measurement based on experiment to understand the characteristic of 1 phase inrush current on 1 phase 1 kVA transformer and 3 phase 3 kVA transformer with firing angle of 0 and 90 degree is discussed on this research.

Results shows that ratio of 1 phase 1 kVA transformer inrush current against its nominal current is higher than ratio of 3 phase 3 kVA transformer. On 3 phase 3 kVA transformer , inrush currents that flow through is the resultant of 3 phase inrush current in the same core. A higher the value of residual flux on a transformer core, higher inrush current will produced by transformer.

Keywords : Inrush Current, Measurement, Experiment, Transformer

DAFTAR ISI

ABSTRAK	I
ABSTRACT	III
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR GAMBAR	IX
DAFTAR TABEL	XI
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 TRANSFORMATOR DAN ARUS <i>INRUSH</i>	5
2.1 Pengertian Transformator	5
2.2 Konstruksi Transformator	5
2.3 Transformator Ideal	6
2.4 Transformator Tidak Ideal	7
2.5 Transformator Tiga Fasa	7
2.6 Histeresis	7
2.7 Arus <i>Inrush</i>	9
BAB 3 PERANCANGAN ALAT	11
3.1 Perencanaan Alat	11
3.1.2 Sumber AC 3 Fasa	13
3.1.3 Kapasitor Demagnetisasi	14
3.1.4 Komponen Pensaklaran	14
3.1.5 <i>BK Precision 2542 Digital Oscilloscope</i>	21
BAB 4 PENGUJIAN ALAT, AKUISISI DATA DAN ANALISA	25
4.1 Pengujian Alat	25
4.2 Akuisisi Data	30
4.3 Hasil Pengujian	32
4.3.1 Pengujian Sudut Penyalaan	32
4.3.1.1 Inrush pada Sudut Penyalaan 0 Derajat	32
4.3.1.1.1 Transformator 1 kVA 1 Fasa	32
4.3.1.1.2 Transformator 3 kVA 3 Fasa	34
4.3.1.2 Inrush pada Sudut Penyalaan 90 Derajat	36
4.3.1.2.1 Transformator 1 kVA 1 Fasa	36
4.3.1.2.2 Transformator 3 kVA 3 Fasa	38
4.3.2 Pengujian Fluks Residu	39
4.3.2.1 Pengujian 1	39

4.3.2.2	Pengujian 2	40
4.3.2.3	Pengujian 3	41
4.4	Analisa Data	41
4.4.1	Arus <i>Inrush</i> pada Sudut Penyalaan 0 derajat	41
4.4.2	Arus <i>Inrush</i> pada Sudut Penyalaan 90 derajat	42
4.4.3	Pengaruh Fluks Residu pada Tren Arus <i>Inrush</i>	44
BAB 5	PENUTUP	47
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Penelitian Selanjutnya	47
DAFTAR PUSTAKA		49
LAMPIRAN		51
RIWAYAT HIDUP PENULIS		53

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator 1 kVA 1 fasa	13
Tabel 3.2 Spesifikasi transformator 3 kVA 3 fasa	13
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>BK Precision 2542</i>	21
Tabel 3.4 Spesifikasi utama <i>current probe Tektronix A622</i>	23
Tabel 3.5 Spesifikasi <i>probe</i> osiloskop	23
Tabel 4.1 <i>Setting probe</i> osiloskop	26
Tabel 4.2 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> transformator 1 kVA 1 fasa dengan sudut penyalaan 0 derajat	34
Tabel 4.3 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalaan 0 derajat	35
Tabel 4.4 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> transformator 1 kVA 1 fasa dengan sudut penyalaan 90 derajat	37
Tabel 4.5 Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalaan 90 derajat	39
Tabel 4.6 Hasil Pengujian 1	40
Tabel 4.7 Hasil Pengujian 2	40
Tabel 4.8 Hasil Pengujian 3	41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Transformator tipe <i>core</i>	5
Gambar 2.2	Transformator tipe <i>shell</i>	6
Gambar 2.3	Kurva histeresis	8
Gambar 2.4	Fenomena hubungan arus <i>inrush</i> akibat pengaruh fluks dan kurva magnetisasi inti	10
Gambar 3.1	Konsep sistem modul peralatan arus <i>inrush</i>	11
Gambar 3.2	Transformator 1 kVA 1 fasa	12
Gambar 3.3	Transformator 3 kVA 3 fasa	12
Gambar 3.4	Sumber AC 3 fasa	13
Gambar 3.5	Kapasitor demagnetisasi	14
Gambar 3.6	Konsep pensaklaran modul arus <i>inrush</i>	14
Gambar 3.7	SSR Opto 22 240D25 -17	15
Gambar 3.8	Prinsip kerja SSR	15
Gambar 3.9	Konsep rangkaian <i>zero crossing</i>	16
Gambar 3.10	Rangkaian <i>zero crossing</i> pada modul	17
Gambar 3.11	<i>Script</i> program pada arduino	18
Gambar 3.12	Arduino yang digunakan pada modul	18
Gambar 3.13	<i>Driver</i> TRIAC pada modul	19
Gambar 3.14	Rangkaian <i>driver</i> TRIAC pada modul	20
Gambar 3.15	Osiloskop <i>BK Precision 2542</i>	21
Gambar 3.16	Current Probe Tektronix A622	22
Gambar 3.17	<i>Probe</i> osiloskop	22
Gambar 4.1	Tegangan input dan arus yang mengalir pada transformator uji tanpa menggunakan modul	25
Gambar 4.2	<i>Delay time</i> dari SSR (CH1) ke rangkaian <i>zero crossing</i> (CH2)	26
Gambar 4.3	<i>Delay time</i> rangkaian <i>zero crossing</i> (merah) hingga ke output Arduino (biru)	27
Gambar 4.4	<i>delay time</i> dari output arduino (CH2)	27
Gambar 4.5	Proses sinkronisasi modul arus <i>inrush</i> terhadap input tegangan jala-jala	28
Gambar 4.6	Kalibrasi sudut penyalaan 0 derajat	29
Gambar 4.7	Kalibrasi sudut penyalaan 90 derajat	29
Gambar 4.8	Proses akuisisi data arus <i>inrush</i>	31
Gambar 4.9	Hasil salah satu pengukuran arus <i>inrush</i> (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalaan 0 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa	33

Gambar 4.10	Salah satu bentuk arus <i>inrush</i> dengan sudut penyalaan 0 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa	33
Gambar 4.11	Hasil salah satu pengukuran arus <i>inrush</i> (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalaan 0 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa	34
Gambar 4.12	Salah satu bentuk arus <i>inrush</i> dengan sudut penyalaan 0 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa	35
Gambar 4.13	Hasil salah satu pengukuran arus <i>inrush</i> (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalaan 90 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa	36
Gambar 4.14	Salah satu bentuk arus <i>inrush</i> dengan sudut penyalaan 90 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa	37
Gambar 4.15	Hasil salah satu pengukuran arus <i>inrush</i> (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalaan 90 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa	38
Gambar 4.16	Salah satu bentuk arus <i>inrush</i> dengan sudut penyalaan 90 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa	38
Gambar 4.17	Perbandingan rasio arus <i>inrush</i> terhadap In masing-masing transformator uji dengan sudut 0 derajat	42
Gambar 4.18	Perbandingan rasio arus <i>inrush</i> terhadap In masing-masing transformator uji dengan sudut 90 derajat	42
Gambar 4.19	Arus <i>inrush</i> pada transformator 3 kVA 3 fasa	43
Gambar 4.20	Grafik pengaruh fluks residu terhadap <i>tren</i> arus <i>inrush</i>	44

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Fenomena transien pada peralatan listrik selalu menjadi salah satu perhatian utama. Hal ini disebabkan jika fenomena transien tidak diamati dan dipelajari secara mendalam, memiliki dampak yang luas, seperti ketidakstabilan sistem, kualitas daya, harmonisa dan ketahanan peralatan. Arus *inrush* merupakan salah satu fenomena transien yang terjadi pada peralatan listrik. Arus *inrush* merupakan arus yang muncul ketika peralatan yang menggunakan prinsip elektromagnetik, seperti transformator, motor, dll, melakukan *starting* maupun *ringdown*. Arus *inrush* memiliki magnitude yang besar, spektrum harmonisa yang luas dan komponen arus DC yang besar. Arus *inrush* dapat menyebabkan terjadinya kesalahan operasi pada rele-rele pengaman, mengurangi usia peralatan dan mengurangi kualitas daya sistem.

Transformator merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem tenaga. Transformator memainkan peran penting dalam saluran transmisi dan distribusi. Selain saluran transmisi, transformator memiliki tingkat kerentanan yang besar terhadap terjadinya listrik transien. Saturasi pada inti magnet sebuah transformator menjadi penyebab utama terjadinya arus *inrush*. Saturasi pada inti disebabkan oleh perubahan tiba-tiba pada sistem tegangan akibat switching transient, sinkronisasi fasa generator, kesalahan eksternal dan pemulihan kesalahan [1]. Hasil pengisian transformator pada kebanyakan kasus arus *inrush* dan fluks inti dapat mencapai nilai 2-3 kali nilai teoritis maksimum fluks puncak nominal [1].

Hingga saat ini tidak ada bukti langsung yang menyatakan pengisian transformator dapat menyebabkan kegagalan akibat adanya arus *inrush* yang besar. Namun, kegagalan isolasi pada transformator daya yang sering dioperasikan pada kondisi tidak berbeban mendukung dugaan bahwa arus *inrush* memiliki efek yang berbahaya [2]. Masalah lain yang ditimbulkan pengisian transformator adalah interaksi harmonisa dengan komponen sistem lain yang menghasilkan fenomena tegangan lebih dan resonansi [3]. Pada [4] penulis menunjukkan bagaimana distorsi harmonisa yang disebabkan oleh proses pensaklaran transformator tidak berbeban dapat menjadi lebih besar selama proses pemberian beban, yang menghasilkan harmonisa tegangan lebih. Selain itu, arus *inrush* pada

transformator dapat menghasilkan frekuensi resonansi pada sistem tenaga interkoneksi lepas pantai [5].

Metode yang digunakan pada studi ini adalah pengukuran berbasis eksperimen untuk mendapatkan karakteristik arus *inrush* pada transformator uji. Pengujian pada transformator dilakukan pada kondisi transien, yakni saat *starting*. Metode yang diusulkan diharapkan membantu untuk lebih memahami karakteristik arus *inrush* transformator uji lebih baik.

Konsep utama dalam pengukuran arus *inrush* adalah mengetahui bagaimana karakteristik arus *inrush* dengan melalui metode pengukuran berbasis eksperimen untuk kemudian dianalisa dan dibandingkan. Arus *inrush* memiliki *magnitude* maksimum ketika sudut penyalan berada dititik 0 derajat, sedangkan pada sudut penyalan 90 derajat, arus *inrush* memiliki *magnitude* minimum [11].

Masalah yang dibahas dalam studi ini adalah bagaimana mendapatkan karakteristik kurva arus *inrush* pada transformator 1 kVA 1 fasa dan 3 kVA 3 fasa berdasarkan metode pengukuran berbasis eksperimen. Permasalahan dalam studi dibatasi pada membandingkan karakteristik arus *inrush* pada per fasa kedua transformator uji.

Tujuan yang ingin dicapai pada studi ini adalah memahami karakteristik arus *inrush* pada transformator uji dan dapat dijadikan sebagai salah satu referensi dalam metode pengukuran arus *inrush*.

Adapun urutan kerja yang akan dilakukan dalam studi ini pertama-tama adalah studi literatur dan menentukan metode pengukuran. Kedua, setelah melakukan studi literatur dan menentukan model transformator uji, menyiapkan, merancang dan menguji modul peralatan untuk pengukuran transformator uji. Ketiga, setelah modul peralatan siap digunakan, dilakukan proses pengukuran untuk pengambilan data. Proses pengambilan data menggunakan instrument akuisisi data dan dilakukan secara real-time di laboratorium. Keempat, data yang didapatkan dari pengukuran di laboratorium diolah. Pada fase ini dapat diketahui dan dibandingkan karakteristik dari arus *inrush* transformator uji. Langkah terakhir yakni memberikan kesimpulan dan melakukan evaluasi terhadap data yang diperoleh.

1.2 Sistematika Penulisan

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

Selanjutnya pada bab dua dibahas tentang teori transformator yang digunakan dalam pengerjaan studi ini.

Pada bab tiga dibahas tentang perancangan modul peralatan pengukuran transformator uji untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* transformator uji.

Selanjutnya pada bab empat dibahas tentang pengujian modul peralatan dan analisis data hasil pengujian.

Pada bab lima dibahas tentang kesimpulan dari studi yang dilakukan.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2 TRANSFORMATOR DAN ARUS *INRUSH*

2.1 Pengertian Transformator

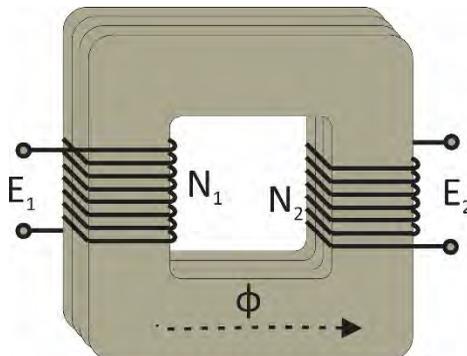
Transformator merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem kelistrikan, secara umum trafo digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan.

Transformator terdiri dari tiga bagian utama, yaitu kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti besi transformator.

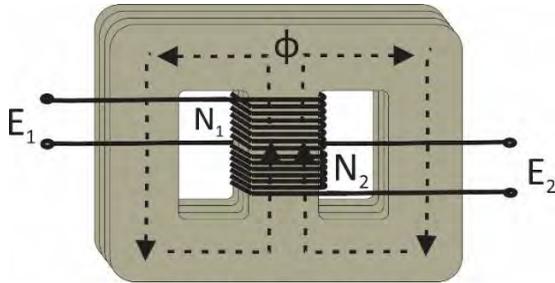
Prinsip kerja transformator adalah tegangan bolak-balik diberikan melalui kumparan primer. Kemudian akan mengalir arus bolak-balik pada masing-masing putaran kumparan. Arus bolak-balik tersebut akan menghasilkan fluks bolak-balik pada inti magnetik. Fluks tersebut mengalir pada inti transformator dan menginduksikan gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder.

2.2 Konstruksi Transformator

Pada dasarnya ada dua jenis transformator yang umum digunakan, yaitu tipe core dan tipe shell [9]. Pada transformator tipe core, kumparan primer dan kumparan sekunder berada pada sisi lengan transformator yang berbeda. Pada transformator tipe shell, kumparan primer dan kumparan sekunder berada pada sisi lengan transformator yang sama. Perbandingan antara kedua jenis tipe transformator dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.1 Transformator tipe *core*



Gambar 2.2 Transformator tipe *shell*

2.3 Transformator Ideal

Sebuah transformator dapat dikatakan sebuah transformator ideal apabila pada transformator tersebut tidak ada rugi-rugi dan tidak ada fluks bocor. e_1 merupakan tegangan induksi pada kumparan primer (N_1) dan e_2 merupakan tegangan induksi yang terbangkit pada sisi kumparan sekunder (N_2). Ketika kumparan primer disuplai dengan sumber tegangan AC, pada inti transformator mengalir fluks (ϕ) searah dengan aturan tangan kanan. Besarnya gaya gerak listrik pada kumparan primer dipengaruhi oleh banyaknya jumlah belitan dan fluks yang berubah terhadap waktu. Dapat ditulis sebagai berikut

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

GGL yang terinduksi pada kumparan sekunder adalah

$$-e_2 = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Apabila polaritas diabaikan, dan diasumsikan e_1 dan e_2 sama dengan tegangan terminal v_1 dan v_2 . Akan didapatkan :

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

Dari rumus di atas dapat disimpulkan bahwa:

Apabila $N_1 > N_2$, maka transformator tersebut menjadi step-down transformer.

Apabila $N_1 < N_2$, maka transformator tersebut menjadi step-up transformer.

2.4 Transformator Tidak Ideal

Walaupun kecil, setiap belitan pada transformator memiliki nilai hambatan. Hal tersebut menyebabkan transformator dapat menghasilkan fluks bocor. Fluks bocor merupakan fluks yang melalui udara di sekitar belitan. Fluks bocor yang dihasilkan oleh kumparan primer dan kumparan sekunder dapat menyebabkan adanya mutual flux. Fluks tersebut tidak mengalir di udara, melainkan mengalir pada inti transformator.

2.5 Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa dapat terdiri dari tiga buah transformator 1 fasa atau 1 buah transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa juga terdiri dari tipe core dan tipe shell. Belitan pada transformator tiga fasa dapat dihubungkan dengan koneksi wye (Y) dan delta (Δ). Sehingga koneksi antara kumparan primer dan kumparan sekunder akan didapatkan empat kombinasi, yaitu: Koneksi Y- Δ ; Koneksi Y-Y; Koneksi Δ -Y; Koneksi Δ - Δ .

Pada transformator tiga fasa, antar belitannya memiliki beda fasa 120 derajat. Sedangkan antara wye (Y) dan delta (Δ) memiliki beda fasa 30 derajat.

2.6 Histeresis

Keterlambatan dari material magnetik disebut sebagai histeresis magnetik yang berhubungan dengan karakteristik dari material. Kurva histeresis merupakan kurva yang membandingkan kerapatan fluks (B) dengan intensitas medan magnet (H). Kerapatan fluks merupakan jumlah aliran fluks per luasan lintasan. Secara matematis dapat dijabarkan sebagai berikut,

$$B = \mu H; B = \frac{\phi}{A} \quad (2.4)$$

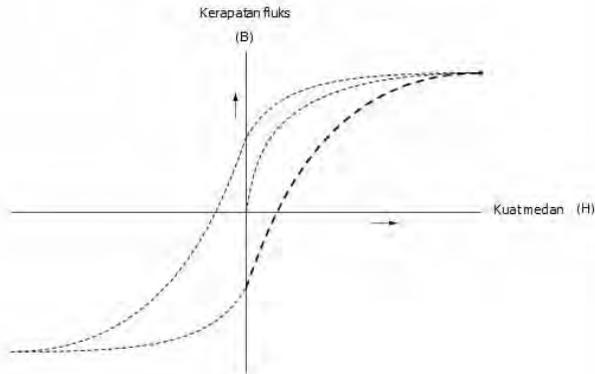
dimana H adalah intensitas medan magnet atau gaya magnetisasi, dan A adalah luas permukaan dari inti ferromagnetik. Untuk mendapatkan nilai H, diperoleh dari rumus,

$$H = i \frac{T_1}{l} \quad (2.5)$$

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

$$\oint B \cdot dS = A\mu \frac{iT_1}{l} \quad (2.6)$$

Pertama-tama, transformator di-*energize* dan mencapai kondisi saturasi pada inti, ketika transformator dimatikan, terdapat fluks sisa yang masih berada didalam inti. Hal ini dipengaruhi oleh retentivitas. Retentivitas merupakan kemampuan material untuk mempertahankan sebagian dari magnet yang mengalir pada inti setelah proses magnetisasi berhenti.



Gambar 2.3 Kurva histeresis

Pada Gambar 2.3 diatas, jika arus dinaikkan pada arah positif, kuat medan (H) dan kerapatan fluks (B) akan ikut naik secara linear hingga mencapai tahap saturasi, dimana dengan menaikkan arus nilai (B) cenderung tetap.

Ketika arus diturunkan menuju 0, kuat medan akan menuju 0. Namun, kerapatan fluks (B) tidak akan berada pada titik 0 karena terdapat magnet sisa akibat efek retentivitas pada inti.

Untuk mengurangi (B), diinjeksikan arus yang memiliki arah berlawanan pada kumparan. Gaya magnet yang harus diberikan untuk menghilangkan sisa fluks (B) disebut gaya koersif.

Peningkatan pada arus yang memiliki arah berlawanan menyebabkan inti termagnetisasi pada arah berlawanan. Peningkatan ini akan menyebabkan inti mencapai saturasi namun pada arah berlawanan. Ketika arus diturunkan menuju 0 lagi, hal yang sama terjadi, dimana kerapatan fluks (B) tidak akan berada pada titik nol [1].

2.7 Arus *Inrush*

Arus *Inrush* merupakan arus transien yang terjadi ketika peralatan yang menggunakan prinsip elektromagnetik, seperti transformator, motor, dll, melakukan *starting* maupun *ringdown*. Arus *inrush* memiliki magnitudo yang besar, spektrum harmonisa yang luas dan komponen arus DC yang besar. Arus *inrush* bisa menyebabkan terjadinya kesalahan operasi pada rele-rele pengaman, mengurangi usia peralatan dan mengurangi kualitas daya sistem.

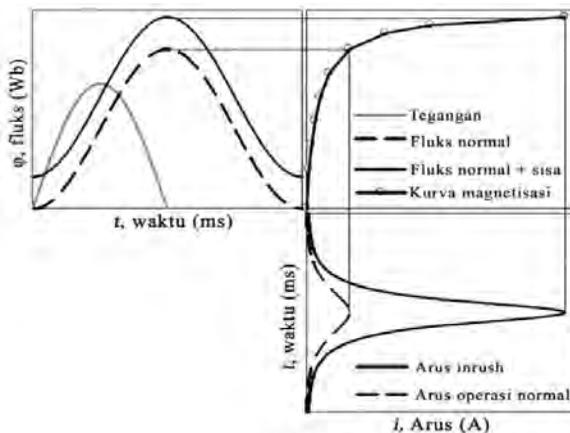
Saturasi pada inti magnet sebuah transformator menjadi penyebab utama terjadinya arus *inrush*. Saturasi pada inti disebabkan oleh perubahan tiba-tiba pada sistem tegangan akibat switching transient, sinkronisasi fasa generator, kesalahan eksternal dan pemulihan kesalahan [1]. Hasil pengisian transformator pada kebanyakan kasus arus *inrush* dan fluks inti dapat mencapai nilai 2-3 kali nilai teoritis maksimum fluks puncak nominal [1].

Ada 2 metode pengukuran arus *inrush* pada transformator yang saat ini telah dikembangkan, yakni metode simulasi arus *inrush* dan metode perhitungan analisis arus *inrush*. Pada metode simulasi arus *inrush*, pemodelan transformator menggunakan software seperti *EMTP (Electrical Machine Transient Program)* dengan berbagai metode untuk pemodelannya, seperti; *Newton-Raphson*; *Backward Differential Formulas (BDF)*; dan *Finite Element Method (FEM)*. Pada metode perhitungan analisis arus *inrush*, analisis didapatkan melalui menurunkan Teori transformator 1 fasa. Ada beberapa formula yang diusulkan, yakni; formula *Bertagnolli* [6]; *Specht* [7]; dan *Holcomb* [8].

Secara teori, arus *inrush* memiliki magnitudo maksimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalan 0 derajat dan memiliki magnitudo minimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalan 90 derajat [11].

Ketika transformator di-*energize* menggunakan sumber AC, maka akan muncul aliran arus magnetisasi yang melewati belitan yang terhubung oleh sumber tersebut meskipun belitan yang berada di sisi lainnya tidak terhubung. Arus ini yang disebut sebagai arus *inrush*. Arus

inrush dibutuhkan untuk energisasi pada transformator sehingga menghasilkan fluks pada inti.



Gambar 2.4 Fenomena hubungan arus *inrush* akibat pengaruh fluks dan kurva magnetisasi inti

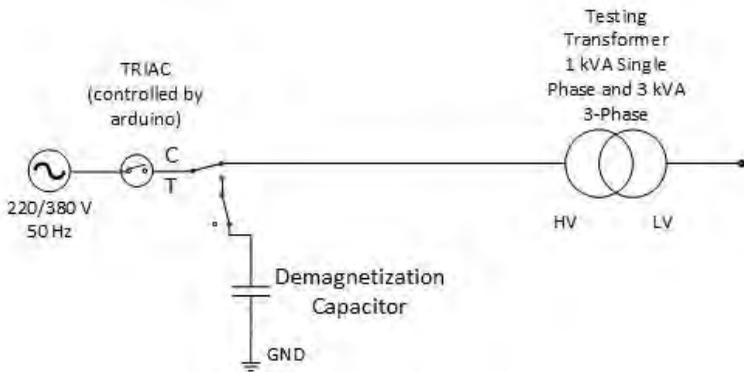
Arus *inrush* dipengaruhi oleh 2 faktor, yakni faktor internal dan eksternal. Pada faktor internal, arus *inrush* dipengaruhi oleh karakteristik dari material inti. Setiap material inti transformator memiliki kurva saturasi dan kurva histerisis yang berbeda sesuai dengan karakteristik materialnya. Pada faktor eksternal, arus *inrush* dipengaruhi oleh adanya fluks residu atau fluks sisa pada inti transformator. Arus *inrush* dibagi menjadi 2 bagian, yakni 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*. Fenomena hubungan arus *inrush* akibat adanya pengaruh fluks dan kurva magnetisasi inti dapat dilihat pada Gambar 2.3 diatas.

BAB 3 PERANCANGAN ALAT

Dalam bab ini dijelaskan tentang perencanaan alat untuk mendapatkan karakteristik arus *inrush*.

3.1 Perencanaan Alat

Tujuan pembuatan modul adalah mendapatkan arus *inrush* dari transformator uji sehingga dapat diketahui bagaimana karakteristik arus *inrush* transformator uji. Secara keseluruhan, konsep rangkaian yang digunakan dalam pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Konsep sistem modul peralatan arus *inrush* [1]

Dalam sistem yang digunakan, terdapat 7 komponen secara garis besar, yakni SSR, rangkaian zero *crossing*, arduino uno, rangkaian *driver* TRIAC, *fuse*, *Current Transformer* (CT) dan *Shunt Capacitor*. Sistem secara detail dapat dilihat pada Lampiran 1.

3.1.1 Transformator

Terdapat 2 transformator yang akan diuji pada studi ini, yakni transformator step down *SAE* 220/127 V 1 kVA 1 fasa dan 3 kVA 3 fasa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan 3.3 dibawah ini. Pada studi ini transformator 3 kVA 3 fasa dihubungkan dalam bentuk Y-Y.



Gambar 3.2 Transformator 1 kVA 1 fasa



Gambar 3.3 Transformator 3 kVA 3 fasa

Kedua transformator uji diatas memiliki inti standar. Secara lengkap spesifikasi dari transformator yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 dibawah ini:

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator 1 kVA 1 fasa

Fasa	1 Fasa
Daya Pada Trafo	1 KVA
Tegangan Primer	220 V
Tegangan Sekunder	127 V
Frekuensi	50 Hz
Belitan Primer	255
Belitan Sekunder	147

Tabel 3.2 Spesifikasi transformator 3 kVA 3 fasa

Fasa	3 Fasa
Daya Pada Trafo	3 KVA
Tegangan Primer	220 V
Tegangan Sekunder	127 V
Belitan Primer	340
Belitan Sekunder	196
Hubungan Belitan	Y / Y
Frekuensi	50 Hz

3.1.2 Sumber AC 3 Fasa

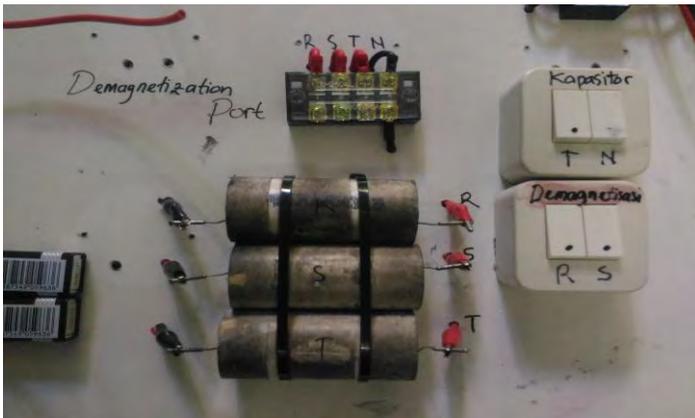


Gambar 3.4 Sumber AC 3 fasa

Transformator disuplai oleh sumber AC 3 fasa 220/380 V 50 Hz, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Sumber AC 3 fasa ini diambil dari line PLN yang ada di dalam laboratorium Tegangan Tinggi Elektro ITS.

3.1.3 Kapasitor Demagnetisasi

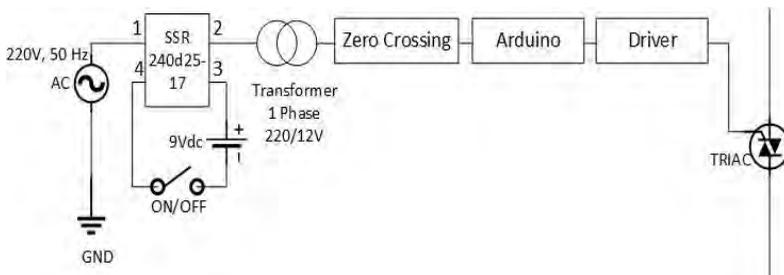
Pada modul peralatan ini dipasang shunt capacitor yang memiliki fungsi demagnetisasi fluks yang ada di dalam transformator uji. 3 buah kapasitor 39uF seperti pada Gambar 3.5 dipasang secara paralel terhadap sistem yang dikendalikan oleh saklar manual. Saklar dinyalakan ketika sistem dalam kondisi mati, setelah proses pengukuran transformator. Saklar dinyalakan dalam waktu tertentu untuk proses demagnetisasi transformator uji.



Gambar 3.5 Kapasitor demagnetisasi

3.1.4 Komponen Pensaklaran

Konsep komponen pensaklaran pada modul peralatan ini dapat dijabarkan dalam Gambar 3.6 dibawah ini:



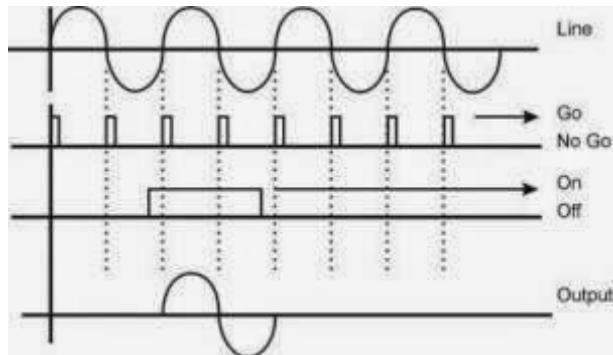
Gambar 3.6 Konsep pensaklaran modul arus *inrush*

Dari Gambar diatas dapat diamati bahwa komponen pensaklaran dibagi menjadi 4, yakni :

- a. SSR (*Solid State Relay*)



Gambar 3.7 SSR Opto 22 240D25 -17



Gambar 3.8 Prinsip kerja SSR [10]

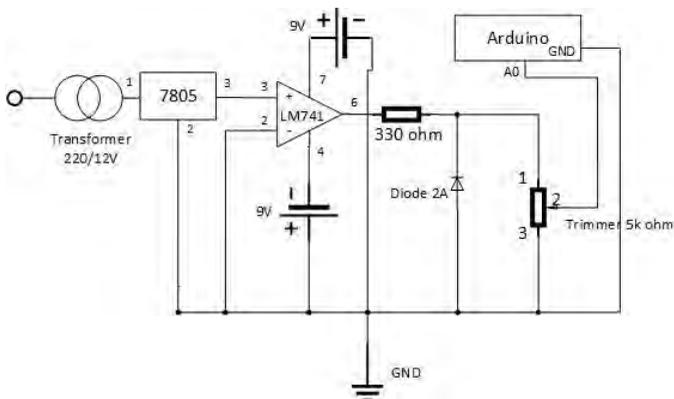
SSR yang digunakan dalam modul arus *inrush* ini adalah SSR tipe *Opto 22 Model 24D25-17* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 diatas. SSR ini memiliki *rating* tegangan hingga 240 VAC dan kekuatan hantar arus 25 A pada kondisi *steady state*. SSR bekerja sebagai saklar. Prinsip kerja SSR dapat digambarkan pada Gambar 3.8 diatas. Dari Gambar 3.8 terlihat

bahwa ketika saklar SSR dinyalakan pada saat input SSR memiliki nilai (polaritas (+) maupun polaritas (-)), SSR belum beroperasi. SSR menunggu polaritas input bernilai 0 agar dapat bekerja .

Pada modul ini, SSR dihubungkan secara seri di depan rangkaian *zero crossing* sehingga sinyal input yang diumpangkan kepada rangkaian *zero crossing* tidak terpotong dan rangkaian *zero crossing* tidak memberikan trigger yang kurang tepat kepada arduino.

b. Rangkaian Zero Crossing

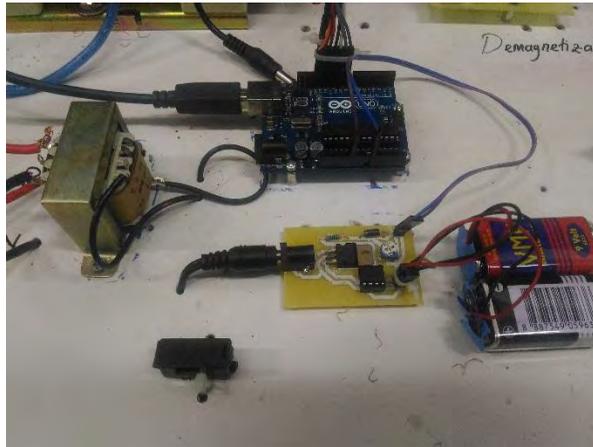
Rangkaian ini berfungsi untuk mendeteksi titik persimpangan nol dari input sistem. Rangkaian ini terdiri dari sebuah transformator 220/12 V, IC voltage regulator 7805, LM741, baterai 9Vdc, resistor, dioda 2A, dan resistor trimmer 5 kΩ. Konsep rangkaian dapat ditunjukkan pada Gambar 3.9 dibawah ini.



Gambar 3.9 Konsep rangkaian *zero crossing*

Proses yang terjadi pada rangkaian ini pertama-tama penurunan tegangan input dari 220V menjadi 12V. Berikutnya terjadi penurunan tegangan menjadi 5V melalui regulator tegangan. Sinyal 5V kemudian dibandingkan dengan 0 V melalui komparator, sehingga pada setiap polaritas input, LM741 mengeluarkan output yakni +Vsat untuk polaritas input

positif dan $-V_{sat}$ untuk polaritas input negatif. Berikutnya, keluaran LM741 dimasukkan dalam rangkaian clipper yang terdiri dari resistor 330 ohm yang dioda 2A.



Gambar 3.10 Rangkaian *zero crossing* pada modul

Rangkaian ini berfungsi untuk memotong sinyal $-V_{sat}$ pada output dari LM741, sehingga keluaran dari rangkaian clipper hanya $+V_{sat}$ dan 0 V. Proses selanjutnya, keluaran rangkaian clipper dimasukkan ke rangkaian trimmer 5k. Hal ini digunakan untuk mengkalibrasi tegangan keluaran rangkaian zero crossing sebelum diumpankan ke arduino.

c. *Arduino Uno*

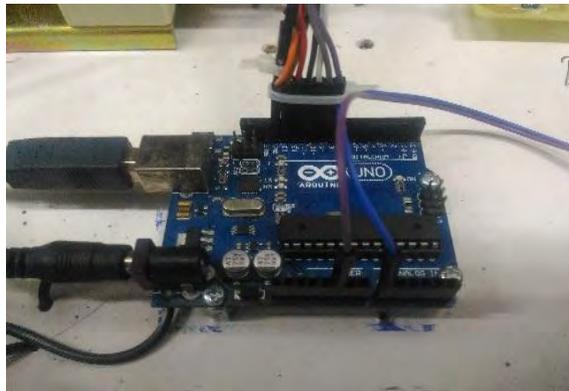
Dalam modul peralatan ini, arduino uno melakukan peran fungsi *delay time*. *Arduino uno* diprogram untuk melakukan fungsi latch setelah *delay time* tertentu. Dengan kata lain, arduino uno digunakan untuk mengatur sudut penyalaan input dari sistem ke transformator uji. Berikut pada Gambar 3.11 dijabarkan *script* program pada arduino uno. Gambar 3.12 menunjukkan arduino yang digunakan dalam modul arus *inrush*.

```

int buttonPin = A0;
int ledPin8 = 8;
int ledPin9 = 9;
int ledPin10 = 10;
int ledPin11 = 11;
int ledPin12 = 12;
int ledPin13 = 13;
int buttonState1 = 0;
void setup() {
  pinMode(ledPin8, OUTPUT);
  pinMode(ledPin9, OUTPUT);
  pinMode(ledPin10, OUTPUT);
  pinMode(ledPin11, OUTPUT);
  pinMode(ledPin12, OUTPUT);
  pinMode(ledPin13, OUTPUT);
  pinMode(buttonPin, INPUT);
  buttonState1 = digitalRead(buttonPin);
}
void loop() {
  buttonState1 = digitalRead(buttonPin);
  if (buttonState1 == HIGH) {
    if (buttonState1 == HIGH); {
      delay (24.1);
      digitalWrite(ledPin8, HIGH);
      digitalWrite(ledPin9, HIGH);
      digitalWrite(ledPin10, HIGH);
      digitalWrite(ledPin11, HIGH);
      digitalWrite(ledPin12, HIGH);
      digitalWrite(ledPin13, HIGH); }}}

```

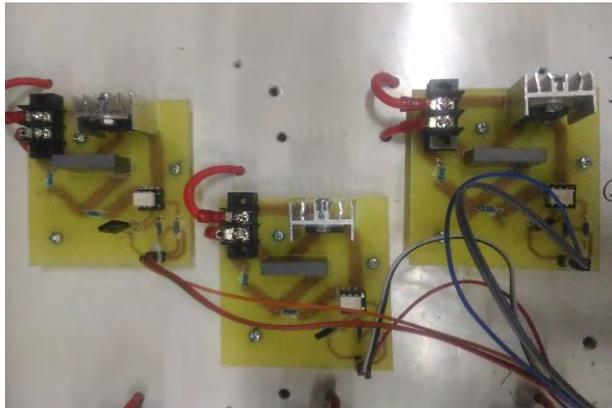
Gambar 3.11 Script program pada arduino



Gambar 3.12 Arduino yang digunakan pada modul

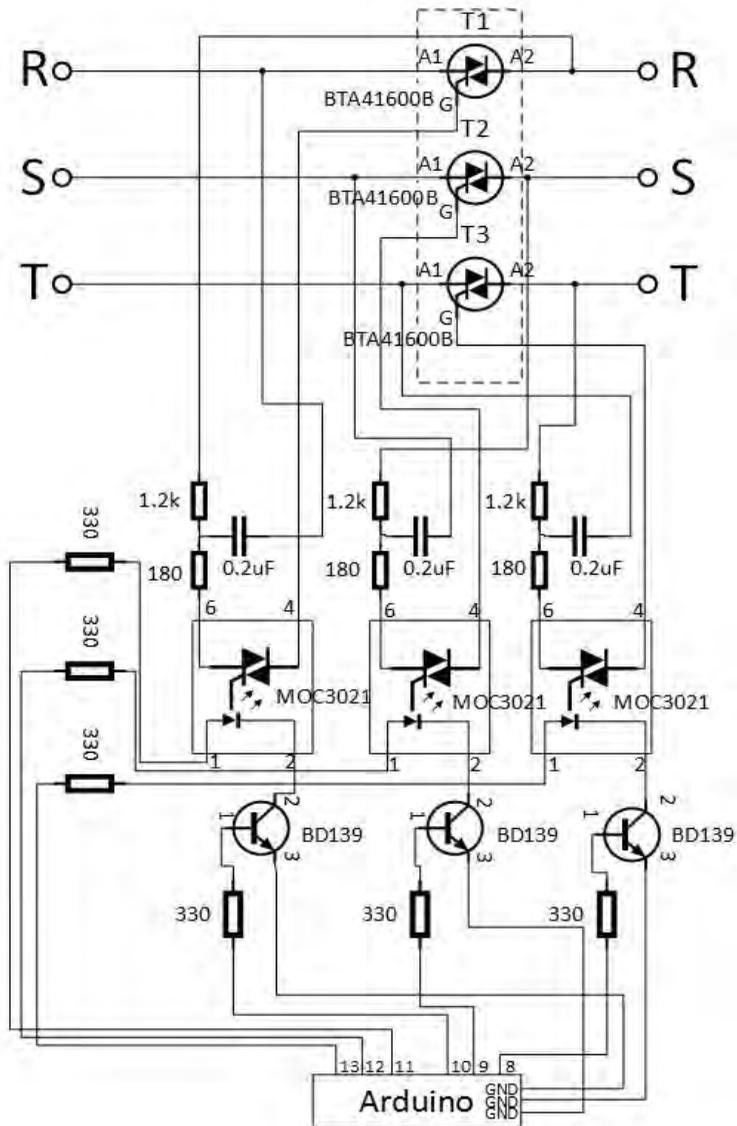
d. Rangkaian *Driver* dan TRIAC

Rangkaian driver berfungsi sebagai trigger TRIAC *BTA41600B 40A* setelah mendapat umpan dari arduino. Rangkaian ini terdiri dari resistor dan transistor *BJT BD139* yang berfungsi sebagai rangkaian switching, *Optocoupler MOC3021* yang bertugas men-trigger gate TRIAC setelah mendapat umpan dari rangkaian switching, serta rangkaian snubber yang terdiri dari resistor 180 Ohm, 1,2 kilo Ohm dan sebuah kapasitor 0,22 uF 275 VAC, berfungsi untuk melindungi *optocoupler* dari interferensi perubahan polaritas sinyal. Setelah mendapatkan masukan pada gate dari optocoupler, kondisi *off* TRIAC berubah ke kondisi forward sehingga tegangan sumber AC dapat mengalir ke transformator uji. Gambar 3.13 merupakan *driver* TRIAC yang dipasang pada modul arus *inrush*.



Gambar 3.13 *Driver* TRIAC pada modul

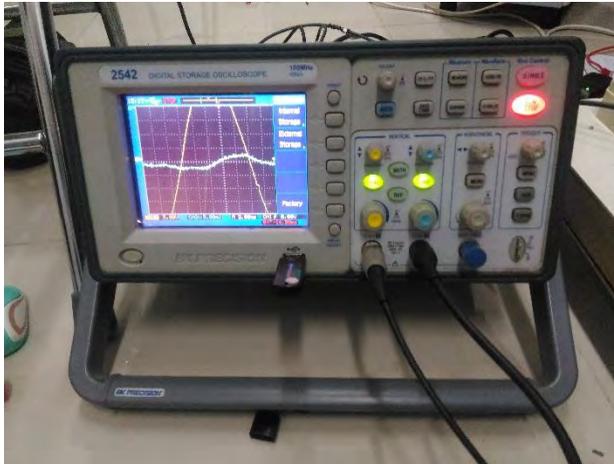
Rangkaian pada Gambar 3.14 merupakan rangkaian driver yang digunakan pada modul arus *inrush*. Pada modul ini, rangkaian *driver* TRIAC dipasang sebanyak 3 buah untuk pengujian transformator 3 fasa pada modul.



Gambar 3.14 Rangkaian *driver* TRIAC pada modul

3.1.5 BK Precision 2542 Digital Oscilloscope

Osiloskop ini digunakan untuk mengamati dan menangkap (akuisisi data) sinyal tegangan dan arus dari transformator uji untuk kemudian diolah dan dianalisa. Gambar 3.15 di bawah ini merupakan Gambar osiloskop yang digunakan pada proses akuisisi data.



Gambar 3.15 Osiloskop *BK Precision 2542*

Tabel 3.3 dibawah ini melampirkan beberapa spesifikasi dari osiloskop *BK Precision 2542*.

Tabel 3.3 Spesifikasi *BK Precision 2542*

<i>Bandwidth</i>	100 MHz
<i>Channel</i>	2
<i>Sample rate</i>	1 GSa/s
<i>Maximum Input Voltage</i>	400 V_{pk} , CAT II
<i>Vertical Sensitivity</i>	2 mV - 5 V/div
<i>Time Base Range</i>	2 ns/div – 50 s/div

Probe yang digunakan pada osiloskop *BK Precision 2542* ada 3 buah, yakni 2 buah *probe* tegangan dan 1 buah *current probe* Tektronix A622. Pada Gambar 3.16 dan Gambar 3.17 merupakan jenis *probe* yang digunakan pada proses akuisisi data menggunakan osiloskop.



Gambar 3.16 Current Probe Tektronix A622



Gambar 3.17 Probe osiloskop

Pada Tabel 3.3 dan 3.4 dibawah ini memaparkan beberapa spesifikasi utama dari *probe* yang digunakan pada osiloskop.

Tabel 3.4 Spesifikasi utama *current probe* Tektronix A622

<i>Frequency</i>	DC to 100 kHz
<i>Maximum input current</i>	100 A peak
<i>Output</i>	10 mV/A, 100 mV/A
<i>Maximum bare-wire voltage</i>	600 V (CAT III)

Tabel 3.5 Spesifikasi *probe* osiloskop

<i>Bandwidth</i>	17/150 MHz
<i>Attenuation</i>	X1/X10
<i>Cable length</i>	47" (1.2m)
<i>Maximum Input Voltage</i>	300 V CAT II

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 4

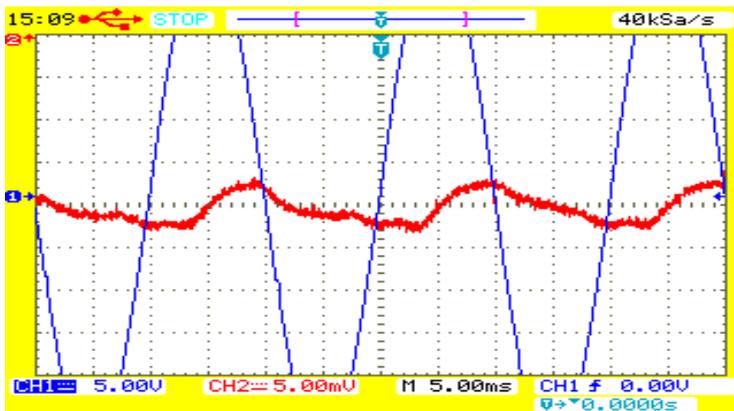
PENGUJIAN ALAT, AKUISISI DATA DAN ANALISA

4.1 Pengujian Alat

Subbab ini membahas tentang pengujian hardware modul peralatan dan proses akuisisi data, dengan tujuan agar modul peralatan dapat berhasil merekam bagaimana karakteristik arus *inrush* pada transformator uji.

Pada pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan besaran puncak arus *inrush* transformator uji dengan 2 sudut penyalan yang berbeda, yakni sudut penyalan 0 derajat dan 90 derajat. Hal ini bertujuan untuk memahami karakteristik arus *inrush* transformator uji. Secara teori, arus *inrush* memiliki magnitudo maksimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalan 0 derajat dan memiliki magnitudo minimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalan 90 derajat [11].

Sebelum melakukan kalibrasi modul, transformator uji dihubungkan secara langsung dengan sumber AC 3 fasa untuk mengetahui bagaimana karakteristik tegangan dan arus yang muncul. Hasil pengukuran menggunakan osiloskop dapat ditunjukkan pada Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 Tegangan input dan arus yang mengalir pada transformator uji tanpa menggunakan modul

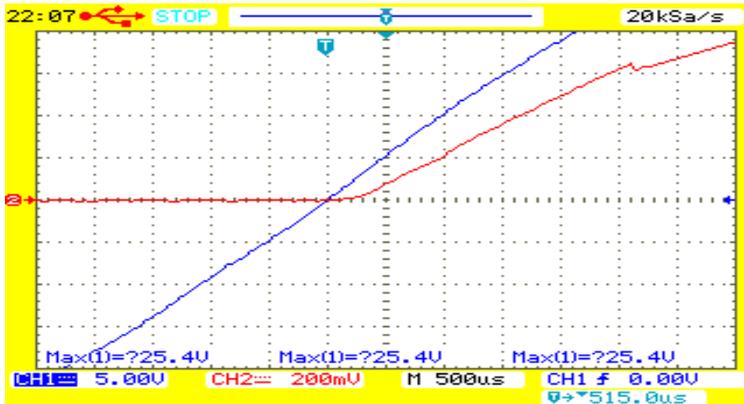
Didapatkan dari Gambar 4.1 bahwa arus yang mengalir pada transformator uji tanpa melalui modul arus *inrush* tertinggal (*lagging*) ± 90 derajat.

Langkah berikutnya adalah memastikan bahwa modul arus *inrush* bekerja seperti yang diinginkan dengan melakukan kalibrasi terlebih dahulu. Kalibrasi modul ini menggunakan osiloskop *BK Precision 2542* dengan *Setting* pada *probe* osiloskop dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

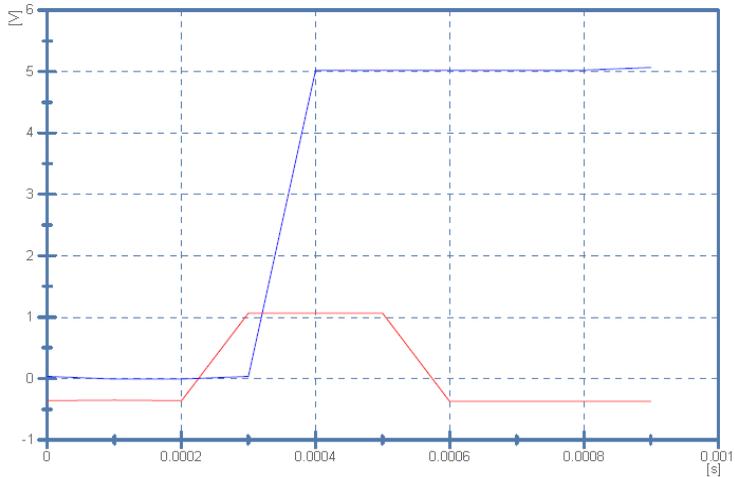
Tabel 4.1 *Setting probe* osiloskop

CH	Probe set	Osiloskop	Real Value
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 meng-estimasi *delay time* total yang diperlukan komponen pensaklaran untuk bekerja. Gambar 4.2 dibawah ini menunjukkan *delay time* dari output SSR hingga output rangkaian *zero crossing*. Didapatkan bahwa nilai *delay time* dari output SSR hingga output rangkaian *zero crossing* ± 500 us.

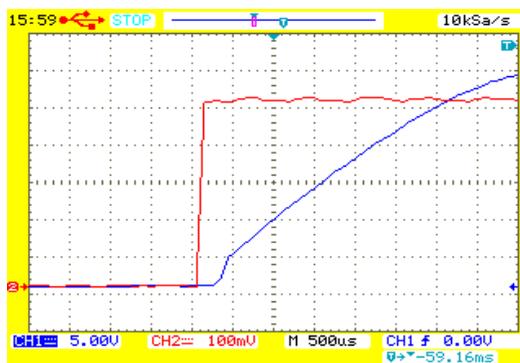


Gambar 4.2 *Delay time* dari SSR (CH1) ke rangkaian *zero crossing* (CH2)



Gambar 4.3 Delay time rangkaian zero crossing (merah) hingga ke output Arduino (biru)

Berikutnya, meng-estimasi *delay time* dari output rangkaian zero crossing hingga output arduino. Gambar 4.3 diatas menunjukkan *delay time* dari output rangkaian zero crossing hingga output arduino. Dari Gambar 4.3 didapatkan bahwa *delay time zero crossing* ke rangkaian arduino sebesar ± 100 us.



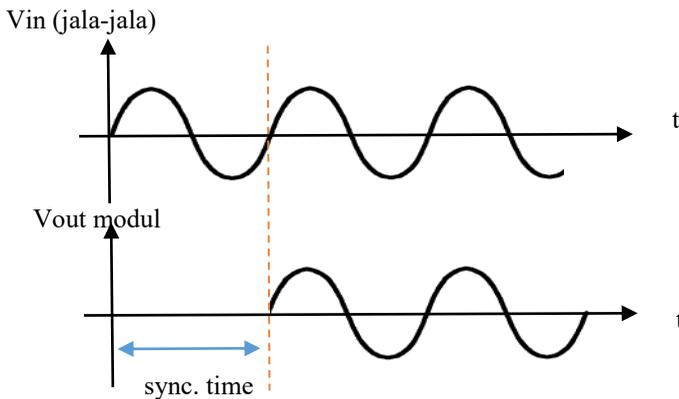
Gambar 4.4 delay time dari output arduino (CH2) hingga output TRIAC (CH1)

Langkah berikutnya adalah meng-estimasi *delay time* dari output arduino hingga output TRIAC. Gambar 4.4 diatas menunjukkan *delay time* dari output arduino hingga output TRIAC. Didapatkan *delay time* sebesar ± 300 us.

Sehingga didapatkan *delay time* total dari komponen pensaklaran sebesar ± 900 us, sehingga untuk dapat memberikan *trigger* yang tepat dengan sudut penyalan 0 derajat pada TRIAC, arduino diprogram untuk memberikan *delay time* sebesar:

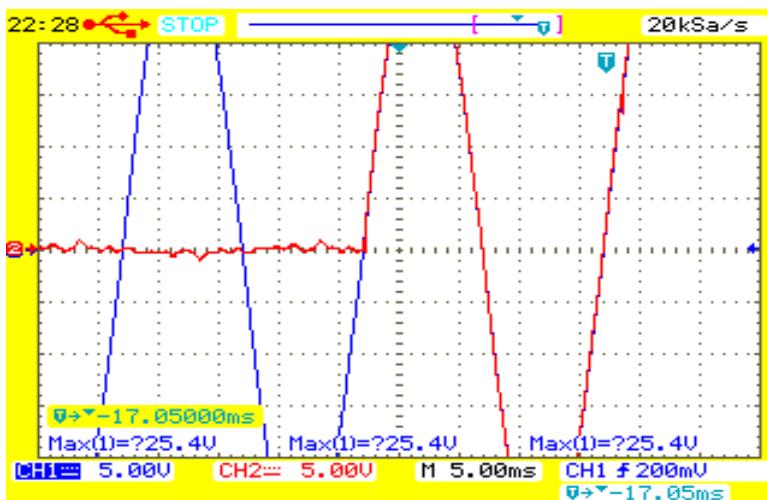
$$20 \text{ ms} - 900 \text{ us} = 19,1 \text{ ms}$$

Dengan kata lain, modul arus *inrush* bekerja setelah 1 *cycle* untuk proses sinkronisasi. Untuk memahami lebih lanjut tentang proses sinkronisasi, dapat dilihat pada Gambar 4.5 dibawah ini.

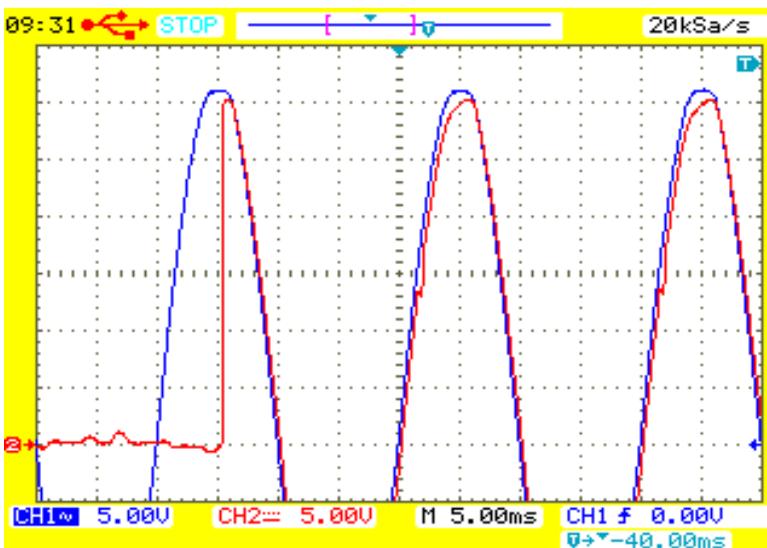


Gambar 4.5 Proses sinkronisasi modul arus *inrush* terhadap input tegangan jala-jala

Kalibrasi modul dilakukan dengan memasang *probe Channel 1* osiloskop pada tegangan jala-jala (PLN) yang terhubung dengan modul dan memasang *probe Channel 2* osiloskop pada tegangan output TRIAC.



Gambar 4.6 Kalibrasi sudut penyalan 0 derajat



Gambar 4.7 Kalibrasi sudut penyalan 90 derajat

Pada Gambar 4.6 diatas menunjukkan hasil kalibrasi setelah dimasukkan kompensasi *delay time* sebesar 19,1 ms ke program arduino pada sudut penyalan 0 derajat. Untuk melakukan sudut penyalan sebesar 90 derajat, *delay time* pada arduino ditambahkan sebesar 5 ms.

Gambar 4.7 menunjukkan hasil kalibrasi untuk sudut penyalan sebesar 90 derajat. Dari hasil pengukuran, didapatkan bahwa tingkat toleransi sebesar ± 50 us atau 0,05 % dari $\frac{1}{2}$ cycle.

4.2 Akuisisi Data

Akuisisi data pada tugas akhir ini menggunakan osiloskop *BK Precision 2542* untuk mengambil gambar sinyal dari tegangan input dan arus *inrush*. Faktor-faktor yang memengaruhi arus *inrush* adalah saturasi inti dan fluks residu. Pada studi ini dibahas pengaruh fluks residu pada transformator 1 kVA 1 fasa.

Pada proses akuisisi data dari transformator uji, yakni 1 kVA 1 fasa dan 3 kVA 3 fasa, proses akuisisi data dibagi menjadi 2, yakni pengujian sudut penyalan (0 dan 90 derajat) dan pengujian fluks residu. Urutan kerja pada proses akuisisi data dapat dijabarkan sebagai berikut:

- a. Pengujian Sudut Penyalan
 - Sudut Penyalan 0 Derajat

Delay time arduino diatur agar sudut penyalan menjadi 0 derajat. Sebelum di-*energize*, transformator mengalami proses magnetisasi selama 5 menit, kemudian transformator di-*energize* selama 3 menit. Untuk mengulangi proses yang sama, transformator didemagnetisasi selama 5 menit
 - Sudut Penyalan 90 Derajat

Delay time arduino diatur agar sudut penyalan menjadi 90 derajat. Sebelum di-*energize*, transformator mengalami proses magnetisasi selama 5 menit, kemudian transformator di-*energize* selama 3 menit. Untuk mengulangi proses yang sama, transformator didemagnetisasi selama 5 menit

b. Pengujian Fluks Residu

- Pengujian 1

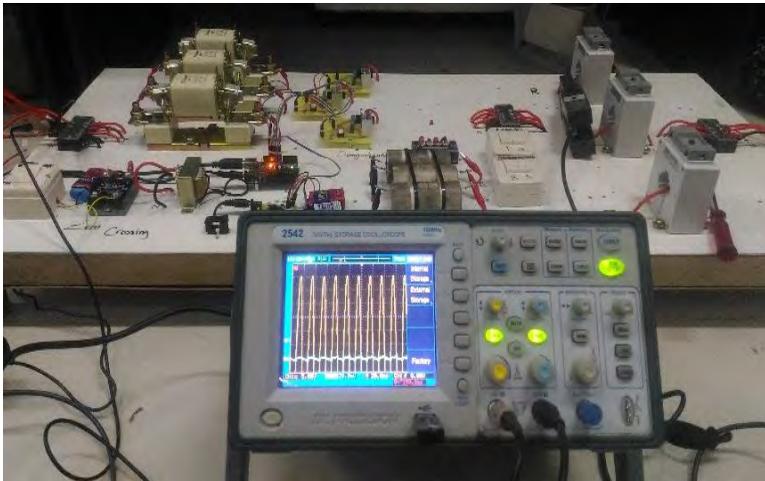
Transformator disuplai dengan *DC Power Supply* dengan arus sebesar 2A selama 1 menit, kemudian di-*energize* untuk mengukur arus *inrush*

- Pengujian 2

Transformator disuplai dengan *DC Power Supply* dengan arus sebesar 2A selama 1 menit, kemudian dilakukan proses demagnetisasi selama 5 menit. Transformator di-*energize* untuk mengukur arus *inrush*

- Pengujian 3

Transformator disuplai dengan *DC Power Supply* dengan arus sebesar 2A selama 1 menit, kemudian dilakukan proses demagnetisasi selama 15 menit. Transformator di-*energize* untuk mengukur arus *inrush*



Gambar 4.8 Proses akuisisi data arus *inrush*

Parameter pengukuran :

- Membandingkan tegangan dan arus yang muncul 1 fasa pada transformator 1 kVA 1 fasa dengan tegangan dan arus fasa R pada transformator 3 kVA 3 fasa
- Transformator 3 kVA 3 fasa dipasang dengan model hubungan Y-Y

Sinyal yang sudah terekam oleh osiloskop *BK Precision 2542* akan di-*capture* untuk dianalisa.

4.3 Hasil Pengujian

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data tegangan jala-jala input (V_{in}) dan arus yang masuk pada transformator uji (I_{nl}). Tegangan jala-jala input digunakan sebagai verifikasi bahwa pensaklaran sudah beroperasi sesuai dengan yang diinginkan. Hasil pengujian dikelompokkan menjadi 2, yakni pengujian sudut penyalan dan pengujian fluks residu.

4.3.1 Pengujian Sudut Penyalan

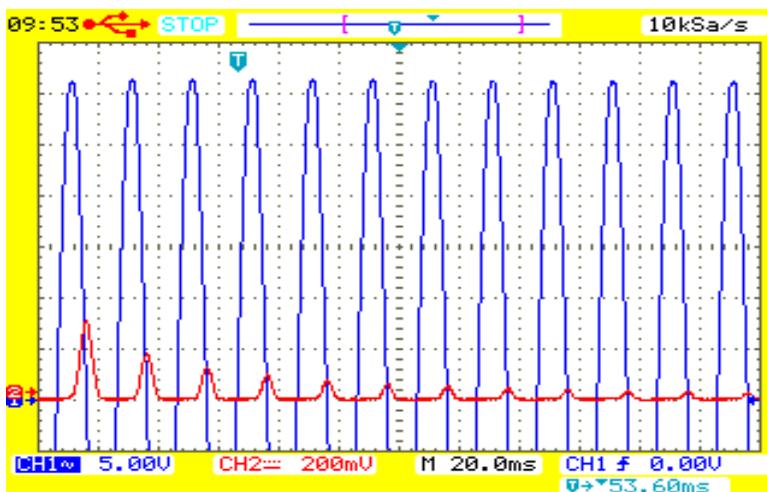
4.3.1.1 *Inrush pada Sudut Penyalan 0 Derajat*

Arduino diprogram untuk memberikan *delay time* untuk mengkompensasi *delay* dari komponen pensaklaran sebesar 19,1 ms sehingga sudut penyalan sistem menjadi 0 derajat.

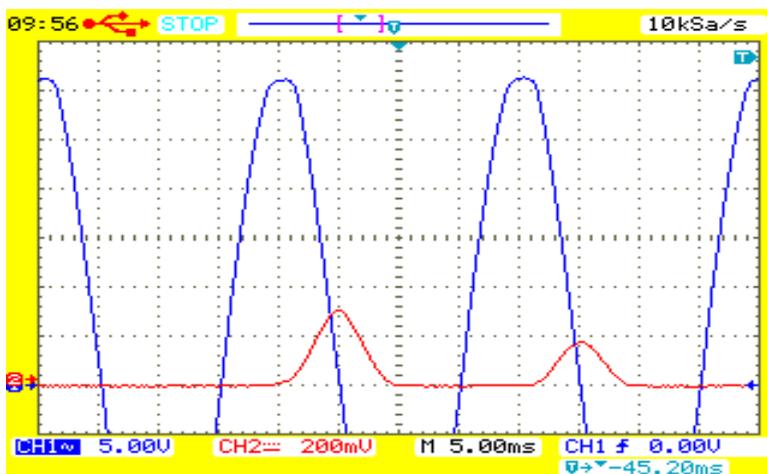
4.3.1.1.1 *Transformator 1 kVA 1 Fasa*

Salah satu hasil pengukuran arus *inrush* ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 untuk hasil pengukuran salah satu puncak arus *inrush* di bawah ini. Pengujian untuk proses akuisisi data dilakukan sebanyak 5 kali masing-masing pada kedua transformator uji.

Pengukuran pengujian menggunakan alat ukur osiloskop *BK Precision 2542* menggunakan 2 *channel*. Pada *Channel 1*, *Probe* osiloskop dipasang pada input tegangan pada modul, yakni tegangan jala-jala PLN. Untuk *Channel 2*, *Current Probe* dipasang pada output dari TRIAC, sehingga dapat diamati arus yang mengalir dari tegangan jala-jala (PLN) ke transformator uji.



Gambar 4.9 Hasil salah satu pengukuran arus *inrush* (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalan 0 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa



Gambar 4.10 Salah satu bentuk arus *inrush* dengan sudut penyalan 0 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa

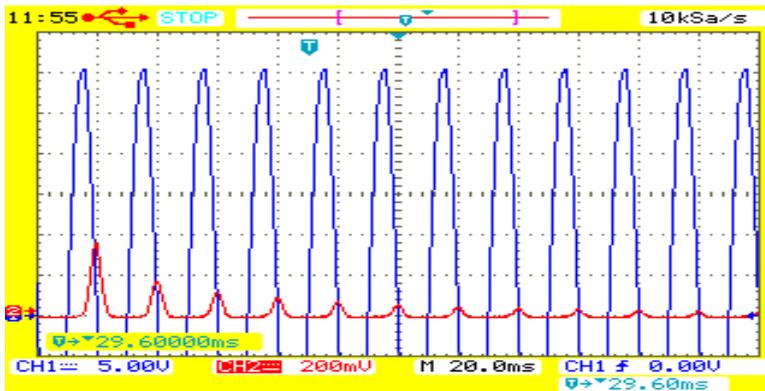
Hasil yang didapatkan dari pengujian dengan sudut penyalaaan 0 derajat untuk transformator 1 kVA 1 fasa secara detil ditampilkan pada Tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran arus *inrush* transformator 1 kVA 1 fasa dengan sudut penyalaaan 0 derajat

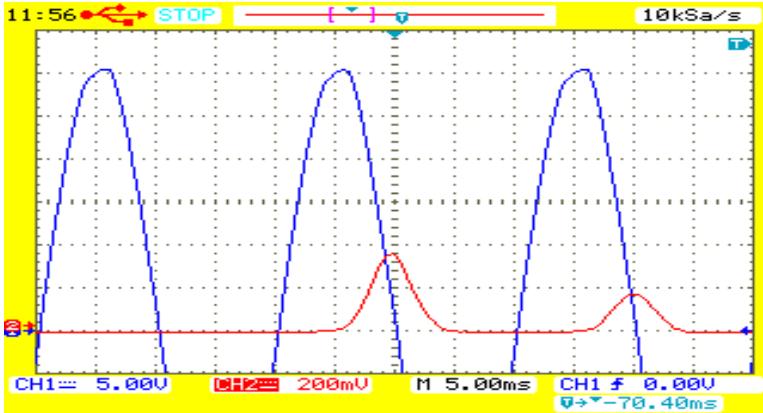
Pengujian ke	<i>Inrush Peak</i>	Arus No Load (I_{nl})	Arus Nominal (I_n)	Presentase <i>Inrush Peak</i> terhadap	
				I_{nl}	I_n
1	29,5 A	0,28 A	4,54 A	$105,3I_{nl}$	$6,5I_n$
2	32 A	0,28 A	4,54 A	$114,3I_{nl}$	$7,05I_n$
3	28,8 A	0,28 A	4,54 A	$102,9I_{nl}$	$6,34I_n$
4	29 A	0,28 A	4,54 A	$103,6I_{nl}$	$6,39I_n$
5	31,5 A	0,28 A	4,54 A	$157,1I_{nl}$	$6,94I_n$

Dari Tabel 4.2 didapatkan bahwa karakteristik arus *inrush* transformator 1 kVA 1 fasa dengan sudut penyalaaan 0 derajat berkisar dari $6,34I_n$ hingga $7,05I_n$.

4.3.1.1.2 Transformator 3 kVA 3 Fasa



Gambar 4.11 Hasil salah satu pengukuran arus *inrush* (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalaaan 0 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa



Gambar 4.12 Salah satu bentuk arus *inrush* dengan sudut penyalan 0 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa

Modul disambungkan dengan transformator 3 kVA 3 fasa dengan konfigurasi hubungan Y-Y. Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan salah satu sinyal tegangan dan arus hasil pengukuran menggunakan osiloskop. Hasil pengukuran arus *inrush* transformator uji 3 kVA 3 fasa dijabarkan pada Tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.3 Hasil pengukuran arus *inrush* transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalan 0 derajat

Pengujian ke	<i>Inrush Peak</i>	Arus <i>No Load</i> (I_{nl})	Arus Nominal (I_n)	Presentase <i>Inrush Peak</i> terhadap	
				I_{nl}	I_n
1	35 A	2,82 A	13,6 A	$12,41I_{nl}$	$2,57I_n$
2	36 A	2,82 A	13,6 A	$12,77I_{nl}$	$2,65I_n$
3	36 A	2,82 A	13,6 A	$12,77I_{nl}$	$2,65I_n$
4	28 A	2,82 A	13,6 A	$9,93I_{nl}$	$2,06I_n$
5	41 A	2,82 A	13,6 A	$14,54I_{nl}$	$3,01I_n$

Dari Tabel 4.3 diatas didapatkan bahwa karakteristik arus *inrush* transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalan 0 derajat berkisar dari $2,06I_n$ hingga $3,01I_n$.

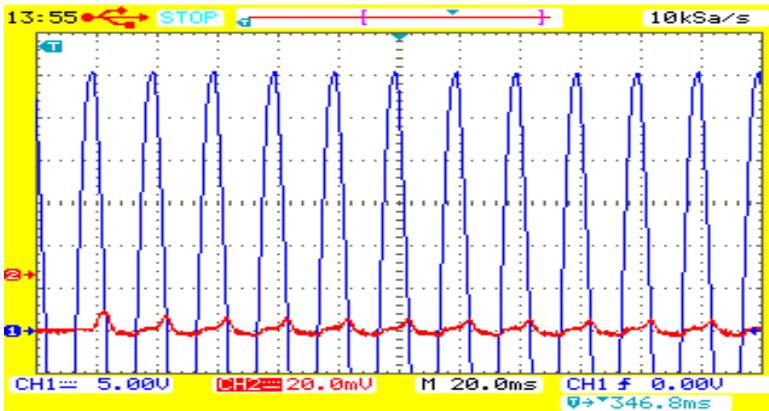
4.3.1.2 Inrush pada Sudut Penyalaan 90 Derajat

Pada sudut penyalaan 90 derajat, arduino diprogram untuk memberikan *delay time* sebesar 24,1 ms, yakni menambahkan ekstra *delay* sebesar 5 ms, sehingga penyalaan modul mendekati 90 derajat.

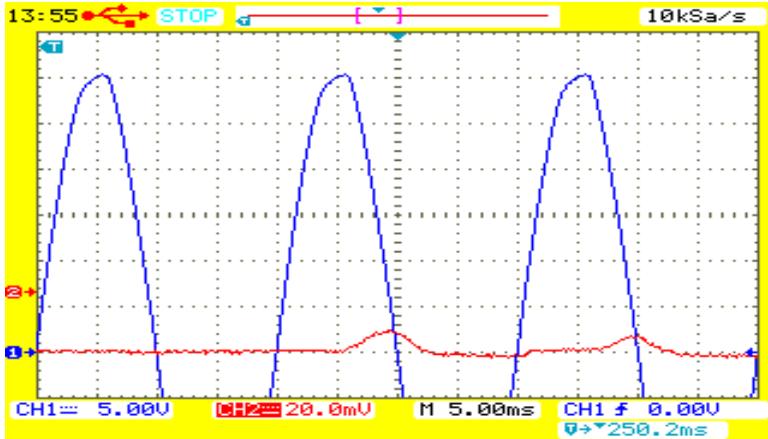
4.3.1.2.1 Transformator 1 kVA 1 Fasa

Salah satu hasil pengukuran arus *inrush* ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 untuk hasil pengukuran salah satu puncak arus *inrush* di bawah ini. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali untuk setiap transformator uji.

Pengukuran pengujian menggunakan alat ukur osiloskop *BK Precision 2542* menggunakan 2 *channel*. Pada *Channel 1*, *Probe* osiloskop dipasang pada input tegangan pada modul, yakni tegangan jala-jala PLN. Untuk *Channel 2*, *Probe Current Probe* dipasang pada output dari TRIAC, sehingga dapat diamati arus yang mengalir dari tegangan jala-jala (PLN) ke transformator uji.



Gambar 4.13 Hasil salah satu pengukuran arus *inrush* (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalaan 90 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa



Gambar 4.14 Salah satu bentuk arus *inrush* dengan sudut penyalan 90 derajat pada transformator 1 kVA 1 fasa

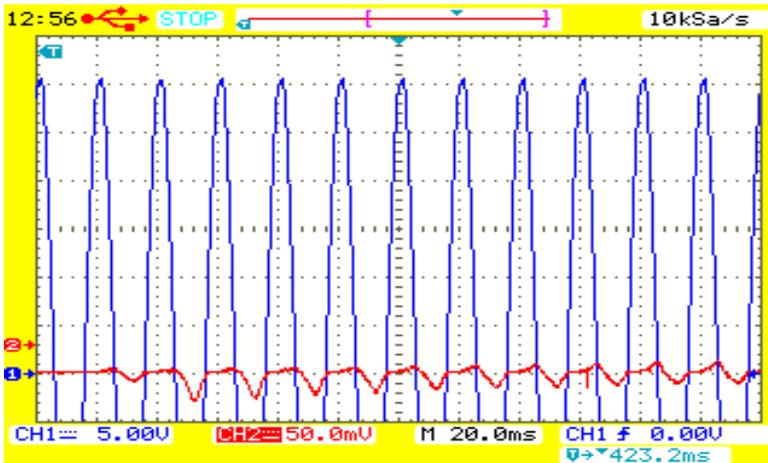
Hasil yang didapatkan dari pengujian transformator 1 kVA 1 fasa dengan sudut penyalan 90 derajat secara detail ditampilkan pada Tabel 4.4 dibawah ini.

Tabel 4.4 Hasil pengukuran arus *inrush* transformator 1 kVA 1 fasa dengan sudut penyalan 90 derajat

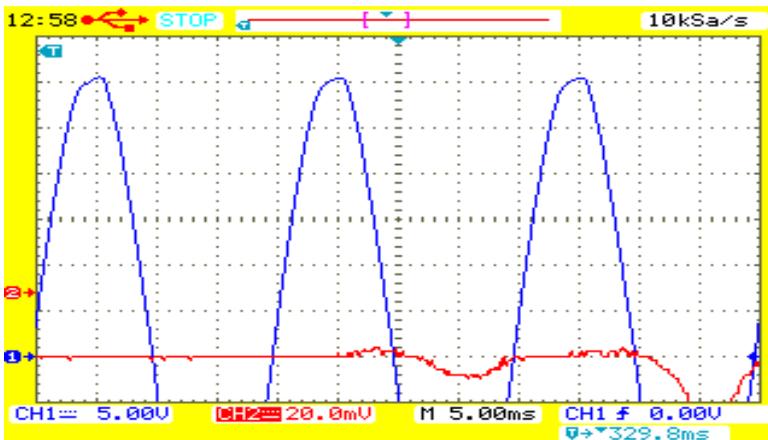
Pengujian ke	<i>Inrush Peak</i>	Arus No Load (I_{nl})	Arus Nominal (I_n)	Presentase <i>Inrush Peak</i> terhadap	
				I_{nl}	I_n
1	1,5 A	0,28 A	4,54 A	$5,36I_{nl}$	$0,33I_n$
2	2,3 A	0,28 A	4,54 A	$8,2I_{nl}$	$0,5I_n$
3	3,5 A	0,28 A	4,54 A	$12,5I_{nl}$	$0,77I_n$
4	5 A	0,28 A	4,54 A	$17,9I_{nl}$	$1,1I_n$
5	2,9 A	0,28 A	4,54 A	$10,4I_{nl}$	$0,64I_n$

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 4.4, didapatkan bahwa arus *inrush* transformator 1 kVA 1 fasa dengan sudut penyalan 90 derajat berkisar dari $0,33I_n$ hingga $1,1I_n$.

4.3.1.2.2 Transformator 3 kVA 3 Fasa



Gambar 4.15 Hasil salah satu pengukuran arus *inrush* (CH2) terhadap tegangan jala-jala (CH1) dengan sudut penyalan 90 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa



Gambar 4.16 Salah satu bentuk arus *inrush* dengan sudut penyalan 90 derajat pada transformator 3 kVA 3 fasa

Modul disambungkan dengan transformator 3 kVA 3 fasa dengan konfigurasi hubungan Y-Y. Salah satu hasil pengujian disajikan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 diatas.

Untuk hasil pengujian transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalan sebesar 90 derajat, hasil pengukuran arus *inrush* ditampilkan pada Tabel 4.5 dibawah ini,

Tabel 4.5 Hasil pengukuran arus *inrush* transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalan 90 derajat

Pengujian ke	<i>Inrush Peak</i>	Arus No Load (I_{nl})	Arus Nominal (I_n)	Presentase <i>Inrush Peak</i> terhadap	
				I_{nl}	I_n
1	4,9 A	2,82 A	13,6 A	$1,74I_{nl}$	$0,36I_n$
2	2,3 A	2,82 A	13,6 A	$0,82I_{nl}$	$0,17I_n$
3	3,5 A	2,82 A	13,6 A	$1,24I_{nl}$	$0,26I_n$
4	5 A	2,82 A	13,6 A	$1,77I_{nl}$	$0,36I_n$
5	2,9 A	2,82 A	13,6 A	$1,03I_{nl}$	$0,21I_n$

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 4.5, didapatkan bahwa arus *inrush* transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalan 90 derajat berkisar dari $0,17I_n$ hingga $0,36I_n$.

4.3.2 Pengujian Fluks Residu

Salah satu faktor yang mempengaruhi arus *inrush* adalah fluks residu (*residual flux*). Dalam pengujian ini dilakukan 3 macam pengujian pada transformator 1 kVA 1 fasa untuk mengetahui bagaimana pengaruh fluks residu terhadap *tren* dari arus *inrush* transformator uji.

4.3.2.1 Pengujian 1

Pada Percobaan 1, Transformator disuplai dengan DC Power Supply dengan arus sebesar 2A selama 1 menit, kemudian di-energize untuk mengukur arus *inrush*. Tidak ada proses demagnetisasi pada pengujian ini. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.6 dibawah ini.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian 1

Pengujian ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu (I_{irf})	Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})	Presentase I_{irf} Terhadap I_{inr}
1	54 A	30,16 A	$1,79I_{inr}$
2	61 A	30,16 A	$2,02I_{inr}$
3	62 A	30,16 A	$2,05I_{inr}$

Dari Tabel 4.6 diatas didapatkan bahwa transformator yang diberi fluks residu memiliki *magnitude* arus *inrush* yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa diberi fluks residu, yakni sekitar $1,79I_{inr}$ - $2,05I_{inr}$.

4.3.2.2 Pengujian 2

Proses yang dilakukan mirip dengan proses pada Pengujian 1, namun sebelum di-*energize*, transformator uji terlebih dahulu didemagnetisasi selama 5 menit. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil pengujian dipaparkan pada Tabel 4.7 dibawah ini.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian 2

Pengujian ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu (I_{irf})	Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})	Presentase I_{irf} Terhadap I_{inr}
1	40 A	30,16 A	$1,33I_{inr}$
2	40,5 A	30,16 A	$1,34I_{inr}$
3	40 A	30,16 A	$1,33I_{inr}$

Tabel 4.7 diatas menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian ini mengalami penurunan rasio terhadap arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu dibanding pada Pengujian 1. Rasio berkisar antara $1,33I_{inr}$ - $1,34I_{inr}$.

4.3.2.3 Pengujian 3

Pada Pengujian 3, proses yang dilakukan hampir sama dengan Pengujian 2, namun waktu demagnetisasi diperpanjang hingga 15 menit. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil pengujian dipaparkan pada Tabel 4.8 dibawah ini.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian 3

Pengujian ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu (I_{irf})	Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})	Presentase I_{irf} Terhadap I_{inr}
1	34 A	30,16 A	$1,13I_{inr}$
2	34,5 A	30,16 A	$1,14I_{inr}$
3	31 A	30,16 A	$1,03I_{inr}$

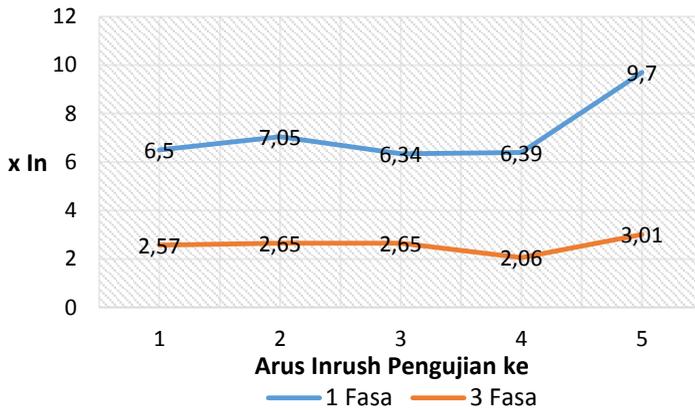
Tabel 4.7 diatas menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian ini mengalami penurunan rasio terhadap arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu dibanding pada Pengujian 2. Rasio berkisar antara $1,03I_{inr}$ - $1,14I_{inr}$.

4.4 Analisa Data

4.4.1 Arus *Inrush* pada Sudut Penyalaan 0 derajat

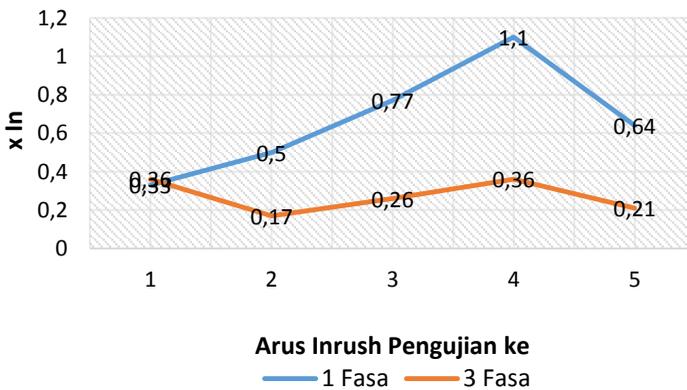
Pada Gambar 4.17 dibawah ini menunjukkan hasil pengujian dari transformator uji 1 kVA 1 fasa dan transformator 3 kVA 3 fasa dengan sudut penyalaan 0 derajat.

Gambar 4.16 menyajikan rasio perbandingan transformator uji terhadap I_n masing-masing transformator uji. Dari Gambar 4.16 didapatkan bahwa rasio kenaikan arus *inrush* terhadap I_n pada transformator 1 kVA 1 fasa berkisar antara 6-9 kali, lebih tinggi dibandingkan dengan rasio perbandingan dari transformator 3 kVA 3 fasa yang berkisar antara 2-3 kali pada sudut penyalaan yang sama.



Gambar 4.17 Perbandingan rasio arus *inrush* terhadap In masing-masing transformator uji dengan sudut 0 derajat

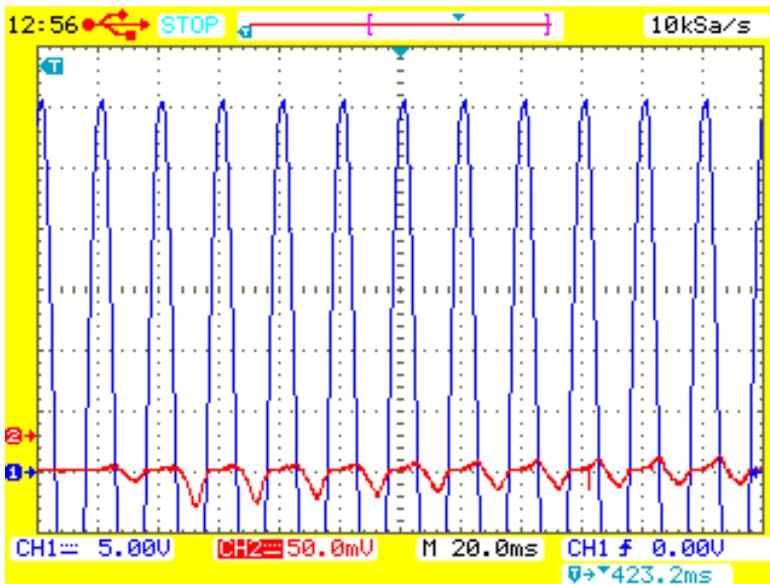
4.4.2 Arus *Inrush* pada Sudut Penyalaan 90 derajat



Gambar 4.18 Perbandingan rasio arus *inrush* terhadap In masing-masing transformator uji dengan sudut 90 derajat

Pada hasil pengujian kedua transformator uji dengan sudut penyalan 90 derajat, dijabarkan pada Gambar 4.18 diatas dalam bentuk grafik.

Gambar 4.18 menyajikan rasio perbandingan transformator uji terhadap I_n masing-masing. Dari Gambar 4.18 didapatkan bahwa rasio kenaikan arus *inrush* terhadap I_n pada transformator 1 fasa berkisar antara 0,33-1,1 kali, lebih tinggi dibandingkan dengan rasio perbandingan dari transformator 3 fasa yang berkisar antara 0,17-0,36 kali.



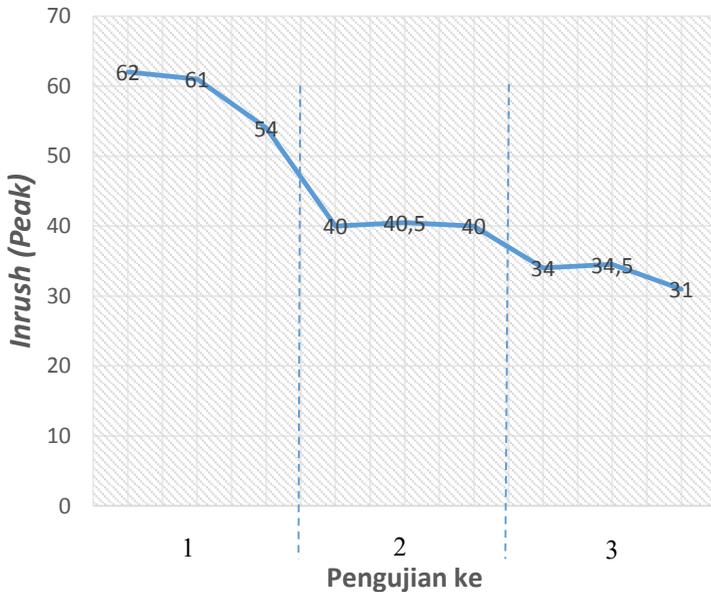
Gambar 4.19 Arus *inrush* pada transformator 3 kVA 3 fasa

Pada sudut penyalan 90 derajat dari transformator 3 kVA 3 fasa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.19, puncak arus awal berada di nilai yang cukup kecil, namun puncak arus berikutnya menjadi puncak arus maksimum dan berada pada sisi polaritas negatif tegangan. Hal ini kemungkinan disebabkan 2 faktor yakni : 1) Ketika transformator menerima input tegangan pada sudut penyalan 90 derajat, arus yang diserap transformator 3 kVA 3 fasa belum cukup untuk melakukan proses magnetisasi pada inti transformator uji, sehingga pada setengah siklus

berikutnya transformator uji membutuhkan arus untuk melakukan proses magnetisasi inti yang mengakibatkan lonjakan arus *inrush* lebih tinggi di posisi ini. 2) Pada tranafomator 3 kVA 3 fasa, arus yang mengalir merupakan resultan dari 3 belitan (3 fasa) di dalam transformator yang berada dalam inti yang sama. 3) Persebaran fluks pada inti transformator 3 fasa.

4.4.3 Pengaruh Fluks Residu pada Tren Arus *Inrush*

Gambar 4.20 menunjukkan hasil akuisisi data dari *pengujian 1* hingga *pengujian 3* tentang pengaruh fluks residu terhadap *tren* arus *inrush* dari transformator uji.



Gambar 4.20 Grafik pengaruh fluks residu terhadap *tren* arus *inrush*

Pada *Pengujian 1*, transformator uji diinjeksi dengan arus DC 2A selama 1 menit kemudian transformator uji di-*energize*, sehingga tidak ada proses demagnetisasi pada *Pengujian 1*. Arus *inrush* pada *Pengujian*

1 terukur 54-62A dengan rasio terhadap arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu berkisar antara $1,79I_{inr}$ - $2,05I_{inr}$.

Pada *Pengujian 2*, transformator uji diinjeksi dengan arus DC 2A selama 1 menit kemudian transformator uji didemagnetisasi selama 5 menit. Berikutnya transformator uji di-*energize*. Arus *inrush* pada *Pengujian 2* terukur 40-40,5A dengan rasio terhadap arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu berkisar antara $1,33I_{inr}$ - $1,34I_{inr}$.

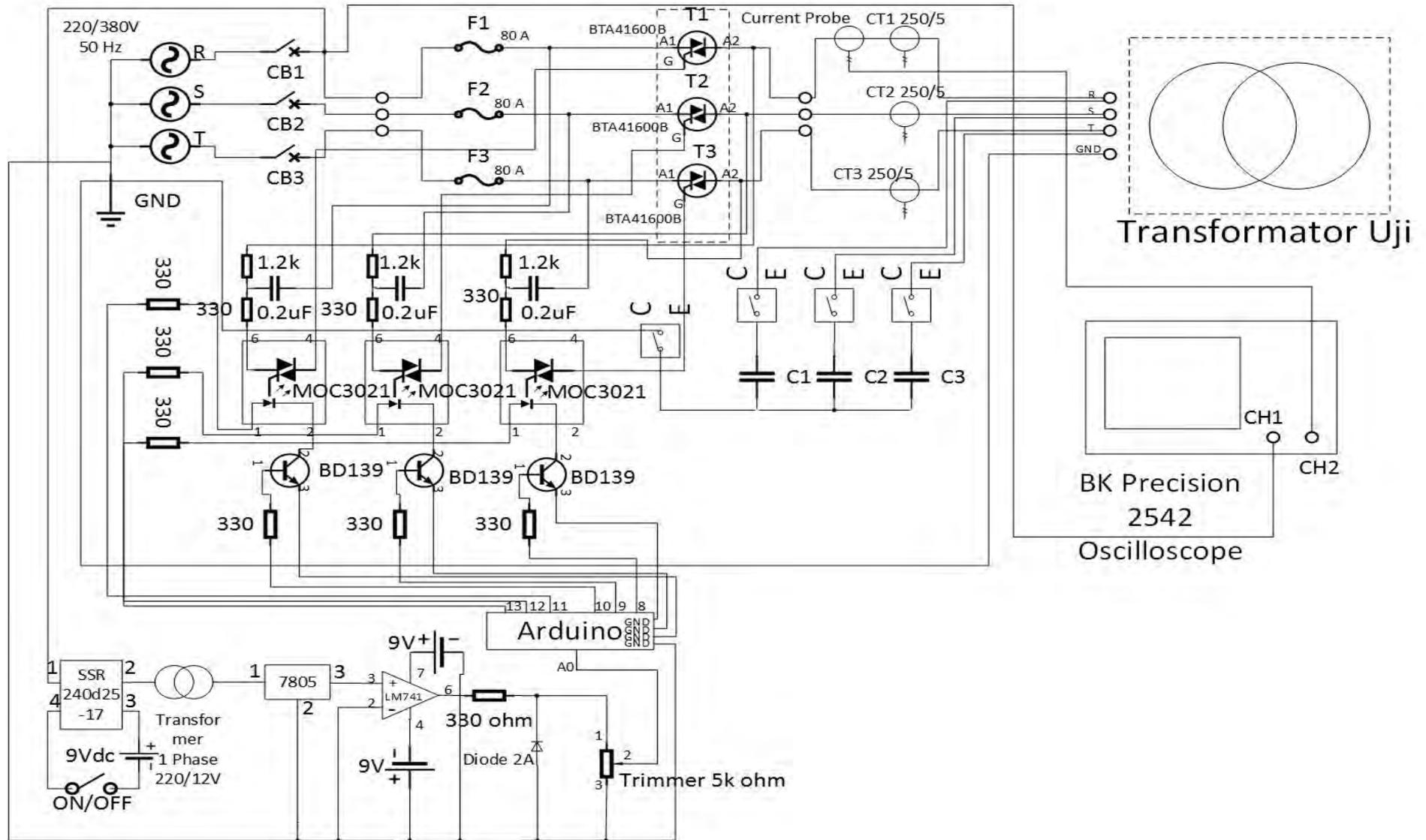
Untuk *Pengujian 3*, transformator uji diinjeksi dengan arus DC 2A selama 1 menit kemudian transformator uji didemagnetisasi selama 15 menit. Berikutnya transformator uji di-*energize*. Arus *inrush* pada *Pengujian 3* terukur 31-34,5A dengan rasio terhadap arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu berkisar antara $1,03I_{inr}$ - $1,14I_{inr}$.

Dari Gambar 4.20 didapatkan bahwa *tren* arus *inrush* berbanding terbalik terhadap waktu demagnetisasi. Dari ketiga *pengujian* ini, didapatkan *tren* arus *inrush* terhadap fluks residu. Pada *pengujian 1*, dimana tidak ada proses demagnetisasi, arus *inrush* mencapai nilai tertinggi dibandingkan 2 *pengujian* lainnya. Hal ini berarti semakin besar fluks residu yang tersimpan di dalam transformator, arus *inrush* yang dihasilkan akan semakin besar. Selain itu, waktu demagnetisasi arus *inrush* ikut memengaruhi besar arus *inrush* yang muncul.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN 1

Rangkaian modul arus *inrush*



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari studi tentang karakteristik arus *inrush* pada transformator 1 kVA 1 fasa dan 3 kVA 3 fasa berbasis eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Pada sudut penyalan 0 derajat, rasio puncak maksimum arus *inrush* terhadap I_n pada transformator 1 kVA 1 fasa jauh lebih tinggi dibandingkan pada transformator 3 kVA 3 fasa. Perbandingan rasio arus *inrush* transformator 1 kVA 1 fasa dan 3 kVA 3 fasa berdasarkan hasil pengujian berkisar pada 1:3.
2. Pada sudut penyalan 90 derajat, rasio puncak maksimum arus *inrush* terhadap I_n pada transformator 1 kVA 1 fasa jauh lebih tinggi dibandingkan pada transformator 3 kVA 3 fasa. Perbandingan rasio arus *inrush* transformator 1 kVA 1 fasa terhadap 3 kVA 3 fasa berdasarkan hasil pengujian berkisar pada 1,94-3 kali lipat.
3. Semakin besar kadar fluks residu, arus *inrush* yang dihasilkan akan semakin besar.

5.2 Penelitian Selanjutnya

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang penentuan / pengukuran fluks residu pada transformator 3 fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nicola Chiesa, Power Transformer Modeling for *Inrush* Current Calculation. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Jun. 2010.
- [2] M. Steurer and K. Frohlich, “The impact of *Inrush* Currents on the Mechanical stress of High Voltage Power Transformer Coils,” IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 1, pp. 155–160, Jan. 2002.
- [3] J. F. Witte, F. P. DeCesaro, and S. R. Mendis, “Damaging Long-term Overvoltages on Industrial Capacitor Banks Due to Transformer Energization *Inrush* Currents,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 4, pp. 1107–1115, Jul. 1994.
- [4] G. H. Cheng and Z. Xu, “Analysis and Control of Harmonic Overvoltages During Power System Restoration,” in Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005, pp. 1–7.
- [5] R. A. Turner and K. S. Smith, “Resonance Excited by Transformer *Inrush* Current in Inter-connected Offshore Power Systems,” in Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS '08, Oct. 5–9, 2008, pp. 1–7.
- [6] G. Bertagnolli, Short-Circuit Duty of Power Transformers, Second Revised Edition. ABB, 1996.
- [7] T. R. Specht, “Transformer Magnetizing *Inrush* Current,” AIEE Trans, vol. 70, pp. 323–328, 1951.
- [8] J. F. Holcomb, “Distribution transformer magnetizing *inrush* current,” Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III (Power Apparatus and Systems), vol. 80, no. 57, pp. 697–702, Dec. 1961.
- [9] Chapman, Stephen. J. “*Electric Machinery Fundamentals : Fourth Edition*,” McGraw-Hill Education, New York, 2005.
- [10] Bishop, Anthony. “*Solid-State Relay Handbook*,” Crydom

Company, 1986.

- [11] Reliable Demagnetization of Transformer Cores. “Influence of Residual Magnetism on *Inrush* Current”, OMICRON electronics, 2006.

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Muhammad Irfan Islami lahir di Gresik pada tanggal 05 Desember 1994. Anak kedua dari 4 bersaudara ini menempuh pendidikan dasar di MINU Lumpur Gresik pada tahun 2000-2006, kemudian SMPNU 1 Gresik pada tahun 2006-2009, dan lulus dari SMAN 1 Gresik pada tahun 2012. Pada tahun 2012 juga, penulis diterima sebagai mahasiswa di jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

Semasa kuliah, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Jurusan sebagai Kepala Biro Sosial Keprofesian PENGMAS HIMATEKTRO ITS 2014-2015 dan juga aktif sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi 2015-2016.