



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN *LEG* YANG BERBEDA BERBASIS EKSPERIMEN**

Aditya Wahyu Ramadhan  
NRP 0711134000124

Dosen Pembimbing  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**FINAL PROJECT - TE 141599**

**ANALYSIS OF INRUSH CURRENT CHARACTERISTIC ON  
3-PHASE TRANSFORMER WITH DIFFERENT LEG BASED  
ON EXPERIMENT**

Aditya Wahyu Ramadhan  
NRP 07111340000124

Advisor  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “**Analisis Karakteristik Arus *Inrush* pada Transformator 3 Fasa dengan *Leg* yang Berbeda Berbasis Eksperimen**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, Juni 2018



Aditya Wahyu Ramadhan

NRP. 07111340000124



**ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS *INRUSH* PADA  
TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN *LEG* YANG  
BERBEDA BERBASIS EKSPERIMEN**

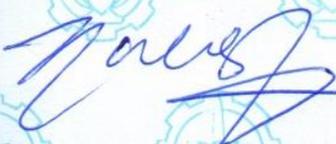
**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

  
Dr. Eng. I Made Yulistya N., ST., M.Sc.  
NIP 19700712 199802 1001

  
IGN Satriyadi H., ST., MT.  
NIP 19730123 200212 1001





# ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN *LEG* YANG BERBEDA BERBASIS EKSPERIMEN

**Nama** : Aditya Wahyu Ramadhan  
**NRP** : 0711134000124  
**Pembimbing I** : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
**Pembimbing II** : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

## ABSTRAK

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

**Kata kunci:** arus *inrush*, eksperimen, transformator 3-fasa, *leg* berbeda

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

# **ANALYSIS OF INRUSH CURRENT CHARACTERISTIC ON 3-PHASE TRANSFORMER WITH DIFFERENT LEG BASED ON EXPERIMENT**

**Name** : Aditya Wahyu Ramadhan  
**NRP** : 0711134000124  
**1<sup>st</sup> Advisor** : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.  
**2<sup>nd</sup> Advisor** : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

## ***ABSTRACT***

*Inrush current is the condition when transformer were firstly injected by voltage source which could lead to spiking current. This phenomenon may lead to disruption on protection system and transformer itself. This study , transformer with different legs were used to find out the inrush current characteristic and the impact of transformer legs size. 5 kVA-Three phase transformers with conventional core type were experimented in this study to find out the inrush current characteristics. Transformer were tested on transient condition, which is when the transformer were injected by voltage source. Transformer were tested on each phase alternately then it was tested on its three phases simultaneously. The experiment results shown that phase S generated the highest inrush current and no load current than the other phases. This could happen because phase S had the biggest leg among the others. Besides, phase S shown magnetization curve of transformer core on its non-saturation curve, which affected the current characteristic generated by the transformer.*

***Keyword: inrush current, experiment, 3-phase transformer, different leg***

*( Halaman ini sengaja dikosongkan )*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat waktunya. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

### **ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS *INRUSH* PADA TRANSFORMATOR 3 FASA DENGAN *LEG* YANG BERBEDA BERBASIS EKSPERIMEN**

Dalam penyusunan buku tugas akhir ini banyak hambatan dan rintangan yang penulis hadapi. Namun, pada akhirnya penulis dapat melaluinya berkat adanya bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak baik secara moral maupun spiritual. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Allah SWT Yang Maha Kuasa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Kedua Orang tua penulis, Bapak Dawi dan Ibu Tatik Agus Hidayati yang tiada henti memberikan doa, nasehat, dan semangat kepada penulis sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan.
3. Kakak penulis, Dilla Hilda Elfazia yang selalu memberikan semangat dan tidak bosan dalam mengingatkan penulis untuk segera menyelesaikan tugas akhirnya.
4. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc dan I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
5. Kawan-kawan asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
6. Mas Arief Budi Ksatria, ST., MT. dan Mas Mochammad Wahyudi, ST., MT. yang telah sabar memberikan ilmu dalam proses pengerjaan tugas akhir ini layaknya pembimbing ketiga dan keempat.
7. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Departemen Teknik Elektro-FTE, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

8. Seluruh keluarga besar e-53 dan e-54 atas semangat dan motivasi selama 5 tahun di Departemen Teknik Elektro-FTE, ITS.
9. Sahabat-sahabat penulis yang selalu memberikan suasana baru dan pencerahan disaat menemui jalan buntu.
10. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB II TRANSFORMATOR DAN ARUS <i>INRUSH</i></b> .....	<b>5</b>
2.1 Transformator.....	5
2.1.1 Pengertian Transformator .....	5
2.1.2 Konstruksi Transformator .....	5
2.1.3 Transformator Ideal .....	6
2.1.4 Transformator Tidak Ideal .....	7
2.1.5 Transformator Tiga Fasa .....	7
2.1.6 Histerisis .....	9
2.2 Arus <i>Inrush</i> .....	10
<b>BAB III METODOLOGI EKSPERIMEN DAN</b> <b>PENGUKURAN ARUS <i>INRUSH</i></b> .....	<b>13</b>
3.1 Spesifikasi Transformator Uji .....	13
3.2 Eksperimen Pengukuran Arus <i>Inrush</i> .....	15
3.3 Alat Pengukuran Arus <i>Inrush</i> .....	16
3.3.1 Sumber 3-Fasa.....	17
3.3.2 Komponen Pensaklaran .....	17
3.3.3 Perangkat Akuisisi Data.....	18
3.3.4 Transformator Arus (CT).....	19
3.3.5 Demagnetisasi .....	20
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISIS EKSPERIMEN</b> <b>PENGUKURAN ARUS <i>INRUSH</i></b> .....	<b>23</b>
4.1 Pengujian Kurva Magnetisasi Inti .....	23
4.2 Akuisisi Data.....	34
4.3 Hasil Pengujian .....	36
4.3.1 Hasil Pengukuran Pengujian 1 .....	36

4.3.1.1	<i>Hasil Pengukuran Fasa R</i> .....	36
4.3.1.2	<i>Hasil Pengukuran Fasa S</i> .....	37
4.3.1.3	<i>Hasil Pengukuran Fasa T</i> .....	38
4.3.2	Hasil Pengukuran Pengujian 2 .....	40
4.3.3	Hasil Pengukuran Pegujian 3 .....	43
4.3.3.1	<i>Hasil Pengukuran Fasa R</i> .....	43
4.3.3.2	<i>Hasil Pengukuran Fasa S</i> .....	50
4.3.4	Hasil Pengukuran Pengujian 4 .....	55
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP</b> .....	<b>70</b>
5.1	Kesimpulan .....	71
5.2	Saran .....	72
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>73</b>
	<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>75</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Transformator tipe inti (core-form) [2] .....	6
<b>Gambar 2. 2</b>	Transformator tipe cangkang (shell-form) [2] .....	6
<b>Gambar 2. 3</b>	Transformator tiga fasa tipe inti (core-form) [11].....	8
<b>Gambar 2. 4</b>	Transformator tiga fasa tipe cangkang (shell-form) [11] ..	8
<b>Gambar 2. 5</b>	Kurva histerisis pada transformator [2].....	10
<b>Gambar 2. 6</b>	Hubungan arus <i>inrush</i> akibat pengaruh fluks [3].....	12
<b>Gambar 3. 1</b>	Transformator 3-fasa 5 kVA; tampak atas (a), tampak depan (b), tampak samping (c) .....	14
<b>Gambar 3. 2</b>	Bentuk inti transformator .....	15
<b>Gambar 3. 3</b>	Rangkaian pengukuran arus <i>inrush</i> dan demagnetisasi transformator.....	16
<b>Gambar 3. 4</b>	Panel sumber 3-fasa tampak luar (a), tampak dalam (b).....	17
<b>Gambar 3. 5</b>	Rangkaian pensaklaran.....	18
<b>Gambar 3. 6</b>	DAQ 9246.....	19
<b>Gambar 3. 7</b>	Transformator arus (CT).....	19
<b>Gambar 3. 8</b>	Kapasitor demagnetisasi.....	20
<b>Gambar 3. 9</b>	Skema peralatan demagnetisasi .....	21
<b>Gambar 4. 1</b>	Rangkaian pengujian tanpa beban (open-circuit test) .....	24
<b>Gambar 4. 2</b>	Kurva magnetisasi fasa R .....	32
<b>Gambar 4. 3</b>	Kurva magnetisasi fasa S.....	33
<b>Gambar 4. 4</b>	Kurva magnetisasi fasa T.....	33
<b>Gambar 4. 5</b>	Proses akuisisi data pada transformator uji .....	35
<b>Gambar 4. 6</b>	Bentuk gelombang arus transformator uji fasa R.....	37
<b>Gambar 4. 7</b>	Bentuk gelombang arus transformator uji fasa S .....	38
<b>Gambar 4. 8</b>	Bentuk gelombang arus transformator uji fasa T.....	39
<b>Gambar 4. 9</b>	Perbandingan gelombang arus ketiga fasa.....	39
<b>Gambar 4. 10</b>	Bentuk gelombang arus transformator uji fasa R.....	41
<b>Gambar 4. 11</b>	Bentuk gelombang arus transformator uji fasa S .....	42
<b>Gambar 4. 12</b>	Bentuk gelombang arus transformator uji fasa T.....	42
<b>Gambar 4. 13</b>	Perbandingan gelombang arus ketiga fasa.....	43
<b>Gambar 4. 14</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 20V .....	44
<b>Gambar 4. 15</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 40V .....	45
<b>Gambar 4. 16</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 60V .....	45
<b>Gambar 4. 17</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 80V .....	46
<b>Gambar 4. 18</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 100V ...	46
<b>Gambar 4. 19</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 120V ...	47

<b>Gambar 4. 20</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 140V....	47
<b>Gambar 4. 21</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 160V....	48
<b>Gambar 4. 22</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 180V....	48
<b>Gambar 4. 23</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 200V....	49
<b>Gambar 4. 24</b>	Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 220V....	49
<b>Gambar 4. 25</b>	Perbandingan nilai arus inrush dengan arus no load pada fasa R.....	50
<b>Gambar 4. 26</b>	Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 20 V.....	51
<b>Gambar 4. 27</b>	Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 60 V.....	52
<b>Gambar 4. 28</b>	Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 120 V...	52
<b>Gambar 4. 29</b>	Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 180 V...	53
<b>Gambar 4. 30</b>	Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 220 V...	53
<b>Gambar 4. 31</b>	Perbandingan nilai arus inrush dengan arus no load pada fasa S.....	54
<b>Gambar 4. 32</b>	Perbandingan arus inrush pada fasa R dan S.....	54
<b>Gambar 4. 33</b>	Bentuk gelombang fasa R dengan tegangan 20V.....	56
<b>Gambar 4. 34</b>	Bentuk gelombang fasa S dengan tegangan 20V.....	56
<b>Gambar 4. 35</b>	Bentuk gelombang fasa T dengan tegangan 20V.....	57
<b>Gambar 4. 36</b>	Bentuk gelombang fasa R tegangan 60V.....	57
<b>Gambar 4. 37</b>	Bentuk gelombang fasa S tegangan 60V.....	58
<b>Gambar 4. 38</b>	Bentuk gelombang fasa T tegangan 60V.....	58
<b>Gambar 4. 39</b>	Bentuk gelombang fasa R tegangan 100V.....	59
<b>Gambar 4. 40</b>	Bentuk gelombang fasa S tegangan 100V.....	59
<b>Gambar 4. 41</b>	Bentuk gelombang fasa T tegangan 100V.....	60
<b>Gambar 4. 42</b>	Bentuk gelombang fasa T tegangan 140V.....	60
<b>Gambar 4. 43</b>	Bentuk gelombang fasa S tegangan 140V.....	61
<b>Gambar 4. 44</b>	Bentuk gelombang fasa T tegangan 140V.....	61
<b>Gambar 4. 45</b>	Bentuk gelombang fasa R tegangan 180V.....	62
<b>Gambar 4. 46</b>	Bentuk gelombang fasa S tegangan 180V.....	62
<b>Gambar 4. 47</b>	Bentuk gelombang fasa T tegangan 180V.....	63
<b>Gambar 4. 48</b>	Bentuk gelombang fasa R tegangan 220V.....	63
<b>Gambar 4. 49</b>	Bentuk gelombang fasa S tegangan 220V.....	64
<b>Gambar 4. 50</b>	Bentuk gelombang fasa T tegangan 220V.....	64
<b>Gambar 4. 51</b>	Bentuk gelombang fasa R tegangan 240V.....	65
<b>Gambar 4. 52</b>	Bentuk gelombang fasa S tegangan 240V.....	65
<b>Gambar 4. 53</b>	Bentuk gelombang fasa T tegangan 240V.....	66
<b>Gambar 4. 54</b>	Perbandingan arus inrush ketiga fasa.....	66

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b>	Spesifikasi transformator .....	13
<b>Tabel 3. 2</b>	Ukuran inti transformator.....	15
<b>Tabel 4. 1</b>	Data pengujian open-circuit transformator uji fasa R.....	24
<b>Tabel 4. 2</b>	Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan flux linkage ( $\lambda$ ) transformator uji fasa R .....	25
<b>Tabel 4. 3</b>	Data pengujian open-circuit transformator uji fasa S .....	26
<b>Tabel 4. 4</b>	Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan flux linkage ( $\lambda$ ) transformator uji fasa S.....	28
<b>Tabel 4. 5</b>	Data pengujian open-circuit transformator uji fasa T.....	29
<b>Tabel 4. 6</b>	Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan flux linkage ( $\lambda$ ) transformator uji fasa S.....	30
<b>Tabel 4. 7</b>	Hasil pengujian arus inrush pada transformator uji fasa R.....	36
<b>Tabel 4. 8</b>	Hasil pengujian arus inrush pada transformator uji fasa S .....	37
<b>Tabel 4. 9</b>	Hasil pengujian arus inrush pada transformator uji fasa T.....	38
<b>Tabel 4. 10</b>	Data hasil pengujian arus inrush 3 fasa.....	40
<b>Tabel 4. 11</b>	Data hasil pengujian arus inrush 3 fasa.....	41
<b>Tabel 4. 12</b>	Hasil pengujian arus inrush pada transformator uji fasa R.....	44
<b>Tabel 4. 13</b>	Hasil pengujian arus inrush pada fasa S.....	51
<b>Tabel 4. 14</b>	Hasil pengujian arus inrush pada transformator uji .....	55
<b>Tabel 4. 15</b>	Nilai harmonisa transformator uji pada pengujian ke-4 .....	68
<b>Tabel 4. 16</b>	Nilai harmonisa transformator uji pada pengujian ke-4 .....	69

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

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

Keandalan transformator harus diperhatikan karena semakin handal sebuah transformator maka akan semakin baik kualitas daya yang dihasilkan sehingga tidak ada kerugian pada pihak konsumen maupun pihak produsen listrik. Oleh karena itu, sistem proteksi yang baik pada transformator sangat diperlukan. Fenomena-fenomena tertentu dapat muncul dalam transformator yang dapat menyebabkan gangguan dan akan mempengaruhi kinerja dan sistem pengamanan pada transformator sehingga akan mempengaruhi pula performa transformator tersebut. Salah satu fenomena tersebut adalah arus *inrush*. Saturasi inti magnet dari transformator adalah penyebab utama terjadinya arus *inrush* [3]. Saturasi tersebut terjadi karena perubahan secara tiba-tiba dalam sistem tegangan yang mungkin disebabkan oleh *switching transient*, sinkronisasi fasa generator, kesalahan eksternal, dan restorasi kesalahan [3]. Dengan adanya fenomena arus *inrush* ini kondisi transformator saat pertama kali dihubungkan dengan sumber tegangan, arus magnetisasi dapat mencapai 10-20 kali dari arus rating, sedangkan pada saat kondisi *steady state* arus magnetisasi pada transformator hanya 1-2% dari arus rating [4].

Tidak ada bukti langsung bahwa pengisian daya (*energize*) pada transformator dapat menyebabkan kegagalan langsung karena arus *inrush* yang tinggi. Namun, kegagalan isolasi dalam transformator daya yang sering melewati proses pengisian daya (*energize*) pada keadaan tidak berbeban mendukung dugaan bahwa arus *inrush* memiliki efek yang cukup berbahaya [5]. Arus *inrush* dapat menyebabkan kesalahan operasi rele proteksi pada transformator, mengurangi usia operasi transformator, dan mengurangi kualitas daya pada sistem [6]. Besarnya arus *inrush* juga dapat dipengaruhi oleh variasi sudut penyalaan dan fluks sisa di dalam

inti transformator [7]. Fluks sisa merupakan fenomena yang sulit untuk dihindari. Belum diketahui berapa lama waktu yang dibutuhkan fluks sisa tersebut untuk menghilang dari inti transformator karena fluks sisa akan muncul saat proses pengisian daya (*energize*).

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

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui besar dan karakteristik arus *inrush* yang terdapat pada transformator tiga fasa dengan *leg* yang berbeda sehingga dapat diketahui pula pengaruh perbedaan besar *leg* terhadap arus *inrush* yang dihasilkan transformator tersebut. Studi ini bermanfaat sebagai referensi dalam pertimbangan perancangan konstruksi transformator. Studi ini juga diharapkan menjadi referensi dalam mengembangkan penelitian transformator berikutnya sehingga dapat berkembang lebih jauh lagi.

Metode penelitian yang dilakukan dalam studi ini adalah mengumpulkan parameter-parameter yang diperlukan untuk eksperimen antara lain kapasitas daya transformator dan arus rating transformator. Pengujian akan dilakukan pada kondisi transien, yaitu saat awal proses *energize* transformator. Hasil analisis yang didapat hanya dari data pengujian yang dilakukan. Setelah dilakukan analisis dan perbandingan data hasil pengukuran maka dapat disimpulkan karakteristik arus *inrush* pada transformator tersebut.

## **1.2 Sistematika Penulisan**

Pada laporan studi ini terdiri dari beberapa bab. Pada bab satu membahas tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat, relevansi dari penulisan pada studi ini.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang transformator dan arus *inrush* yang digunakan dalam pengerjaan studi ini.

Bab tiga membahas tentang metode yang digunakan dalam pengujian dan pengambilan data.

Bab empat berisi tentang analisis data hasil pengujian terkait dengan perbedaan *leg* pada transformator uji terhadap arus *inrush*.

Bab lima berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan studi selanjutnya.

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## **BAB II**

### **TRANSFORMATOR DAN ARUS *INRUSH***

#### **2.1 Transformator**

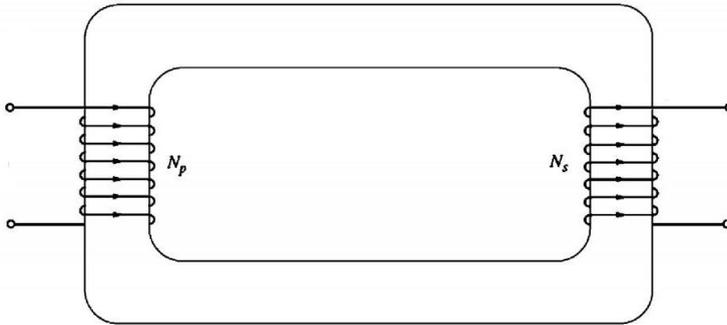
##### **2.1.1 Pengertian Transformator**

Transformator adalah peralatan listrik yang mengubah level tegangan antara dua rangkaian atau lebih. Dalam prosesnya, nilai arus juga berubah. Namun, daya yang disalurkan tidak berubah, kecuali rugi-rugi daya yang terjadi pada proses di dalam transformator. Transfer daya antara dua rangkaian ini terjadi pada arus bolak-balik (AC). Prinsip kerja transformator berdasarkan pada hukum induksi yang ditemukan oleh Faraday tahun 1831. Ia menemukan bahwa setiap perubahan medan magnet pada kumparan akan menyebabkan gaya gerak listrik (GGL) induksi yang sebanding dengan laju perubahan fluks.

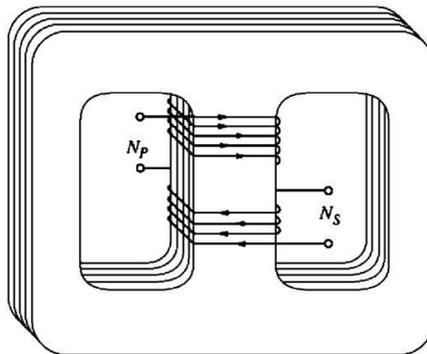
Menurut fungsinya transformator dibagi menjadi dua jenis, yaitu transformator *step up* dan transformator *step down*. Transformator *step up* berfungsi untuk menaikkan level tegangan. Transformator ini memiliki lilitan sekunder lebih banyak dari pada lilitan primer. Biasanya digunakan di pembangkit tenaga listrik yang kemudian disalurkan oleh jaringan transmisi. Transformator *step down* berfungsi sebagai penurun level tegangan. Jumlah lilitan sekunder lebih sedikit daripada jumlah lilitan primer. Biasanya digunakan pada saluran transmisi ke saluran distribusi.

##### **2.1.2 Konstruksi Transformator**

Menurut konstruksinya transformator dibagi menjadi dua jenis, yaitu transformator tipe inti (*core-form*) dan transformator tipe cangkang (*shell-form*). Transformator dengan tipe inti (*core-form*), belitan atau kumparan primer dan sekunder dililitkan pada dua lengan inti yang berbeda, atau bisa dikatakan kumparan melingkari inti seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Pada transformator tipe cangkang (*shell-form*), kumparan dililitkan pada pusat inti transformator. Dua kumparan dililitkan pada bagian yang sama dari inti atau dengan kata lain inti transformator melingkari kumparan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



**Gambar 2. 1** Transformator tipe inti (core-form) [2]



**Gambar 2. 2** Transformator tipe cangkang (shell-form) [2]

### 2.1.3 Transformator Ideal

Sebuah transformator dikatakan ideal apabila saat beroperasi tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain sehingga daya dari kumparan primer sama dengan daya pada kumparan sekunder dengan kata lain tidak terdapat rugi-rugi daya pada transformator. Pada kondisi ini efisiensi dari transformator ideal adalah 100%, dengan asumsi tidak ada rugi inti, permeabilitas inti sangat tinggi, resistansi belitan diabaikan, dan fluks bocor diabaikan. Namun, kondisi-kondisi tersebut hanya bisa didekati, belum pernah tercapai secara nyata sehingga tidak ada transformator yang ideal dalam aplikasi praktisnya.

Berdasarkan asumsi kondisi transformator ideal, besar gaya gerak listrik (GGL) yang disimbolkan dengan  $e$ , pada kumparan primer dipengaruhi oleh jumlah belitan ( $N$ ) dan fluks ( $\Phi$ ) yang berubah terhadap waktu. Secara matematis dapat dituliskan seperti persamaan 2.1.

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

Fluks yang dihasilkan oleh kumparan primer mengalir melalui inti dan menginduksi kumparan sekunder, sehingga besar gaya gerak listrik (GGL) secara matematis dapat ditulis seperti persamaan 2.2.

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

Apabila polaritas diabaikan, besar fluks yang dihasilkan pada kumparan primer diasumsikan sama dengan fluks yang dihasilkan pada kumparan sekunder, maka dapat disimpulkan bahwa:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

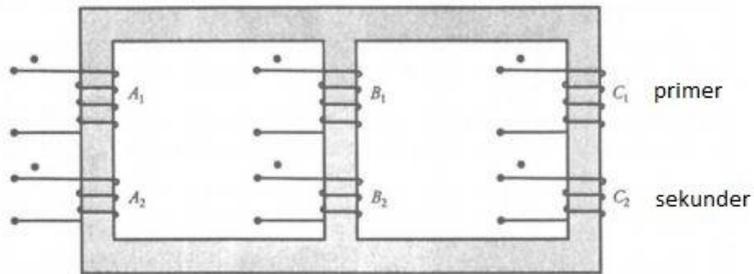
Jika besar  $N_1 > N_2$ , maka transformator tersebut merupakan transformator *step down*, sebaliknya jika besar  $N_1 < N_2$  maka transformator tersebut merupakan transformator *step up*.

#### 2.1.4 Transformator Tidak Ideal

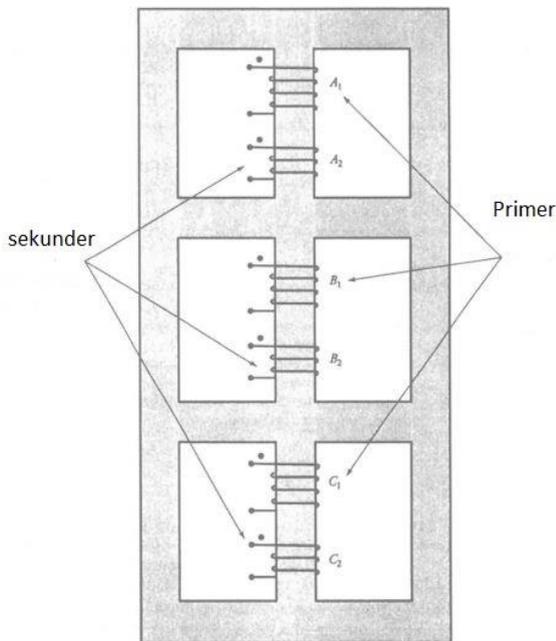
Transformator dikatakan tidak ideal disebabkan oleh beberapa hal diantaranya adalah pengaruh resistansi kumparan, pengaruh adanya fluks bocor, dan arus eksitasi karena permeabilitas inti yang terbatas. Efisiensi dari transformator tidak ideal adalah kurang dari 100%. Tidak semua fluks yang dihasilkan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

#### 2.1.5 Tansformator Tiga Fasa

Sebagian besar sistem kelistrikan, mulai dari sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi menggunakan transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa dapat dibuat dengan cara



**Gambar 2. 3** Transformator tiga fasa tipe inti (core-form) [11]



**Gambar 2. 4** Transformator tiga fasa tipe cangkang (shell-form) [11]

menghubungkan tiga unit transformator satu fasa atau dengan cara membuat satu unit transformator yang terdiri dari tiga pasang lilitan yang digulung mengelilingi tiga lengan inti. Pada umumnya terdapat tiga cara

untuk merangkai belitan kumparan di sisi primer dan sekunder, yaitu hubungan bintang (Wye/Y), hubungan delta ( $\Delta$ ), dan hubungan zig-zag. Oleh karena itu, transformator tiga fasa dapat dihubungkan dengan empat kombinasi, yaitu hubungan Y-Y, hubungan Y- $\Delta$ , hubungan  $\Delta$ -Y, dan hubungan  $\Delta$ - $\Delta$ . Perbedaan fasa untuk setiap belitannya pada transformator tiga fasa sebesar  $120^\circ$  sedangkan antara Y dan  $\Delta$  memiliki perbedaan fasa  $30^\circ$ . Konstruksi dari transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar 2.3 dan 2.4.

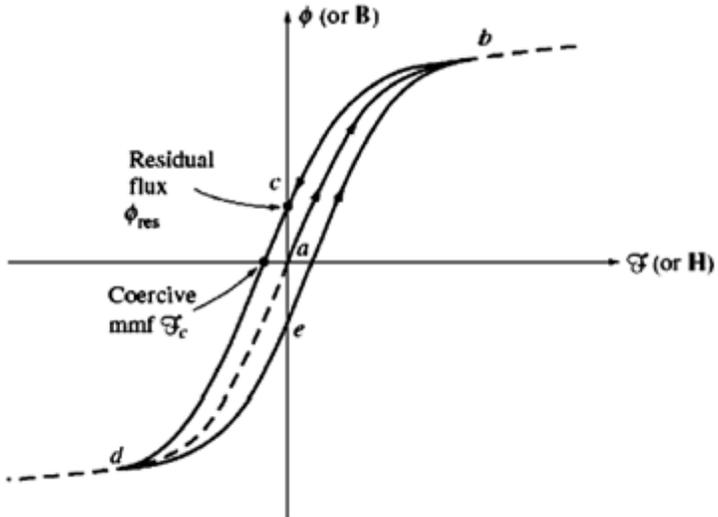
### 2.1.6 Histerisis

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

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

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

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5, mula-mula fluks bernilai nol yaitu pada posisi a, saat transformator dihubungkan dengan sumber tegangan maka fluks pada inti akan membentuk jalur a-b. ketika arus turun, fluks tidak kembali ke titik nol melainkan membentuk jalur baru yaitu jalur b-c-d. Kemudian ketika arus naik kembali maka fluks akan membentuk jalur d-e-b.



**Gambar 2. 5** Kurva histerisis pada transformator [2]

## 2.2 Arus *Inrush*

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

Arus *inrush* pada transformator bisa terjadi ketika fluks sisa di dalam inti tidak memenuhi nilai sesaat fluks dalam kondisi *steady-state*, terutama pada titik-titik gelombang tegangan tertentu. Laju perubahan fluks sesaat pada inti transformator mempunyai nilai yang sebanding dengan jatuh tegangan sesaat pada belitan yang terhubung pada sumber.

Ketika transformator dioperasikan secara terus-menerus, nilai fluks puncak akan berada pada nilai negatif saat tegangan berada pada titik nol. Kondisi idealnya adalah ketika transformator di-*energize*, nilai fluks harus bermula pada titik nol. Sehingga saat menaikkan tegangan dari nol nilai fluks akan mencapai nilai puncak yang berkali-kali lipat dari kondisi idealnya. Ketidaklinieran karakteristik kurva magnetisasi pada kondisi saturasi akan mengakibatkan jumlah gaya gerak magnet yang tidak sebanding diperlukan untuk membangkitkan fluks magnet, sehingga arus belitan yang diperlukan untuk membuat gaya gerak magnet akan meningkat untuk menghasilkan fluks pada inti transformator dibandingkan saat kondisi normal. Pada gambar 2.6 dapat dilihat hubungan arus *inrush* akibat pengaruh fluks sisa.

Nilai puncak arus *inrush* adalah sebuah fungsi yang terdiri atas tegangan suplai, kerapatan medan magnet sisa, dan kerapatan medan magnet saturasi, resistansi kumparan primer dan induktansi transformator. Nilai puncak arus *inrush* dapat diperoleh berdasarkan parameter-parameter transformator pada saat kondisi beroperasi seperti yang ditunjukkan pada studi [12]. Secara matematis dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$i_{peak} = \frac{\sqrt{2}V_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \left( \frac{2.B_N + B_R + B_S}{B_N} \right) \quad (2.5)$$

Dimana,

$V_m$  = Tegangan terhubung maksimum (V)

$L$  = Induktansi transformator (H)

$R$  = Resistansi total transformator ( $\Omega$ )

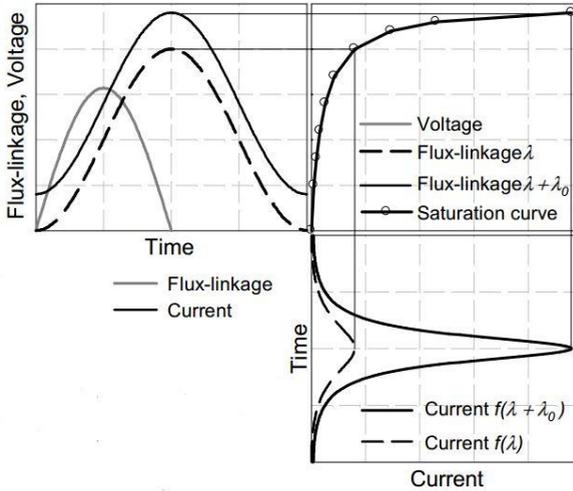
$B_N$  = Kerapatan medan magnet normal transformator (Wb/m<sup>2</sup>)

$B_R$  = Kerapatan medan magnet sisa transformator (Wb/m<sup>2</sup>)

$B_S$  = Kerapatan medan magnet jenuh transformator (Wb/m<sup>2</sup>)

Besar nilai kerapatan medan magnet normal diperoleh pada saat transformator beroperasi normal. Kerapatan medan magnet sisa ( $B_R$ ) dan kerapatan medan magnet jenuh ( $B_S$ ) diperoleh berdasarkan nilai permeabilitas dari inti transformator. Oleh karena itu, jenis material inti transformator berpengaruh terhadap besarnya arus *inrush*, sehingga dengan jenis material inti yang berbeda besar arus *inrush* dimungkinkan berbeda pula [13]. Selain itu, kedua parameter tersebut juga didasarkan pada kurva magnetisasi dari transformator, khususnya untuk mencari nilai

$B_R$  yang tampak pada saat intensitas medan bernilai nol. Gambar 2.6 menjelaskan bahwa keberadaan fluks sisa maupun fluks sementara berpengaruh pada kurva magnetisasi. Semakin tinggi nilai magnetisasi (saturasi), maka semakin tinggi pula arus yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.5.



**Gambar 2. 6** Hubungan arus *inrush* akibat pengaruh fluks [3]

## **BAB III**

### **METODOLOGI EKSPERIMEN DAN PENGUKURAN ARUS *INRUSH***

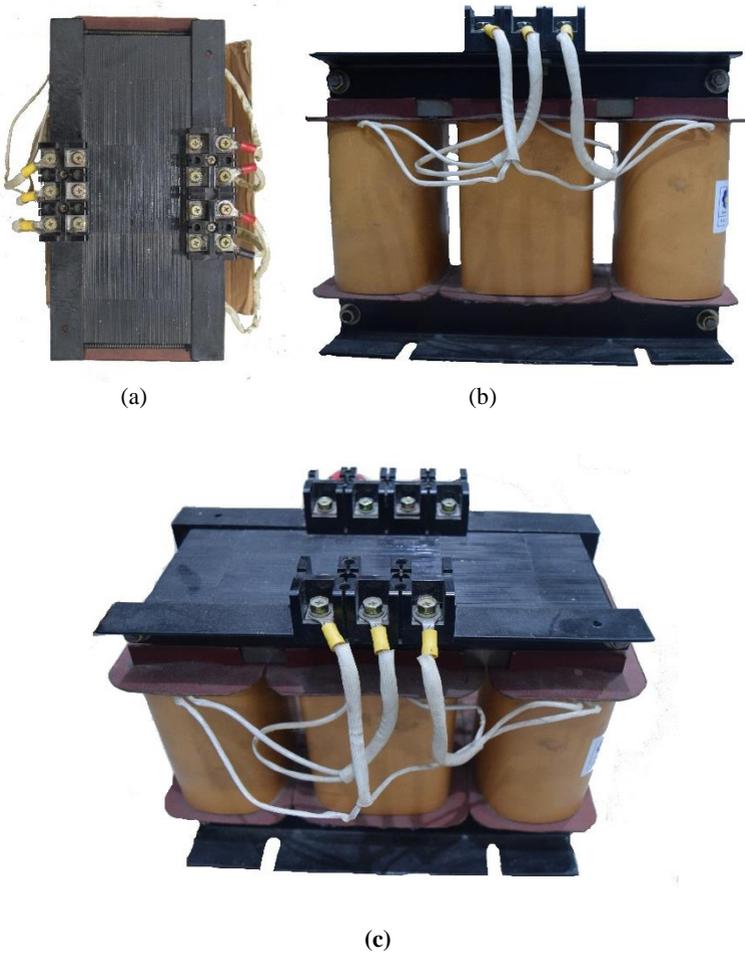
Pada bab ini akan dibahas mengenai metodologi yang akan digunakan dalam studi ini. Metodologi yang digunakan adalah dengan melakukan eksperimen pengukuran arus *inrush* dengan meng-*energize* transformator menggunakan modul pensaklaran dan proses demagnetisasi untuk mengurangi fluks sisa pada transformator.

#### **3.1 Spesifikasi Transformator Uji**

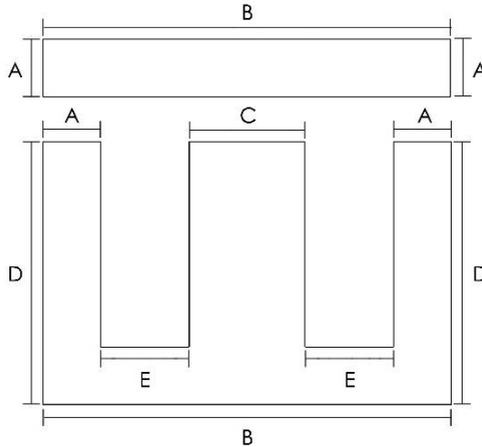
Transformator yang diuji pada studi ini adalah transformator 3-fasa dengan kapasitas daya 5 kVA yang memiliki perbedaan besar *leg*, dimana *leg* fasa R dan T memiliki besar yang sama, sedangkan *leg* fasa S lebih besar daripada kedua fasa lainnya. Gambar 3.1 menunjukkan bentuk fisik dari transformator yang digunakan dalam studi ini. Secara lengkap spesifikasi dari transformator tersebut ditunjukkan pada tabel 3.1. Cara potong inti transformator 3-fasa ini menggunakan cara potong inti transformator pada umumnya yaitu E-I seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2 dan tabel 3.2.

**Tabel 3. 1** Spesifikasi transformator

<b>Spesifikasi Transformator</b>	
<b>Fasa</b>	3 Fasa
<b>Tipe</b>	Core
<b>Kapasitas Daya</b>	5 kVA
<b>Tegangan Primer</b>	380 V
<b>Tegangan Sekunder</b>	380 V
<b>Frekuensi</b>	50 Hz
<b>Hubungan Lilitan</b>	Y- $\Delta$
<b>Jumlah Lilitan Primer</b>	255
<b>Jumlah Lilitan Sekunder</b>	255



**Gambar 3. 1** Transformator 3-fasa 5 kVA; tampak atas (a), tampak depan (b), tampak samping (c)



**Gambar 3. 2** Bentuk inti transformator

**Tabel 3. 2** Ukuran inti transformator

<b>Dimensi Potongan</b>	<b>Ukuran</b>
A	4 cm
B	28 cm
C	8 cm
D	18 cm
E	6 cm
Ketebalan	10 cm

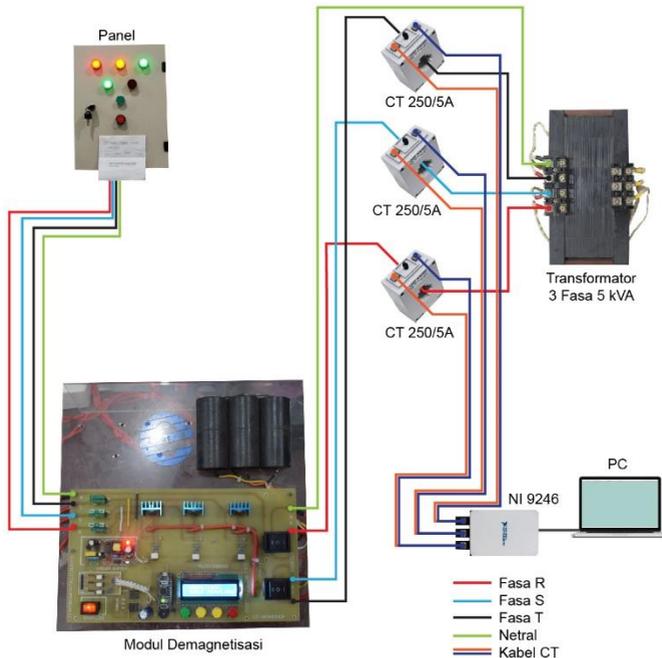
### 3.2 Eksperimen Pengukuran Arus *Inrush*

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

sehingga didapatkan hasil yang lebih akurat. Tahap demagnetisasi pada studi ini menggunakan kapasitor.

### 3.3 Alat Pengukuran Arus *Inrush*

Alat yang digunakan untuk pengukuran arus *inrush* yang berbasis pada laboratorium menggunakan rangkaian seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Berdasarkan gambar 3.3, alat yang digunakan terdiri dari transformator 3-fasa 5 kVA dengan besar *leg* yang berbeda, sumber AC 3-fasa, kapasitor demagnetisasi, komponen pensaklaran, *current transformer*, alat pengambilan data yaitu DAQ 9246, dan menggunakan perangkat lunak LabVIEW sebaga *human interface* pada proses akuisisi data. Rangkaian alat pengukuran arus *inrush* ditunjukkan pada gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Rangkaian pengukuran arus *inrush* dan demagnetisasi transformator



(a)

(b)

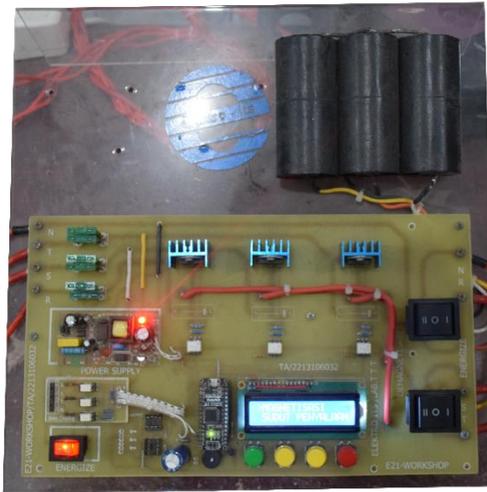
**Gambar 3. 4** Panel sumber 3-fasa tampak luar (a), tampak dalam (b)

### 3.3.1 Sumber 3-Fasa

Sumber yang digunakan pada eksperimen ini adalah sumber tegangan bolak-balik (AC) dari PLN tiga fasa 380 V (L-L) pada frekuensi 50 Hz. Sumber yang digunakan memiliki kapasitas arus yang besar unuk dapat memperoleh nilai arus *inrush* yang tinggi. Bentuk dari panel sumber yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.4.

### 3.3.2 Komponen Pensaklaran

Komponen pensaklaran digunakan untuk mendapatkan sudut tegangan agar tepat pada  $0^\circ$  sehingga arus *inrush* yang dihasilkan bisa mencapai nilai maksimal. Selain itu, sudut tegangan tersebut dibutuhkan agar data yang dihasilkan lebih akurat. Rangkaian pensaklaran ditunjukkan pada gambar 3.5.



**Gambar 3. 5** Rangkaian pensaklaran

### 3.3.3 Perangkat Akuisisi Data

Perangkat dalam proses akuisisi data pada eksperimen pengukuran ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Untuk perangkat keras menggunakan DAQ 9246 dari *National Instrument*. DAQ 9246 ini berfungsi untuk merekam arus yang terbangkitkan pada saat sistem dihubungkan dengan sumber. DAQ 9246 ini harus tersambung dengan transformator arus (*current transformer*) untuk dapat membaca arus yang mengalir pada sistem. Selain itu transformator arus juga berfungsi sebagai proteksi untuk DAQ 9246 dari arus yang tinggi. Setelah DAQ 9246 merekam arus, data akan disimpan di dalam *personal computer* dengan menggunakan perangkat lunak LabVIEW. Setelah proses akuisisi data selesai, dilakukan pengolahan data dengan menggunakan perangkat lunak DIAdem yang merupakan fitur pengolahan data dari perangkat lunak LabVIEW. Bentuk fisik dari DAQ dapat dilihat pada gambar 3.6.



**Gambar 3. 6** DAQ 9246

### **3.3.4 Transformator Arus (CT)**

Transformator arus (CT) adalah peralatan yang digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya hingga ratusan ampere. Transformator arus berfungsi untuk menurunkan arus yang terukur sehingga arus yang digunakan pengukuran pada DAQ9246 tidak terlalu tinggi dan dapat melakukan pengukuran dengan aman sesuai dengan kapasitasnya. Transformator arus yang digunakan pada pengukuran ini memiliki nilai rasio 250/5 A. Transformator arus memiliki lilitan primer dan lilitan sekunder. Lilitan primer digunakan untuk menerima induksi magnetik dari arus listrik yang mengalir pada saluran yang akan diukur, sedangkan lilitan sekunder digunakan untuk menerima induksi magnetik yang dihasilkan oleh lilitan primer dan mengubahnya menjadi nilai arus yang lebih kecil sesuai dengan rasio lilitan pada transformator arus tersebut. Gambar 3.7 menunjukkan bentuk fisik dari transformator arus yang digunakan pada eksperimen pengukuran arus *inrush*.



**Gambar 3. 7** Transformator arus (CT)

### 3.3.5 Demagnetisasi

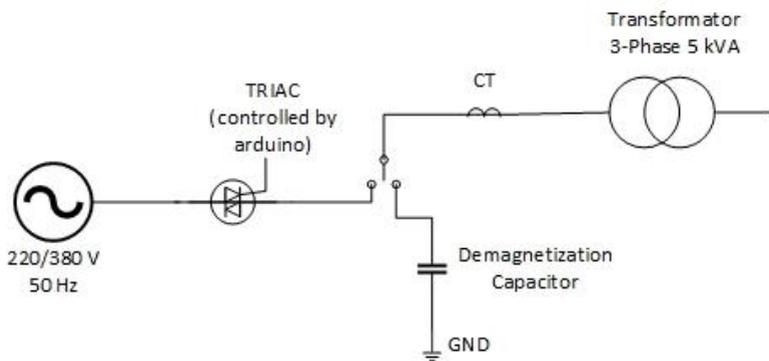
Proses demagnetisasi pada transformator merupakan proses yang dibutuhkan untuk mengurangi fluks sisa pada inti transformator sehingga nilai arus *inrush* akan berkurang. Seperti yang sebelumnya telah dijelaskan bahwa setiap kali dilakukan *energize* pada transformator maka akan timbul arus magnetisasi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

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

Pada transformator hanya bisa digunakan metode demagnetisasi elektrik yaitu dengan cara menggunakan input sumber DC dan menggunakan kapasitor. Dalam studi ini akan digunakan demagnetisasi menggunakan kapasitor *shunt*. Kapasitor *shunt* sebanyak tiga buah kapasitor dengan kapasitas 40uF seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8, dipasang secara paralel terhadap sistem yang dikendalikan oleh saklar manual. Saklar diaktifkan ketika sistem dalam kondisi mati setelah proses pengukuran arus *inrush* pada transformator. Saklar dinyalakan dalam waktu tertentu untuk proses demagnetisasi transformator uji. Tujuan dari proses demagnetisasi pada studi ini adalah untuk mendapatkan kondisi fluks pada inti transformator dengan jumlah yang sama pada setiap pengukuran yang dilakukan sehingga besar arus *inrush* yang didapatkan lebih akurat. Skema dari alat demagnetisasi ditunjukkan pada gambar 3.9.



**Gambar 3. 8** Kapasitor demagnetisasi



**Gambar 3. 9** Skema peralatan demagnetisasi

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## BAB IV

### HASIL DAN ANALISIS EKSPERIMEN PENGUKURAN ARUS *INRUSH*

#### 4.1 Pengujian Kurva Magnetisasi Inti

Karakteristik arus *inrush* pada transformator dapat dilihat pada kurva magnetisasi inti transformator tersebut. Kurva magnetisasi inti menggambarkan hubungan antara arus magnetisasi ( $I_m$ ) dengan *flux linkage* ( $\lambda$ ). Nilai arus magnetisasi ( $I_m$ ) didapatkan dari persamaan 4.1.

$$I_m = I_p \cdot \sin \theta \quad (4.1)$$

$I_p$  merupakan nilai arus sisi primer yang didapatkan dari data pengujian. Nilai sudut  $\theta$  dapat dicari dari nilai *power factor* (PF) seperti yang ditunjukkan pada persamaan 4.2.

$$PF = \cos \theta = \frac{P_p}{V_p \cdot I_p} \quad (4.2)$$

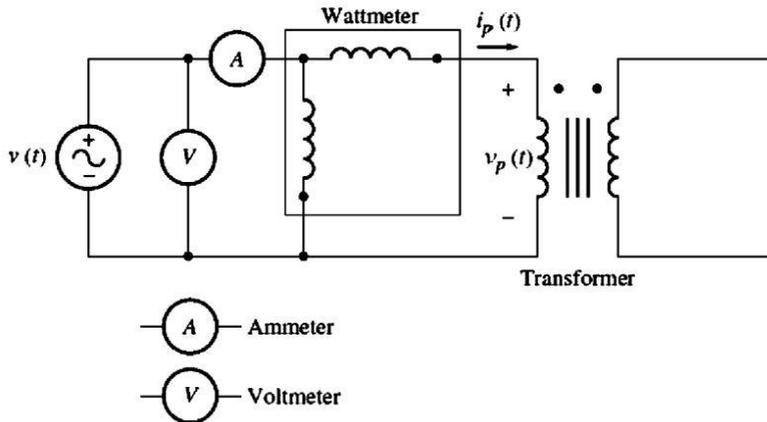
Nilai PF adalah faktor daya yang didapatkan dari data pengujian.  $P_p$  dan  $V_p$  merupakan daya dan tegangan pada sisi primer transformator yang didapatkan dari data pengujian. Selanjutnya untuk mencari nilai *flux linkage* ( $\lambda$ ) digunakan persamaan 4.3.

$$\lambda = I_m \cdot L_m \quad (4.3)$$

$L_m$  merupakan nilai induktansi inti transformator. Nilai  $L_m$  sendiri dapat didapatkan melalui persamaan 4.4.

$$L_m = \frac{V_p}{I_p \cdot 2\pi \cdot f} \quad (4.4)$$

Untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut, maka dilakukan pengujian transformator tanpa beban (*open-circuit test*). Rangkaian dari pengujian transformator tanpa beban ditunjukkan pada gambar 4.1. Transformator diberi tegangan pada sisi primer dan dinaikkan secara bertahap sampai melebihi arus nominalnya atau dengan kata lain sampai inti transformator bersaturasi. Selanjutnya, besar arus dan daya primer dapat dicatat untuk selanjutnya diolah menggunakan persamaan-persamaan diatas. Hasil dari pengujian transformator tanpa beban tersebut ditunjukkan pada tabel 4.1.



Gambar 4. 1 Rangkaian pengujian tanpa beban (*open-circuit test*)

Tabel 4. 1 Data pengujian *open-circuit* transformator uji fasa R

Voc (V)	Ioc (A)	Poc (Watt)	Qoc (VAR)	S (VA)
6.5	0.04	0.20	0.20	0.28
10.9	0.06	0.50	0.30	0.58
15.3	0.06	0.50	0.40	0.64
20.3	0.09	1.80	0.80	1.97
24.8	0.14	3.00	0.90	3.13
31	0.14	4.10	1.20	4.27
34.5	0.19	6.20	1.40	6.36
40.1	0.15	7.20	2.10	7.50
45	0.18	7.90	2.00	8.15
50	0.21	10.00	2.30	10.26
55.6	0.21	11.30	2.80	11.64
58.8	0.23	13.00	3.20	13.39
65	0.19	11.90	3.90	12.52
69.7	0.21	14.20	4.20	14.81
75.2	0.20	14.20	4.90	15.02
80.1	0.23	17.10	6.60	18.33
84.3	0.23	17.60	7.00	18.94
89.9	0.23	18.80	7.70	20.32
95.8	0.23	19.00	9.80	21.38
99.5	0.25	22.50	10.50	24.83

**Tabel 4.1** Data pengujian *open-circuit* transformator uji fasa R (Lanjutan)

<b>Voc (V)</b>	<b>Ioc (A)</b>	<b>Poc (Watt)</b>	<b>Qoc (VAR)</b>	<b>S (VA)</b>
109.2	0.28	27.8	12.5	30.48
114	0.29	29.3	15.1	32.96
119.8	0.29	29.7	17	34.22
124	0.28	27.5	21.7	35.03
129.8	0.33	34	25.1	42.26
134.6	0.34	39.1	28.3	48.27
138.3	0.34	40.1	28.5	49.2
143.4	0.36	42.7	28.6	51.39
148.4	0.41	51.6	31.9	60.66
154.8	0.54	80	30	85.44
159.8	0.55	90	40	98.49
169.6	0.59	100	50	111.8
173.9	0.69	110	50	120.83
178	0.74	110	60	125.3
184.2	0.76	120	70	138.92
189	0.78	130	80	152.64
192.7	0.84	140	80	161.25
198.5	0.87	150	90	174.93
203.9	0.97	180	110	210.95
208.5	1.04	180	100	205.91
219.7	1.14	180	100	205.91

**Tabel 4. 2** Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan *flux linkage* ( $\lambda$ ) transformator uji fasa R

<b>PF (<math>\cos \theta</math>)</b>	<b>Sudut (<math>\theta</math>)</b>	<b><math>I_m</math> (A)</b>	<b><math>X_m</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>L_m</math> (H)</b>	<b><math>\lambda</math> (Wb-T)</b>
0.71	45.00	0.03	213.78	0.68	0.02
0.86	30.96	0.03	365.27	1.16	0.03
0.78	38.66	0.04	422.28	1.34	0.05
0.91	23.96	0.04	531.73	1.69	0.06
0.96	16.70	0.04	629.97	2.01	0.08
0.96	16.31	0.04	766.39	2.44	0.10
0.98	12.72	0.04	837.61	2.67	0.11
0.96	16.26	0.04	954.76	3.04	0.13
0.97	14.21	0.04	1030.10	3.28	0.14
0.97	12.95	0.05	1088.13	3.47	0.16
0.97	13.92	0.05	1111.40	3.54	0.18
0.97	13.83	0.05	1093.36	3.48	0.19

**Tabel 4.2** Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan *flux linkage* ( $\lambda$ ) transformator uji fasa R (Lanjutan)

<b>PF (<math>\cos \theta</math>)</b>	<b>Sudut (<math>\theta</math>)</b>	<b><math>I_m</math> (A)</b>	<b><math>X_m</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>L_m</math> (H)</b>	<b><math>\lambda</math> (Wb-T)</b>
0.95	18.15	0.06	1087.05	3.46	0.21
0.96	16.48	0.06	1164.66	3.71	0.22
0.95	19.04	0.07	1152.68	3.67	0.24
0.93	21.1	0.08	971.41	3.09	0.26
0.93	21.69	0.08	996.08	3.17	0.27
0.93	22.27	0.09	1049.53	3.34	0.29
0.89	27.28	0.1	928.83	2.96	0.31
0.91	25.02	0.11	944.93	3.01	0.32
0.91	24.95	0.11	942.71	3	0.33
0.91	24.21	0.11	951.01	3.03	0.35
0.89	27.26	0.13	861.08	2.74	0.36
0.87	29.79	0.14	837.36	2.67	0.38
0.79	38.28	0.17	709.84	2.26	0.39
0.8	36.44	0.19	668.34	2.13	0.41
0.81	35.9	0.2	685.27	2.18	0.43
0.82	35.4	0.2	702.15	2.24	0.44
0.83	33.81	0.2	719.79	2.29	0.46
0.85	31.73	0.21	691.7	2.2	0.47
0.94	20.56	0.19	816.43	2.6	0.49
0.91	23.96	0.22	720.63	2.29	0.51
0.89	26.57	0.27	638.45	2.03	0.54
0.91	24.44	0.28	613.5	1.95	0.55
0.88	28.61	0.35	502.33	1.6	0.57
0.86	30.26	0.38	484.2	1.54	0.59
0.85	31.61	0.41	462.93	1.47	0.6
0.87	29.74	0.42	461.83	1.47	0.61
0.86	30.96	0.45	446.03	1.42	0.63
0.85	31.43	0.5	405.21	1.29	0.65
0.87	29.05	0.5	414.01	1.32	0.66
0.87	29.05	0.55	397.88	1.27	0.7

**Tabel 4.3** Data pengujian *open-circuit* transformator uji fasa S

<b>Voc (V)</b>	<b>Ioc (A)</b>	<b>Poc (Watt)</b>	<b>Qoc (VAR)</b>	<b>S (VA)</b>
6.5	0.25	0.40	1.60	1.65
10.9	0.39	0.90	4.20	4.30
15.3	0.52	1.30	7.50	7.61

**Tabel 4.3** Data pengujian *open-circuit* transformator uji fasa S (Lanjutan)

<b>Voc (V)</b>	<b>Ioc (A)</b>	<b>Poc (Watt)</b>	<b>Qoc (VAR)</b>	<b>S (VA)</b>
20.3	0.72	2.7	13.9	14.16
24.8	0.9	3.9	21.5	21.85
31	1.07	5.4	31.6	32.06
34.5	1.21	7.6	40.3	41.01
40.1	1.36	10.6	52.5	53.56
45	1.48	11.9	63.6	64.7
50	1.65	14.7	78.4	79.77
55.6	1.79	17.7	95.1	96.73
58.8	1.93	20.6	109.8	111.72
65	2	23	122.6	124.74
69.7	2.15	26.1	141.9	144.28
75.2	2.26	29.9	160.2	162.97
80.1	2.42	35.9	183.3	186.78
84.3	2.5	36.8	197.8	201.19
89.9	2.67	43.1	225.9	229.97
95.8	2.78	48.5	247.7	252.4
99.5	2.92	54	274	279.27
103.8	3.05	58.5	297.8	303.49
109.2	3.21	65.5	330.9	337.32
114	3.33	72.6	357.6	364.9
119.8	3.45	78.5	386.7	394.59
124	3.53	87.2	411.6	420.74
129.8	3.72	98.2	452.8	463.33
134.6	3.89	108.9	494.3	506.15
138.3	4.03	111.1	527	538.58
143.4	4.11	118.1	555.8	568.21
148.4	4.28	130.5	600.5	614.52
154.8	4.57	180	700	722.77
159.8	4.89	200	740	766.55
169.6	5.19	230	840	870.92
173.9	5.44	250	890	924.45
178	5.64	270	920	958.8
184.2	5.74	290	1000	1041.2
189	5.91	320	1050	1097.68
192.7	6.06	330	1100	1148.43
198.5	6.22	360	1160	1214.58
203.9	6.46	390	1240	1299.88
208.5	6.59	390	1250	1309.43

**Tabel 4.3** Data pengujian *open-circuit* transformator uji fasa S (Lanjutan)

<b>Voc (V)</b>	<b>Ioc (A)</b>	<b>Poc (Watt)</b>	<b>Qoc (VAR)</b>	<b>S (VA)</b>
219.7	6.71	400	1280	1341.04

**Tabel 4.4** Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan flux linkage ( $\lambda$ ) transformator uji fasa S

<b>PF (cos <math>\theta</math>)</b>	<b>Sudut (<math>\theta</math>)</b>	<b><math>I_m</math> (A)</b>	<b><math>X_m</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>L_m</math> (H)</b>	<b><math>\lambda</math> (Wb-T)</b>
0.24	75.96	0.24	27.24	0.087	0.02
0.21	77.91	0.39	28.29	0.090	0.03
0.17	80.17	0.51	30.15	0.096	0.05
0.19	79.01	0.70	28.80	0.092	0.06
0.18	79.72	0.88	28.16	0.090	0.08
0.17	80.30	1.05	29.50	0.094	0.10
0.19	79.32	1.19	28.97	0.092	0.11
0.20	78.59	1.33	30.06	0.096	0.13
0.18	79.40	1.45	30.95	0.099	0.14
0.18	79.38	1.62	30.87	0.098	0.16
0.18	79.46	1.76	31.58	0.101	0.18
0.18	79.37	1.89	31.03	0.099	0.19
0.18	79.37	1.96	33.10	0.105	0.21
0.18	79.58	2.11	32.99	0.105	0.22
0.18	79.43	2.22	33.82	0.108	0.24
0.19	78.92	2.38	33.71	0.107	0.26
0.18	79.46	2.45	34.35	0.109	0.27
0.19	79.20	2.62	34.34	0.109	0.29
0.19	78.92	2.73	35.14	0.112	0.31
0.19	78.85	2.87	34.68	0.110	0.32
0.19	78.89	2.99	34.71	0.111	0.33
0.19	78.80	3.15	34.70	0.111	0.35
0.20	78.52	3.26	34.96	0.111	0.36
0.20	78.52	3.38	35.46	0.113	0.38
0.21	78.04	3.46	35.89	0.114	0.39
0.21	77.76	3.63	35.71	0.114	0.41
0.22	77.58	3.80	35.43	0.113	0.43
0.21	78.10	3.95	35.04	0.112	0.44
0.21	78.00	4.02	35.67	0.114	0.46
0.21	77.74	4.19	35.46	0.113	0.47
0.25	75.58	4.43	34.98	0.111	0.49
0.26	74.88	4.72	33.85	0.108	0.51

**Tabel 4.4** Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan flux linkage ( $\lambda$ ) transformator uji fasa S (Lanjutan)

<b>PF (<math>\cos \theta</math>)</b>	<b>Sudut (<math>\theta</math>)</b>	<b><math>I_m</math> (A)</b>	<b><math>X_m</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>L_m</math> (H)</b>	<b><math>\lambda</math> (Wb-T)</b>
0.26	74.69	5.01	33.88	0.108	0.54
0.27	74.31	5.24	33.2	0.106	0.55
0.28	73.64	5.41	32.89	0.105	0.57
0.28	73.83	5.51	33.41	0.106	0.59
0.29	73.05	5.65	33.43	0.106	0.6
0.29	73.3	5.8	33.2	0.106	0.61
0.3	72.76	5.94	33.41	0.106	0.63
0.3	72.54	6.16	33.09	0.105	0.65
0.3	72.67	6.29	33.14	0.106	0.66
0.3	72.65	6.4	34.3	0.109	0.7

**Tabel 4.5** Data pengujian *open-circuit* transformator uji fasa T

<b>Voc (V)</b>	<b>Ioc (A)</b>	<b>Poc (Watt)</b>	<b>Qoc (VAR)</b>	<b>S (VA)</b>
6.5	0.01	0.10	0.20	0.10
10.9	0.04	0.40	0.10	0.41
15.3	0.06	0.90	0.20	0.92
20.3	0.10	1.90	0.70	2.02
24.8	0.15	3.60	1.60	3.94
31	0.18	5.30	2.00	5.66
34.5	0.21	6.50	3.70	7.48
40.1	0.21	7.20	4.60	8.54
45	0.24	8.80	5.00	10.12
50	0.26	10.70	6.20	12.37
55.6	0.26	12.50	7.30	14.48
58.8	0.28	14.50	8.50	16.81
65	0.28	14.20	8.60	16.60
69.7	0.29	15.70	9.30	18.25
75.2	0.29	17.10	10.10	19.86
80.1	0.29	18.70	11.70	22.06
84.3	0.30	19.40	12.50	23.08
89.9	0.30	21.90	14.60	26.32
95.8	0.30	21.20	15.30	26.14
99.5	0.31	24.10	18.20	30.20
103.8	0.33	26.10	20.20	33.00
109.2	0.34	28.30	23.30	36.66
114	0.34	28.10	25.70	38.08

**Tabel 4.5** Data pengujian *open-circuit* transformator uji fasa T (Lanjutan)

<b>Voc (V)</b>	<b>Ioc (A)</b>	<b>Poc (Watt)</b>	<b>Qoc (VAR)</b>	<b>S (VA)</b>
119.8	0.34	28.9	26.8	39.41
124	0.34	24	27.4	36.42
129.8	0.34	26.6	34.4	43.48
134.6	0.37	28	40	48.83
138.3	0.42	37.1	44	57.55
143.4	0.42	33.5	42.9	54.43
148.4	0.43	37.2	51.8	63.77
154.8	0.5	70	80	106.3
159.8	0.54	70	90	114.02
169.6	0.59	70	110	130.38
173.9	0.68	80	120	144.22
178	0.7	70	120	138.92
184.2	0.73	80	140	161.25
189	0.76	70	150	165.53
192.7	0.77	80	160	178.89
198.5	0.8	80	180	196.98
203.9	0.89	70	200	211.9
208.5	0.92	80	200	215.41
219.7	0.98	80	200	215.41

**Tabel 4.6** Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan *flux linkage* ( $\lambda$ ) transformator uji fasa S

<b>PF (<math>\cos \theta</math>)</b>	<b>Sudut (<math>\theta</math>)</b>	<b><math>I_m</math> (A)</b>	<b><math>X_m</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>L_m</math> (H)</b>	<b><math>\lambda</math> (Wb-T)</b>
0.98	11.08	0.00	2400.49	7.64	0.02
0.97	14.04	0.01	1152.36	3.67	0.03
0.98	12.53	0.01	1119.52	3.57	0.05
0.94	20.22	0.03	593.14	1.89	0.06
0.91	23.96	0.06	418.24	1.33	0.08
0.94	20.67	0.06	490.53	1.56	0.10
0.87	29.65	0.11	327.42	1.04	0.11
0.84	32.57	0.11	352.99	1.12	0.13
0.87	29.60	0.12	379.55	1.21	0.14
0.87	30.09	0.13	386.55	1.23	0.16
0.86	30.28	0.13	425.68	1.36	0.18
0.86	30.38	0.14	416.74	1.33	0.19
0.86	31.20	0.15	446.53	1.42	0.21
0.86	30.64	0.15	478.18	1.52	0.22

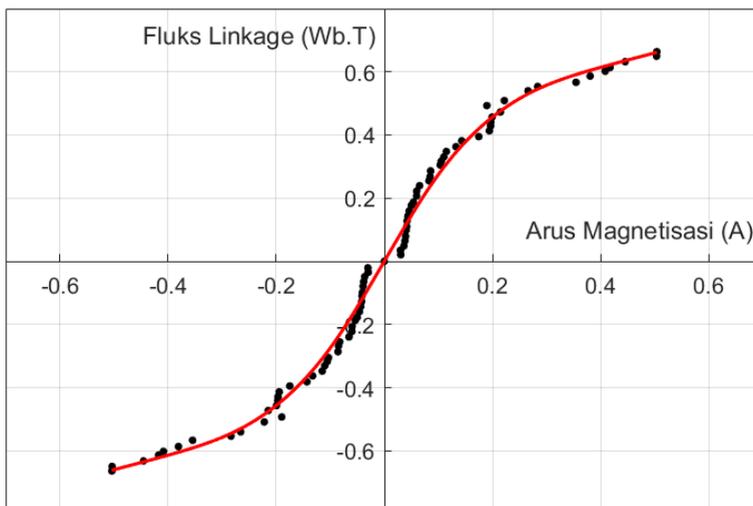
**Tabel 4.6** Hasil perhitungan parameter arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan *flux linkage* ( $\lambda$ ) transformator uji fasa S (Lanjutan)

<b>PF (<math>\cos \theta</math>)</b>	<b>Sudut (<math>\theta</math>)</b>	<b><math>I_m</math> (A)</b>	<b><math>X_m</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>L_m</math> (H)</b>	<b><math>\lambda</math> (Wb-T)</b>
0.86	30.57	0.15	508.14	1.62	0.24
0.85	32.03	0.15	518.96	1.65	0.26
0.84	32.79	0.16	524.04	1.67	0.27
0.83	33.69	0.17	543.86	1.73	0.29
0.81	35.82	0.18	545.67	1.74	0.31
0.8	37.06	0.18	541.33	1.72	0.32
0.79	37.74	0.2	517.05	1.65	0.33
0.77	39.47	0.21	509.8	1.62	0.35
0.74	42.45	0.23	499.75	1.59	0.36
0.73	42.84	0.23	519.72	1.66	0.38
0.66	48.78	0.26	484.83	1.54	0.39
0.61	52.29	0.27	481.17	1.53	0.41
0.57	55.01	0.3	447.68	1.43	0.43
0.64	49.86	0.32	432.78	1.38	0.44
0.62	52.01	0.33	432.17	1.38	0.46
0.58	54.32	0.35	424.89	1.35	0.47
0.66	48.81	0.38	408.93	1.3	0.49
0.61	52.13	0.42	378.4	1.21	0.51
0.54	57.53	0.5	342.47	1.09	0.54
0.55	56.31	0.56	308.72	0.98	0.55
0.5	59.74	0.61	293.13	0.93	0.57
0.5	60.26	0.64	289.83	0.92	0.59
0.42	64.98	0.68	276.25	0.88	0.6
0.45	63.43	0.69	278.35	0.89	0.61
0.41	66.04	0.73	273.24	0.87	0.63
0.33	70.71	0.84	242.73	0.77	0.65
0.37	68.2	0.85	245.42	0.78	0.66
0.37	68.2	0.91	242.44	0.77	0.7

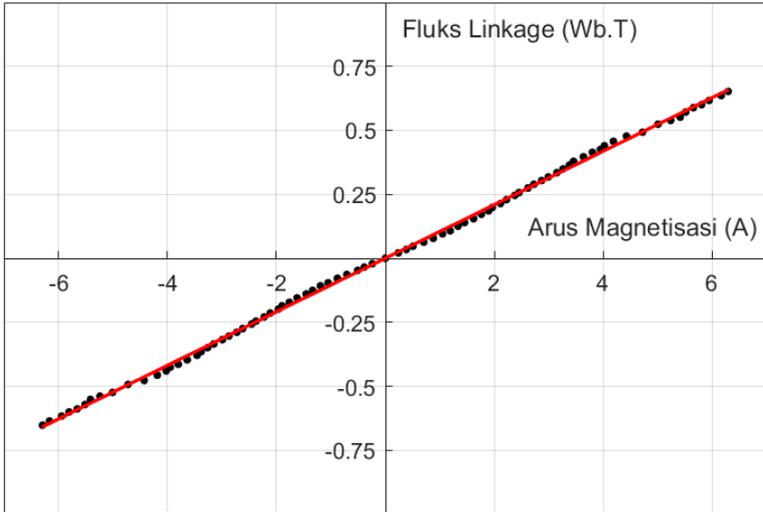
Dari data hasil pengujian dan perhitungan diatas, maka didapatkan nilai arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan *flux linkage* ( $\lambda$ ) untuk setiap fasanya, sehingga didapatkan kurva magnetisasi inti transformator seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.

Hasil dari pengujian kurva magnetisasi inti transformator ditunjukkan pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.3. Terlihat bentuk kurva magnetisasi inti transformator pada fasa R memiliki bentuk yang relatif sama dengan fasa T, sedangkan bentuk kurva magnetisasi inti

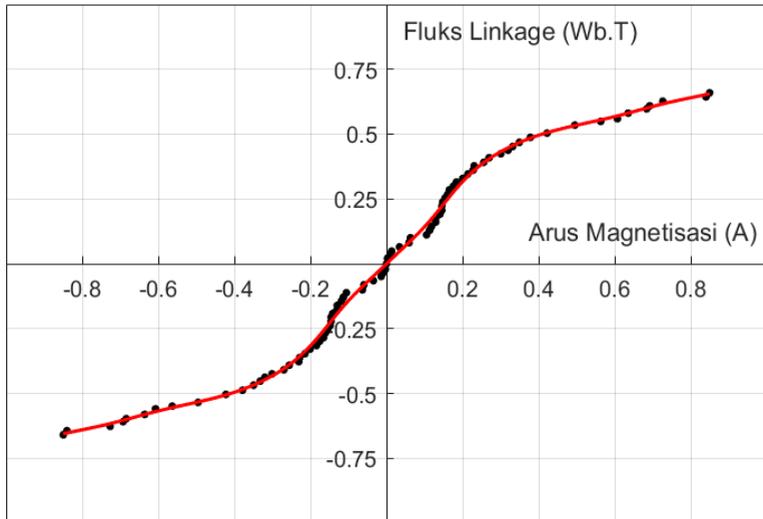
transformator pada fasa S memiliki bentuk yang berbeda dengan kedua fasa lainnya. Setelah dihubungkan dengan tegangan pada sisi primer yang dinaikkan secara bertahap hingga sebesar tegangan nominal transformator yaitu sekitar 220 V, area saturasi dari fasa R dan T dapat diamati. Namun, pada kurva magnetisasi pada fasa S masih berupa garis linier atau disebut dengan area non-saturasi. Hal ini disebabkan oleh *leg* fasa S lebih besar daripada *leg* dari kedua fasa lainnya.



**Gambar 4. 2** Kurva magnetisasi fasa R



**Gambar 4. 3** Kurva magnetisasi fasa S



**Gambar 4. 4** Kurva magnetisasi fasa T

## 4.2 Akuisisi Data

Akuisisi data untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* pada transformator uji 3-fasa 5 kVA dengan *leg* yang berbeda tanpa dihubungkan beban dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak LabVIEW. Akuisisi data dilakukan pada sudut penyalaaan  $0^\circ$ . Terdapat empat kondisi akuisisi data pada pengujian ini. Berikut adalah kondisi-kondisi tersebut untuk mendapatkan karakteristik arus *inrush* ketika terdapat perbedaan *leg* pada transformator uji.

### 1) Pengujian 1

Pengujian pertama dilakukan dengan cara menguji setiap fasa secara bergantian pada sisi primer transformator uji. Pengujian dimulai pada fasa R. Kemudian, fasa R ini harus mengalami proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal transformator. Setelah proses magnetisasi, fasa R di-*energize* pada tegangan nominal transformator pula dengan menggunakan sudut penyalaaan  $0^\circ$  selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Setelah itu, dilakukan proses demagnetisasi selama 3 menit untuk mendapatkan kondisi sisa fluks yang sama dengan kondisi awal pengujian. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali pengambilan data. Setiap pengambilan data dilakukan proses yang sama, begitu juga untuk fasa S dan T.

### 2) Pengujian 2

Pengujian kedua dilakukan dengan cara menguji semua fasa dalam waktu bersamaan pada sisi primer transformator uji. Pengujian dimulai dengan proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal transformator. Setelah proses magnetisasi, ketiga fasa di-*energize* pada tegangan nominal transformator dengan menggunakan sudut penyalaaan  $0^\circ$  selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Setelah itu, dilakukan proses demagnetisasi selama 3 menit untuk mendapatkan kondisi sisa fluks yang sama dengan kondisi awal pengujian. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali pengambilan data.

### 3) Pengujian 3

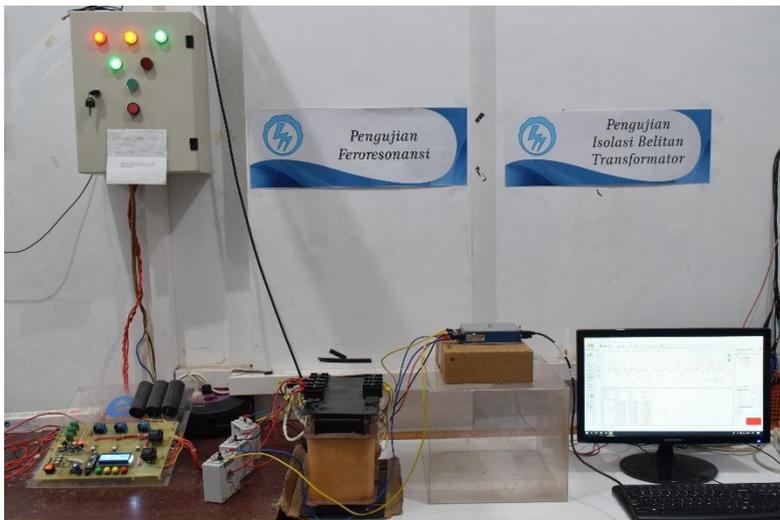
Pengujian ketiga dilakukan dengan cara menguji setiap fasa secara bergantian pada sisi primer transformator uji. Pengujian dilakukan dengan meng-*energize* transformator uji pada tegangan yang bervariasi, dimulai dengan tegangan 20 V, kemudian dinaikkan pada setiap kelipatannya hingga mencapai tegangan 220 V. Dengan asumsi

fasa R dan T memiliki karakteristik yang hampir sama, maka pengujian dilakukan pada fasa R dan S saja.

#### 4) Pengujian 4

Pengujian keempat dilakukan dengan cara menguji ketiga fasa secara bersamaan pada sisi primer transformator uji. Pengujian dilakukan dengan meng-*energize* transformator uji pada tegangan yang bervariasi, dimulai dengan tegangan 20 V, kemudian dinaikkan pada setiap kelipatannya hingga mencapai tegangan 220 V.

Akuisisi data yang dilakukan pada transformator uji, yaitu transformator 3-fasa 5 kVA dengan besar *leg* yang berbeda dengan pengujian per-fasa secara bergantian dan pengujian tiga fasa secara bersamaan. Dengan membandingkan data dari semua pengujian akan dapat diketahui pengaruh perbedaan besar *leg* transformator terhadap karakteristik dari arus *inrush*.



**Gambar 4. 5** Proses akuisisi data pada transformator uji

### 4.3 Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan pada sudut penyalaan  $0^\circ$ . Cara penyambungan peralatan-peralatan dalam pengujian, yaitu alat modul pensaklaran dan demagnetisasi, alat pengamatan, alat pengukuran, serta alat pendukung lainnya dengan transformator uji pada setiap proses pengambilan data selalu sama.

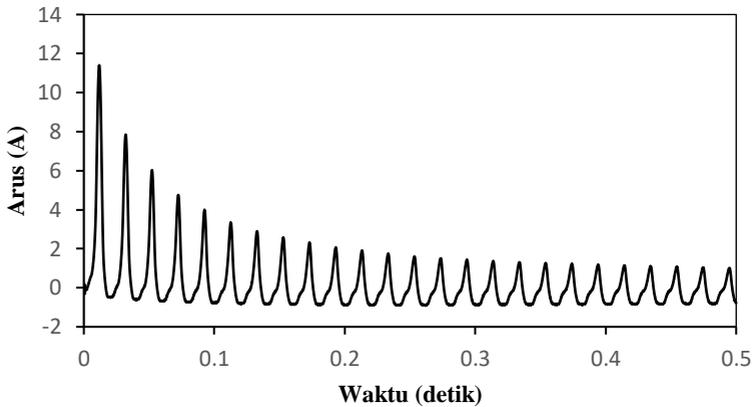
#### 4.3.1 Hasil Pengukuran Pengujian 1

##### 4.3.1.1 Hasil Pengukuran Fasa R

Data hasil pengujian pada fasa R ditunjukkan pada tabel 4.7. Dari tabel 4.7 dapat dilihat bahwa besar arus *inrush* pada transformator uji fasa R ketika dihubungkan dengan sumber 220 V berkisar antara  $10.83I_{nl}$  –  $15.21I_{nl}$ , dimana besar arus tanpa beban ( $I_{nl}$ ) adalah 0.75 A. Bentuk gelombang dari arus *inrush* dapat diamati pada gambar 4.4.

**Tabel 4. 7** Hasil pengujian arus *inrush* pada transformator uji fasa R

Percobaan Ke-	Tegangan (V)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Arus <i>no Load</i> (A)	Persentase Arus <i>Inrush</i> terhadap Arus Tanpa Beban
1	220	8.13	0.75	$10.83I_{nl}$
2	220	9.83	0.75	$13.11I_{nl}$
3	220	11.41	0.75	$15.21I_{nl}$
4	220	9.92	0.75	$13.22I_{nl}$
5	220	9.92	0.75	$13.22I_{nl}$



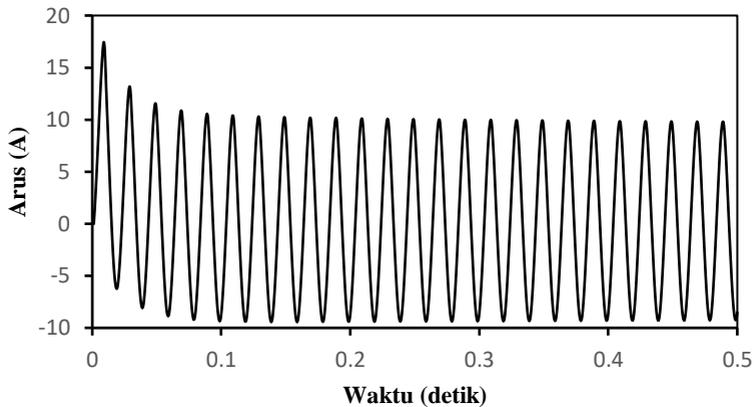
**Gambar 4. 6** Bentuk gelombang arus transformator uji fasa R

#### 4.3.1.2 Hasil Pengukuran Fasa S

Data hasil pengujian pada fasa R ditunjukkan pada tabel 4.8. Dari tabel 4.8 dapat dilihat bahwa besar arus *inrush* pada transformator uji fasa S ketika dihubungkan dengan sumber 220 V berkisar antara  $1.51I_{nl}$  –  $1.83I_{nl}$ , dimana besar arus tanpa beban ( $I_{nl}$ ) adalah 9.51 A. Jika dibandingkan dengan fasa R, arus *no load* fasa S 12 kali lebih besar dari arus *no load* fasa R. Hal ini dipengaruhi oleh besar *leg* pada fasa S lebih besar dari pada fasa R. Bentuk gelombang dari arus *inrush* dapat diamati pada gambar 4.5.

**Tabel 4. 8** Hasil pengujian arus *inrush* pada transformator uji fasa S

Percobaan Ke-	Tegangan (V)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Arus <i>no Load</i> (A)	Persentase Arus <i>Inrush</i> terhadap Arus Tanpa Beban
1	220	14.34	9.51	$1.51I_{nl}$
2	220	16.40	9.51	$1.72I_{nl}$
3	220	17.44	9.51	$1.83I_{nl}$
4	220	15.80	9.51	$1.66I_{nl}$
5	220	15.77	9.51	$1.66I_{nl}$



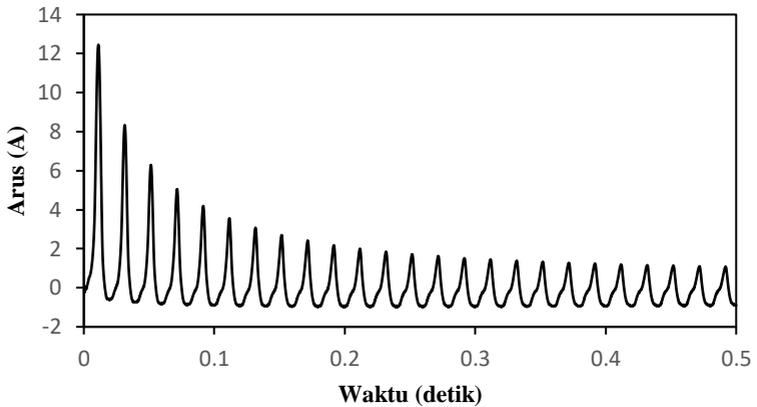
**Gambar 4. 7** Bentuk gelombang arus transformator uji fasa S

#### 4.3.1.3 Hasil Pengukuran Fasa T

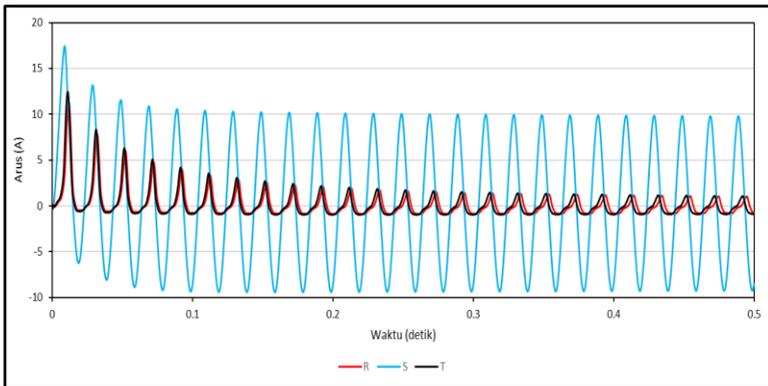
Data hasil pengujian pada fasa T ditunjukkan pada tabel 4.9. Dapat dilihat bahwa besar arus *inrush* pada transformator uji fasa T ketika dihubungkan dengan sumber 220 V berkisar antara  $10.81I_{nl} - 16.45I_{nl}$ , dimana besar arus tanpa beban ( $I_{nl}$ ) adalah 0.76 A. Jika dilihat dari data yang dihasilkan, fasa R dan T memiliki besar arus *inrush* dan arus *no load* yang relatif sama, sehingga arus *inrush* pada fasa R dan T memiliki karakteristik yang sama. Bentuk gelombang dari arus *inrush* dapat diamati pada gambar 4.6.

**Tabel 4. 9** Hasil pengujian arus *inrush* pada transformator uji fasa T

Percobaan Ke-	Tegangan (V)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Arus <i>no Load</i> (A)	Persentase Arus <i>Inrush</i> terhadap Arus Tanpa Beban
1	220	8.18	0.76	$10.81I_{nl}$
2	220	9.03	0.76	$11.93I_{nl}$
3	220	8.92	0.76	$11.78I_{nl}$
4	220	12.45	0.76	$16.45I_{nl}$
5	220	10.11	0.76	$13.37I_{nl}$



**Gambar 4. 8** Bentuk gelombang arus transformator uji fasa T



**Gambar 4. 9** Perbandingan gelombang arus ketiga fasa

Perbandingan bentuk gelombang dari fasa R, S, dan T dapat diamati pada gambar 4.9 untuk membandingkan karakteristik gelombang arus *inrush* pada ketiga fasa ketika diuji setiap fasa secara bergantian dengan tegangan nominal transformator.

### 4.3.2 Hasil Pengukuran Pengujian 2

Data hasil pengujian 2 ditunjukkan pada tabel 4.10. Dari tabel 4.10 dapat dilihat bahwa besar arus *inrush* pada transformator uji 5 kVA 3-fasa ketika dihubungkan dengan sumber 220/380 V berkisar  $1.571I_{nl} - 5.93I_{nl}$  pada fasa R. Besar arus tanpa beban ( $I_{nl}$ ) adalah 1.67 A. Pada fasa S besar arus *inrush* berkisar antara  $1.22I_{nl} - 2.01I_{nl}$ , sedangkan arus tanpa beban sebesar 10.5 A. Pada fasa T besar arus *inrush* berkisar  $1.31I_{nl} - 7.67I_{nl}$ , sedangkan besar arus tanpa beban adalah 1.52 A. Dapat diamati melalui tabel 4.10 bahwa terjadi ketimpangan antara fasa S dengan kedua fasa lainnya. Besar arus tanpa beban pada fasa S lebih dari 7 kali lipat dari besar arus tanpa beban fasa R dan T. Bentuk gelombang arus pada transformator uji dapat dilihat pada gambar 4.10, 4.1, dan 4.12.

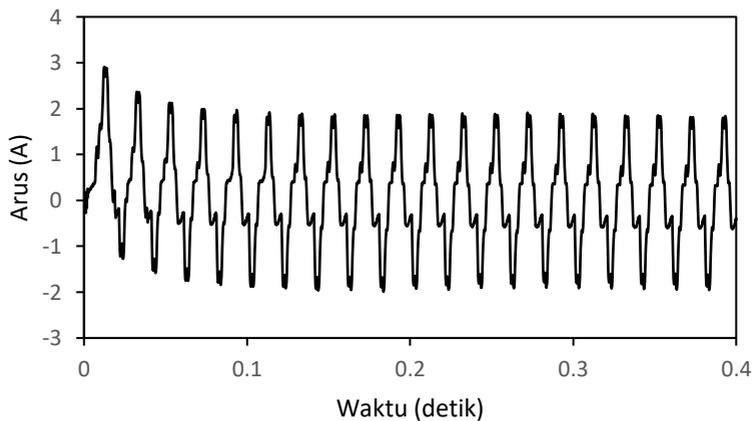
Jika dilihat dari data pengujian 1 dan 2 dapat diamati bahwa fasa S mempunyai arus *inrush* yang paling tinggi dari kedua fasa lainnya, begitu juga dengan arus *no load*-nya. Namun, fasa S mempunyai persentase arus *inrush* terhadap arus *no load* yang cukup rendah yaitu 1-2 kali arus *no load*-nya. Sedangkan pada fasa R dan T mempunyai persentase hingga 16 kali arus *no load*-nya. Hal ini berkaitan dengan kurva magnetisasi inti transformator uji, dimana fasa R dan T lebih cepat mencapai titik saturasinya dari pada fasa S yang belum mencapai titik saturasinya sehingga lonjakan arus yang terjadi pada fasa R dan T jauh lebih tinggi daripada fasa S.

**Tabel 4. 10** Data hasil pengujian arus *inrush* 3 fasa

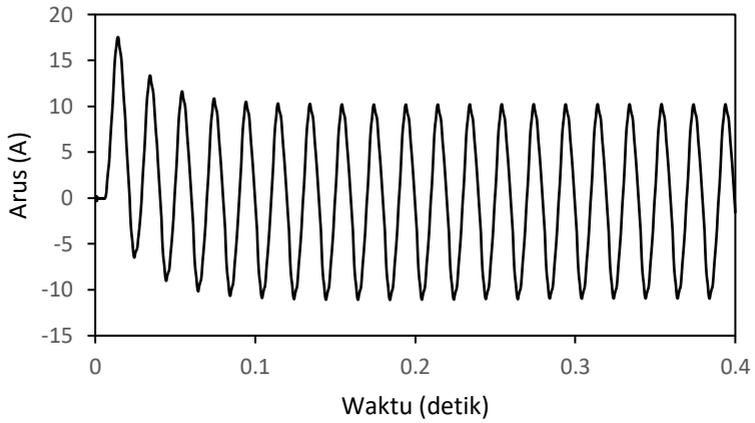
Tegangan (V)	Arus <i>Inrush</i> (A)		
	R	S	T
220	9.91	12.77	3.25
220	2.63	17.01	2.33
220	7.78	21.09	11.65
220	2.91	17.54	1.99
220	5.23	20.91	5.40

**Tabel 4. 11** Data hasil pengujian arus *inrush* 3 fasa

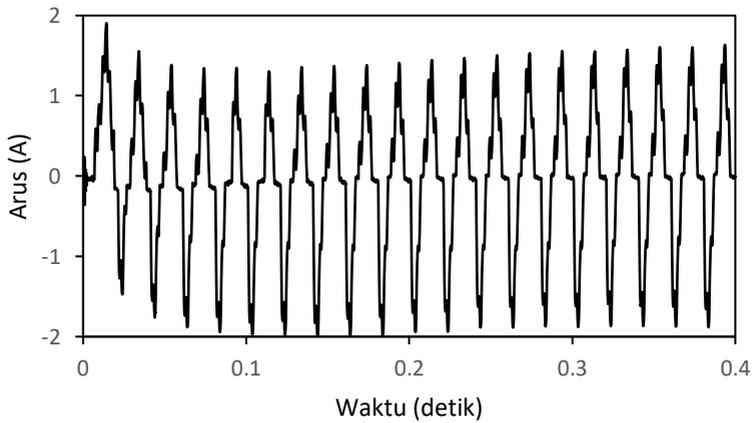
Arus no Load (A)			Persentase arus <i>inrush</i> terhadap arus no load		
R	S	T	R	S	T
1.67	10.5	1.52	$5.93I_{nl}$	$1.22I_{nl}$	$2.14I_{nl}$
1.67	10.5	1.52	$1.57I_{nl}$	$1.62I_{nl}$	$1.54I_{nl}$
1.67	10.5	1.52	$4.66I_{nl}$	$2.01I_{nl}$	$7.67I_{nl}$
1.67	10.5	1.52	$1.74I_{nl}$	$1.67I_{nl}$	$1.31I_{nl}$
1.67	10.5	1.52	$3.13I_{nl}$	$1.99I_{nl}$	$3.55I_{nl}$



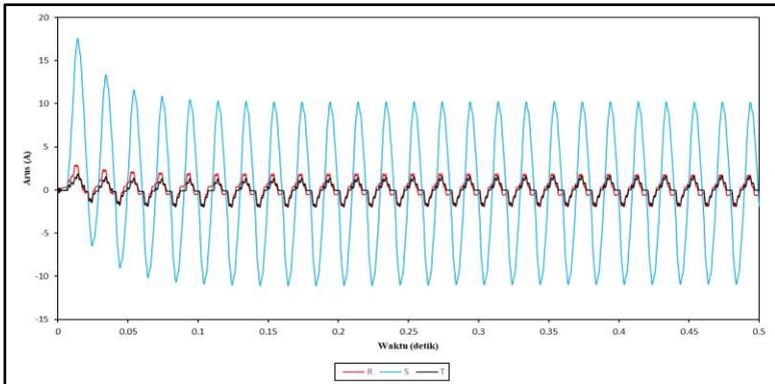
**Gambar 4. 10** Bentuk gelombang arus transformator uji fasa R



**Gambar 4. 11** Bentuk gelombang arus transformator uji fasa S



**Gambar 4. 12** Bentuk gelombang arus transformator uji fasa T



**Gambar 4. 13** Perbandingan gelombang arus ketiga fasa

Dilihat dari hasil perbandingan ketiga fasa yang ditunjukkan pada gambar 4.13, bentuk gelombang fasa R dan T tidak menunjukkan bentuk gelombang sinus murni. Terdapat distorsi yang menyebabkan gelombang tidak sinusoidal. Hal ini disebabkan oleh adanya harmonisa pada fasa R dan T, sedangkan pada fasa S, bentuk gelombang menunjukkan gelombang sinus murni. Munculnya harmonisa dikarenakan fasa R dan T telah mencapai kondisi saturasi pada tegangan tersebut.

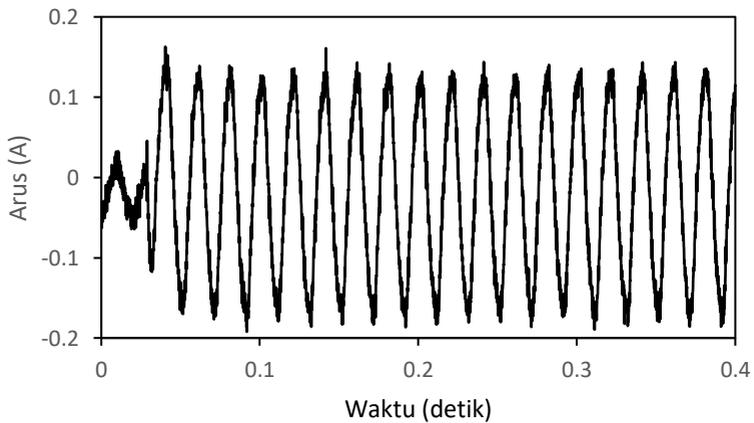
### 4.3.3 Hasil Pengukuran Pegujian 3

#### 4.3.3.1 Hasil Pengukuran Fasa R

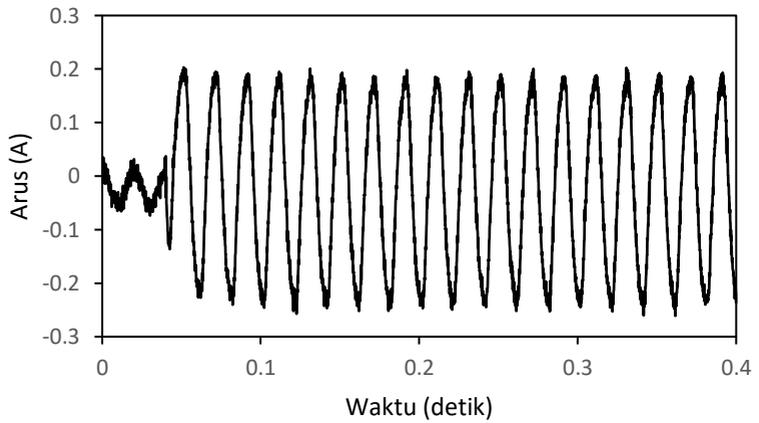
Data pengujian ke-3 pada fasa R dapat dilihat pada tabel 4.12. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kenaikan lonjakan arus *inrush* terjadi ketika transformator di-*energize* dengan tegangan diatas 180V. Nilai arus *inrush* mencapai 17 kali arus *no load*-nya, sedangkan pada tegangan dibawah 180 V, nilai arus *inrush* mulai dari 1-3 kali arus *no load*-nya. Bentuk gelombang arus pengujian pada fasa R ini dapat diamati pada gambar 4.14 – 4.24.

**Tabel 4. 12** Hasil pengujian arus *inrush* pada transformator uji fasa R

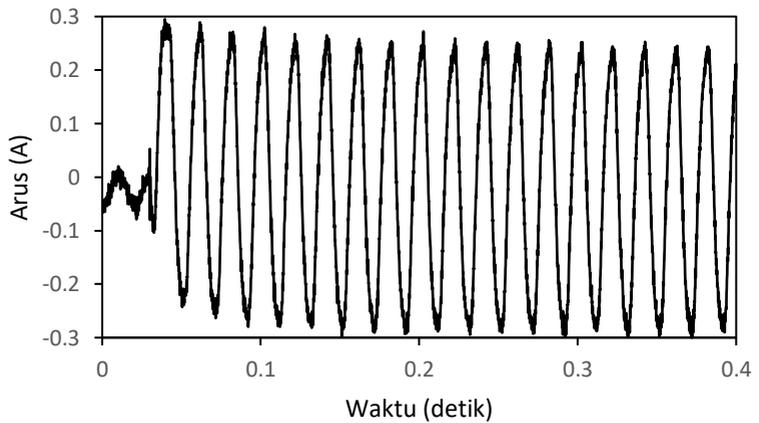
Percobaan Ke-	Tegangan (V)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Arus <i>no Load</i> (A)	Persentase Arus <i>Inrush</i> terhadap Arus Tanpa Beban
1	20	0.19	0.12	$1.62I_{nl}$
2	40	0.26	0.17	$1.57I_{nl}$
3	60	0.30	0.19	$1.57I_{nl}$
4	80	0.38	0.22	$1.74I_{nl}$
5	100	0.40	0.22	$1.83I_{nl}$
6	120	0.36	0.22	$1.63I_{nl}$
7	140	1.02	0.32	$3.17I_{nl}$
8	160	0.79	0.32	$2.44I_{nl}$
9	180	1.72	0.45	$3.79I_{nl}$
10	200	12.46	0.74	$16.85I_{nl}$
11	220	14.63	0.83	$17.56I_{nl}$



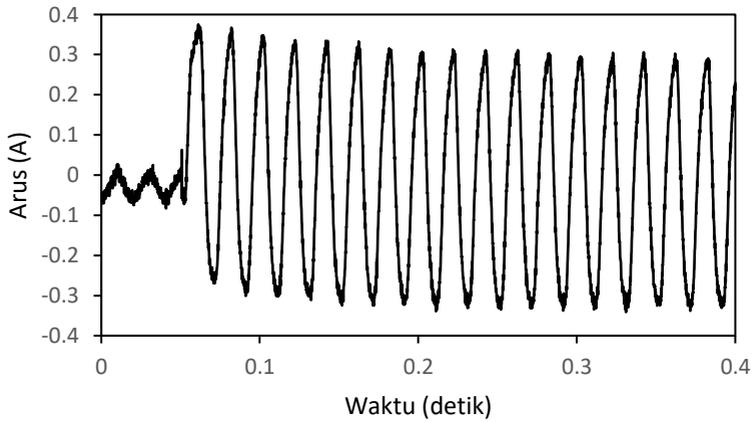
**Gambar 4. 14** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 20V



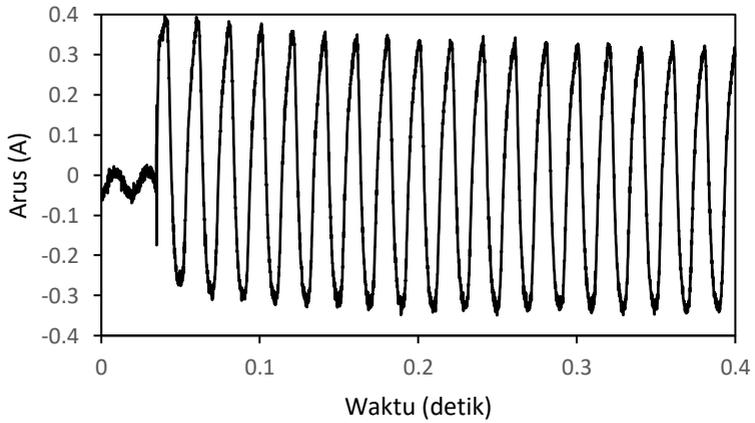
**Gambar 4. 15** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 40V



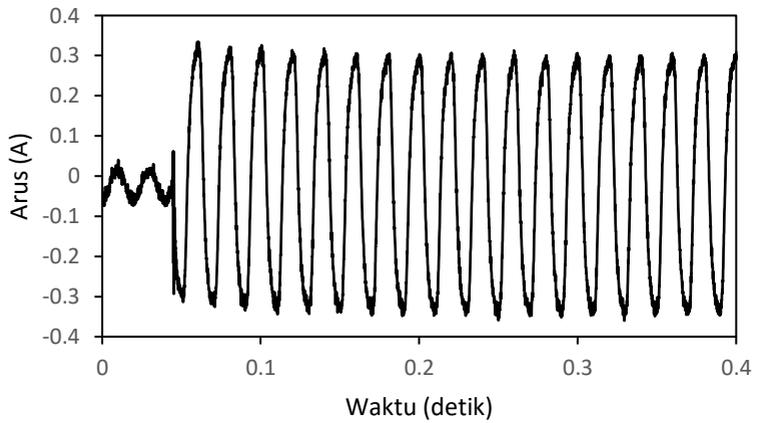
**Gambar 4. 16** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 60V



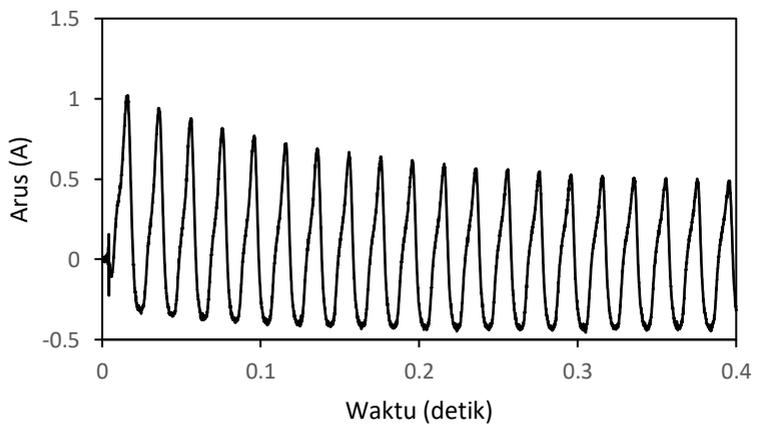
**Gambar 4. 17** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 80V



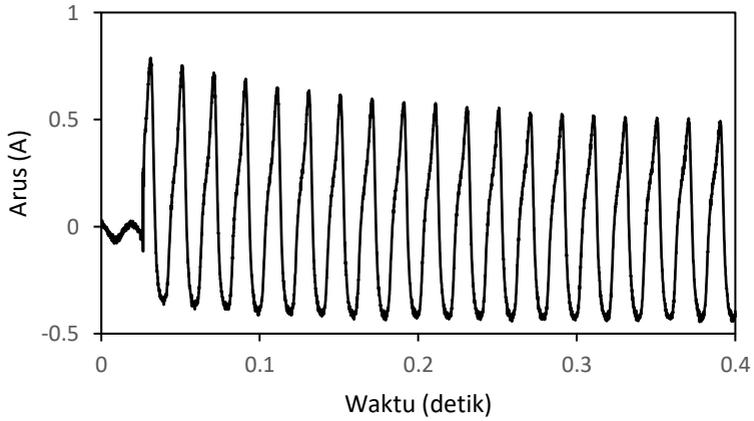
**Gambar 4. 18** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 100V



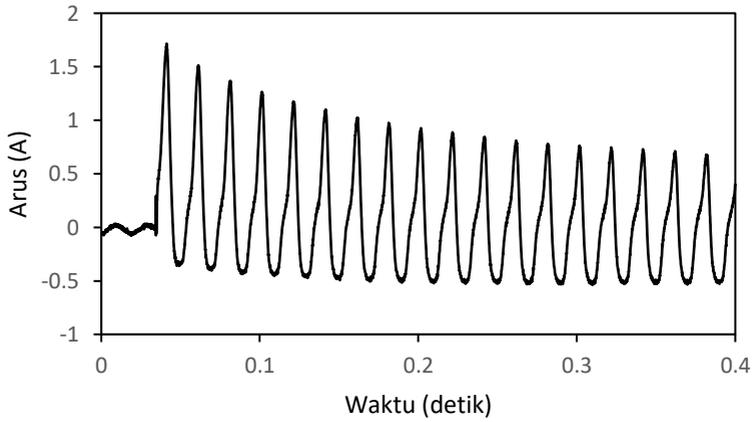
**Gambar 4. 19** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 120V



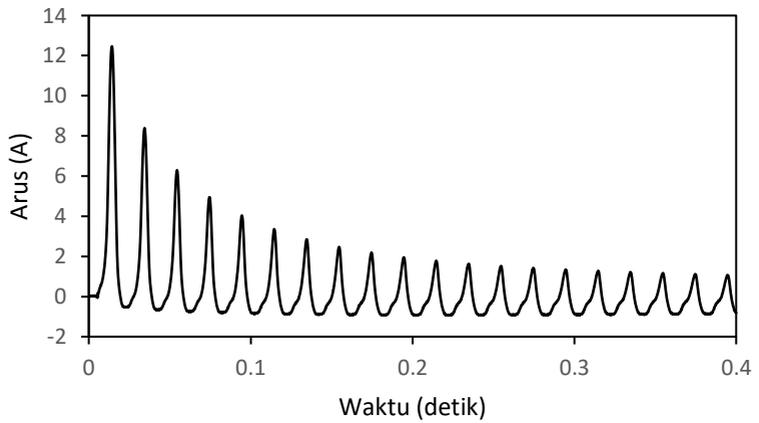
**Gambar 4. 20** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 140V



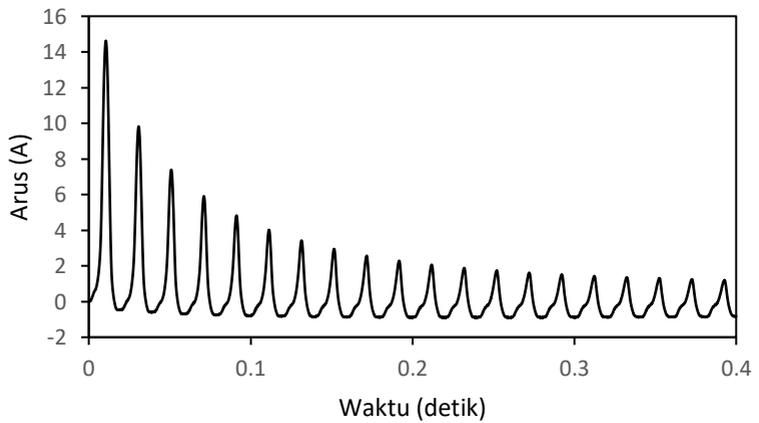
**Gambar 4. 21** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 160V



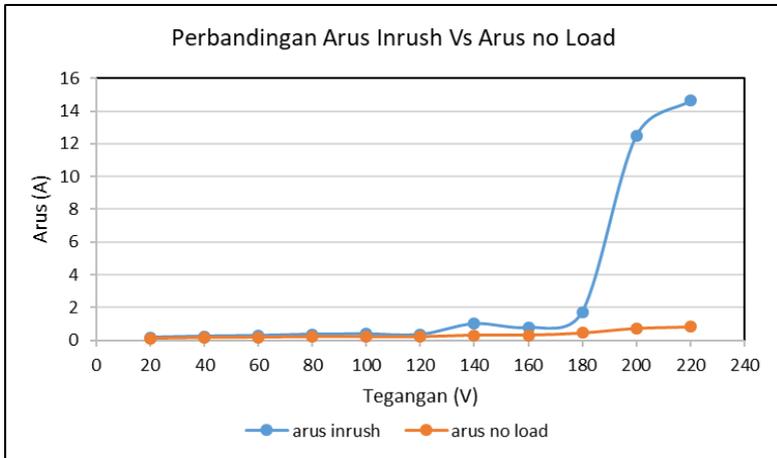
**Gambar 4. 22** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 180V



**Gambar 4. 23** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 200V



**Gambar 4. 24** Bentuk gelombang arus fasa R pada tegangan 220V



**Gambar 4. 25** Perbandingan nilai arus *inrush* dengan arus *no load* pada fasa R

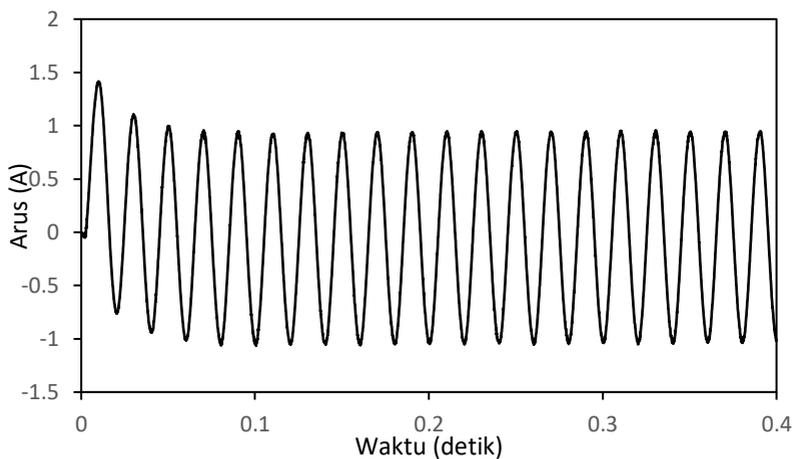
Dari gambar 4.25 pengujian fasa R diatas dapat diamati bahwa terjadi kenaikan lonjakan arus dimulai pada tegangan 180V dan akan semakin tinggi seiring dengan kenaikan tegangan yang diberikan.

#### 4.3.3.2 Hasil Pengukuran Fasa S

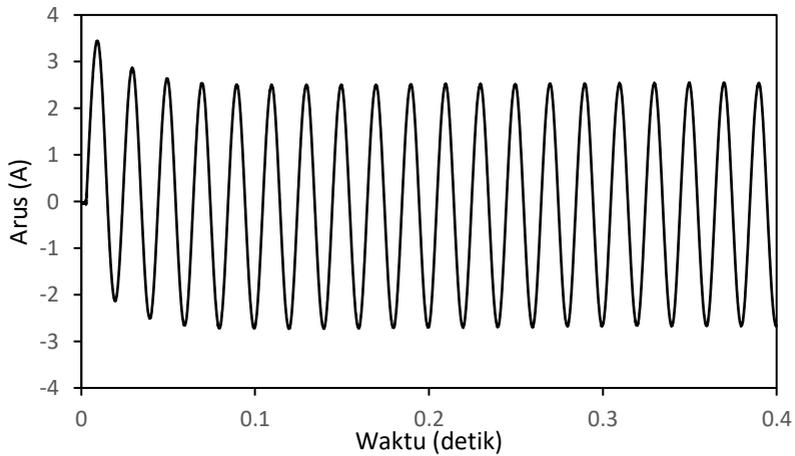
Data pengujian ke-3 pada fasa R dapat dilihat pada tabel 4.13. Setelah diamati hasil yang didapat pada tabel 4.13, maka dapat diketahui tidak ada lonjakan arus *inrush* yang tinggi pada fasa S. Nilai arus *inrush* hanya mencapai 1-2 kali arus *no load*-nya. Nilai arus *inrush* dan arus *no load* yang dihasilkan akan naik seiring tegangan masukan yang diberikan. Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka semakin tinggi pula nilai arus *inrush* dan arus *no load* transformator uji. Bentuk gelombang arus dari pengujian fasa S ditunjukkan pada gambar 4.26 – 4.30.

**Tabel 4. 13** Hasil pengujian arus *inrush* pada fasa S

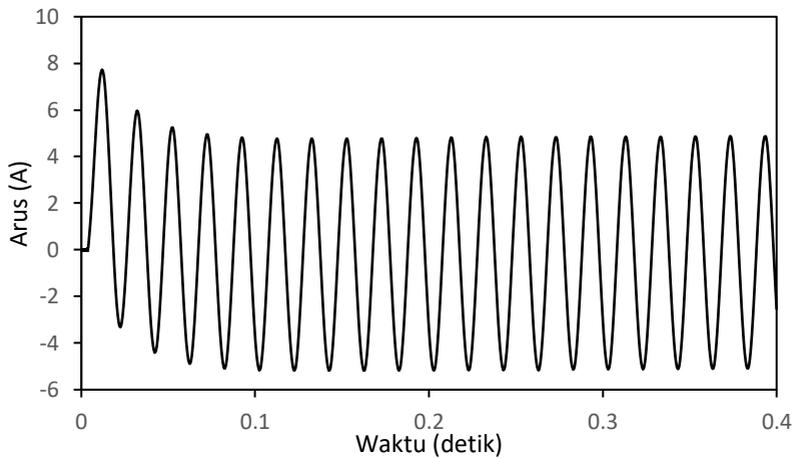
Percobaan Ke-	Tegangan (V)	Arus <i>Inrush</i> (A)	Arus <i>No Load</i> (A)	Persentase Arus <i>Inrush</i> terhadap Arus Tanpa Beban
1	20	1.42	1.31	$1.08I_{nl}$
2	40	2.40	1.82	$1.32I_{nl}$
3	60	3.44	2.48	$1.38I_{nl}$
4	80	4.85	3.60	$1.35I_{nl}$
5	100	6.07	3.80	$1.60I_{nl}$
6	120	7.71	4.41	$1.75I_{nl}$
7	140	8.83	4.41	$2.00I_{nl}$
8	160	10.75	5.25	$2.05I_{nl}$
9	180	10.89	5.56	$1.96I_{nl}$
10	200	15.52	7.98	$1.95I_{nl}$
11	220	17.44	10.21	$1.71I_{nl}$



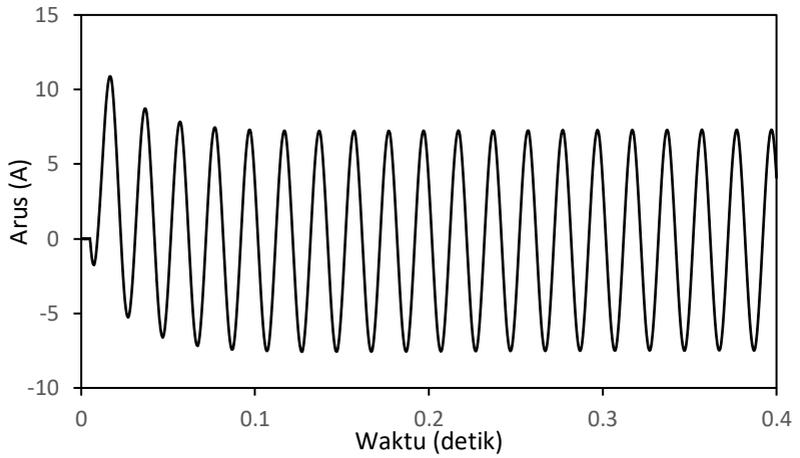
**Gambar 4. 26** Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 20 V



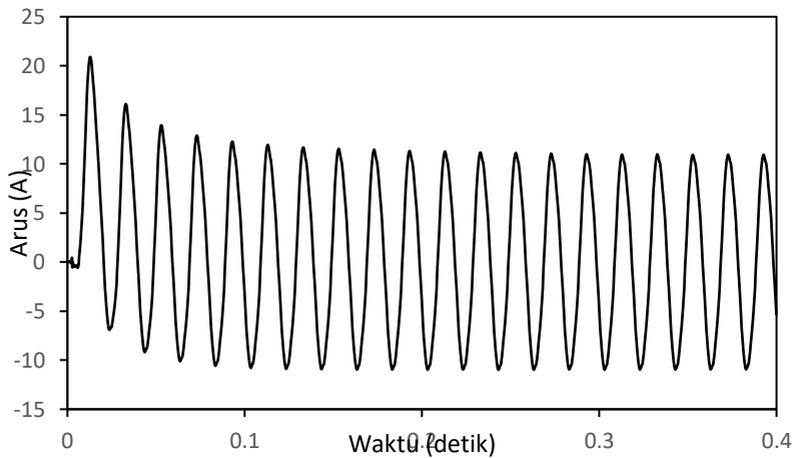
**Gambar 4. 27** Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 60 V



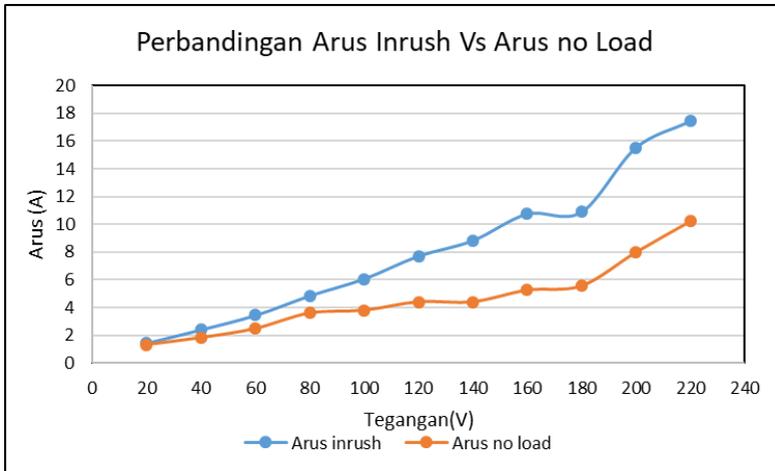
**Gambar 4. 28** Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 120 V



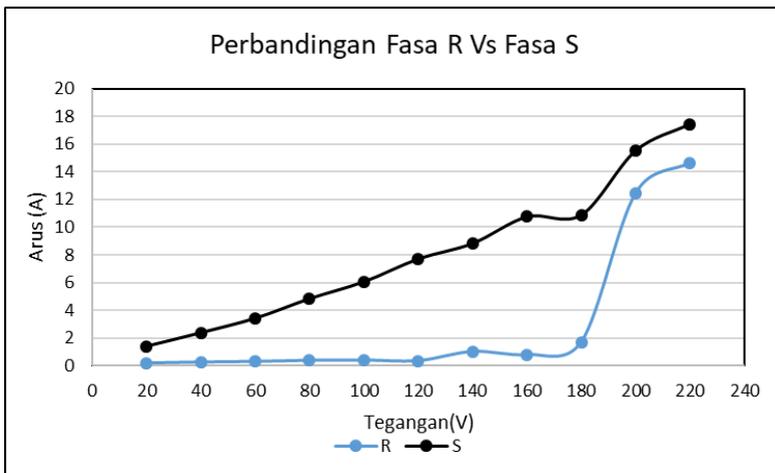
**Gambar 4. 29** Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangan 180 V



**Gambar 4. 30** Bentuk gelombang arus fasa S pada tegangann 220 V



Gambar 4. 31 Perbandingan nilai arus *inrush* dengan arus *no load* pada fasa S



Gambar 4. 32 Perbandingan arus *inrush* pada fasa R dan S

Dari gambar-gambar pengujian fasa S, diketahui bahwa bentuk gelombang arus merupakan gelombang sinus murni. Pada gambar 4.31 dapat diamati bahwa lonjakan arus *inrush* yang terjadi pada fasa S relatif linier seiring dengan tegangan yang diberikan. Hal ini membuktikan bahwa hingga tegangan 220 V fasa S belum juga mengalami kondisi

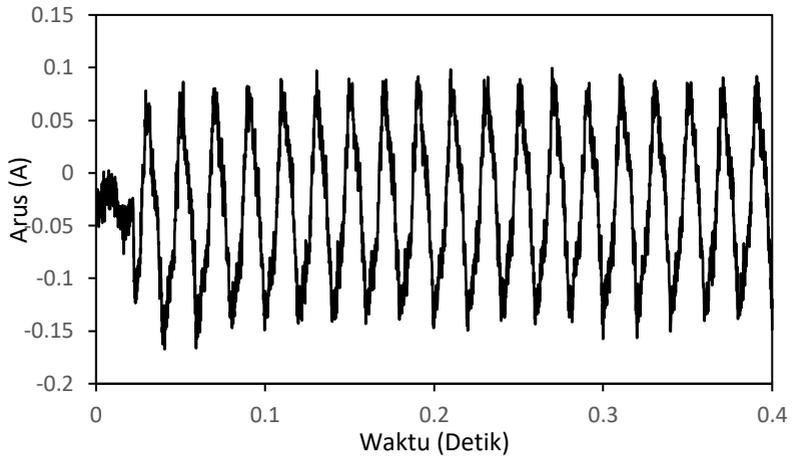
saturasi. Perbandingan hasil pengujian ke-3 pada fasa R dan fasa S ditunjukkan pada gambar 4.32.

#### 4.3.4 Hasil Pengukuran Pengujian 4

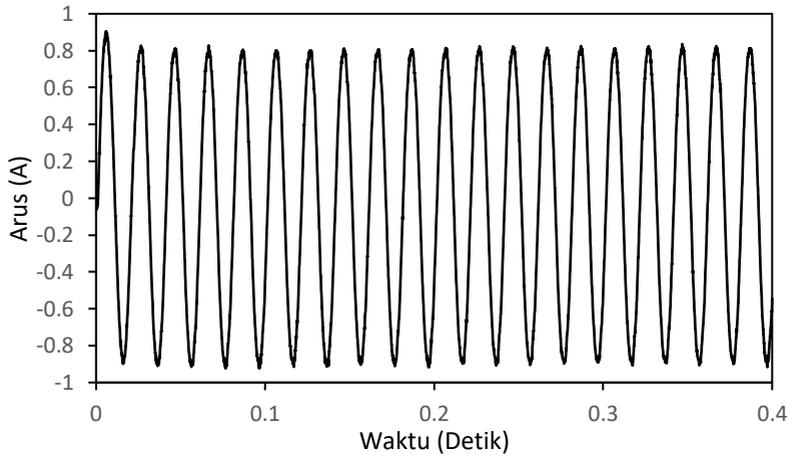
Setelah dilakukan pengujian tiga fasa secara bersamaan dengan variasi tegangan maka didapatkan data yang ditunjukkan pada tabel 4.14. Dari data tersebut dapat diamati, mulai terjadi lonjakan pada fasa T setelah diberikan tegangan 200 V sama seperti hasil pengujian 3 pada tabel 4.13. sedangkan pada fasa R baru mengalami lonjakan pada tegangan 240 V, hal ini dikarenakan pada fasa R mengalami penyalan yang lebih lambat dari kedua fasa lainnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.48, sehingga arus *inrush* pada fasa R mempunyai nilai yang rendah. Hal ini sesuai dengan studi [14] bahwa sudut penyalan mempengaruhi tinggi dan rendahnya nilai arus *inrush* pada transformator. Pada fasa S sama dengan pengujian sebelumnya yaitu tidak terjadi lonjakan nilai arus yang tinggi. Selain itu, dengan melihat data yang dihasilkan dari pengujian 1 sampai dengan pengujian 4, tanpa adanya proses demagnetisasi arus *inrush* yang dihasilkan pada transformator uji lebih besar dari pada saat dilakukan proses demagnetisasi. Hal ini menunjukkan bahwa proses demagnetisasi berpengaruh pada keberadaan fluks sisa dalam transformator uji. Bentuk gelombang pengujian ini dapat diamati pada gambar 4.33 – 4.53.

**Tabel 4. 14** Hasil pengujian arus *inrush* pada transformator uji

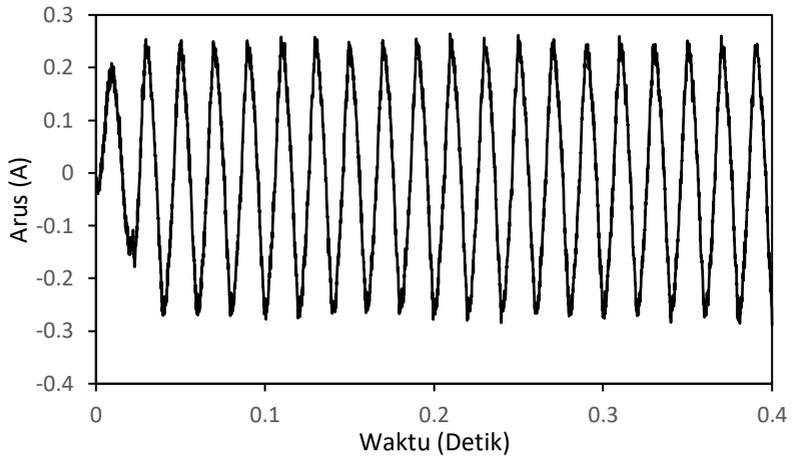
U (V)	Arus <i>Inrush</i> (A)			Arus no Load (A)			Persentase Arus <i>Inrush</i> terhadap arus no load ( $I_{nl}$ )		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
20	0.17	0.92	0.29	0.10	0.59	0.18	1.67	1.57	1.57
40	0.24	2.01	0.29	0.09	1.17	0.17	2.52	1.72	1.69
60	0.33	4.39	0.59	0.15	2.13	0.29	2.27	2.06	2.03
80	0.31	4.88	0.57	0.16	2.44	0.25	1.88	2.00	2.27
100	0.46	6.69	0.79	0.27	3.21	0.50	1.69	2.08	1.58
120	0.67	8.45	1.41	0.40	4.17	0.63	1.67	2.02	2.25
140	0.93	8.79	1.19	0.47	4.85	0.67	1.98	1.81	1.79
160	0.88	7.64	1.01	0.49	4.72	0.55	1.79	1.62	1.84
180	1.18	12.11	1.09	0.69	5.93	0.66	1.72	2.04	1.66
200	2.60	16.89	4.60	1.40	8.03	1.01	1.86	2.10	4.57
220	1.53	29.28	15.60	1.50	10.30	1.02	1.02	2.84	15.25
240	20.64	33.99	9.65	1.53	11.89	1.26	13.51	2.86	7.69



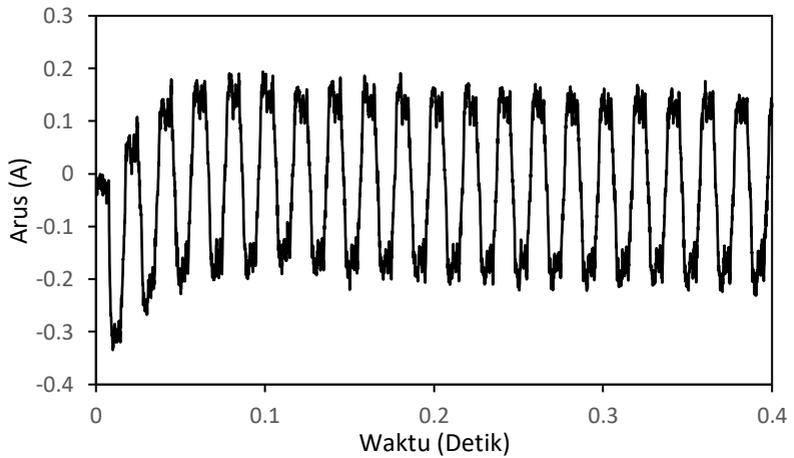
**Gambar 4.33** Bentuk gelombang fasa R dengan tegangan 20V



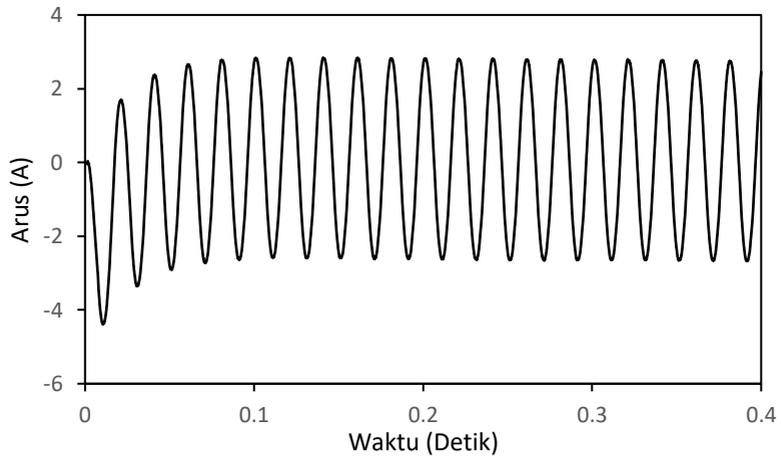
**Gambar 4.34** Bentuk gelombang fasa S dengan tegangan 20V



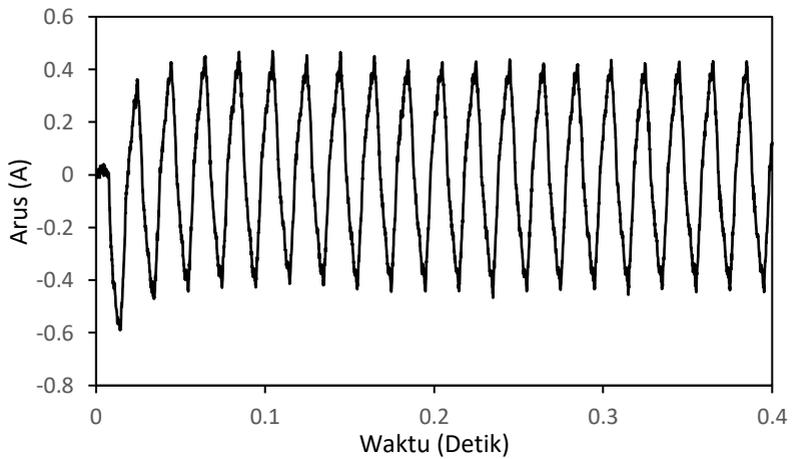
**Gambar 4. 35** Bentuk gelombang fasa T dengan tegangan 20V



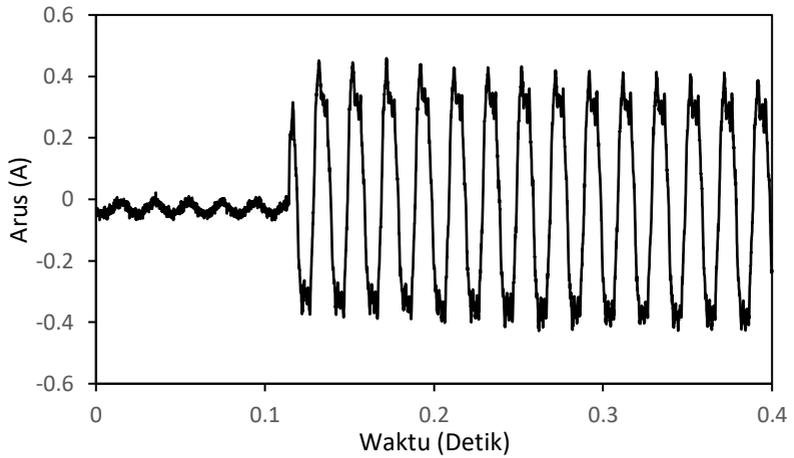
**Gambar 4. 36** Bentuk gelombang fasa R tegangan 60V



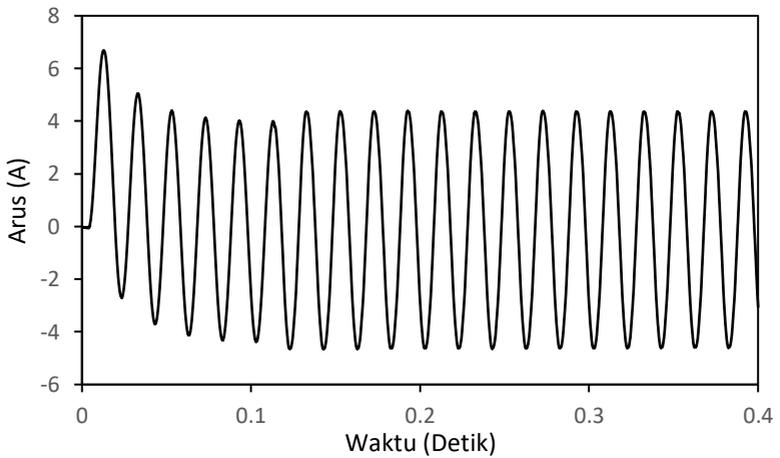
**Gambar 4. 37** Bentuk gelombang fasa S tegangan 60V



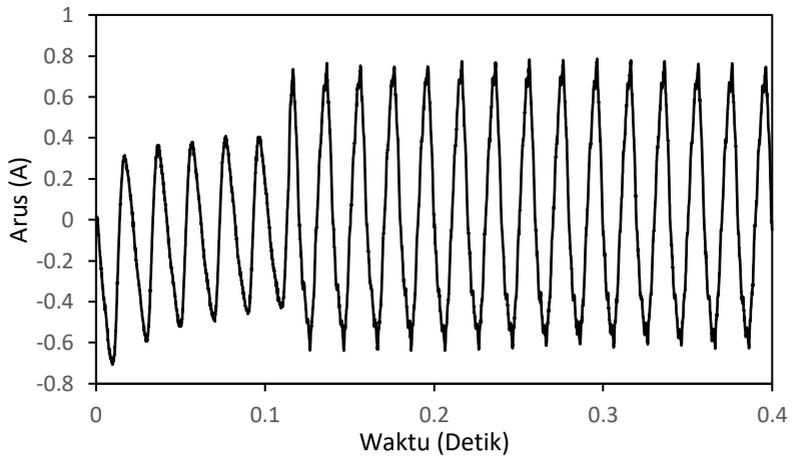
**Gambar 4. 38** Bentuk gelombang fasa T tegangan 60V



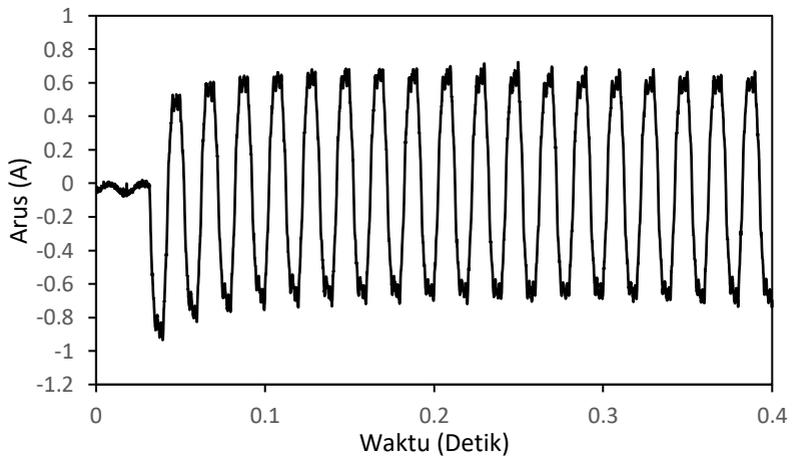
**Gambar 4. 39** Bentuk gelombang fasa R tegangan 100V



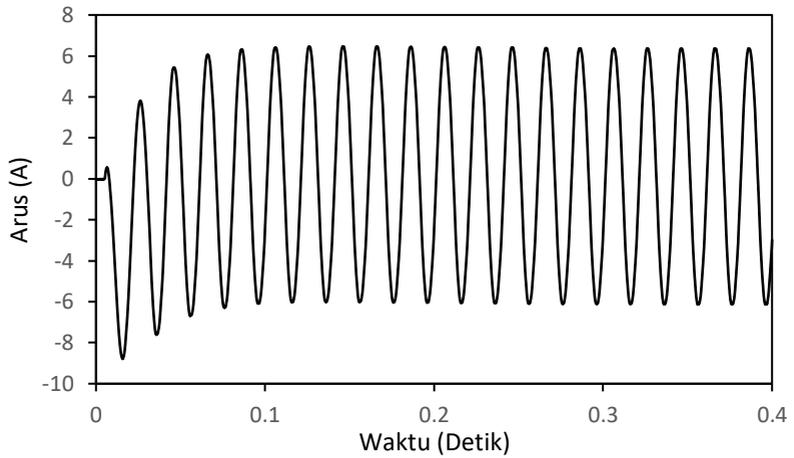
**Gambar 4. 40** Bentuk gelombang fasa S tegangan 100V



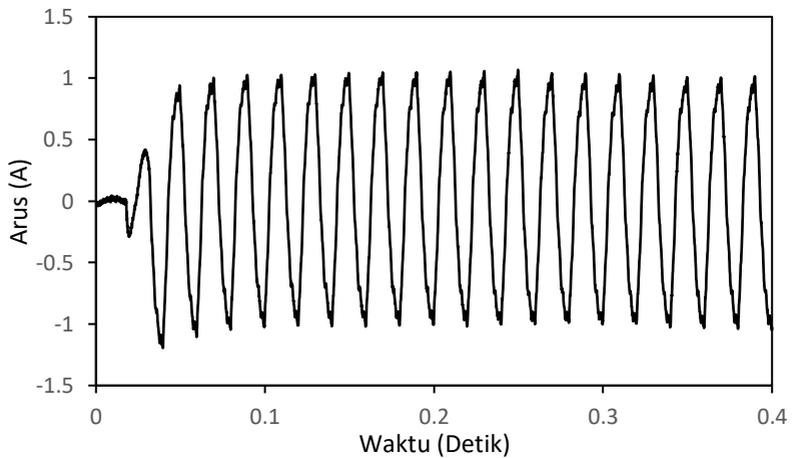
**Gambar 4. 41** Bentuk gelombang fasa T tegangan 100V



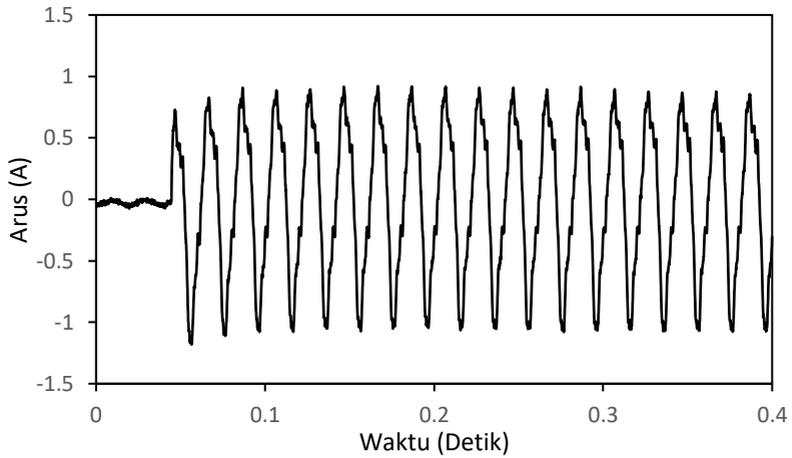
**Gambar 4. 42** Bentuk gelombang fasa T tegangan 140V



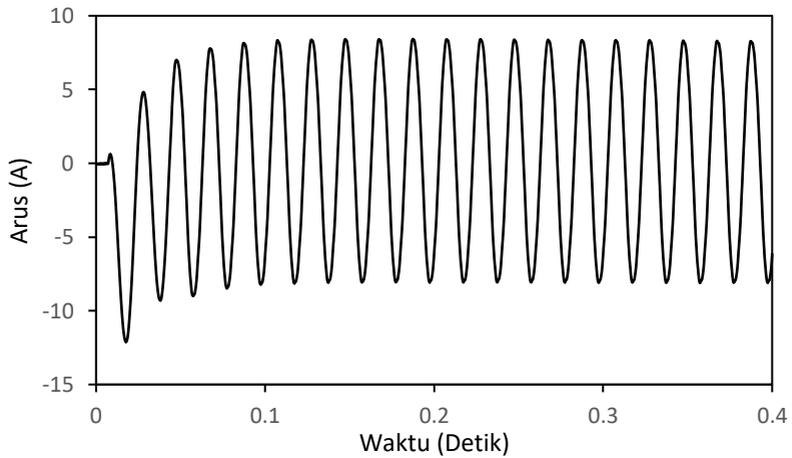
**Gambar 4. 43** Bentuk gelombang fasa S tegangan 140V



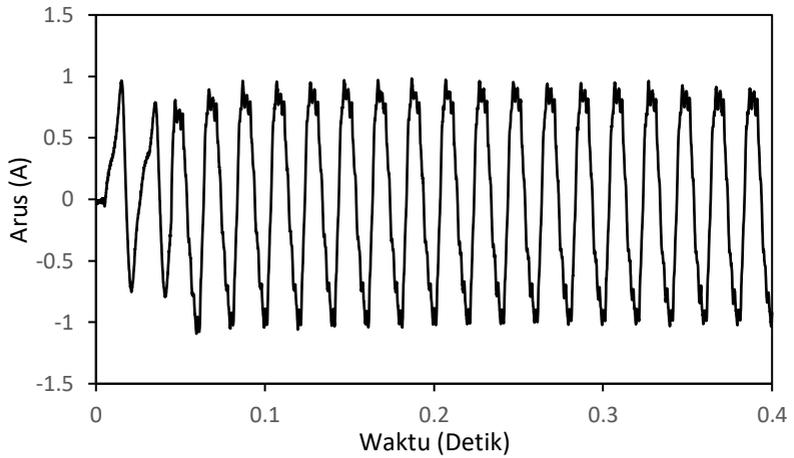
**Gambar 4. 44** Bentuk gelombang fasa T tegangan 140V



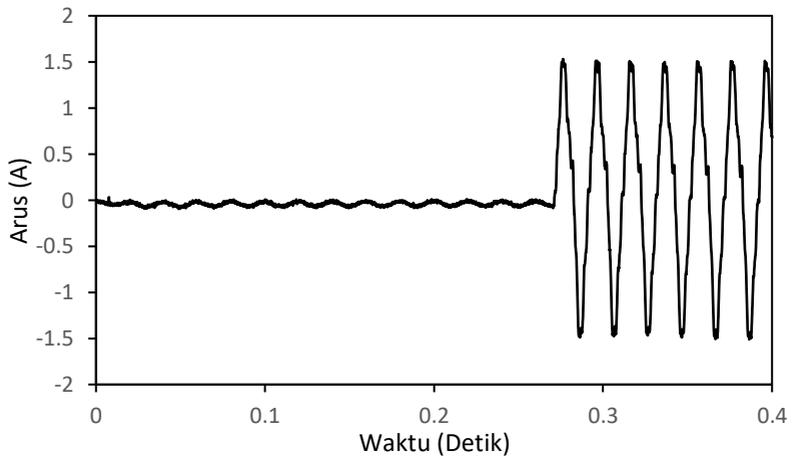
**Gambar 4. 45** Bentuk gelombang fasa R tegangan 180V



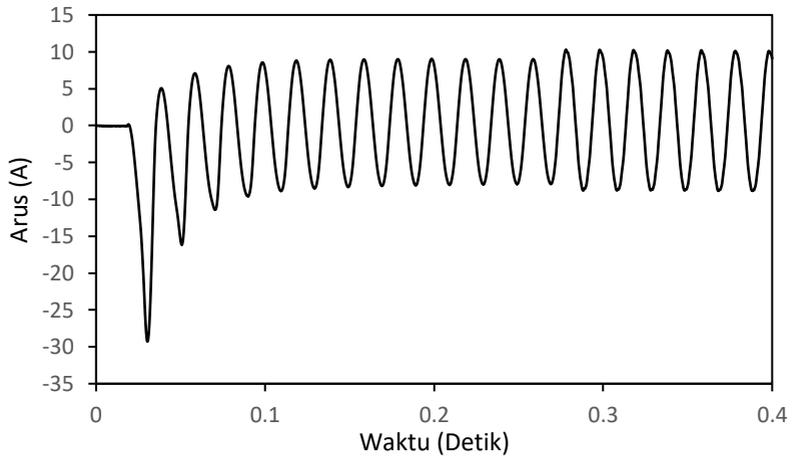
**Gambar 4. 46** Bentuk gelombang fasa S tegangan 180V



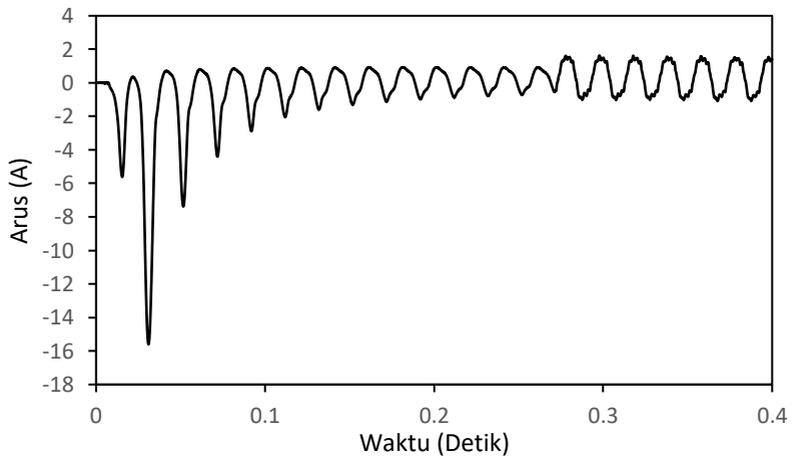
**Gambar 4. 47** Bentuk gelombang fasa T tegangan 180V



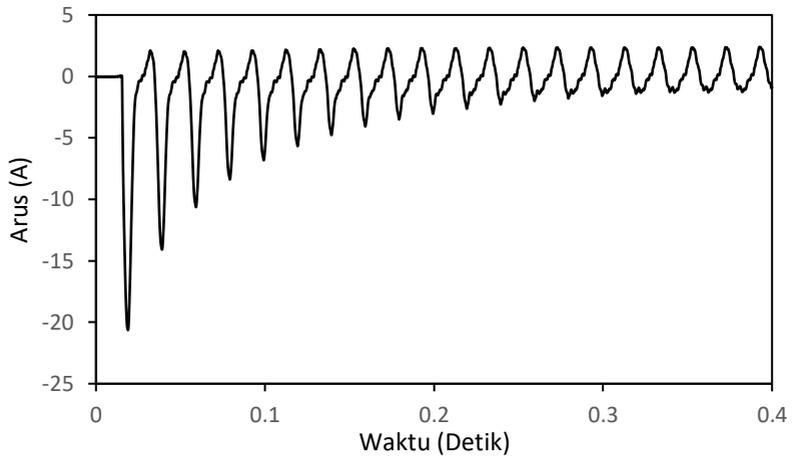
**Gambar 4. 48** Bentuk gelombang fasa R tegangan 220V



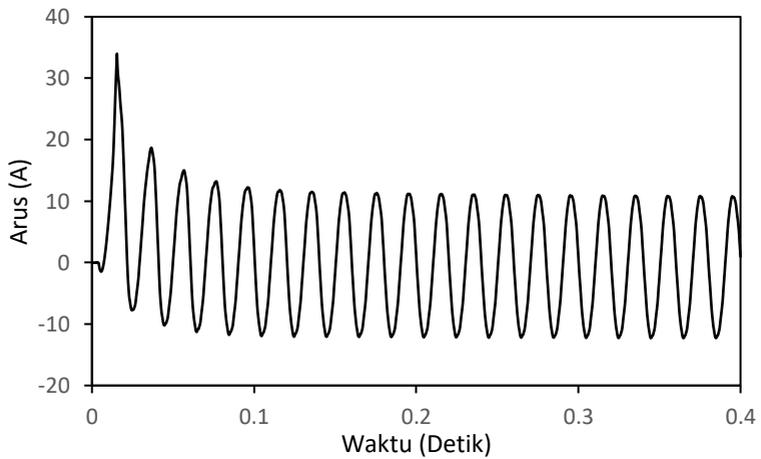
**Gambar 4. 49** Bentuk gelombang fasa S tegangan 220V



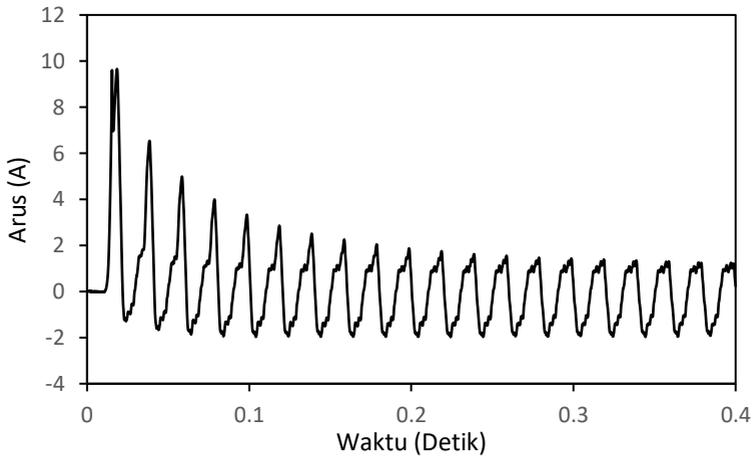
**Gambar 4. 50** Bentuk gelombang fasa T tegangan 220V



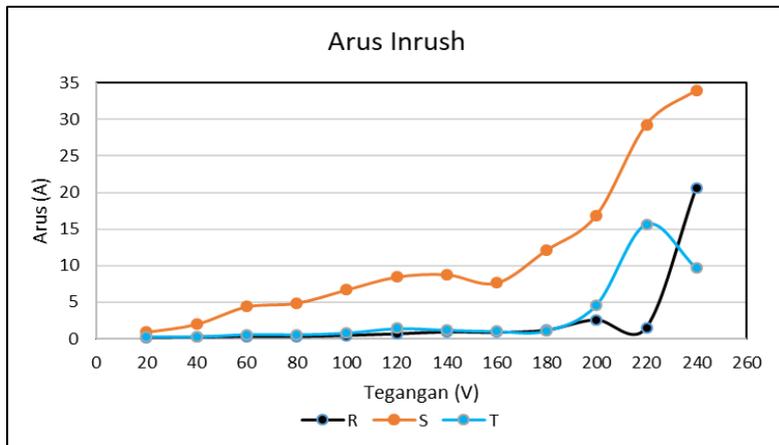
**Gambar 4. 51** Bentuk gelombang fasa R tegangan 240V



**Gambar 4. 52** Bentuk gelombang fasa S tegangan 240V



**Gambar 4. 53** Bentuk gelombang fasa T tegangan 240V



**Gambar 4. 54** Perbandingan arus *inrush* ketiga fasa

Perbandingan arus *inrush* ketiga fasa pada pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.54. Dilihat dari bentuk gelombang arus pengujian pada ketiga fasa tersebut, pada fasa S masih berbentuk gelombang sinus murni tanpa adanya distorsi saat diberikan tegangan masuk hingga 240 V. Hal ini terjadi karena karakteristik kurva magnetisasi dari fasa S yang

berbentuk garis linier atau disebut dengan area non-saturasi. Jadi, hingga nilai tegangan 240V inti transformator fasa S belum mencapai titik saturasinya. Berbeda dengan fasa R dan T terdapat distorsi pada gelombang arus yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena adanya harmonisa pada fasa R dan T. Semakin besar tegangan yang diberikan pada transformator, maka semakin besar pula nilai harmonisa yang muncul pada fasa R dan T. Hal ini terjadi karena ketika titik pada suatu material berada pada titik saturasi, atau melebihi karakteristik magnetisasi material inti, maka akan timbul harmonisa orde ke-3 pada transformator. Sesuai dengan karakteristik kurva magnetisasi inti transformator uji yang ditunjukkan pada gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 bahwa titik saturasi dari fasa R dan T memiliki titik saturasi yang rendah, sedangkan pada fasa S belum menunjukkan titik saturasi. Perbandingan nilai harmonisa dapat dilihat pada tabel 4.15.

Selisih arus yang begitu besar antara fasa R dan T dengan fasa S disebabkan oleh adanya perbedaan besar *leg* transformator. Semakin besar *leg* transformator maka luas dari inti transformator akan semakin besar sehingga akan mempengaruhi besarnya fluks yang terjadi di dalam inti transformator tersebut. Semakin tinggi fluks sisa ataupun fluks sementara yang ada pada inti transformator, maka semakin tinggi pula arus *inrush* yang dihasilkan ketika transformator di-*energize* oleh sumber tegangan. Kondisi ini sesuai dengan data pengujian arus *inrush*. Ketika suatu inti transformator mencapai titik saturasi, maka arus *inrush* yang dihasilkan akan semakin besar pula dibandingkan dengan inti transformator yang masih pada area non-saturasi. Hal ini dibuktikan dengan perbandingan arus *inrush* dengan arus tanpa beban ( $I_{nl}$ ), dimana pada fasa R dan T memiliki perbandingan nilai yang lebih tinggi daripada fasa S.

**Tabel 4. 15** Nilai harmonisa transformator uji pada pengujian ke-4

Frekuensi (Hz)	R	S	T	R	S	T	R	S	T
	240 V	240V	240V	220V	220V	220V	180V	180V	180V
50	2.22	12.2	1.81	0.65	9.34	1.27	0.78	8.26	0.91
100	1.12	0.62	0.49	0.05	0.52	0.28	0.09	0	0.13
150	0.26	0.46	0.43	0.09	0.2	0.21	0.13	0.14	0.1
200	0.18	0.01	0.07	0	0	0.08	0.01	0	0.01
250	0.07	0	0.03	0	0	0.03	0.01	0	0.18
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
450	0.09	0	0.08	0.05	0	0.04	0.05	0	0.07
500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.5267	0.0633	0.3653	0.1696	0.0597	0.2856	0.2186	0.0169	0.2775
<b>THD %</b>	<b>52.67</b>	<b>6.33</b>	<b>36.53</b>	<b>16.96</b>	<b>5.97</b>	<b>28.56</b>	<b>21.86</b>	<b>1.69</b>	<b>27.75</b>

**Tabel 4. 16** Nilai harmonisa transformator uji pada pengujian ke-4

<b>Frekuensi (Hz)</b>	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>	<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>
	<b>100V</b>	<b>100V</b>	<b>100V</b>	<b>60V</b>	<b>60V</b>	<b>60V</b>	<b>20V</b>	<b>20V</b>	<b>20V</b>
50	0.31	4.41	0.55	0.18	2.73	0.37	0.08	0.86	0.23
100	0.01	0	0.07	0	0	0	0	0	0
150	0.06	0.09	0.03	0.04	0.05	0.05	0.01	0.02	0.01
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
450	0.02	0	0.02	0.01	0	0.01	0	0	0
500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.206	0.0204	0.1408	0.2426	0.0171	0.127	0.1688	0.0176	0.0591
<b>THD %</b>	<b>20.6</b>	<b>2.04</b>	<b>14.08</b>	<b>24.26</b>	<b>1.71</b>	<b>12.7</b>	<b>16.88</b>	<b>1.76</b>	<b>5.91</b>

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah melakukan pengujian pada transformator 5 kVA 3 fasa untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* akibat adanya perbedaan besar *leg* transformator tersebut, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- 1) Fasa S memiliki nilai arus *no load* lebih tinggi daripada fasa R dan T, dengan perbedaan kurang lebih 12 kali arus *no load* pada fasa R dan T. Begitu pula dengan arus *inrush peak* yang dihasilkan, fasa S menghasilkan arus *inrush* yang lebih tinggi dibandingkan dengan fasa R dan T. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan *leg* pada transformator, dimana fasa S memiliki *leg* paling besar dibandingkan kedua fasa lainnya yang memiliki besar *leg* yang sama. Kondisi tersebut akan mempengaruhi jumlah fluks yang ada pada inti transformator. Fasa S memiliki luas yang lebih besar dibandingkan kedua fasa lainnya sehingga jumlah fluks yang dihasilkan lebih besar, maka nilai arus *inrush* dan arus *no load* dari fasa S ini sangatlah tinggi dibandingkan dengan kedua fasa lainnya.
- 2) Perbandingan nilai arus *inrush* dengan arus *no load* pada fasa R dan T mencapai hingga 16 kali arus *no load*-nya, sedangkan pada fasa S hanya berada pada angka 1-2 kali arus *no load*-nya dan besar nilai arusnya selalu linier seiring dengan kenaikan tegangannya. Lonjakan arus *inrush* yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan arus *no load*-nya terjadi karena pada fasa R dan T mencapai titik saturasi lebih cepat daripada fasa S atau dengan kata lain titik saturasi dari material inti transformator fasa R dan T rendah, sedangkan pada fasa S mempunyai titik saturasi yang sangat tinggi.
- 3) Pada pengujian ke-4 membuktikan bahwa nilai harmonisa pada fasa R dan T akan terus bertambah tinggi seiring dengan naiknya tegangan yang diberikan pada transformator sehingga gelombang yang dihasilkan tidak berbentuk gelombang sinusoidal murni sesuai dengan frekuensi fundamentalnya.
- 4) Nilai THD tertinggi terjadi pada fasa R mencapai 52,67%, fasa T 36,53%, dan fasa S dengan nilai THD paling rendah yaitu 6,33%. Hal ini membuktikan bahwa ketika titik pada suatu material inti transformator berada pada kondisi saturasi, atau melebihi karakteristik

magnetisasi material inti, maka akan timbul nilai harmonisa yang tinggi.

## **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan dari studi ini untuk penelitian berikutnya adalah dalam pengujian menggunakan alat untuk mengukur nilai fluks secara riil dan *real time* agar penelitian tentang arus *inrush* ini bisa lebih akurat. Selain itu, perlu dikembangkannya demagnetisasi dengan metode matematis.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, dan R. Ahuja, *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers, Second Edition*. FL: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010.
- [2] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals : Fourth Edition*. New York: McGraw-Hill Education, 2005.
- [3] N. Chiesa, *Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [4] P. C. Y. Ling dan A. Basak, "Investigation of magnetizing *inrush* current in a single-phase transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 6, hlm. 3217–3222, Nov 1988.
- [5] M. Steurer dan K. Frohlich, "The impact of *inrush* currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 1, hlm. 155–160, Jan 2002.
- [6] R. Cano-González, A. Bachiller-Soler, J. A. Rosendo-Macías, dan G. Álvarez-Cordero, "*Inrush* current mitigation in three-phase transformers with isolated neutral," *Electric Power Systems Research*, vol. 121, hlm. 14–19, 2015.
- [7] J. C. Oliveira, C. E. Tavares, R. Apolonio, A. B. Vasconcellos, dan H. S. Bronzeado, "Transformer Controlled Switching to Eliminate *Inrush* Current - Part I: Theory and Laboratory Validation," dalam *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, hlm. 1–5.
- [8] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, dan J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing *inrush* current in transformers. I. Numerical simulation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, hlm. 246–254, Jan 1993.
- [9] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, dan J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing *inrush* current in transformers. II. Harmonic analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, hlm. 255–263, Jan 1993.
- [10] J. J. Rico, E. Acha, dan M. Madrigal, "The study of *inrush* current phenomenon using operational matrices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, hlm. 231–237, Apr 2001.

- [11] R. Cahyadi Putra, “Eksperimen dan Simulasi Finite Element Method (FEM) Pengaruh Topologi Pemotongan Inti Transformator Tiga Fasa Pada Kurva Magnetisasi dan Arus *Inrush*,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [12] M. Jamali, M. Mirzaie, dan S. Asghar Gholamian, “Calculation and Analysis of Transformer *Inrush* Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions,” 2011.
- [13] I.M. Yulistya Negara, Dimas A. Asfani, Daniar Fahmi, Shandy Baskoro, dan Budi Arief K, “Materials and Cutting Method Effects of Three Phase Transformer Core on Magnetization Curve and *Inrush* Current: Simulation Approach,” *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, vol. 8, 2015.
- [14] I Made Yulistya Negara, Arif Musthofa, dan Yudha Rohman Setiadi, “Analisis karakteristik arus *inrush* pada trafo 3 fasa akibat pengaruh residual fluks,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.

## RIWAYAT HIDUP



Aditya Wahyu Ramadhan, lahir di Madiun pada tanggal 8 Februari 1995. Anak terakhir dari dua bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDN 02 Kare pada tahun 2007. Penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 4 Madiun dan tamat pada tahun 2010. Kemudian, penulis melanjutkan pendidikan di SMAN 2 Madiun dan tamat pada tahun 2013 setelah itu penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi, tepatnya pada Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama kuliah penulis aktif dalam kegiatan organisasi di BEM FTI-ITS selama dua tahun. Penulis juga aktif pada kegiatan kepanduan di Bakor Pemandu FTI-ITS. Selain itu, penulis aktif dalam berbagai kepanitiaan dalam lingkup kampus ITS. Saat ini penulis berkesempatan menjadi seorang asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang berada di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro ITS. Penulis dapat dihubungi pada email: [adit.ramadhann@gmail.com](mailto:adit.ramadhann@gmail.com).

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*