



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

PENGARUH LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA TRAFU SATU FASA TERHADAP IMPEDANSI TRAFU DAN PERFORMANSI TES SURJA

Dhanang Tri Laksono
NRP 0711144000005

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

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



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGARUH LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT
ANTAR BELITAN PADA TRAFU SATU FASA TERHADAP
IMPEDANSI TRAFU DAN PERFORMANSI TES SURJA**

Dhanang Tri Laksono
NRP 0711144000005

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

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



FINAL PROJECT - TE 141599

**EFFECT OF INTER-TURN FAULT LOCATION ON
SINGLE PHASE TRANSFORMER TO TRANSFORMER
IMPEDANCE AND SURGE TEST PERFORMANCE**

Dhanang Tri Laksono
NRP 0711144000005

Supervisors
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

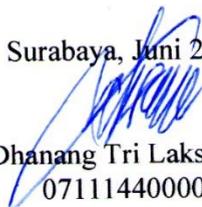
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“PENGARUH LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA TRAF0 SATU FASA TERHADAP IMPEDANSI TRAF0 DAN PERFORMANSI TES SURJA”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

Surabaya, Juni 2018



Dhanang Tri Laksono
0711144000005

**PENGARUH LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT
ANTAR BELITAN PADA TRAFU SATU FASA TERHADAP
IMPEDANSI TRAFU DAN PERFORMANSI TES SURJA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian 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



Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19810905 200501 1002

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
NIP 19700712 199802 1001



Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGARUH LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA TRAFU SATU FASA TERHADAP IMPEDANSI TRAFU DAN PERFORMANSI TES SURJA

Nama Mahasiswa : Dhanang Tri Laksono
Pembimbing I : Dimas Anton Asfani S.T., M.T., Ph.D.
Pembimbing II : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Keandalan dari peralatan listrik sangat diperhatikan untuk menjaga kinerja dari sistem tenaga listrik. Kerusakan isolasi belitan pada trafo akan membuat salah satu bagian dari konduktor tidak terlindungi. Saat konduktor tersebut mengenai belitan yang lainnya maka akan terjadi hubung singkat antar belitan atau *inter-turn fault*. Hubung singkat yang tidak terdeteksi pada waktu yang lama, dapat membawa kerusakan trafo menuju nilai hubung singkat yang lebih besar dan menimbulkan kerusakan mekanis. Pada penelitian kali ini akan membahas mengenai efek lokasi gangguan hubung singkat antar belitan pada trafo satu fasa. Dengan menggunakan tes surja pada belitan, akan diketahui karakteristik nilai tiap lokasi gangguan hubung singkat. Metode yang digunakan untuk analisis adalah *Error Area Ratio* (EAR) dan *Zero Crossing*. Dari hasil yang didapatkan dengan menggunakan metode EAR dan *Zero Crossing*, lokasi gangguan hubung singkat tidak memiliki *trendline* pada tiap nilai *fault* yang menggambarkan karakteristik dari lokasi gangguan. Sehingga, lokasi gangguan belitan tidak berefek pada tiap nilai *fault* yang sama dengan menggunakan tes surja.

Kata kunci : *Error Area Ratio* (EAR), *inter-turn fault*, impedansi trafo, lokasi gangguan hubung singkat, tes surja

Halaman ini sengaja dikosongkan

EFFECT OF INTER-TURN FAULT LOCATION ON SINGLE PHASE TRANSFORMER TO TRANSFORMER IMPEDANCE AND SURGE TEST PERFORMANCE

Name : Dhanang Tri Laksono
Advisor I : Dimas Anton Asfani S.T., M.T., Ph.D.
Advisor II : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara S.T., M.Sc.

ABSTRACT

The reliability of the electrical equipment is a great concern to maintain the performance of the power system. Damage to the winding insulation of the transformer will make some parts of the winding exposed. When the exposed windings closed to each other, it will cause short circuit between turn or inter-turn fault. Undetectable short circuit for a long time, can lead the transformer damage to larger short circuit and causing mechanical damage. In this research will discuss about the effect of inter-turn fault location on single phase transformer. Using the surge test on windings, we will know the characteristic value of each location of inter-turn fault. The methods used for analyze the effect are Error Area Ratio (EAR) and Zero Crossing. From the results obtained using the EAR and Zero Crossing methods, the location of inter-turn fault has no trendline on each fault value that describes the characteristics of the fault location. Thus, the location of the fault in winding has no effect on the equal fault values using the surge test.

Keywords : *Error Area Ratio (EAR), fault location, inter-turn fault, transformer impedance, surge test*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah sehingga penyusunan buku Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tak lupa shalawat dan salam selalu tercurahkan untuk Rasulullah Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabat - sahabatnya.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan Sarjana di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan judul :

PENGARUH LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN PADA TRAF0 SATU FASA TERHADAP IMPEDANSI TRAF0 DAN PERFORMANSI TES SURJA

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada beberapa pihak yang telah membantuk dalam penyusunan buku Tugas Akhir ini :

1. Allah SWT atas segala limpahan rahmat-Nya dan atas izin-Nya dapat menyelesaikan buku Tugas Akhir.
2. Orang tua dari penulis, Sutarno dan Dra. Sri Handayani yang selalu memberikan dukungan dalam setiap kesempatan dan menjadi motivasi yang kuat dalam menyelesaikan pendidikan Sarjana penulis.
3. Bapak Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. dan Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M. Sc. selaku Dosen Pembimbing dari penulis yang selalu membimbing dari awal pengerjaan data dan buku Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi S.T., M. Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
5. Saudara dari penulis, Edwin Prasetyo dan Ega Kusuma Dwi Putri yang selalu memberikan semangat dan dukungan moral kepada penulis.
6. Mas Arief Budi Ksatria, S.T., M.T. dan Mas Mochammad Wahyudi, S.T., M.T. yang telah membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir secara ilmu dan dorongan moral di Laboratorium Tegangan Tinggi.
7. Teman – teman e-54 yang selalu menemani kehidupan penulis dari awal perkuliahan hingga saat ini.

8. Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi beserta para Dosen yang telah menjadi tempat untuk bersandar dan berkembang di kehidupan perkuliahan yang penulis jalani.
9. Teman teman perantauan *Kost Rohmah*, *Kontrakan Sutorejo Timur*, dan *Kontrakan Blok H.10* yang selalu menemani penulis dalam berbagai hal selama di Surabaya.
10. *Arek Warkop Hello Kitty* dan *Aliansi Warung Kopi Gebang Keputih* dalam menjadi teman berkeluh kesah di setiap malam.
11. Dan semua pihak yang membantu penyusunan buku Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis telah berusaha secara maksimal dalam penyusunan buku Tugas Akhir ini. Kritik yang membangun dan saran sangat diharapkan untuk penyempurnaan kedepannya. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi segala pihak.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 KAJIAN TERKAIT DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Kajian Penelitian Terkait	7
2.2 Trafo	7
2.3 <i>Inter-Turn Fault</i>	9
2.4 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC	10
2.5 Uji Surja	11
2.6 Standar Pengujian Surja.....	13
2.7 Metode Error Area Ratio (EAR)	14
2.6.1 <i>Test-Ref</i> EAR.....	14
2.6.2 <i>Pulse-Pulse</i> EAR	15
2.6.3 <i>Line-Line</i> EAR.....	15
2.6.4 <i>Zero Crossing</i>	15
BAB 3 PERANCANGAN PENGUJIAN SURJA.....	17
3.1 Konfigurasi Peralatan	17
3.2 Perancangan <i>Hardware</i>	18
3.2.1 Modul Pembangkitan Tegangan Tinggi DC	18
3.2.2 Modul Rangkaian <i>Switching</i> Surja	20
3.3 Perancangan Akuisisi Data	22
3.3.1 Verivolt	22

3.3.2	Modul <i>Input</i> Tegangan NI-9223	23
3.3.3	Perancangan <i>Software</i> LabView	23
3.4	Perancangan Trafo Satu Fasa	24
BAB 4 PENGUJIAN SURJA DAN ANALISIS TERHADAP LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN		29
4.1	Pengukuran Resistansi dan Induktansi Belitan.....	29
4.2	Hasil dan Analisis Pengujian Gelombang Surja.....	31
4.3	Pengujian Surja pada Tiap Nilai <i>Fault</i>	32
4.3.1	Skenario Pengujian Tiap Nilai <i>Fault</i>	33
4.3.2	Perhitungan Nilai Referensi antar Gelombang	33
4.3.3	Hasil Uji Surja Tiap Nilai <i>Fault</i>	35
4.3.2.1	Gelombang Surja Tiap Nilai <i>Fault</i>	35
4.3.2.2	EAR dan Zero Crossing Gelombang Surja Tiap Nilai <i>Fault</i>	37
4.4	Pengujian Surja Tiap Lokasi <i>Fault</i>	40
4.4.1	Skenario Pengujian Tiap Lokasi <i>Fault</i>	40
4.4.2	Pengukuran Resistansi dan Induktansi Tiap Lokasi <i>Fault</i>	41
4.4.3	Hasil dan Analisis Surja Tiap Selisih <i>Fault</i> antar Lokasi 44	
4.4.2.1	Plot Grafik Surja Selisih <i>Fault</i> 2%	44
4.4.2.2	Analisis EAR dan Zero Crossing Selisih <i>Fault</i> 2% Tiap Lokasi.....	46
4.4.2.3	Plot Grafik Surja Selisih <i>Fault</i> 5%	48
4.4.2.4	Analisis EAR dan Zero Crossing Selisih <i>Fault</i> 5% Tiap Lokasi.....	50
4.4.2.5	Plot Grafik Surja Selisih <i>Fault</i> 10%	52
4.4.2.6	Analisis EAR dan Zero Crossing Selisih <i>Fault</i> 10% Tiap Lokasi.....	54
4.5	Analisis Metode EAR dan <i>Zero Crossing</i> Terhadap Lokasi Gangguan Hubung Singkat.....	56
BAB 5 PENUTUP.....		59
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....		61
LAMPIRAN A		63
LAMPIRAN B		65
BIODATA PENULIS.....		67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gambar umum trafo [10].....	8
Gambar 2.2	Rangkaian ekivalen trafo [11].....	8
Gambar 2.3	<i>Inter-turn fault</i> pada trafo [12].....	10
Gambar 2.4	Rangkaian <i>Cockroft-Walton</i>	10
Gambar 2.5	Pemodelan rangkaian uji surja	13
Gambar 3.1	Rancangan alur peralatan uji.....	17
Gambar 3.2	Konfigurasi peralatan	17
Gambar 3.3	Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC	19
Gambar 3.4	Implementasi modul rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC	19
Gambar 3.5	Arduino Uno	20
Gambar 3.6	Rangkaian <i>switching</i> dan kapasitor surja.....	21
Gambar 3.7	Verivolt Entube DE-HB	22
Gambar 3.8	NI-9223.....	23
Gambar 3.9	Blok diagram LabView	24
Gambar 3.10	Skema <i>turn fault</i> [17].....	26
Gambar 3.11	Implementasi desain trafo satu fasa. (a) Trafo satu fasa. (b) <i>External tab fault</i> . (c) Tampak samping	27
Gambar 4.1	Resistansi belitan sisi primer dan sekunder	30
Gambar 4.2	Induktansi belitan sisi primer dan sekunder	30
Gambar 4.3	Hasil uji <i>rise time</i> sisi primer 220V	32
Gambar 4.4	Hasil uji <i>rise time</i> sisi sekunder 127V	32
Gambar 4.5	Gelombang surja sisi primer 220V	36
Gambar 4.6	Gelombang surja sisi sekunder 127V	36
Gambar 4.7	<i>Error Area Ratio</i> sisi primer 220V	38
Gambar 4.8	<i>Error Area Ratio</i> sisi sekunder 127V	38
Gambar 4.9	<i>Zero Crossing</i> sisi primer 220V.....	39
Gambar 4.10	<i>Zero Crossing</i> sisi sekunder 127V	39
Gambar 4.11	Resistansi pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi	41
Gambar 4.12	Resistansi pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi	42
Gambar 4.13	Resistansi pada selisih <i>fault</i> 10% tiap lokasi	42
Gambar 4.14	Induktansi pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi.....	43
Gambar 4.15	Induktansi pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi.....	43

Gambar 4.16 Induktansi pada selisih <i>fault</i> 10% tiap lokasi	44
Gambar 4.17 Gelombang surja pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi sisi primer 220V	45
Gambar 4.18 Gelombang surja pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi sisi sekunder 127V	45
Gambar 4.19 <i>Error Area Ratio</i> pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi sisi primer 220V	46
Gambar 4.20 <i>Error Area Ratio</i> pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi sisi sekunder 127V	47
Gambar 4.21 <i>Zero Crossing</i> pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi sisi primer 220V	47
Gambar 4.22 <i>Zero Crossing</i> pada selisih <i>fault</i> 2% tiap lokasi sisi sekunder 127V	48
Gambar 4.23 Gelombang surja pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi sisi primer 220V	49
Gambar 4.24 Gelombang surja pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi sisi sekunder 127V	49
Gambar 4.25 <i>Error Area Ratio</i> pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi sisi primer 220V	50
Gambar 4.26 <i>Error Area Ratio</i> pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi sisi sekunder 127V	51
Gambar 4.27 <i>Zero Crossing</i> pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi sisi primer 220V	51
Gambar 4.28 <i>Zero Crossing</i> pada selisih <i>fault</i> 5% tiap lokasi sisi sekunder 127V	52
Gambar 4.29 Gelombang surja pada selisih <i>fault</i> 10% tiap lokasi sisi primer 220V	53
Gambar 4.30 Gelombang surja pada selisih <i>fault</i> 10% tiap lokasi sisi sekunder 127V	53
Gambar 4.31 <i>Error Area Ratio</i> pada selisih <i>fault</i> 10% tiap lokasi sisi primer 220V	54
Gambar 4.32 <i>Error Area Ratio</i> pada selisih <i>fault</i> 10% tiap lokasi sisi sekunder 127V	55
Gambar 4.33 <i>Zero Crossing</i> pada selisih <i>fault</i> 10% tiap lokasi sisi primer 220V	55

Gambar 4.34 *Zero Crossing* pada selisih *fault* 10% tiap lokasi sisi sekunder 127V 56

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar pengujian surja [14]	14
Tabel 2.2 Standar metode EAR [16]	16
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>reed relay</i> DAR71210S	21
Tabel 3.2 Spesifikasi IGBT IRGPS60B120KDP	21
Tabel 3.3 Spesifikasi trafo satu fasa	25
Tabel 3.4 Spesifikasi <i>turn fault</i> [17]	25
Tabel 3.5 Spesifikasi tegangan pada <i>tab fault</i>	26
Tabel 4.1 Data <i>rise time</i>	31
Tabel 4.2 Prosedur uji pada tiap nilai <i>fault</i>	33
Tabel 4.3 EAR antar gelombang referensi sisi primer dan sekunder	34
Tabel 4.4 Prosedur uji surja berdasarkan lokasi <i>fault</i>	41
Tabel 4.5 Nilai impedansi lokasi <i>fault</i>	57

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Belitan memiliki peran yang penting pada transformator. Kegunaan dari isolasi adalah menjaga bagian bertegangan pada trafo dengan bagian bertegangan lainnya, atau dengan bagian yang tidak bertegangan. Isolasi belitan dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu isolasi *turn-to-turn* dan *groundwall*. Isolasi *turn-to-turn* memisahkan belitan agar tidak terjadi hubung singkat antar belitan fasa. Sedangkan isolasi *groundwall* memisahkan belitan dengan badan trafo atau *ground* dari peralatan.

Berdasarkan survei yang telah dilakukan, kerusakan pada belitan menjadi gangguan yang paling umum nomor dua yang terjadi di trafo [1]. Faktor dari tekanan mekanis, termis dan elektrik pada belitan trafo dapat menjadi penyebab dari degradasi isolasi [2]. Kerusakan isolasi belitan akan membuat salah satu bagian dari konduktor tidak terlindungi, saat konduktor tersebut mengenai belitan yang lainnya maka akan terjadi hubung singkat antar belitan atau *inter-turn fault*. Hubung singkat yang tidak terdeteksi pada waktu yang lama, dapat membawa kerusakan trafo menuju nilai hubung singkat yang lebih besar dan menimbulkan kerusakan mekanis. Selain itu trafo juga memiliki nilai impedansi yang dimiliki akibat belitan yang sangat panjang dan digulung pada trafo. Dengan adanya *inter-turn fault* ini maka akan berefek pada nilai impedansi yang ada pada trafo.

Pengujian isolasi saat ini yang paling banyak digunakan adalah IR dan PI *test* [3],[4]. IR dan PI *test* dilakukan dengan cara mengukur *insulation resistance* pada waktu 10 menit dan 1 menit [5]. Dari pengujian tersebut dapat diindikasikan apakah belitan dalam kondisi yang baik atau buruk. Akan tetapi, pengujian ini hanya bisa mendeteksi kerusakan pada isolasi *groundwall*. Pada kerusakan isolasi *inter-turn* tidak dapat dideteksi menggunakan pengujian tersebut.

Untuk mendeteksi gangguan hubung singkat antar belitan, dapat dilakukan menggunakan metode tes surja [6]. Tes ini dilakukan dengan cara memberikan nilai tegangan tertentu diatas rating peralatan dalam waktu yang singkat [7]. Gelombang surja akan terbentuk dan dapat dilihat kondisi belitan berdasarkan bentuk gelombangnya. Untuk menganalisis gelombang tersebut menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR).

Banyak metode EAR yang dapat digunakan untuk menghitung dari tes surja yang dilakukan. Dari berbagai metode tersebut, dapat diketahui karakteristik uji dari belitan.

Dengan belum berkembangnya penelitian mengenai pengaruh lokasi *inter-turn fault*, kali ini akan dilakukan penelitian mengenai pengaruh dari lokasi gangguan tersebut terhadap impedansi dengan menggunakan tes surja sebagai metode pengujiannya. Sehingga dapat dilihat karakteristik dari pengaruh lokasi gangguan tersebut terhadap impedansi trafo.

1.2 Permasalahan

Kerusakan pada trafo yang sulit untuk dideteksi merupakan hal yang berbahaya. Hal ini dikarenakan trafo dapat mengalami kerusakan secara tiba-tiba tanpa penanganan masalah yang memadai. Pada penelitian yang sebelumnya, telah dilakukan cara untuk mendeteksi *inter-turn fault* pada trafo. Namun, dampak lain yang ditimbulkan terhadap trafo itu sendiri belum dibahas.

Trafo memiliki impedansi pada belitannya. Hal ini dipengaruhi oleh nilai induktansi dan resistansi dari kawat tembaga yang menyusun belitan tersebut. Pada penelitian ini, pengujian surja dilakukan pada trafo yang memiliki variasi *fault* yang dimodifikasi. Variasi kerusakan yang diberikan bergantung pada besar dan titik lokasi dari kerusakan. Sehingga dari pengujian surja yang dilakukan dapat dianalisis dengan uji surja mengenai pengaruh lokasi *inter-turn fault*.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian yang akan dilakukan adalah untuk mengetahui pengaruh dari nilai tegangan dan frekuensi uji surja gangguan hubung singkat antar belitan pada belitan trafo terhadap impedansinya. Untuk mendapatkan kesimpulan tersebut akan dilakukan pengujian dan pengambilan data, serta menganalisis data yang diambil. Sehingga nantinya setelah didapatkan analisis mengenai pengaruh lokasi gangguan hubung singkat antar belitan, dapat disimpulkan mengenai penelitian ini. Dan dari penelitian ini dapat dilanjutkan untuk studi yang selanjutnya mengenai uji surja pada belitan trafo.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Objek pengujian adalah *Dry Transformer* 1 fasa dengan rating tegangan 220V/127V dan kapasitas 1kVA.
2. Tegangan surja yang diaplikasikan pada objek uji bernilai maksimum 1000V.
3. Lokasi yang akan diuji dan dianalisis hanya pada tiap *tab fault* dan lokasi yang memiliki kesamaan nilai gangguan.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Pada tahap ini dilakukan pembelajaran dari teori teori mengenai uji surja pada trafo. Pengumpulan makalah dan jurnal yang berkaitan dengan uji surja dilakukan dan dipelajari. Hal yang telah dipelajari dijadikan dasar dari penelitian.
2. Perancangan alat uji surja
Alat uji surja dirancang pada penelitian ini, sehingga dapat melakukan uji surja pada belitan. Hal ini dilakukan berdasarkan penelitian yang sebelumnya telah dilaksanakan mengenai perancangan alat uji surja [8]. Rancangan *hardware* dan *software* yang akan digunakan dilakukan pada tahap ini.
3. *Re-winding* trafo satu fasa
Trafo satu fasa yang digunakan pada penelitian yang sebelumnya dilakukan *re-winding* agar tidak memiliki kecacatan belitan sebelum pengujian. Sehingga, data yang didapatkan pada pengujian dapat dikatakan valid.
4. Uji surja
Uji surja dilakukan pada belitan pada tiap variasi *fault* yang telah diberikan pada trafo. Pengujian ini dilakukan secara bertahap pada sisi primer dan sekunder trafo yang memiliki rating tegangan masing masing 220V dan 127V.
5. Analisis data
Setelah melakukan pengujian, data yang didapatkan pada pengujian dianalisis menggunakan metode Error Area Ratio (EAR). Dengan menggunakan metode ini maka dapat dianalisis mengenai uji surja yang telah dilakukan, dan dampak dari lokasi *fault* terhadap impedansi trafo.

6. Penyusunan buku tugas akhir
Penyusunan buku didasarkan dari awal hal yang telah dilakukan, melampirkan data uji, serta analisis yang telah dilakukan pada belitan trafo. Sehingga mendapatkan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

- BAB 1** : Pendahuluan
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.
- BAB 2** : Tinjauan Pustaka
Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir. Teori penunjang yang digunakan adalah seperti trafo, uji surja, pembangkitan tegangan tinggi DC, *Error Area Ratio* (EAR), dan standar uji.
- BAB 3** : Perancangan Pengujian Surja
Bab ini membahas mengenai perancangan alat untuk melakukan pengujian. Perancangan alat tersebut meliputi desain trafo, penggunaan alat uji surja, dan penggunaan alat pengukuran.
- BAB 4** : Pengujian Surja dan Analisis Terhadap Lokasi Gangguan Hubung Singkat antar Belitan
Bab ini membahas mengenai pengambilan data uji surja, pengolahan gelombang surja, dan analisis terhadap lokasi gangguan di trafo.
- BAB 5** : Penutup
Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran yang bisa diambil dari pengujian yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

1. Untuk Industri

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap industri sebagai acuan dari efek lokasi gangguan hubung singkat antar belitan pada trafo satu fasa terhadap impedansi trafo.

2. Untuk Ilmu Pengetahuan

Pada ilmu pengetahuan, diharapkan penelitian ini dapat menjadi lanjutan dasar penelitian gangguan hubung singkat antar belitan trafo terhadap impedansi trafo yang diuji menggunakan uji surja.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN TERKAIT DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Penelitian Terkait

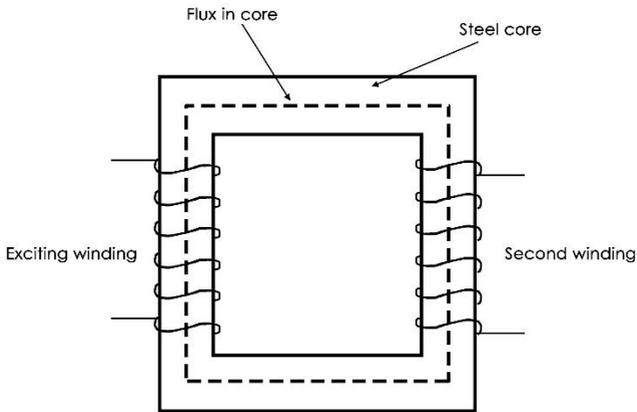
Sedangkan untuk penelitian yang telah dilakukan Dahlan [8], pengujian yang dilakukan menggunakan gelombang surja dan metode *Error Area Ratio* (EAR) serta *Zero Crossing*. Pengujian yang dilakukan adalah dengan memvariasi trafo dengan nilai *fault* tertentu. Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut adalah bahwa nilai dari belitan saat kondisi normal dengan kondisi *inter-turn* memiliki bentuk gelombang surja yang berbeda. Kondisi normal dengan *inter-turn* juga memiliki nilai yang berbeda jauh namun masih dalam nilai yang acak. Dari hasil tersebut, maka *threshold* kondisi normal dan *fault* dapat dicari.

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Usha [9], lokasi gangguan hubung singkat dapat dideteksi. Belitan yang diuji pada penelitian tersebut adalah dengan tipe belitan uji jenis *disc*. Dengan menggunakan pengujian *Sweep Frequency Response Analysis* (SFRA), tiap lokasi yang telah diimplementasikan nilai *fault* dapat dideteksi. Dengan nilai *fault factor*, maka dapat diplot grafik lokasi gangguan lokasi pada tiap *disc* pada keseluruhan trafo.

Pada penelitian yang akan dilakukan ini adalah mencari lokasi gangguan hubung singkat dengan metode EAR dan *Zero Crossing*. Dengan melakukan tes surja pada belitan di tiap nilai *fault* dan lokasi *fault*. Sehingga akan dilihat untuk hasil dari pengujian menggunakan tes surja pada belitan dan dianalisis dengan metode yang telah disebutkan.

2.2 Trafo

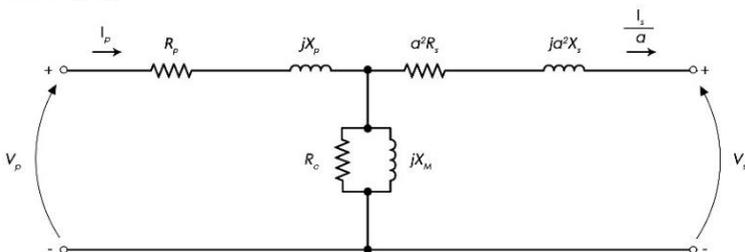
Trafo merupakan peralatan listrik yang digunakan untuk menaikkan atau menurunkan pada level tegangan tertentu. Berdasarkan jenisnya, trafo dibagi menjadi dua yaitu trafo *step-up* dan *step-down*. Hal ini didasarkan pada kebutuhan penggunaan pada level tegangan tertentu. Pada umumnya, trafo *step-up* digunakan menaikkan tegangan pada sistem transmisi sehingga menurunkan *losses* yang dimiliki pada sistem. Sedangkan trafo *step-down* digunakan pada sistem distribusi yang dekat dengan beban. Hal ini untuk mengubah tegangan menjadi arus, sehingga dapat digunakan oleh konsumen. Gambar umum trafo dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Gambar umum trafo [10]

Cara kerja dari trafo untuk menaikkan dan menurunkan tegangan adalah berdasarkan pada belitan dan inti dari trafo itu sendiri. Pada sisi primer trafo disuplai menggunakan *Alternating Current (AC)* atau arus bolak balik. Kemudian saat dilakukan *open circuit* pada bagian sekundernya akan muncul tegangan. Hal ini dikarenakan induksi magnetik pada kumparan sekunder akan memunculkan tegangan apabila terjadi perubahan fluks dari belitan primer [11]. Dengan berubahnya nilai arus pada sistem AC akan mengubah nilai fluks pada inti, sehingga induksi magnetik pada kumparan sekunder akan memunculkan tegangan. Pengaruh bahan pada inti trafo akan berefek pada kurva magnetisasi. Kurva magnetisasi ini juga berperan dalam munculnya tegangan di trafo.

Rangkaian ekuivalen pada trafo dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah. Dimana rangkaian tersebut terdiri dari resistansi serta induktansi pada belitan.



Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen trafo [11]

Resistansi dan induktansi pada masing masing belitan primer maupun sekunder berpengaruh pada munculnya tegangan. Pada trafo yang tidak ideal juga disertai dengan rugi rugi pada inti yang dipengaruhi oleh rugi histerisis dan *eddy current*, serta rugi magnetisasi inti pada trafo. Hal tersebut dikatakan sebagai impedansi dari trafo. Karena terdapat penyusun reaktansi dan resistansi dari trafo.

Induktansi merupakan faktor yang tidak bisa lepas dari trafo. Dikarenakan belitan yang banyak pada trafo, maka akan memunculkan induktansi pada belitannya. Induktansi yang terukur pada belitan dipengaruhi banyak faktor berdasarkan rumus pada persamaan 2.1 berikut.

$$L = \frac{N^2 \mu_r \mu_0 A}{l} \quad (2.1)$$

Keterangan :

L = Induktansi pada belitan trafo (H)

N = Jumlah kumparan

μ_r = Permeabilitas bahan (inti besi) (m/At)

μ_0 = Permeabilitas udara (celah udara) (m/At)

A = Luas penampang belitan (m²)

l = Panjang belitan (m)

Dengan semakin banyaknya jumlah belitan pada trafo, dan semakin tinggi konstanta permeabilitas bahan serta area dengan panjang belitan yang tidak panjang akan membuat nilai induktansi menjadi tinggi. Begitu pula sebaliknya maka akan membuat nilai induktansi dari belitan akan semakin rendah.

2.3 *Inter-Turn Fault*

Hubung singkat antar belitan atau yang sering disebut dengan *inter-turn fault* adalah kerusakan pada belitan mesin listrik. Kerusakan ini disebabkan oleh tidak mampunya isolasi pada belitan untuk menahan arus dan tegangan pada konduktor agar tidak terhubung dengan belitan lainnya. Akibat dari terhubungnya antar belitan ini maka dapat memengaruhi nilai induktansi dari mesin listrik. Kinerja dari trafo dapat menurun karena nilai induktansi yang terpengaruh akan berefek pada fluks magnet yang akan terbangkit yang nantinya akan terinduksi pada bagian sekundernya.

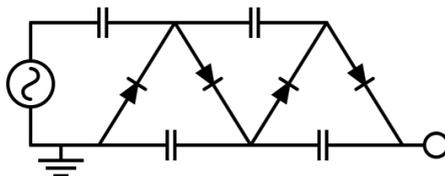
Gangguan hubung singkat antar belitan memiliki banyak penyebab. Faktor dari kontaminan, pemanasan, stres mekanis elektrik dapat mempercepat terjadinya degradasi isolasi hingga membawa pada kegagalan isolasi antar belitan, atau bahkan *groundfault* [2]. Gambar dari kerusakan isolasi pada belitan dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Inter-turn fault* pada trafo [12]

2.4 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Tegangan tinggi DC dapat dibangkitkan dengan metode tertentu. Dengan tanpa perlu mengubah tegangan input yang harus sesuai tegangan output yang diharapkan, maka tegangan tinggi DC dapat dibangkitkan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian *Greinacher* maupun *Cockroft-Walton* sebagai pengganda tegangan DC [13].



Gambar 2.4 Rangkaian *Cockroft-Walton*

Cara kerja rangkaian pengganda tegangan ini adalah dengan memanfaatkan kapasitor sebagai penyimpan muatan. Dengan memodifikasi rangkaian menggunakan dioda, maka pada tiap kapasitor dapat menyimpan muatan tertentu. Output tegangan yang diinginkan juga didapatkan berdasarkan tingkatan dari rangkaian dan input tegangan.

Pengembangan dari rangkaian *Cockroft-Walton* adalah *single secondary winding villard cascade*. Rangkaian tersebut dapat membangkitkan tegangan dua kali lebih besar dibandingkan rangkaian *Cockroft-Walton* dengan cara memberikan rangkaian paralel pembalik polaritas dari *Cockroft-Walton*. Rumus *single secondary winding villard cascade* dapat dilihat pada persamaan 2.2.

$$V_{output} = 4 \times N \times V_{input} \quad (2.2)$$

Keterangan :

V_{output} = Tegangan *output* rangkaian

N = Jumlah *cascade* (tingkatan)

V_{input} = Tegangan *input* rangkaian

2.5 Uji Surja

Pengujian yang dilakukan untuk melihat gangguan pada belitan mesin listrik, salah satunya adalah tes surja. Tes surja dilakukan dengan mengaplikasikan tegangan surja pada belitan mesin listrik dan menganalisis gelombang uji surja yang terbentuk. Pengaplikasian tegangan surja dari alat uji dilakukan saat peralatan uji dalam kondisi *offline*.

Keunggulan dari tes surja adalah sangat sensitif terhadap perbedaan gelombang yang disebabkan oleh belitan dari trafo, khususnya saat terjadi *inter-turn fault*. Menurut [14], tegangan pada pengujian dapat terbentuk dikarenakan arus yang naik secara cepat diaplikasikan pada belitan trafo. Sehingga berdasarkan persamaan (2.3), tegangan dapat terbangkitkan pada belitan mesin listrik melalui prinsip induksi.

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

Keterangan :

V = Tegangan terbangkit (V)

L = Induktansi belitan (H)

di/dt = Perubahan arus terhadap waktu

Pemodelan dari uji surja yang dilakukan dapat menggunakan rangkaian antara resistor, kapasitor, dan induktor. Masing masing dari komponen ini mewakili rangkaian uji surja. Resistor dan induktor mewakili impedansi dari belitan yang ada pada mesin listrik, atau pada tugas akhir ini dikhususkan pada trafo. Sedangkan kapasitor sebagai penyimpan muatan listrik yang nantinya akan dilepaskan ke belitan. Saat muatan pada kapasitor yang dilepaskan menuju belitan, maka akan menciptakan gelombang surja pada waktu yang sangat singkat. Gelombang surja yang terbentuk dapat berupa *underdamped*, *critically damped*, dan *overdamped*. Bentuk gelombang yang terbentuk dapat digunakan untuk melihat karakteristik trafo. Resistansi pada belitan nantinya akan menyerap osilasi yang terjadi pada belitan hingga hilang.

Rumus dari osilasi gelombang terdapat pada persamaan 2.4 [14]. Pada persamaan tersebut terdapat persamaan yang dihilangkan karena nilainya sangat kecil. Maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi persamaan 2.5. Dengan semakin turunnya nilai induktansi dari belitan uji, maka frekuensi akan semakin meningkat. Naiknya frekuensi osilasi akan menyebabkan gelombang surja yang terbentuk menjadi lebih rapat.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.4)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.5)$$

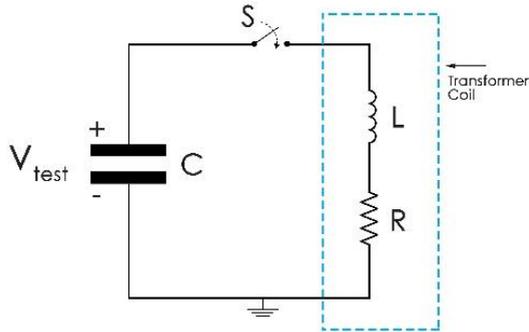
Keterangan :

f = Frekuensi osilasi (Hz)

L = Induktansi belitan (H)

C = Kapasitansi kapasitor surja (F)

R = Resistansi belitan (Ω)



Gambar 2.5 Pemodelan rangkaian uji surja

2.6 Standar Pengujian Surja

Pada pengujian surja memiliki beberapa standar yang telah ditetapkan oleh masing masing asosiasi ahli kelistrikan. Diantaranya terdapat beberapa standar yang dapat dijadikan sebagai batasan uji surja untuk mesin listrik.

Pada penelitian yang telah dilakukan [15], distribusi tegangan pada uji surja tidak linear untuk masing masing belitan yang ada di mesin listrik. Hal ini dikarenakan dengan semakin cepatnya *rise time* yang muncul pada belitan, maka tegangan akan muncul lebih tinggi pada belitan yang diuji, dibandingkan dengan belitan yang pada ujungnya diketanahkan.

Dari penelitian tersebut, maka IEEE merekomendasikan tegangan uji surja untuk pengujian antar belitan pada mesin listrik AC. Pada IEEE 522-1992 mengklasifikasikan tegangan standar berdasarkan *rise time* yang muncul. Untuk *rise time* antara 0 hingga 100ns, IEEE merekomendasikan tegangan uji sebesar 1pu. Sedangkan untuk *rise time* antara 100ns hingga 1.2 μ s IEEE merekomendasikan tegangan uji sebesar 3.5pu. Untuk *rise time* yang melebihi 1.2 μ s maka standar tegangannya adalah sebesar 5pu.

Pada standar yang diberikan EASA, nilainya lebih umum untuk semua kondisi gelombang yang terbentuk. Standar EASA tidak memberikan rincian *rise time* pada nilai standarnya. Nilai dari tegangan uji surja diberikan pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Standar pengujian surja [14]

V _{Line}	Per Unit	IEEE 522		EASA
		New Coils	In Service	In Service
		3.5 pu	75% New	2*V _{Line} + 1000
480	392	1372	1029	1960
575	469	1643	1232	2150
600	490	1715	1286	2200
2300	1878	6573	4930	5600
4160	3397	11888	8916	9320
6900	5634	19718	14789	14800
13800	11268	39437	29578	28600

2.7 Metode Error Area Ratio (EAR)

Error Area Ratio atau yang sering disingkat EAR adalah metode yang digunakan untuk mencari persentase error antara dua nilai. Dengan membandingkan dua nilai tersebut yang dibagi dengan nilai referensinya, maka dapat dicari besar kesalahan yang tampak pada kedua nilai yang dicari. Rumus untuk mencari persentase EAR terdapat pada persamaan 2.6.

$$EAR = \frac{\sum_{i=1}^N ||F_i^{(1)}| - |F_j^{(2)}||}{\sum_{i=1}^N |F_i^{(1)}|} \times 100\% \quad (2.6)$$

Keterangan :

F_i⁽¹⁾ = Nilai gelombang referensi

F_j⁽²⁾ = Nilai gelombang uji

Metode dari EAR sendiri memiliki banyak macam. Perhitungan ini tergantung nilai *fault* belitan mana yang ingin diuji. Berdasarkan jenisnya terdapat *Test-Ref* EAR, *Pulse-Pulse* EAR, *Line-Line* EAR, dan *Zero Crossing*.

2.6.1 Test-Ref EAR

Metode ini merupakan metode EAR yang membandingkan hasil uji gelombang surja referensi dengan uji gelombang peralatan mesin listrik lainnya. Pada saat sebuah peralatan mesin listrik memiliki spesifikasi yang sama, maka gelombang uji surja referensi dijadikan acuan kesalahan isolasi belitan saat *rewinding* maupun produksi peralatan yang sejenis [16]. Agar kualitas belitan dapat terjaga sesuai dengan kondisi dari pabrik saat terjadi proses penggantian atau produksi.

2.6.2 Pulse-Pulse EAR

Metode EAR yang selanjutnya dapat digunakan untuk mengukur persentase error dari gelombang surja adalah *Pulse – Pulse* EAR. Pengukuran dari P-P EAR adalah metode EAR yang pengukurannya secara *real time*. Pengujian ini adalah pengukuran kegagalan antar belitan yang paling modern. Teknik pengujian ini adalah dengan cara *step-voltage*. Tegangan yang diaplikasikan pada belitan mesin listrik, dibuat secara bertahap. Pengukuran EAR dilakukan pada setiap perubahan yang muncul pada kenaikan tegangan uji, untuk peralatan yang memiliki rating tegangan 1,000-30,000V [16]. Standar untuk P-P EAR diantara 5-15% dari tiap gelombang surja.

Contoh dari pengujian ini adalah pada Motor AC yang memiliki tegangan uji sebesar 2300V. Dengan menaikkan tegangan 50V untuk setiap kenaikannya. Dari prosedur pengujian tersebut, maka terdapat 46 kenaikan untuk pengukuran P-P EAR. Pengukuran EAR yang dilakukan pada contoh tersebut adalah pada tegangan uji 50V dengan 100V, serta 100V dengan 150V, dan seterusnya.

2.6.3 Line-Line EAR

Pada pengujian surja yang lebih dari satu fasa, maka terdapat metode lain yang digunakan untuk mengukur persentase kesalahan dari gelombang uji. Metode tersebut adalah *Line – Line* EAR atau L-L EAR. Metode L-L EAR membandingkan hasil uji surja yang diaplikasikan pada gangguan belitan di fasa belitan yang berbeda. Pada saat tegangan surja diaplikasikan pada fasa yang beda dengan kondisi belitan yang sama, maka metode ini digunakan untuk membandingkan kesalahan antar gelombang yang muncul. Standar EAR ini bergantung pada banyak kondisi. Karena, pengujian dipengaruhi oleh bahan inti, dan konfigurasi belitan fasa pada mesin listrik.

2.6.4 Zero Crossing

Zero Crossing digunakan untuk perhitungan persentase kesalahan pada pengujian surja. Metode ini melihat dari sumbu-x yang bergantung pada waktu. Gelombang yang muncul dicari untuk titik yang berpotongan dengan sumbu-X, dan dicari kesalahan *Zero Crossing* tersebut.

Dengan berubahnya gelombang surja yang disebabkan oleh frekuensi gelombang, maka akan berefek pada *Zero Crossing*-nya.

Dengan frekuensi yang semakin cepat, maka waktu untuk memotong sumbu-X relatif lebih singkat, dan dapat dianalisa perubahan *Zero Crossing* saat terjadi gangguan belitan. Pada tabel dibawah, dijelaskan mengenai persentase kegagalan dari tiap metode EAR.

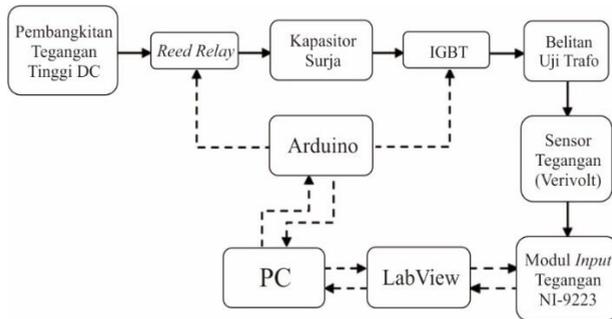
Tabel 2.2 Standar metode EAR [16]

	Line-Line EAR (%)	Pulse-Pulse EAR (%)	Zero Crossing (%)	Test-Ref (%)
Lap Winding	10-30% or off	5-15%	10-50% or off	Manufacture
Concentric Winding	35-65% or off	5-15%	10-50% or off	Manufacture
Manufacture	5-15% - No Rotor Installed	5-15%	5-20%	5-15%
Rotor Installed	15-65%	5-15%	10-25% or higher	10-25% or higher

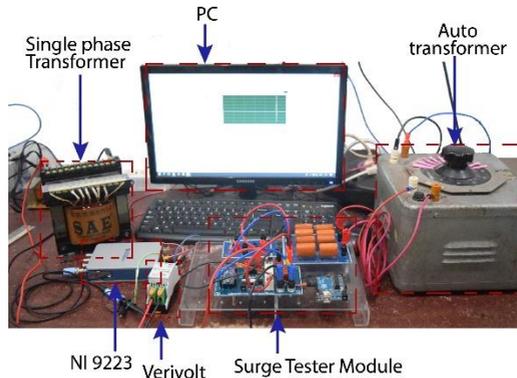
BAB 3 PERANCANGAN PENGUJIAN SURJA

3.1 Konfigurasi Peralatan

Pada pengujian surja, dilakukan perancangan peralatan yang dibutuhkan. Dalam penelitian ini, mulai dari akuisisi data surja, perancangan peralatan uji yang berupa rangkaian pembangkitan dan *switching*, serta *rewinding* trafo direncanakan dari awal pengujian. Penyelesaian setiap tahap rancangan pengujian tersebut, akan membawa pada alur peralatan uji dan konfigurasi peralatan pada gambar 3.1-3.2.



Gambar 3.1 Rancangan alur peralatan uji



Gambar 3.2 Konfigurasi peralatan

Pada diagram alur diatas terdapat banyak komponen penting yang digunakan dalam pengujian. Masing masing peralatan tersebut memiliki kegunaan tertentu dengan fungsi masing masing.

Tegangan tinggi DC dibangkitkan dengan memasang kapasitor bertingkat. Hasil dari peningkatan kapasitor ini akan menggandakan tegangan pada sisi *input* AC menjadi *output* tegangan tinggi DC. Pengontrolan dari *reed relay* dan IGBT menggunakan Arduino Uno. Dengan menggunakan program tersebut, durasi dari pembukaan dan penutupan *reed relay* untuk *charging* kapasitor surja 12nF serta *discharging* kapasitor surja menuju belitan uji dapat dikontrol melalui PC. Tegangan uji surja yang diaplikasikan pada belitan trafo akan terbaca oleh sensor tegangan Verivolt dengan rating 2000V:10V. Dari *input* tegangan yang diukur oleh Verivolt akan direkam oleh modul input tegangan NI-9223 yang dikontrol proses perekaman datanya melalui aplikasi LabView. Data yang telah direkam dapat dimunculkan dalam grafik gelombang uji surja dengan pengolahan data tertentu.

3.2 Perancangan *Hardware*

Perancangan *hardware* dilakukan dengan melakukan desain dan implementasi rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC, dan merancang rangkaian *switching* tegangan tinggi DC menggunakan komponen komponen elektronika.

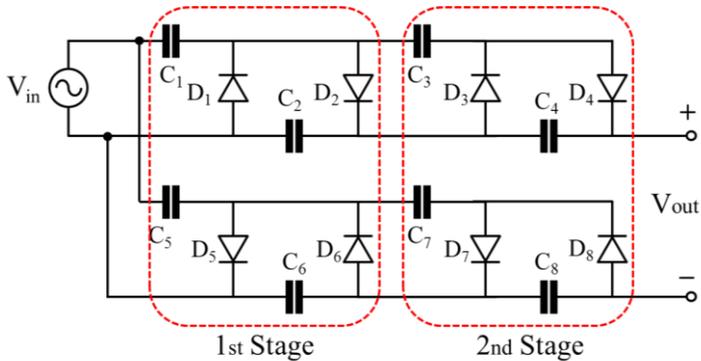
3.2.1 Modul Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Pembangkitan tegangan tinggi DC yang dirancang dan diimplementasikan pada pengujian kali ini menggunakan rangkaian *single secondary winding villard cascade*. Pembangkitan tegangan tinggi DC menggunakan rangkaian tersebut dapat tercapai dua kali lebih tinggi dibanding dengan *Cockroft-Walton*. Hal ini polaritas yang dibalik pada rangkaian ini sehingga tegangan yang terbangkitkan lebih tinggi dengan tingkatan yang lebih sedikit.

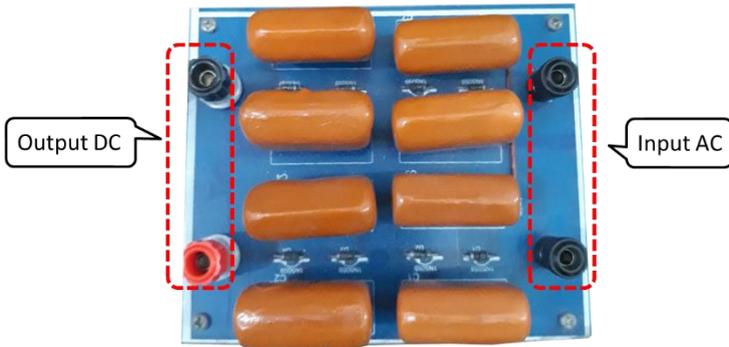
Pada modul pembangkitan tegangan tinggi DC di pengujian ni menggunakan 8 kapasitor 10nF, dan 8 dioda yang disusun seperti gambar 3.2. Dengan perhitungan tegangan output yang dihasilkan menggunakan dua tingkat dan sumber AC 220V, maka:

$$V_{output} = 4 \times 2 \times 220V\sqrt{2}$$
$$V_{output} = 2489V$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka dengan modul pembangkitan tegangan tinggi yang didesain, tegangan maksimal yang terbangkit adalah sebesar 2489V. Kapasitor yang diimplementasikan pada modul pembangkitan memiliki kapasitas tegangan rating 2000V. Tegangan *blocking* dioda yang diaplikasikan pada rangkaian memiliki ketahanan sebesar 4000V. Implementasi dari modul rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 3.3 Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC



Gambar 3.4 Implementasi modul rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC

3.2.2 Modul Rangkaian *Switching* Surja

Desain rangkaian pada modul ini terdapat rangkaian kontrol untuk *switching* dan rangkaian *switching* tersendiri, serta komponen kapasitor surja. Masing masing dari rangkaian berasal dari alat yang berbeda. Maka dari itu, diberikan kabel untuk menyambungkan antara rangkaian kontrol dan rangkaian *switching* pada modul *switching* surja.

Rangkaian kontrol yang digunakan pada modul ini menggunakan Arduino Uno. Arduino adalah mikrokontroler yang digunakan untuk mengendalikan peralatan atau rangkaian tertentu. Pengendalian ini menggunakan pemrograman yang dapat diubah sesuai dengan kebutuhan menggunakan software bawaan dari Arduino tersebut. Program pada Arduino ini, akan dirancang untuk mengendalikan dua *switch* yang terdapat pada rangkaian *switching*. Arduino Uno yang digunakan dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 3.5 Arduino Uno

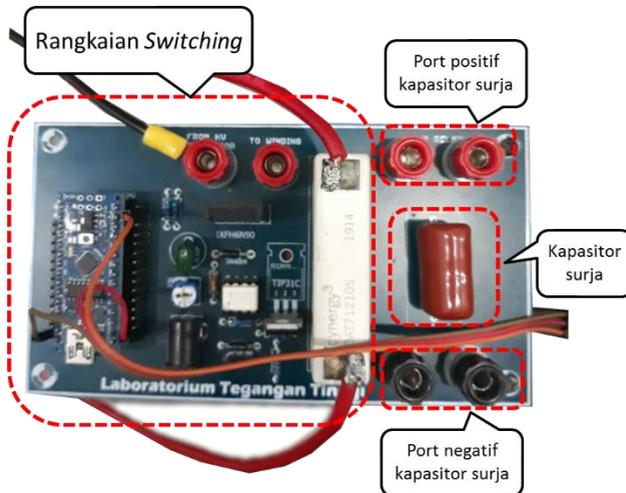
Pada program Arduino yang telah dibuat, *output* kontrol pada terdapat pada *port* 12 dan 13 dari Arduino. *Port* tersebut beserta dengan *ground* pada Arduino dihubungkan dengan rangkaian *switching*. *Output* dari *port* 12 adalah untuk mengontrol *reed relay*. Sedangkan *port* 13 digunakan untuk mengontrol *gate* dari IGBT. Kerja *output* tiap *port* dirancang secara bergantian. *Reed relay* bekerja terlebih dahulu untuk *charging* kapasitor selama 5 detik. Kemudian Arduino akan menjalankan IGBT dari *port* 13 dengan cara memberikan *trigger* ke *gate* dari IGBT agar bekerja selama 3 detik. Sehingga muatan dari kapasitor surja akan dilepaskan ke belitan trafo. Spesifikasi dari *reed relay* dan IGBT yang digunakan pada rangkaian *switching* dapat dilihat pada pada tabel 3.1-3.2 dan hasil dari implementasi rangkaian *switching* ini dapat dilihat pada gambar 3.6.

Tabel 3.1 Spesifikasi *reed relay* DAR71210S

Contact	Condition	Value
Isolation across contact	DC or AC peak	10kV
Maximum switching voltage	DC or AC peak	7kV
Maximum switching current	DC or AC peak	2A
Release time	Diode fitted	2ms

Tabel 3.2 Spesifikasi IGBT IRG60B120KDP

	Parameter	Maximum
V_{CES}	Collector to Emitter voltage	1200V
$I_C @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continous collector current	105 A
$I_C @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continous collector current	60A
$I_F @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Diode continous forward current	120 A
$I_F @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Diode continous forward current	60 A
$V_{FM} @ I_C 60\text{A}$	Diode forward voltage drop	2,20V
Td(on)	Turn-on delay time	94ns



Gambar 3.6 Rangkaian *switching* dan kapasitor surja

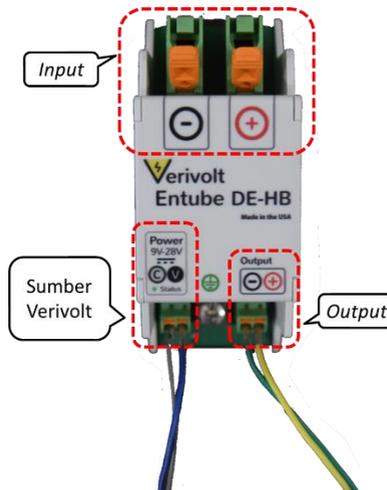
3.3 Perancangan Akuisisi Data

Pengambilan data pengujian surja memerlukan beberapa macam peralatan. Peralatan tersebut digunakan sebagai sensor pembacaan, perekam data, dan *software* untuk mengontrol perekaman data pada PC yang digunakan.

3.3.1 Verivolt

Verivolt adalah sensor yang digunakan untuk membaca tegangan. Cara kerja dari Verivolt adalah dengan cara membaca tegangan pada objek uji dengan menggunakan kabel yang telah dirancang sedemikian rupa. Dari tegangan yang terbaca di sisi *input* Verivolt, sisi *output* akan menghasilkan tegangan yang dikonversi dan disambungkan dengan peralatan yang terhubung ke PC.

Pada alat Verivolt yang digunakan memiliki rating 2000V:10V. Arti dari perbandingan tegangan tersebut adalah Verivolt mampu membaca tegangan maksimum pada sisi *input* sebesar 2000V. Sedangkan pada sisi *output* maksimum menghasilkan 10V untuk pembacaan. *Bandwidth* dari Verivolt adalah sebesar 20MHz dengan akurasi 0,2%. Dengan menggunakan Verivolt sebagai sensor tegangan, maka tegangan surja yang muncul dapat terbaca dan diakuisisi oleh PC [17].



Gambar 3.7 Verivolt Entube DE-HB

3.3.2 Modul *Input* Tegangan NI-9223

NI-9223 adalah modul perekam data tegangan yang dapat dikontrol melalui PC. NI sendiri mengubah dari sinyal *input* yang terbaca oleh Verivolt dalam bentuk analog, menjadi sinyal digital. Dengan menggunakan *software* LabView, proses perekaman sinyal melalui NI dapat dibatasi.

Frekuensi *sampling* yang digunakan pada NI-9223 untuk perekaman gelombang surja dipilih pada nilai 1MHz, yaitu pada nilai maksimal perekaman dari NI-9223. Frekuensi *sampling* dipilih dengan *rate* paling tinggi agar gelombang surja dapat terbaca. Dikarenakan durasi waktu yang sangat cepat dari gelombang surja. Terdapat 4 *port* pada NI yang disambung dengan *probe*. *Probe* tersebut nantinya dipasang pada *output* dari Verivolt.

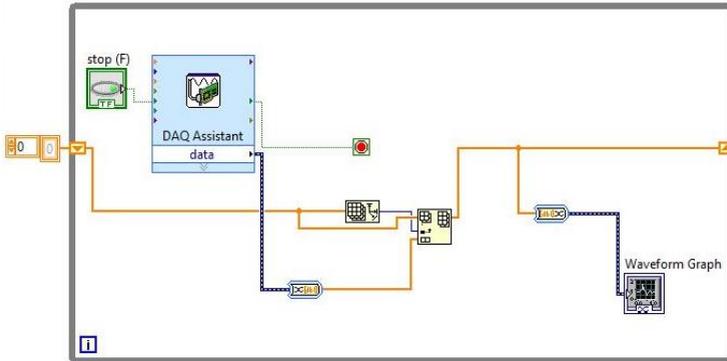


Gambar 3.8 NI-9223

3.3.3 Perancangan *Software* LabView

Pada *software* LabView, digunakan untuk pengontrolan pengambilan dan pengolahan data pada pengujian surja. Perancangan *software* dibuat agar pada program LabView dapat digunakan untuk kontrol *start* dan *stop* NI-9223. Saat program dimulai untuk merekam data hingga selesai, maka data tegangan akan terbentuk berupa kolom tabel

yang terdiri dari nilai tegangan dan urutan *sampling*. Gambar dari blok diagram program LabView dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 3.9 Blok diagram LabView

Pada blok diagram LabView, NI-9223 dikendalikan melalui DAQ Assistant. Kontrol dari *start* dan *stop* terdapat pada tombol stop yang terhubung dengan DAQ Assistant. Data yang diambil melalui NI-9223 akan diubah dalam bentuk angka melalui blok *array* yang bergantung pada frekuensi pengambilan data uji. Angka yang ditampilkan akan diubah dalam tabel yang dapat dibuka dan diedit pada *software* Diadem. Melalui *interface* Waveform Graph, maka dapat dilihat gelombang surja yang muncul yang dideteksi oleh NI-9223.

3.4 Perancangan Trafo Satu Fasa

Trafo satu fasa yang akan diuji akan divariasi pada belitannya. Belitan yang divariasi adalah pada belitan primer dan sekunder. Pada tiap belitan tersebut akan diberikan *fault tab* tertentu sebagai bahan uji coba lokasi gangguan hubung singkat.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya pada trafo satu fasa [17], perancangan *fault tab* sudah dilakukan sebesar 1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 20% dari total jumlah belitan pada masing masing sisi trafo. Pada penelitian kali ini yang dilakukan adalah dengan melakukan *rewinding* trafo satu fasa agar mendapatkan data yang lebih akurat. Hal ini untuk mengantisipasi faktor faktor lain yang dapat menyebabkan berbedanya nilai gangguan pada tiap lokasi gangguan.

Belitan pada trafo yang sudah dilakukan *tab* akan dikeluarkan melalui *external tab* yang dipasang diatas trafo.

Pada spesifikasi trafo yang sudah didesain, pada sisi primer dan sekunder trafo memiliki jumlah belitan yang berbeda. Pada sisi primer trafo memiliki jumlah belitan sebesar 390 *turn*. Sedangkan pada sisi sekundernya memiliki 225 *turn*. Nilai *fault* pada tiap sisi trafo memiliki nilai jumlah belitan yang berbeda. Ini disebabkan nilai dari *fault* yang didesain dengan menggunakan persen dari jumlah total belitan.

Desain kumparan yang diaplikasikan adalah desain kumparan yang umum digunakan pada trafo satu fasa. Bagian belitan sisi primer trafo dibelit pada bagian dalam yang lebih mengarah pada inti trafo. Sedangkan untuk bagian belitan sisi sekunder ditempatkan diluar belitan primer yang menyelubungi kumparannya. Skema *turn fault* pada trafo serta gambar dari implementasinya dapat dilihat di gambar 3.10-3.11. Spesifikasi dari trafo dan spesifikasi *turn fault* dapat dilihat pada tabel 3.3-3.4.

Tabel 3.3 Spesifikasi trafo satu fasa

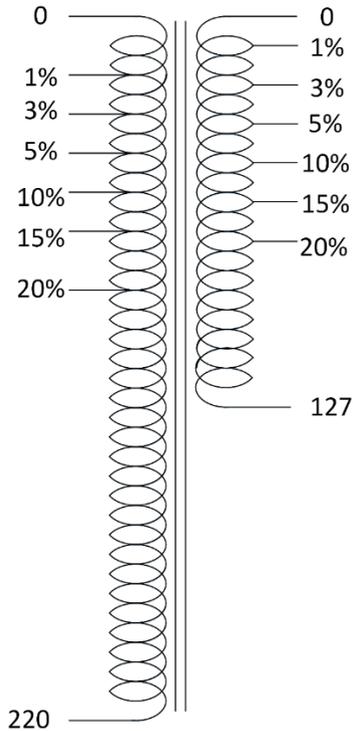
Type	Dry
VA Rating	1000 VA
Voltage Ratio	220V/127 V
Turn Ratio	390/225 Turn

Tabel 3.4 Spesifikasi *turn fault* [17]

External Tab Fault (%)	Winding Turn			
	220 V		127 V	
	Turn Number (Design)	Turn Number (Real)	Turn Number (Design)	Turn Number (Real)
1	3,9	4	2,25	2
3	11,7	12	6,75	7
5	19,5	20	11,25	11
10	39	39	22,5	22
15	58,5	59	33,75	34
20	78	78	45	45

Tabel 3.5 Spesifikasi tegangan pada *tab fault*

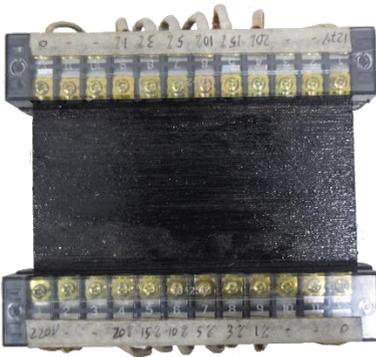
External Tab Fault (%)	Winding Voltage			
	220 V		127 V	
	Turn Number (Design)	Turn Number (Real)	Turn Number (Design)	Turn Number (Real)
1	2,2	2,77	1,27	1,38
3	4,4	6,92	3,81	4,16
5	11	11,07	6,35	6,93
10	22	22,16	12,7	13,16
15	33	33,26	19,05	19,39
20	44	43,66	25,4	25,62



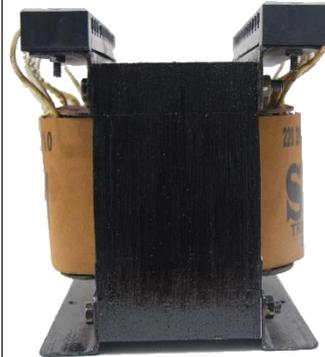
Gambar 3.10 Skema *turn fault* [17]



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.11 Implementasi desain trafo satu fasa. (a) Trafo satu fasa. (b) *External tab fault*. (c) Tampak samping

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGUJIAN SURJA DAN ANALISIS TERHADAP LOKASI GANGGUAN HUBUNG SINGKAT ANTAR BELITAN

Pada bab ini berisi mengenai pemaparan data dari hasil uji surja yang telah dilakukan. Data yang telah didapat akan dianalisis menggunakan metode *Error Area Ratio* (EAR) dan *Zero Crossing*. Hasil analisis tersebut akan menjawab mengenai pengaruh lokasi gangguan hubung singkat antar belitan pada trafo.

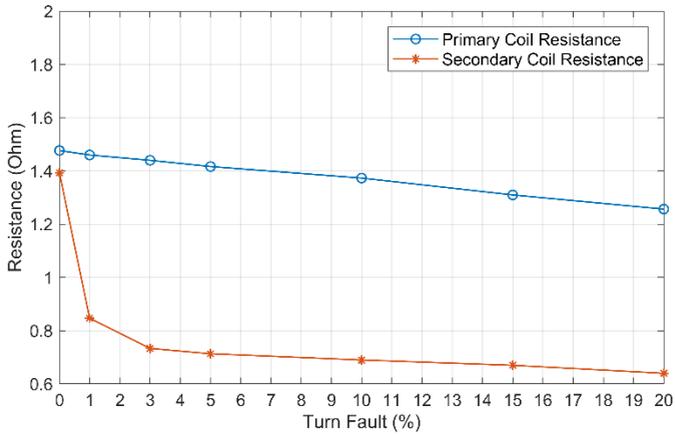
4.1 Pengukuran Resistansi dan Induktansi Belitan

Belitan trafo satu fasa yang akan diuji pada mulanya diukur untuk nilai resistansi dan induktansi. Data yang diukur ini menjadi dasar dari analisis pertama pengujian.

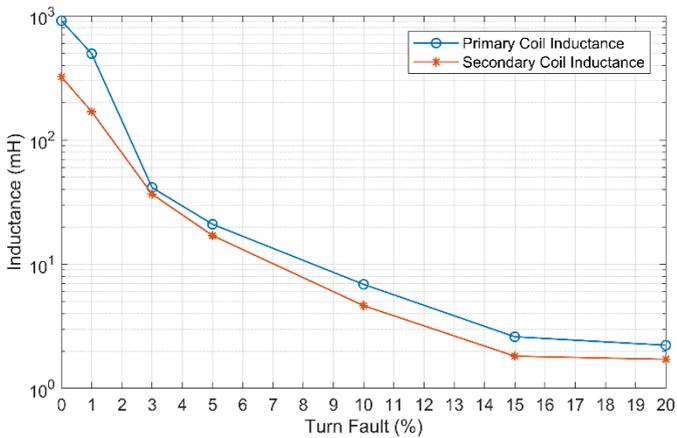
Pengukuran resistansi dan induktansi dilakukan dengan menggunakan LCR meter. Pengukuran resistansi dari belitan trafo dilakukan pada sisi primer dan sekunder trafo. Pengukuran dilakukan dengan memasang *probe* pada *tab* awal dan *tab* akhir belitan trafo. Untuk mengukur nilai resistansi trafo dalam keadaan *fault*, prosedur yang dilakukan sama dengan cara untuk mengukur resistansi dalam keadaan normal. Namun, menambah kabel jumper untuk membuat *short circuit* pada *external tab* yang telah diimplementasikan. Dari kabel jumper yang dipasang, maka nilai resistansi pada saat terdapat *fault* dapat diukur.

Sedangkan untuk pengukuran induktansi, cara yang digunakan sama dengan cara untuk mengukur nilai resistansi dari trafo. Yang menjadi perbedaan adalah pada pengukuran induktansi, terdapat frekuensi yang digunakan untuk mengukur nilai induktansi. Pada pengukuran kali ini, terdapat dua frekuensi yang digunakan untuk mengukur nilai induktansi. Yaitu menggunakan frekuensi 100 dan 120 Hertz. Dengan menggunakan dua frekuensi tersebut, maka hasil dari pengukuran akan dicari rata – ratanya. Sehingga nilai rata – rata pengukuran induktansi akan didapatkan.

Hasil dari pengukuran nilai resistansi dan induktansi pada bagian sisi primer dan sekunder dapat dilihat pada gambar 4.1-4.2.



Gambar 4.1 Resistansi belitan sisi primer dan sekunder



Gambar 4.2 Induktansi belitan sisi primer dan sekunder

Dari hasil plot data mengenai resistansi dan induktansi dari belitan sisi primer dan sisi sekunder, dapat dianalisis bahwa dengan bertambahnya nilai *fault* pada belitan trafo maka nilai resistansi dan induktansi trafo akan semakin menurun. Hal ini dikarenakan jumlah belitan dan panjang belitan trafo yang berkurang.

4.2 Hasil dan Analisis Pengujian Gelombang Surja

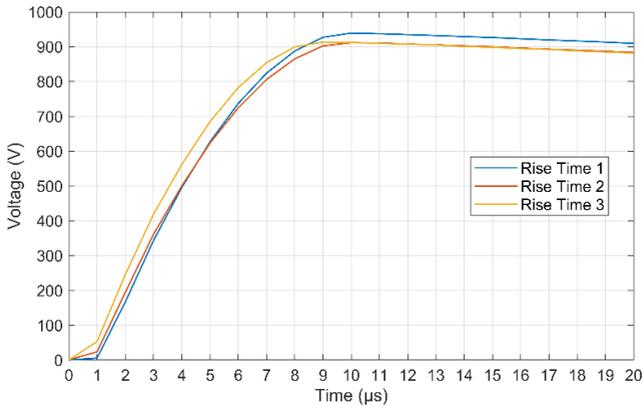
Pada pengujian awal ini memiliki tujuan untuk mengetahui nilai *rise time* dari gelombang surja yang terbentuk. Dengan menggunakan standar tegangan dari EASA pada tabel 2.1, didapatkan untuk tegangan pengujian pada sisi primer dan sekunder trafo adalah masing masing 1440V dan 1254 V. Namun, dikarenakan keterbatasan rating peralatan *switching* yaitu pada komponen IGBT yang hanya memiliki tegangan maksimal 1200V, maka tegangan yang diatur untuk pengujian hanya mencapai batas maksimal 1000V untuk keamanan peralatan *switching*. Hasil dari pengukuran *rise time* dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 4.1 Data *rise time*

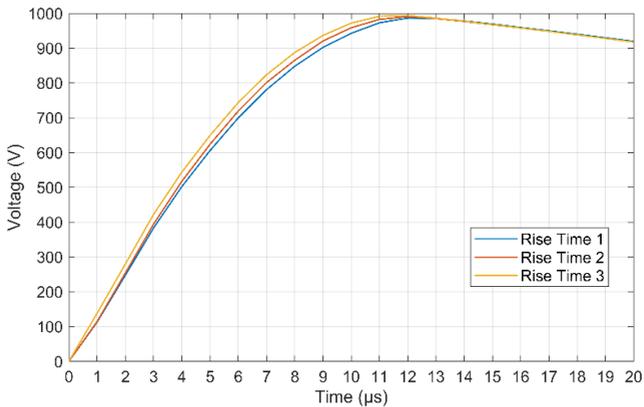
Number of Test	Rise Time (μ s)	
	220V	127V
1	9,14	10,57
2	9,53	10,43
3	9,80	10,61
Rata - rata	9,49	10,54

Dari data diatas, dapat dianalisis bahwa pada setiap percobaan pengujian surja selama tiga kali didapatkan nilai *rise time* yang relatif sama. Yaitu untuk sisi primer 9,49 μ s dan sisi sekunder 10,54 μ s. Dari *rise time* tersebut maka untuk standar tegangan yang direkomendasikan oleh IEEE 522 yaitu nilai tegangan sebesar 5 pu. Namun dikarenakan keterbatasan peralatan yang telah dibahas sebelumnya, maka tegangan hanya diaplikasikan sebesar 1000V.

Dengan melihat hasil yang telah dipaparkan, maka untuk standar tegangan yang diaplikasikan sudah sesuai dengan rekomendasi dari IEEE 522 dan EASA. Hal ini terbukti dengan melihat standar *rise time* dari IEEE 522 dan perhitungan nilai tegangan dari EASA. Namun dikarenakan keterbatasan komponen, maka pemakaian tegangan 1000V dianggap memenuhi kriteria pengujian. Untuk gambar dari *rise time* yang didapatkan pada bagian sisi primer dan sekunder trafo, dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4.



Gambar 4.3 Hasil uji *rise time* sisi primer 220V



Gambar 4.4 Hasil uji *rise time* sisi sekunder 127V

4.3 Pengujian Surja pada Tiap Nilai *Fault*

Trafo yang telah didesain akan diuji pada *external tab*-nya. Prosedur pengujian adalah dengan menguji surja pada awal dan akhir belitan trafo. Dengan mengaplikasikan tegangan surja pada belitan, akan diberikan kabel jumper pada *external tab* pada setiap nilai *fault* yang telah didesain. Hal ini bertujuan untuk mensimulasikan desain *fault* pada belitan trafo dengan besaran gangguan tertentu.

4.3.1 Skenario Pengujian Tiap Nilai *Fault*

Tabel 4.2 Prosedur uji pada tiap nilai *fault*

Fault Percentage	External Tab Fault
1%	0 ke 1
3%	0 ke 3
5%	0 ke 5
10%	0 ke 10
15%	0 ke 15
20%	0 ke 20

Pada tabel 4.2, telah ditampilkan skenario pengujian pada tiap besar *fault* yang akan disimulasikan. Dari berbagai nilai *turn fault* yang akan diuji, nantinya akan ditampilkan gelombang uji surja tersebut. Pengujian dilakukan saat trafo dalam keadaan normal dan keadaan *fault*. Pengambilan data yang dilakukan berjumlah lima untuk masing masing pengujian. Data yang diambil adalah data yang mendekati dari nilai tiap gelombang pengujian.

4.3.2 Perhitungan Nilai Referensi antar Gelombang

Gelombang referensi dibutuhkan dalam pengujian surja. Pada metode *Test-Ref* EAR, membutuhkan hasil pengujian surja dalam keadaan normal atau tanpa *fault*. Dari gelombang surja pada kondisi normal tersebut, nantinya pada setiap *turn fault* yang telah didesain akan dibandingkan dengan nilai gelombang referensi.

Dari lima kali pengujian yang dilakukan dalam kondisi normal di bagian sisi primer dan sekunder trafo, tidak selalu didapatkan nilai yang presisi antar gelombangnya. Antar gelombang uji tersebut memiliki nilai kesalahan masing masing untuk antar gelombangnya. Dengan menggunakan rumus EAR yang telah diberikan pada persamaan 2.6, maka nilai kesalahan pada tiap gelombang akan dicari. Setelah membandingkan nilai seluruh gelombang hasil lima kali pengujian, maka nilai kesalahan akan dicari rata – ratanya. Dari nilai rata rata tersebut maka dapat ditentukan gelombang referensi yang akan digunakan pada pengujian surja. Pencarian nilai referensi pada bagian sisi primer dan sekunder trafo dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 EAR antar gelombang referensi sisi primer dan sekunder

No	Perbandingan antar gelombang	EAR (%)	
		220V	127V
1	1 : 2	4,69	2,81
2	1 : 3	3,42	3,55
3	1 : 4	2,71	3,83
4	1 : 5	4,03	4,15
5	2 : 1	4,89	2,83
6	2 : 3	3,95	1,05
7	2 : 4	5,46	1,57
8	2 : 5	6,75	1,99
9	3 : 1	3,47	3,56
10	3 : 2	3,84	1,05
11	3 : 4	2,41	0,77
12	3 : 5	3,55	1,42
13	4 : 1	2,70	3,85
14	4 : 2	5,20	1,56
15	4 : 3	2,37	0,77
16	4 : 5	1,83	0,75
17	5 : 1	3,97	4,16
18	5 : 2	6,37	1,98
19	5 : 3	3,45	1,42
20	5 : 5	1,81	0,75
Rata - rata		3,84	2,19

Dari data hasil perhitungan diatas, maka untuk nilai EAR pada tiap gelombang pengujian dapat dicari. Nilai rata – rata pada tiap hasil pengujian tersebut dapat dicari. Pada sisi primer trafo yang bertegangan 220V nilai rata – rata EAR didapatkan sebesar 3,84%. Sedangkan pada sisi sekundernya, nilai rata – rata EAR yang didapatkan sebesar 2,19%.

Nilai rata – rata yang didapatkan akan digunakan untuk mencari hasil surja yang nilai EAR-nya paling mendekati. Pada sisi 220V, nilai perbandingan gelombang surja yang paling mendekati nilai rata ratanya adalah pada perbandingan gelombang 3 : 2. Sedangkan untuk sisi 127V, perbandingan gelombang surja yang nilainya mendekati rata rata adalah pada perbandingan gelombang 2 : 5. Dua nilai tersebut yang mendekati nilai EAR rata – ratanya, akan digunakan sebagai referensi dalam persamaan 2.6 pada nilai $F_1^{(1)}$.

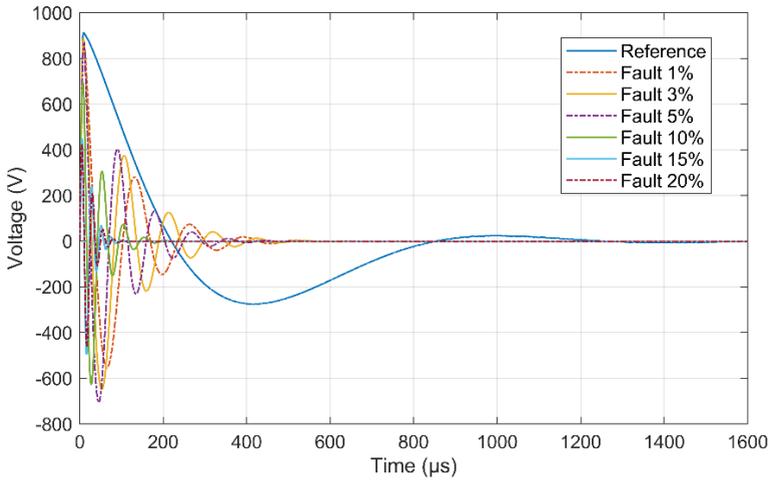
4.3.3 Hasil Uji Surja Tiap Nilai *Fault*

Hasil uji surja pada tiap *fault* akan digambarkan. Dari hasil gelombang surja yang digambarkan dapat dianalisis mengenai gelombang tersebut. Dengan menggunakan metode EAR dan *Zero Crossing* dapat dianalisis karakteristik yang lebih mendalam mengenai pengujian surja pada tiap *fault*.

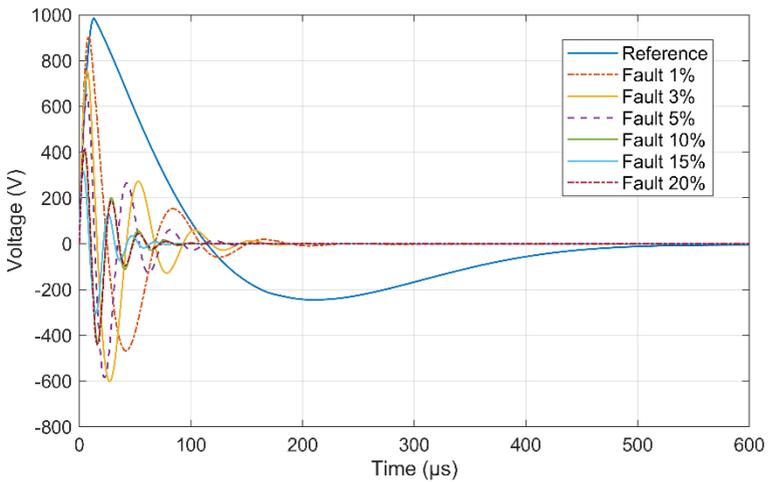
4.3.2.1 Gelombang Surja Tiap Nilai *Fault*

Setelah menemukan referensi yang akan digunakan dari hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.6, setiap *fault* yang dirancang diaplikasikan tegangan surja. Sama seperti dalam penentuan untuk gelombang referensi yang dipakai, pada setiap *fault* diuji sebanyak lima kali.

Setelah mendapatkan data uji sebanyak lima gelombang, maka dicari nilai EAR dari tiap gelombang tersebut. Dengan ketentuan yang sama seperti saat mencari EAR dari gelombang referensi yaitu dengan persamaan 2.6, perhitungan dilakukan sebanyak 20 kali perhitungan. Dari perhitungan tersebut maka dapat ditentukan nilai EAR dari tiap gelombang surja di tiap *fault*. Nilai EAR dari tiap gelombang yang mendekati rata – rata akan menjadi acuan dari penggambaran gelombang surja. Gelombang surja yang terbentuk pada sisi primer dan sekunder dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6. Hasil yang telah didapatkan tersebut merupakan hasil uji dari skenario *fault* yang telah ditampilkan pada tabel 4.2.



Gambar 4.5 Gelombang surja sisi primer 220V



Gambar 4.6 Gelombang surja sisi sekunder 127V

Dari hasil plot gambar gelombang surja dapat dianalisis mengenai bentuk gelombang surja. Dilihat dari sisi primer maupun sisi sekunder memiliki karakteristik yang sama saat terjadi *fault*. Pada gambar gelombang surja sisi primer memiliki durasi waktu yang lebih lama dibandingkan dengan sisi sekundernya. Sesuai dengan data yang didapatkan karena induktansi pada sisi primer lebih besar dibandingkan dengan sisi sekunder.

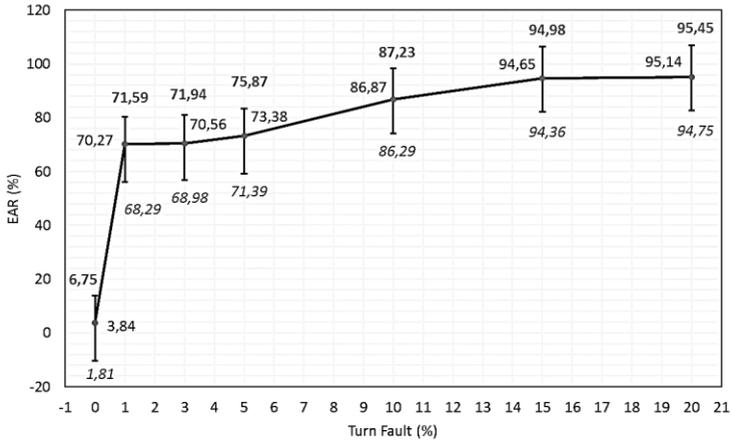
Selain itu pada gelombang surja yang disimulasikan untuk terjadi *fault*, memiliki kerapatan gelombang yang lebih tinggi dibanding saat tidak terjadi *fault*. Hal ini dikarenakan nilai induktansi saat diberikan *fault* yang lebih kecil. Sesuai dengan persamaan 2.5, saat nilai induktansi lebih kecil, maka nilai frekuensi akan lebih tinggi. Dengan nilai frekuensi yang lebih tinggi, maka gelombang surja akan memiliki kerapatan yang lebih tinggi pula.

4.3.2.2 EAR dan Zero Crossing Gelombang Surja Tiap Nilai Fault

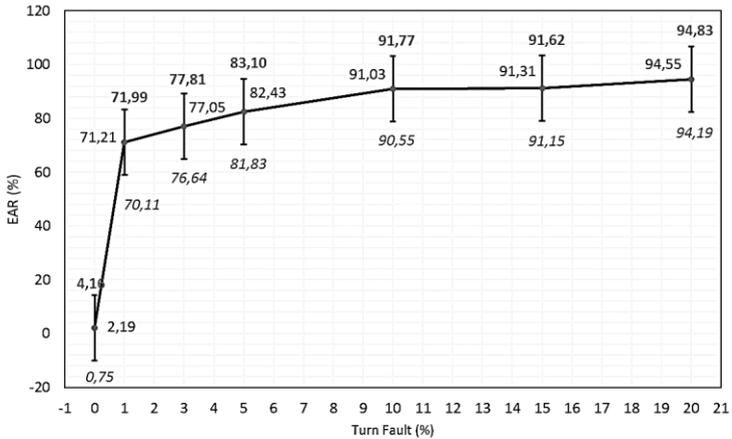
Setelah melakukan plot gambar gelombang surja pada tiap *fault*, maka akan dicari nilai EAR. Nilai EAR yang dicari adalah nilai dari gelombang surja di tiap *fault* terhadap gelombang surja referensi. Lima data gelombang uji surja yang didapatkan pada tiap *fault* akan dihitung nilai EAR-nya, terhadap lima gelombang uji surja trafo dalam kondisi normal. Dari perhitungan tersebut akan dicari nilai maksimal, rata – rata, dan minimal EAR terhadap kondisi normal. Nantinya pada plot gambar akan ditampilkan nilai maksimal, rata – rata, dan minimal dari gelombang uji tiap *fault* terhadap gelombang surja referensi. Plot dari EAR dapat dilihat pada gambar 4.7 dan 4.8.

Metode lain untuk menganalisisnya adalah menggunakan *Zero Crossing*. *Zero Crossing* yang dianalisis adalah perpotongan gelombang dengan sumbu-X. Sumbu-X tersebut adalah sumbu waktu dalam satuan mikrosekond (μs). Perpotongan yang dicari adalah pada saat $1/2$ Cycle, 1 Cycle, $3/2$ Cycle gelombang surja. Pada masing masing gelombang uji akan dicari nilai *Zero Crossing*nya. Dari tiap nilai tersebut akan dicari rata rata waktu untuk perpotongannya terhadap sumbu-X.

Perpotongan tersebut akan digambarkan dalam kurva waktu dan *turn fault* dari belitan. Penggambaran ini akan dilakukan pada sisi primer dan sisi sekunder trafo. Gambar dari *Zero Crossing* dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10.



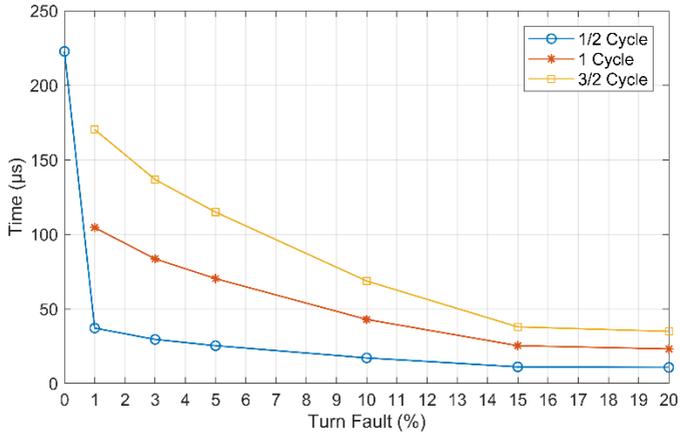
Gambar 4.7 Error Area Ratio sisi primer 220V



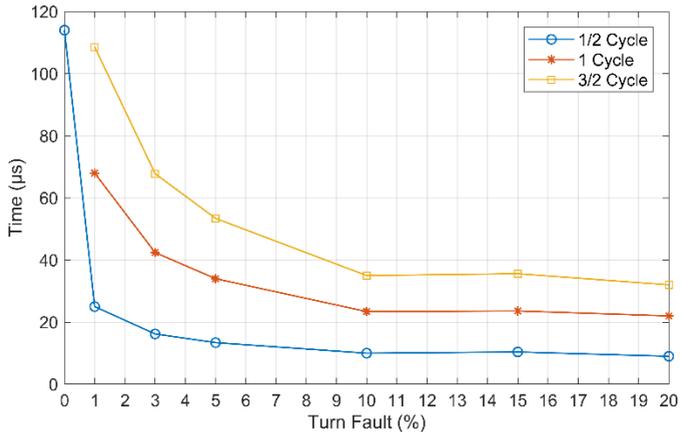
Gambar 4.8 Error Area Ratio sisi sekunder 127V

Dari plot grafik EAR dapat dianalisis bahwa terdapat perbedaan yang cukup jauh untuk kondisi normal terhadap *fault* pada sisi primer dan sekunder trafo. Dari masing masing *fault* yang disimulasikan pada belitan, nilai EAR-nya cenderung bertambah. Hal ini dikarenakan frekuensi

osilasi gelombang surja yang semakin besar atau gelombang semakin rapat. Maka dari itu, nilai *error* gelombang *fault* terhadap gelombang referensi akan semakin besar pula untuk nilai *fault* yang semakin besar pada sisi primer dan sekunder trafo.



Gambar 4.9 Zero Crossing sisi primer 220V



Gambar 4.10 Zero Crossing sisi sekunder 127V

Plot grafik *Zero Crossing* pada gambar 4.9 dan 4.10 dapat dianalisis bahwa untuk nilai perpotongan gelombang surja terhadap nilai nol gelombang, semakin lama cenderung turun. Pada *Zero Crossing 1/2 Cycle*, nilai waktu yang digambarkan pada saat terdapat *fault* pada belitan lebih singkat dibandingkan dengan kondisi normal. Begitu pula yang digambarkan saat *Zero Crossing 1 Cycle* dan *3/2 Cycle*.

Pada gambar 4.9 dan 4.10, nilai *Zero Crossing 1* dan *3/2 Cycle* pada kondisi belitan yang normal tidak diplot pada gambar. Hal ini dikarenakan waktu untuk *1* dan *3/2 Cycle* dari kondisi normal memiliki durasi waktu yang lebih lama dibandingkan saat terjadi *fault*. Apabila *Zero Crossing* tersebut tetap diplot, maka untuk karakteristik *Zero Crossing* saat terdapat *fault* akan sulit untuk dilihat.

Selain itu, untuk nilai *Zero Crossing* dari semua *Cycle* pada kondisi *fault* di sisi primer dan sekunder trafo bernilai dibawah *1/2 Cycle* dalam kondisi normal. Perpotongan gelombang untuk tiap nilai *fault* lebih cepat dibandingkan saat belitan dalam kondisi normal, bahkan sebelum gelombang surja kondisi normal mencapai *Zero Crossing 1/2 Cycle*.

4.4 Pengujian Surja Tiap Lokasi *Fault*

Pengujian berikutnya adalah menguji belitan yang memiliki nilai *fault* sama dengan lokasi yang berbeda. Selisih dari tiap *external tab* yang memiliki nilai sama akan diuji menggunakan gelombang surja. Gelombang surja pada tiap nilai selisih belitan yang sama akan digambarkan dan dianalisis menggunakan *Error Area Ratio* dan *Zero Crossing*. Selain itu akan diukur nilai induktansi dan resistansi pada tiap nilai selisih *fault* yang sama. Lokasi dari tiap *fault* yang akan diuji dapat dilihat pada tabel 4.4.

4.4.1 Skenario Pengujian Tiap Lokasi *Fault*

Pada trafo yang telah dirancang, pada tiap *fault* yang telah diberikan *tab* pada bagian atas trafo, memiliki selisih nilai pada tiap lokasinya. Contohnya adalah, pada *tab 3%* dengan *5%* memiliki selisih nilai *2%*. Dari masing masing selisih ini, memiliki nilai *fault* yang sama dengan variasi lokasi yang berbeda beda.

Dengan lokasi yang berbeda beda tersebut, maka dapat diuji dengan gelombang surja dengan nilai *fault* tertentu. Besaran *fault* dan lokasi yang dipilih ditentukan berdasarkan kesamaan dan variasi lokasi yang terdapat di trafo. Daftar pengujian dapat dilihat pada tabel 4.4.

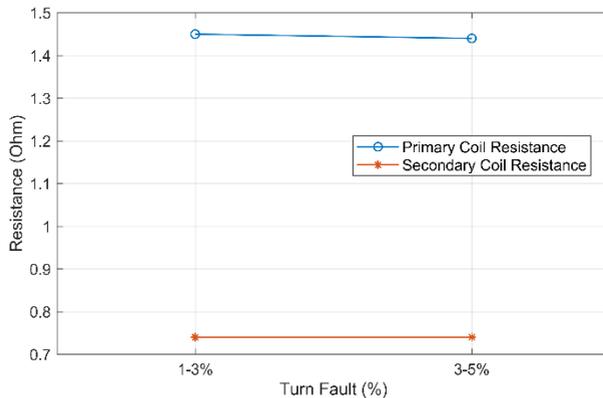
Tabel 4.4 Prosedur uji surja berdasarkan lokasi *fault*

Fault Percentage	External Tab Fault
2%	1 ke 3
	3 ke 5
5%	0 ke 5
	5 ke 10
	10 ke 15
	15 ke 20
10%	0 ke 10
	5 ke 15
	10 ke 20

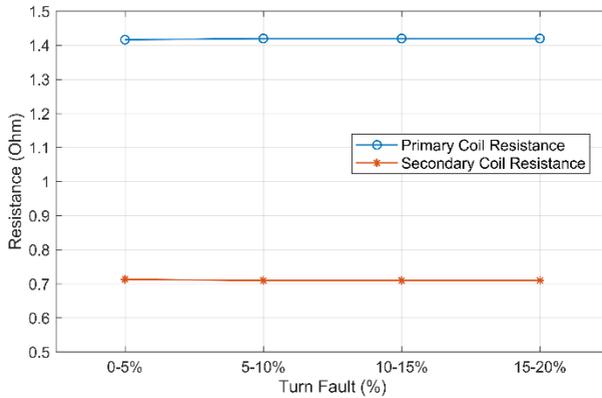
Pada skenario yang dilakukan, menggunakan kabel *jumper* pada tiap *tab fault* yang diuji. Kabel tersebut bertujuan untuk menghubungkan tiap nilai *fault* tertentu untuk mendapatkan lokasi yang berbeda. Dari tiap lokasi tersebut, maka data gelombang surja yang diuji bisa didapatkan.

4.4.2 Pengukuran Resistansi dan Induktansi Tiap Lokasi *Fault*

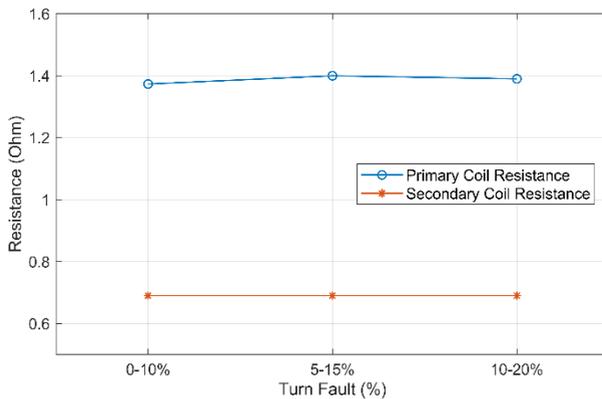
Sebelum melakukan pengujian surja pada tiap lokasi *fault*, maka dilakukan pengukuran pada belitan tersebut. Pengukuran tersebut meliputi nilai induktansi dan resistansi. Gambar dari resistansi selisih tiap *fault* pada beberapa lokasi dapat dilihat pada gambar 4.11-4.13.



Gambar 4.11 Resistansi pada selisih *fault* 2% tiap lokasi



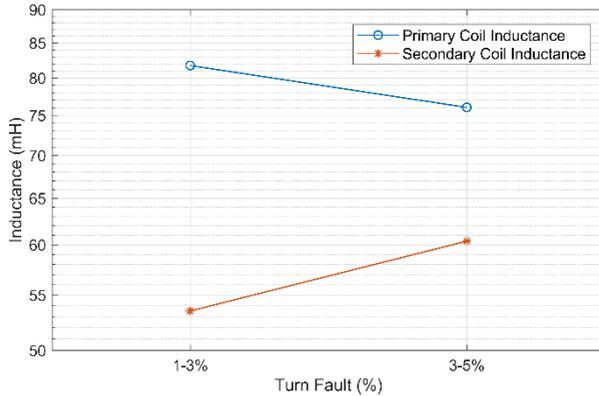
Gambar 4.12 Resistansi pada selisih *fault* 5% tiap lokasi



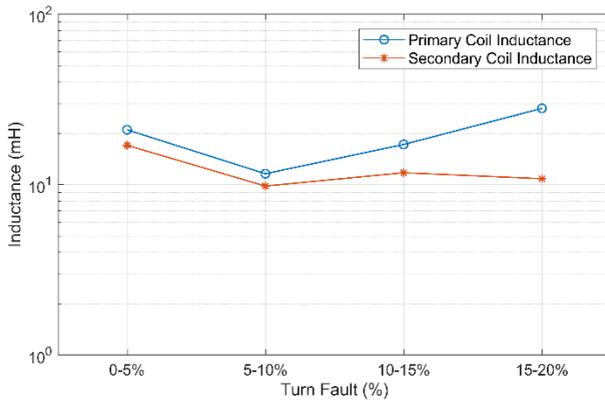
Gambar 4.13 Resistansi pada selisih *fault* 10% tiap lokasi

Pada gambar tersebut, lokasi diplot berdasarkan *tab* yang dihubungkan. Nilai resistansi dari tiap lokasi *fault* yang berbeda memiliki kesamaan karakteristik. Pada nilai *fault* yang sama namun berbeda lokasi, resistansi yang ditunjukkan pada pengukuran relatif sama. Hal ini menunjukkan tidak adanya efek lokasi terhadap nilai resistansi belitan.

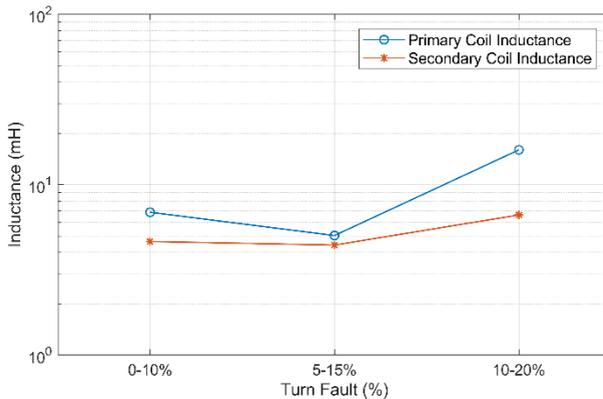
Untuk grafik dari induktansi pada selisih *fault* yang sama namun berbeda lokasi akan ditunjukkan pada penelitian ini. Grafik dari induktansi dapat dilihat pada gambar



Gambar 4.14 Induktansi pada selisih *fault* 2% tiap lokasi



Gambar 4.15 Induktansi pada selisih *fault* 5% tiap lokasi



Gambar 4.16 Induktansi pada selisih *fault* 10% tiap lokasi

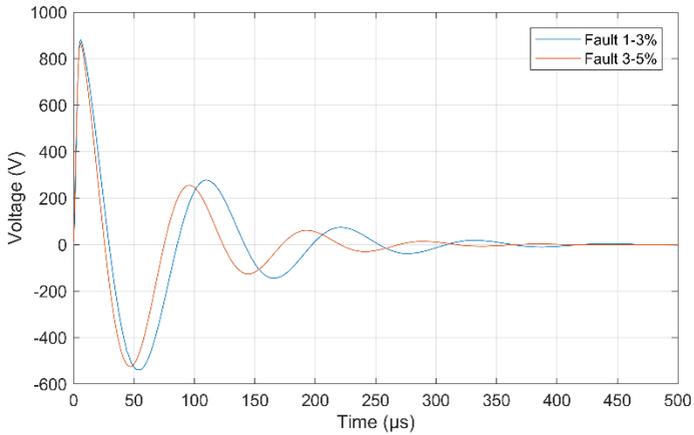
Nilai induktansi pada tiap lokasi dari berbagai nilai *fault* cenderung untuk berubah. Perubahan nilai induktansi pada tiap lokasi tidak menyebabkan perubahan yang signifikan. Selisih pada tiap lokasi hanya rata-rata 5 mH. Dari data yang telah didapatkan dapat dianggap bahwa nilai induktansi relatif sama.

4.4.3 Hasil dan Analisis Surja Tiap Selisih *Fault* antar Lokasi

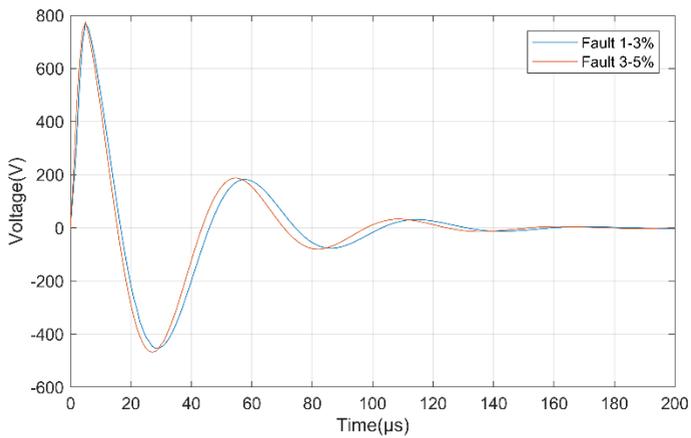
Setelah melakukan uji surja pada tiap nilai *fault* di tiap lokasi, maka data yang didapatkan akan diplot dalam bentuk grafik. Plot grafik akan dibandingkan antar lokasi *fault* pada nilai yang sama. Data yang didapatkan akan dianalisis dengan menggunakan metode *Error Area Ratio* dan *Zero Crossing*.

4.4.2.1 Plot Grafik Surja Selisih *Fault* 2%

Grafik surja pada nilai *fault* lokasi 2% telah didapatkan. Plot grafik yang ditampilkan adalah gelombang surja pada tiap bagian trafo. Bagian yang diplot adalah sisi primer 220V dan sisi sekunder 127V. Dari grafik yang diplot, akan dibandingkan gelombang surja pada tiap lokasi dari nilai *fault* 2%. Grafik dari gelombang surja dapat dilihat pada gambar 4.17 dan 4.18.



Gambar 4.17 Gelombang surja pada selisih *fault* 2% tiap lokasi sisi primer 220V



Gambar 4.18 Gelombang surja pada selisih *fault* 2% tiap lokasi sisi sekunder 127V

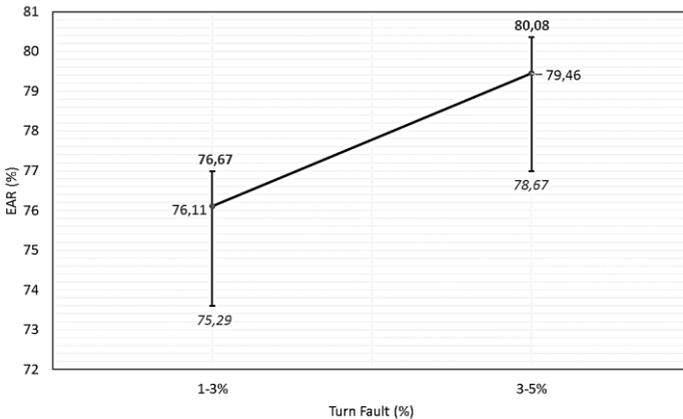
Dari hasil plot grafik gelombang surja pada selisih *fault* 2% dapat dianalisis untuk tiap bagian. Pada sisi primer dan sekunder trafo, gelombang yang terbentuk pada tiap sisi memiliki kemiripan gelombang surja. Hal tersebut dapat dilihat dari perbedaan yang hanya sedikit, yaitu dari pergeseran gelombang surjanya. Sehingga dapat dikatakan bahwa gelombang surja yang terbentuk relatif sama.

Namun untuk analisis yang lebih mendalam tentang karakteristik kedua gelombang tersebut, dapat menggunakan metode yang telah digunakan pada penelitian ini. Hasil dari pengujian tersebut akan dianalisis menggunakan metode EAR dan *Zero Crossing*.

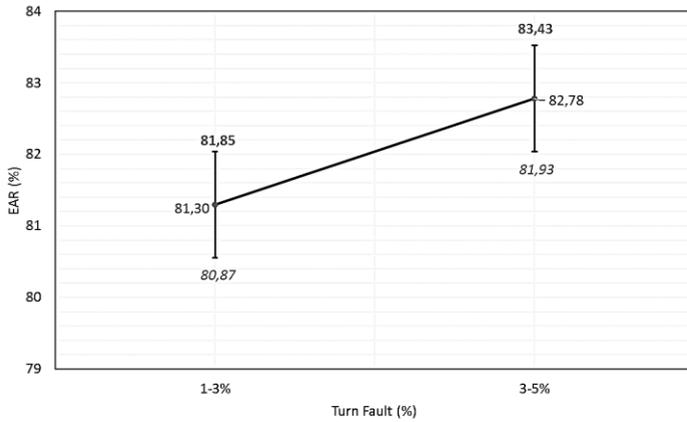
4.4.2.2 Analisis EAR dan Zero Crossing Selisih Fault 2% Tiap Lokasi

Dengan menggunakan persamaan 2.6, maka dapat dihitung nilai EAR dari selisih *fault* 2% tiap lokasi. Hasil perhitungan EAR dapat digunakan untuk analisis dari gelombang surja pada tiap lokasi di selisih *fault* 2%. Selain itu, metode *Zero Crossing* akan digunakan untuk melihat perpotongan gelombang surja terhadap sumbu-X.

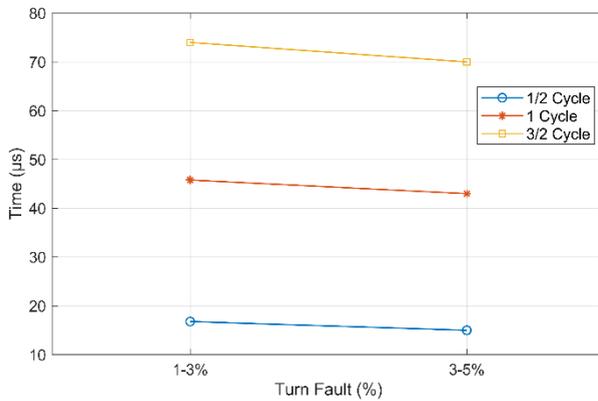
Nilai dari EAR dan *Zero Crossing* yang dicari akan diplot dalam bentuk grafik. Gambar dari nilai EAR dan *Zero Crossing* dapat dilihat pada gambar 4.19-4.22.



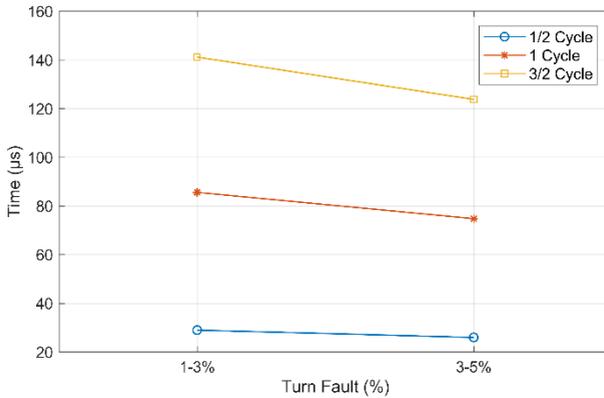
Gambar 4.19 *Error Area Ratio* pada selisih *fault* 2% tiap lokasi sisi primer 220V



Gambar 4.20 Error Area Ratio pada selisih *fault* 2% tiap lokasi sisi sekunder 127V



Gambar 4.21 Zero Crossing pada selisih *fault* 2% tiap lokasi sisi primer 220V



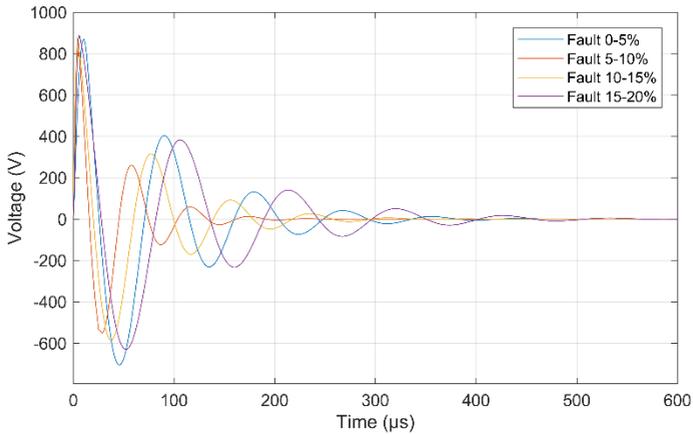
Gambar 4.22 *Zero Crossing* pada selisih *fault* 2% tiap lokasi sisi sekunder 127V

Dari hasil grafik tersebut, untuk nilai EAR dan *Zero Crossing* dapat dianalisis. EAR cenderung untuk naik dan *Zero Crossing* cenderung menurun. Hal ini karena nilai *error* antar gelombang makin besar, dan perpotongan gelombang dengan nilai nol semakin singkat.

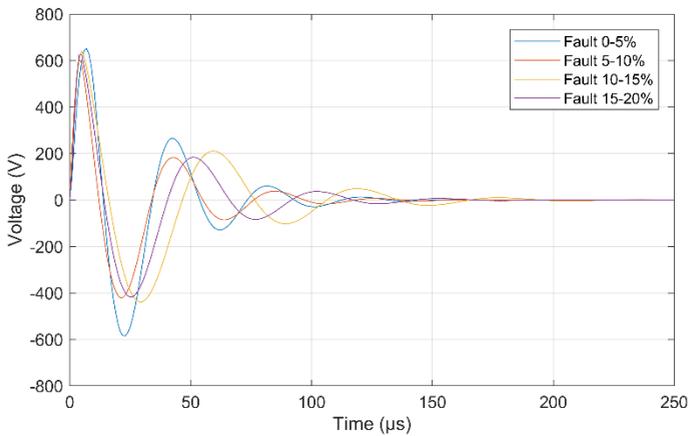
Namun untuk lokasi 2% belum dapat dikatakan bahwa lokasi gangguan berefek pada nilai EAR dan *Zero Crossing*-nya. Karena objek analisis yang terlalu sedikit. Maka analisis akan dilanjutkan pada objek lokasi *fault* yang lebih banyak.

4.4.2.3 Plot Grafik Surja Selisih *Fault* 5%

Grafik surja pada nilai *fault* lokasi 5% telah didapatkan. Plot grafik yang ditampilkan adalah gelombang surja pada tiap bagian trafo. Bagian yang diplot adalah sisi primer 220V dan sisi sekunder 127V. Dari grafik yang diplot, akan dibandingkan gelombang surja pada tiap lokasi dari nilai *fault* 5%. Grafik dari gelombang surja dapat dilihat pada gambar 4.17 dan 4.18.



Gambar 4.23 Gelombang surja pada selisih *fault* 5% tiap lokasi sisi primer 220V



Gambar 4.24 Gelombang surja pada selisih *fault* 5% tiap lokasi sisi sekunder 127V

Dari hasil plot grafik gelombang surja pada selisih *fault* 5% dapat dianalisis untuk tiap bagian. Pada sisi primer dan sekunder trafo,

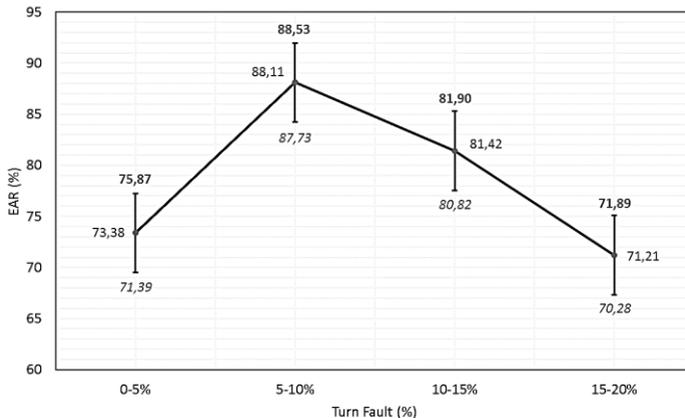
gelombang yang terbentuk pada tiap sisi tidak memiliki kemiripan gelombang surja. Hal tersebut dapat dilihat dari perbedaan gelombang, yaitu dari pergeseran gelombang surja pada tiap pengujiannya. Sehingga dapat dikatakan bahwa gelombang surja yang terbentuk cukup berbeda.

Namun untuk analisis yang lebih mendalam tentang karakteristik kedua gelombang tersebut, dapat menggunakan metode yang telah digunakan pada penelitian ini. Hasil dari pengujian tersebut akan dianalisis menggunakan metode EAR dan *Zero Crossing*.

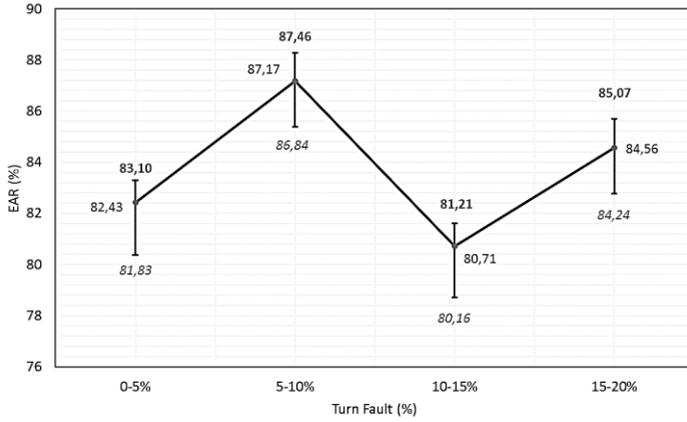
4.4.2.4 Analisis EAR dan Zero Crossing Selisih Fault 5% Tiap Lokasi

Dengan menggunakan persamaan 2.6, maka dapat dihitung nilai EAR dari selisih fault 5% tiap lokasi. Hasil perhitungan EAR dapat digunakan untuk analisis dari gelombang surja pada tiap lokasi di selisih fault 5%. Selain itu, metode *Zero Crossing* akan digunakan untuk melihat perpotongan gelombang surja terhadap sumbu-X.

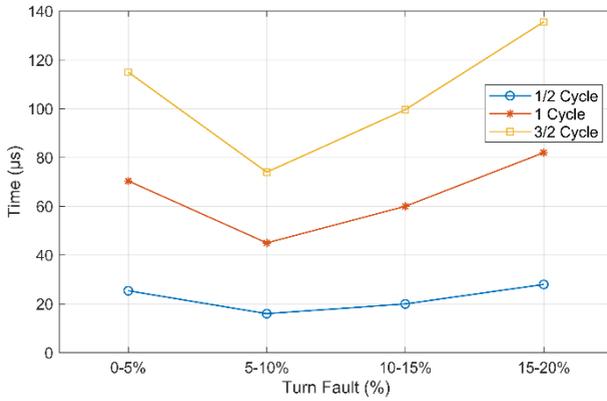
Nilai dari EAR dan *Zero Crossing* yang dicari akan diplot dalam bentuk grafik. Gambar dari nilai EAR dan *Zero Crossing* dapat dilihat pada gambar 4.25-4.28.



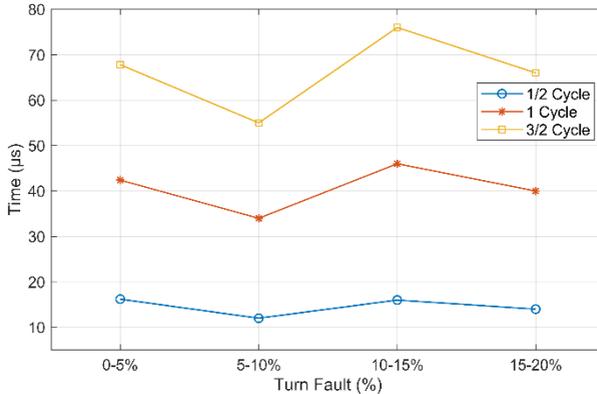
Gambar 4.25 Error Area Ratio pada selisih fault 5% tiap lokasi sisi primer 220V



Gambar 4.26 Error Area Ratio pada selisih fault 5% tiap lokasi sisi sekunder 127V



Gambar 4.27 Zero Crossing pada selisih fault 5% tiap lokasi sisi primer 220V



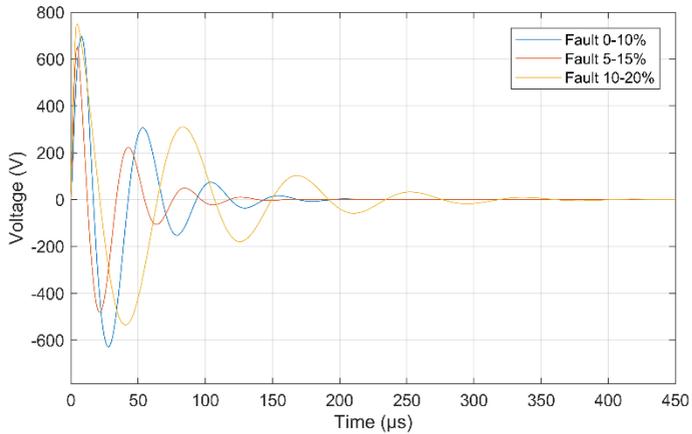
Gambar 4.28 Zero Crossing pada selisih *fault* 5% tiap lokasi sisi sekunder 127V

Dari hasil grafik tersebut, untuk nilai EAR dan Zero Crossing dapat dianalisis. EAR menggambarkan nilai *error* pada setiap lokasi cenderung untuk fluktuatif. Dan Zero Crossing juga cenderung menampilkan grafik yang fluktuatif.

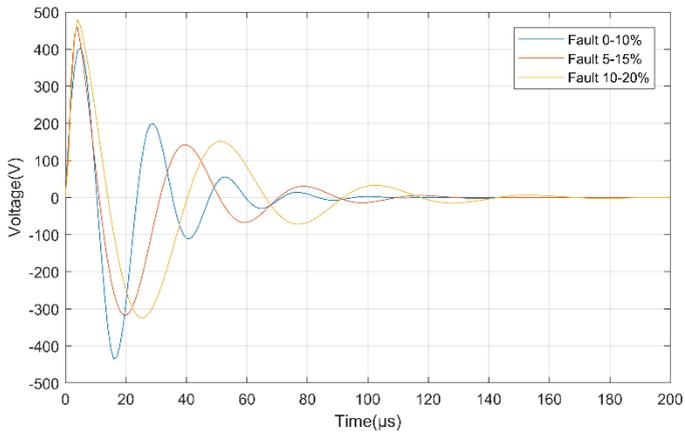
Pada pengujian untuk nilai *fault* 5% pada berbagai lokasi tidak menunjukkan *trendline* dari efek lokasi gangguan hubung singkat. Dari empat data yang diambil tidak menunjukkan bahwa lokasi gangguan akan berpengaruh pada tes surja. Maka dari itu dapat dikatakan bahwa tes surja tidak dapat digunakan untuk mendeteksi lokasi dari gangguan antar belitan pada nilai *fault* 5% terhadap referensi dari empat objek lokasi uji.

4.4.2.5 Plot Grafik Surja Selisih Fault 10%

Pengujian surja dilakukan kembali pada nilai *fault* yang lebih besar pada tiap lokasi. *Fault* yang akan digunakan adalah nilai *fault* 10%. Pada *external tab* yang sudah diimplementasikan, terdapat tiga *tab* yang dapat digunakan. Yaitu pada nilai 0-10%, 5-15%, 10-20%. Hasil gelombang surja dapat dilihat pada gambar 4.29 dan 4.30.



Gambar 4.29 Gelombang surja pada selisih *fault* 10% tiap lokasi sisi primer 220V



Gambar 4.30 Gelombang surja pada selisih *fault* 10% tiap lokasi sisi sekunder 127V

Dari hasil plot grafik gelombang surja, maka dapat dilihat perbedaan dari gelombang surja. Pada sisi primer maupun sisi sekunder

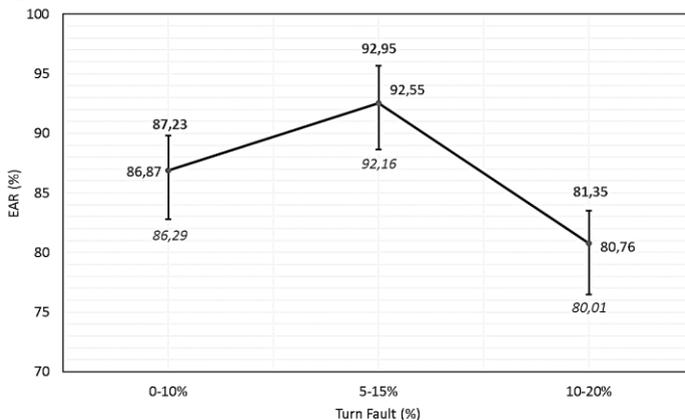
trafo, memiliki perbedaan yang cukup signifikan pada pengujian tiap lokasi. Dari lokasi yang berbeda pada nilai *fault* 10%, tidak memiliki kemiripan antar gelombang surjanya.

Namun untuk analisis yang lebih mendalam tentang karakteristik mengenai gelombang tersebut, dapat menggunakan metode yang telah digunakan pada penelitian ini. Hasil dari pengujian tersebut akan dianalisis menggunakan metode EAR dan *Zero Crossing*.

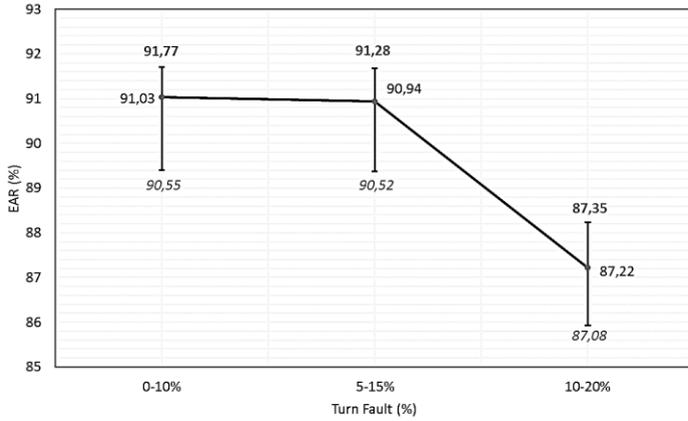
4.4.2.6 Analisis EAR dan Zero Crossing Selisih Fault 10% Tiap Lokasi

Dengan menggunakan persamaan 2.6, maka dapat dihitung nilai EAR dari selisih *fault* 10% untuk tiap lokasi. Hasil perhitungan EAR dapat digunakan untuk analisis dari gelombang surja pada tiap lokasi di selisih *fault* 10%. Selain itu, metode *Zero Crossing* akan digunakan untuk melihat perpotongan gelombang surja terhadap sumbu-X.

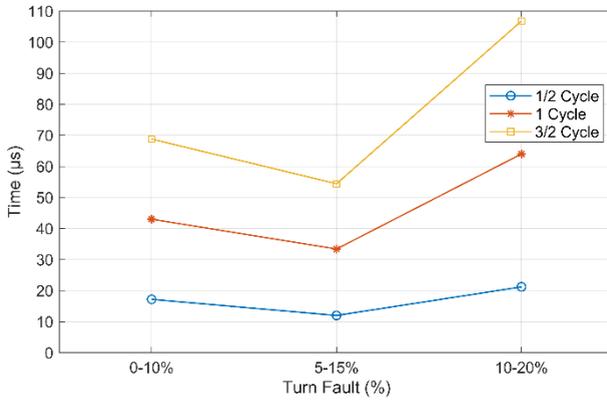
Nilai dari EAR dan *Zero Crossing* yang dicari akan diplot dalam bentuk grafik. Gambar dari nilai EAR dan *Zero Crossing* dapat dilihat pada gambar 4.31-4.34.



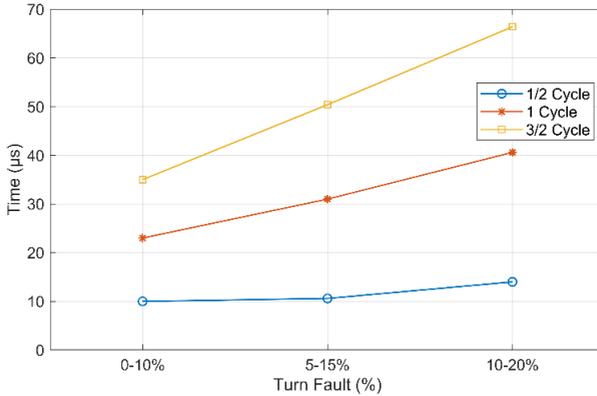
Gambar 4.31 Error Area Ratio pada selisih *fault* 10% tiap lokasi sisi primer 220V



Gambar 4.32 Error Area Ratio pada selisih *fault* 10% tiap lokasi sisi sekunder 127V



Gambar 4.33 Zero Crossing pada selisih *fault* 10% tiap lokasi sisi primer 220V



Gambar 4.34 Zero Crossing pada selisih *fault* 10% tiap lokasi sisi sekunder 127V

Dari hasil grafik tersebut, untuk nilai EAR dan Zero Crossing dapat dianalisis. EAR menggambarkan nilai *error* pada setiap lokasi cenderung untuk fluktuatif. Sehingga nilai dari EAR tidak memiliki *trendline* yang dapat dijadikan patokan. Bahwa lokasi gangguan hubung singkat antar belitan tidak dapat dideteksi pada nilai *fault* 10%.

Sedangkan untuk grafik Zero Crossing, pada sisi primer dan sekunder memiliki perbedaan. Pada sisi primer, grafik Zero Crossing cenderung untuk fluktuatif dan tidak memberikan *trendline* dari grafik. Namun, pada sisi sekunder grafik Zero Crossing dapat dikatakan naik pada lokasi *fault* yang lebih ke tengah. Pada nilai *fault* 10% di sisi sekunder belum bisa dikatakan bahwa dengan semakin ke tengah, maka Zero Crossing menjadi lebih besar. Akan tetapi, karena pada sisi primer dan sisi sekunder pada nilai *fault* yang sama tidak memberikan kesamaan *trendline*, maka dapat dikatakan bahwa lokasi gangguan tidak dapat dideteksi menggunakan tes surja pada nilai *fault* 10% terhadap referensi dari tiga objek lokasi uji.

4.5 Analisis Metode EAR dan Zero Crossing Terhadap Lokasi Gangguan Hubung Singkat

Pada lokasi gangguan hubung singkat antar belitan, telah diuji dengan tes surja. Lokasi gangguan yang diuji memiliki nilai 2%, 5%, dan

10% dari total belitan tiap sisi trafo. Dari hasil gelombang surja yang didapatkan pada masing masing lokasi memiliki nilai yang berbeda beda. Hal ini dikarenakan distribusi tegangan pada tiap belitan trafo yang tidak merata. Sehingga gelombang yang muncul akan berbeda beda pada tiap lokasi *fault* yang berbeda.

Dengan melakukan pengujian *short circuit test* pada trafo satu fasa, maka dapat dilihat nilai impedansi dari trafo. Hal ini untuk memastikan pengaruh lokasi gangguan hubung singkat yang bergantung dari impedansi. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel .

Tabel 4.5 Nilai impedansi lokasi *fault*

Fault Percentage (%)	External Tab Fault Location (%)	Impedansi (Ω)	
		220V	127V
2%	1 ke 3	3,8735	1,1857
	3 ke 5	3,7882	1,1763
5%	0 ke 5	3,6219	1,0367
	5 ke 10	3,5727	1,0655
	10 ke 15	3,5727	1,0167
	15 ke 20	3,6219	1,1530
10%	0 ke 10	3,0077	1,0490
	5 ke 15	3,2400	1,0492
	10 ke 20	3,2005	1,0651

Dari hasil pengujian diatas, maka didapatkan nilai impedansi pada tiap lokasi gangguan. Hasil yang didapatkan memperlihatkan nilai impedansi pada tiap lokasi gangguan yang memiliki nilai *fault percentage* yang sama tidak memiliki perbedaan impedansi yang signifikan. Namun bentuk dari gelombang surja yang ditampilkan memiliki perbedaan pada tiap lokasi gangguannya.

Pada pengujian yang telah dilakukan dengan menggunakan trafo, dengan menggunakan metode EAR dan *Zero Crossing* tidak dapat dilihat karakteristik pengaruh lokasi gangguan. Hal ini dikarenakan gelombang surja yang terbentuk pada tiap lokasi *fault* tidak memiliki trendline tertentu, sehingga dengan metode EAR dan *Zero Crossing* nilainya akan acak dan tidak menunjukkan pengaruh lokasi gangguan. Pada tipe belitan trafo yang merupakan *helical winding*, lokasi tidak dapat ditentukan menggunakan metode EAR dan *Zero Crossing*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan. Kesimpulan tersebut meliputi dari awal pengujian yang dilakukan pada tiap nilai *fault* dan tiap lokasi pada nilai *fault* tertentu. Kesimpulan yang didapatkan adalah sebagai berikut :

1. Perbedaan nilai *turn fault* pada belitan trafo akan menyebabkan nilai frekuensi grafik gelombang surja semakin besar pada nilai *turn fault* yang bertambah.
2. Nilai *turn fault* yang semakin besar akan menghasilkan EAR yang semakin besar pula. Hal ini dapat dilihat pada sisi primer trafo dalam kondisi normal memiliki nilai EAR 1,81% - 6,75%, sedangkan saat disimulasikan terdapat *fault* nilai EAR bervariasi rata – rata dari 70,27% - 95,14%. Sedangkan pada sisi sekunder, nilai EAR pada kondisi normal antara 0,75% - 4,16%, dan saat terjadi *fault* bervariasi rata – rata dari 71,21% - 94,55%.
3. *Zero Crossing* semakin menurun seiring dengan bertambah nilai *fault* dari belitan trafo. Nilai *Zero Crossing* pada *turn fault* lebih singkat waktunya dibanding $1/2$ Cycle kondisi normal.
4. Nilai resistansi pada selisih *fault* yang sama dari berbagai lokasi memiliki nilai yang relatif sama.
5. Nilai induktansi pada selisih *fault* yang sama dari berbagai lokasi memiliki nilai yang bervariasi namun hanya berselisih sedikit.
6. Hasil uji surja pada tiap lokasi dengan nilai *fault* yang sama, menghasilkan gelombang yang berbeda pada tiap lokasinya.
7. EAR dan *Zero Crossing* pada tiap lokasi *fault* tidak memberikan *trendline* grafik mengenai efek lokasi gangguan hubung singkat. Maka lokasi hubung singkat tidak berpengaruh pada penentuan lokasi menggunakan tes surja pada penelitian ini.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian yang selanjutnya adalah pengujian nilai *fault* dari lokasi gangguan untuk diperbanyak. Agar dapat melihat *trendline* dari lokasi gangguan dengan lebih jelas pada nilai *fault* yang sama menggunakan tes surja. Tipe belitan pada trafo juga dapat diubah

dengan menggunakan tipe belitan *disc*, *interleaved*, atau *layer winding* untuk melihat efek lokasi gangguan menggunakan tes surja. Selain itu, dalam mendesain trafo yang akan dijadikan sebagai objek pengujian alangkah lebih baiknya untuk melakukan pengujian sisi primer dan sekunder trafo terlebih dahulu sebelum melakukan pengujian surja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. S. Bhide, M. S. S. Srinivas, A. Banerjee, dan R. Somakumar, "Analysis of winding inter-turn fault in transformer: A review and transformer models," 2010, hlm. 1–7.
- [2] M. A. Cash, T. G. Habetler, dan G. B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, hlm. 1234–1239, Des 1998.
- [3] Megger, *The Complete Guide to Electrical Insulation Testing*. 2006.
- [4] G. C. Stone, Ed., *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Piscataway, NJ: IEEE Press [u.a.], 2004.
- [5] P. Gill, *Electrical power equipment maintenance and testing*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [6] E. Wiedenbrug, G. Frey, dan J. Wilson, "Impulse testing and turn insulation deterioration in electric motors," 2003, hlm. 50–55.
- [7] S. Grubic, J. M. Aller, Bin Lu, dan T. G. Habetler, "A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, hlm. 4127–4136, Des 2008.
- [8] Muhammad Infaq Dahlan, "Diagnosa Kerusakan Isolasi Trafo Menggunakan Analisa Respon Tegangan Uji Surja," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [9] K. Usha dan S. Usa, "Inter disc fault location in transformer windings using SFRA," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 6, hlm. 3567–3573, Des 2015.
- [10] J. H. Harlow, Ed., *Electric power transformer engineering*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [11] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [12] Edvard, "5 transformer fault conditions and how to protect from them," 23-Nov-2016. .
- [13] F. A. M. Rizk dan G. N. Trinh, *High voltage engineering*. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.

- [14] J. Wilson, “Current State of Surge Testing Induction Machines,” *IRIS Rotating Machine Conference*, Jun 2003.
- [15] K. A. Christiansen dan A. Pedersen, “An experimental study of impulse voltage phenomena in a large AC motor,” 1968, hlm. 148–150.
- [16] Baker Instrument Co., *Awa Surge Test Pass/Fail Criteria*. Fort Collins, CO, 2007.
- [17] Verivolt LLC, “Entube DE-HB : Specification Sheet for Verivolt Ultra-Compact, High-Bandwidth, Differential Voltage Sensor.” .

LAMPIRAN A

LIST PROGRAM ARDUINO

```
int pin_out = 13;
int pin_out2 = 12;
//12 ke relay, 13 ke IGBT`
void setup()
{
// put your setup code here, to run once:
Serial.begin(9600);
pinMode(pin_out,OUTPUT);
pinMode(pin_out2,OUTPUT);
Serial.println("pilih saklar");
Serial.println("1. saklar 1 ");
Serial.println("2. saklar 2 ");
}
void lcd()
{Serial.println("pilih saklar");
Serial.println("1. saklar 1 ");
Serial.println("2. saklar 2 ");}
void loop()
{
unsigned int data;
int coba;
if(Serial.available(>0)
{
data=Serial.read();
if(data==52)//4 Gelombang bagus
{
Serial.println("saklar 2 on.....");
digitalWrite(pin_out2,HIGH);
delay(5000);
digitalWrite(pin_out2,LOW);
delay(1);
digitalWrite(pin_out,HIGH);
Serial.println("saklar 2 off.....");
delay(3000);
digitalWrite(pin_out,LOW);
Serial.println("saklar 1 off.....");
lcd();
```

}
}
}

LAMPIRAN B DATASHEET

1. Datasheet IGBT

International
IR Rectifier

PD-95913

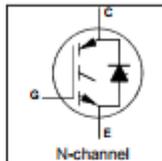
IRGPS60B120KDP

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR WITH
ULTRAFAST SOFT RECOVERY DIODE

Motor Control Co-Pack IGBT

Features

- Low VCE(on) Non Punch Through IGBT Technology.
- Low Diode VF.
- 10µs Short Circuit Capability.
- Square RBSOA.
- Ultrasoft Diode Reverse Recovery Characteristics.
- Positive VCE(on) Temperature Coefficient.
- Super-247 Package.
- Lead-Free



$V_{CE} = 1200V$
 $V_{CE(on)} \text{ typ.} = 2.50V$
@ $V_{GE} = 15V,$
 $I_{CE} = 60A, T_J = 25^\circ C$

Benefits

- Benchmark Efficiency for Motor Control.
- Rugged Transient Performance.
- Low EMI.
- Significantly Less Snubber Required
- Excellent Current Sharing in Parallel Operation.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Voltage	1200	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	105 Φ	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	60	
I_{CM}	Pulsed Collector Current	240	
I_{LW}	Clamped Inductive Load Current Φ	240	
$I_F @ T_C = 25^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	120	
$I_F @ T_C = 100^\circ C$	Diode Continuous Forward Current	60	
I_{FM}	Diode Maximum Forward Current	240	V
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	595	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	238	
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 sec.	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	

2. Datasheet Reed Relay

Contact Specification	Unit	Condition	10kV SPNO			10kV SPNC			15kV SPNO		
Contact Material			Rhodium Tungsten			Rhodium Tungsten			Tungsten		
Isolation across contacts	kV	DC or AC peak	10	10		10	10		15		
Switching Power Max.	W		50	50		50	50		50		
Switching Voltage Max.	V	DC or AC peak	1000	7000		1000	7000		10000		
Switching Current Max.	A	DC or AC peak	3	2		3	2		2		
Carry Current Max	A	DC or AC peak	4	3		4	3		2		
Capacitance across contacts	pF	coil to screen grounded	<0.2	<0.2		<0.2	<0.2		<0.2		
Lifetime operations		dry switching 50W switching	10 ⁵ 10 ⁶	10 ³ 10 ⁴		10 ⁵ 10 ⁶	10 ³ 10 ⁴		10 ⁵ 10 ⁶		
Contact Resistance	mΩ	max (typical)	50 (15)	250(100)		50 (15)	250(100)		250 (100)		
Insulation Resistance	Ωmin	(typical)	10 ¹¹ (10 ¹²)			10 ¹¹ (10 ¹²)			10 ¹¹ (10 ¹²)		
Coil Specification			5V	12V	24V	5V	12V	24V	5V	12V	24V
Must Operate Voltage	V	DC	3.7	9	20	3.7	9	20	3.7	9	20
Must Release Voltage	V	DC	0.5	1.25	4	0.5	1.25	4	0.5	1.25	4
Operate Time	ms	diode fitted	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0
Release Time	ms	diode fitted	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0
Resistance	Ω		28	150	780	38	240	925	16	95	350
Relay Specification											
Isolation contact/coil	kV		17			17			17		
Insulation resistance contact to all terminals	Ωmin	(typical)	10 ¹¹ (10 ¹²)			10 ¹¹ (10 ¹²)			10 ¹¹ (10 ¹²)		
Environmental											
Operating Temp range	°C		-20 to +70			-20 to +70			-20 to +70		

BIODATA PENULIS



Dhanang Tri Laksono adalah anak ketiga dari tiga bersaudara dan lahir di Magelang, 5 April 1996. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SD Muhammadiyah 1 Alternatif Kota Magelang pada tahun 2002 – 2008. Kemudian melanjutkan pendidikannya di SMP Negeri 1 Kota Magelang yang telah diselesaikan pada tahun 2008 – 2011. Penulis juga menyelesaikan jenjang SMA di SMA Negeri 1 Kota Magelang pada tahun 2011 – 2014. Saat ini penulis tengah menjalani pendidikan Program Sarjana di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa mengenyam pendidikan di perguruan tinggi, penulis pernah tercatat sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi dan aktif di berbagai bidang acara kampus.