

EVALUASI DAN PERBAIKAN TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR 60 MVA/150/20 KV CIMANGGIS II

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR SARJANA STRATA SATU (S1) PADA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG



DISUSUN OLEH:

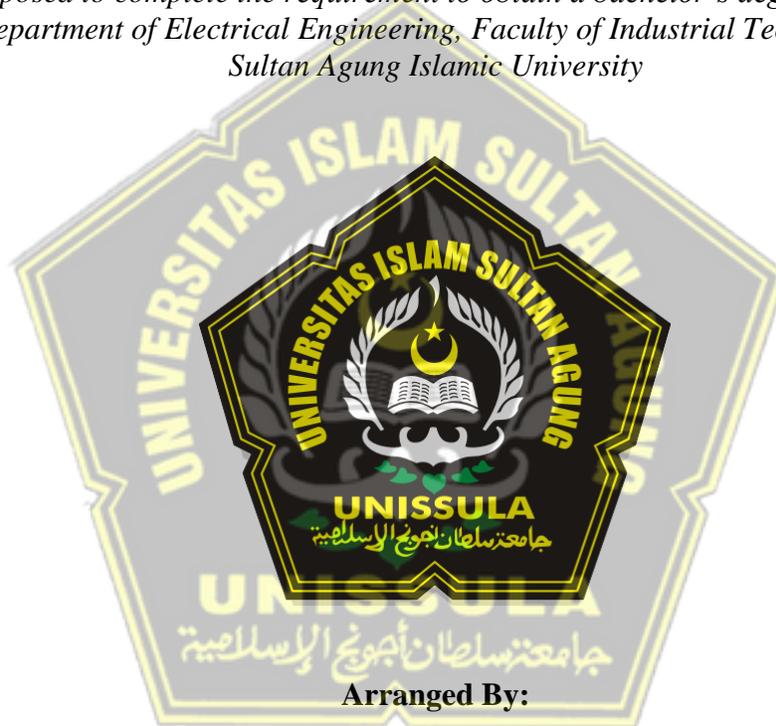
**PURWANTI BEKTI UTAMI
3060200036**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2022**

FINAL PROJECT

***THE EVALUATION AND IMPROVEMENT OF
CIMANGGIS II TRANSFORMER 60 MVA/150/20 KV
INSULATION RESISTANCE***

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at
Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Sultan Agung Islamic University*



Arranged By:

**PURWANTI BEKTI UTAMI
30602000036**

**MAJORING OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2022**

LEMBAR PENGESAILAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul "EVALUASI DAN PERBAIKAN TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR 60 MVA/150/20 KV CIMANGGIS II" ini disusun oleh:

Nama : Purwanti Bekti Utami

NIM : 30602000036

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Kamis

Tanggal : 1 September 2022

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT
NIDN. 0628086501

Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT
NIDN. 0618066301

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



UNISSULA
050922
Jenny Putri Hapsari, ST, MT
NIDN. 0607018501

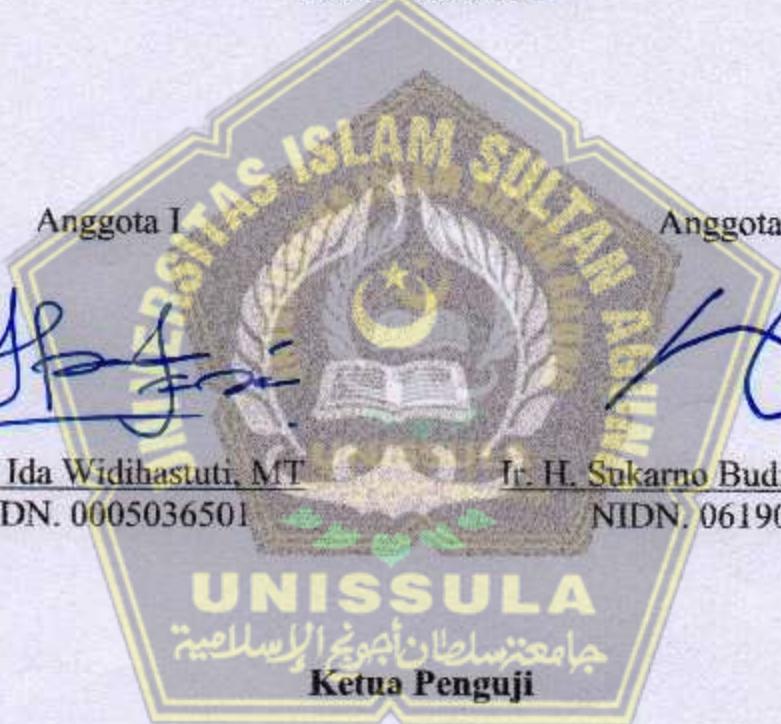
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "EVALUASI DAN PERBAIKAN TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR 60 MVA/150/20 KV CIMANGGIS II" ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis

Tanggal : 1 September 2022

TIM PENGUJI



Anggota I

Anggota II

Ir. Hj. Ida Widiastuti, MT
NIDN. 0005036501

Ir. H. Sukarno Budi Utomo, MT
NIDN. 0619076401

UNISSULA
جامعة سلطان أبو بكر الإسلامية
Ketua Penguji

Gunawan, ST, MT
NIDN. 0607117101

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Purwanti Bekti Utami
NIM : 30602000036
Judul Tugas Akhir : EVALUASI DAN PERBAIKAN TAHAPAN
ISOLASI TRANSFORMATOR 60 MVA/150/20 KV
CIMANGGIS II

Dengan ini saya menyatakan bahwa judul dan isi Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apabila dikemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 5 September 2022

Yang Menyatakan



Purwanti Bekti Utami

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Purwanti Bekti Utami
NIM : 30602000036
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri
Alamat Asal : Jl. Pemuda No. 50 Kp. Gudang Kel. Siswodipuran Kec.
Boyolali, Kab. Boyolali

Dengan ini saya Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan Judul: **EVALUASI DAN PERBAIKAN TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR 60 MVA/150/20 KV CIMANGGIS II**

Menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dan pangkalan data dan dipublikasikan di internet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap menyantumkan nama penulis sebagai pemilik hak cipta. Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 5 September 2022

Yang Menyatakan



Purwanti Bekti Utami

MOTO DAN PERSEMBAHAN

▪ MOTTO

"Wahai orang-orang yang beriman! Apabila dikatakan kepadamu, "Berilah kelapangan di dalam majelis-majelis, maka lapangkanlah, niscaya Allah akan memberi kelapangan untukmu. Dan apabila dikatakan, "Berdirilah kamu," maka berdirilah, niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman di antarmu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat. Dan Allah Mahateliti apa yang kamu kerjakan." (Q.S. Mujadalah : 11)

"Siapa yang menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan mudahkan baginya jalan menuju surga." (HR Muslim, No. 2699)

▪ PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Orang tua dan adik saya yang telah mendukung saya selama ini.
2. PT PLN (Persero) yang telah memberikan saya kesempatan untuk berkembang, berkarir dan menuntut ilmu.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SAW, atas rahmat, barokah, dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini. Penyusunan Tugas Akhir ini selain merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan pendidikan Tingkat Sarjana pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung, juga dimaksudkan untuk menambah wawasan di bidang sistem penyaluran tenaga listrik khususnya di bagian trafo daya serta mengaktualisasikan konsep *link and match* antara dunia kampus dengan dunia kerja yang akan menciptakan kerjasama saling menguntungkan. Pada kesempatan ini izinkan penulis untuk mengucapkan terima kasih dan rasa hormat atas segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini, yaitu kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST, MT selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung atas dukungan yang diberikan untuk mengerjakan Tugas Akhir.
2. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung yang telah membimbing penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT, selaku Dosen Pembimbing I dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir yang telah memberikan ilmunya, membimbing, memberi masukan sehingga penulis dapat lebih menyempurnakan Laporan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT, selaku Dosen Pembimbing II dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir yang telah memberikan ilmunya, membimbing dan memberikan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.

5. Seluruh dosen, staf, dan karyawan Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung atas jasa-jasanya selama penulis menuntut ilmu.
6. Bapak Anggi Widyanto, Bapak Wahyu Hidayat, Bapak Yogi Rifa, Bapak Sakti Utama dari PT PLN (Persero) UPP JBT 1 yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian di GI 150 kV Cimanggis II.
7. Rekan-rekan Program Studi S1 Teknik Elektro Kelas Mitra Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan bantuan selama masa perkuliahan maupun dalam penyusunan Tugas Akhir.
8. Ibu Wiwik Dwi Haryanti tercinta, Ariyanto Dwi Prasetyo, Norma Fatmawati, Siti Mustabsyirah Dahlan, Wiwik Afriella Sijabat, dan Shelvy Winly Rahmawati, serta semua pihak yang telah banyak memberikan bantuan yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu sehingga mengantarkan penulis untuk menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.

Dalam penyusunan Laporan ini tentunya masih banyak terdapat kekurangan, kesalahan dan kekhilafan karena keterbatasan kemampuan penulis, untuk itu sebelumnya penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya. Penulis juga mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak demi perbaikan yang bersifat membangun atas laporan ini.

Akhirnya dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih dan semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun kita bersama. Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Semarang, September 2022

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
MOTO DAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
ABSTRAK	14
ABSTRACT	15
BAB I PENDAHULUAN	16
1.1. Latar Belakang	16
1.2. Perumusan Masalah	17
1.3. Batasan Masalah	18
1.4. Tujuan Penelitian	18
1.5. Manfaat Penelitian	19
1.6. Sistematika Penulisan	19
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	21
2.1. Tinjauan Pustaka	21
2.2. Dasar Teori	22
2.2.1. Transformator	22
2.2.2. Isolasi pada Transformator	29
2.2.3. Pengujian Isolasi Trafo	30

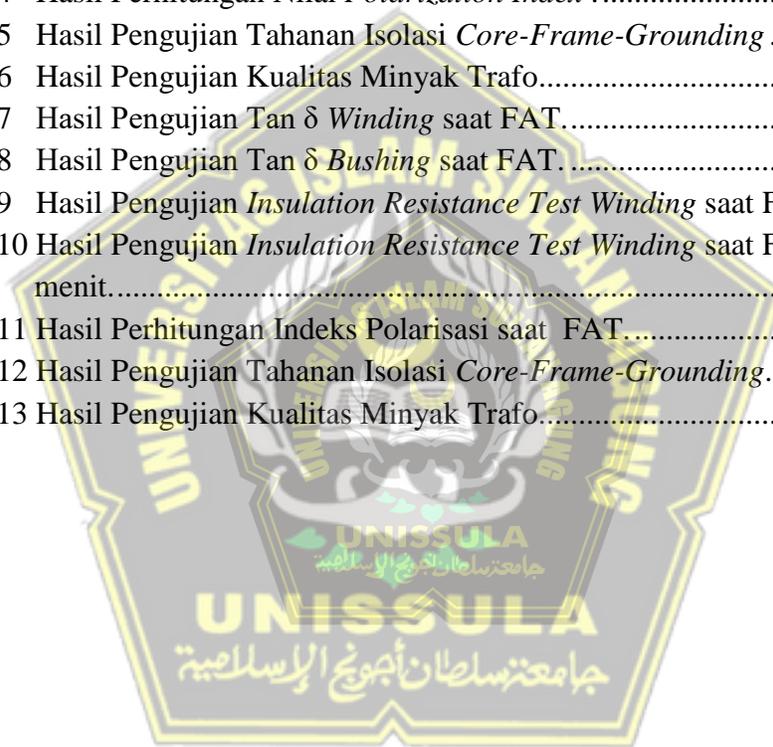
2.2.4. Perbaikan Nilai Tahanan Isolasi.....	35
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	38
3.1. Model Penelitian	37
3.2. Alat dan Bahan.....	38
3.3. Metode Penelitian	38
3.3.1. Jenis Penelitian	38
3.3.2. Jenis Data	39
3.3.3. Teknik Analisa Data.....	39
3.3.4. Pengujian Tahanan Isolasi Trafo.....	40
3.4. Tahapan Penelitian.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1. Pengamatan Visual	45
4.2. Hasil Pengujian dan Perhitungan Tahanan Isolasi di <i>Site</i>	46
4.3. Analisa Perbaikan Tahanan Isolasi.....	55
4.4. Hasil Pengujian dan Perhitungan Tahanan Isolasi pada saat FAT	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	71
DAFTAR PUSTAKA	714

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Transformator 60 MVA GI Cimanggis II.	23
Gambar 2. 2	Inti Trafo.	24
Gambar 2. 3	Kumparan Trafo.	25
Gambar 2. 4	<i>Bushing</i> dan Tangki Konservator.	26
Gambar 2. 5	Sistem pendinginan pada trafo.	27
Gambar 2. 6	Cara kerja trafo.	28
Gambar 2. 7	Arus <i>Eddy</i>	29
Gambar 2. 8	Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian phasor arus pengujian tangen delta.	33
Gambar 3. 1	Model penelitian.	37
Gambar 3. 2	Pelaksanaan Pengujian di <i>Site</i>	37
Gambar 3. 3	Rangkaian <i>Insulation Resistance Test Core-Frame Grounding</i>	40
Gambar 3. 4	Rangkaian <i>Insulation Resistance Winding Test</i>	41
Gambar 3. 5	Rangkaian <i>Capacitance dan Tangent Delta Winding (Tan δ) Test</i>	42
Gambar 3. 6	Rangkaian <i>Capacitance dan Tangent Delta Bushing (Tan δ) Test</i>	43
Gambar 3. 7	Tahapan peneitian.	44
Gambar 4. 1	Proses <i>Untanking</i> Trafo.	55
Gambar 4. 2	Proses <i>Untanking</i> Trafo.	55
Gambar 4. 3	Identifikasi <i>Active Part</i> Trafo.	56
Gambar 4. 4	Kerusakan pada <i>frame support</i> trafo.	56
Gambar 4. 5	Air terjebak di bawah tangki trafo.	57
Gambar 4. 6	Isolasi bagian bawah basah.	57
Gambar 4. 7	<i>Pressboard</i> sisi LV mengembang.	58
Gambar 4. 8	<i>Pressboard</i> sisi LV mengembang.	58
Gambar 4. 9	<i>Top terminal bushing</i> 1N, 2U, 2V, 2W, 2N, 3U2, 3W1 dalam kondisi terbuka.	58
Gambar 4. 10	Trafo setelah dilakukan penggantian <i>support frame</i> dan <i>press block</i> . .	59
Gambar 4. 11	Proses oven.	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Standar indeks polarisasi tranformator menggunakan IEEE 43-2000	32
Tabel 2. 2	Standar pengujian tan delta menggunakan ANSI C 57.12.90	33
Tabel 4. 1	Hasil Pengujian Tan δ <i>Winding</i> di <i>site</i>	46
Tabel 4. 2	Hasil Pengujian Tan δ <i>Bushing</i> di <i>site</i>	49
Tabel 4. 3	Hasil Pengujian Tahanan Isolasi <i>Winding</i> di <i>site</i>	50
Tabel 4. 4	Hasil Perhitungan Nilai <i>Polarization Index</i>	52
Tabel 4. 5	Hasil Pengujian Tahanan Isolasi <i>Core-Frame-Grounding</i>	53
Tabel 4. 6	Hasil Pengujian Kualitas Minyak Trafo	53
Tabel 4. 7	Hasil Pengujian Tan δ <i>Winding</i> saat FAT	63
Tabel 4. 8	Hasil Pengujian Tan δ <i>Bushing</i> saat FAT	65
Tabel 4. 9	Hasil Pengujian <i>Insulation Resistance Test Winding</i> saat FAT	66
Tabel 4. 10	Hasil Pengujian <i>Insulation Resistance Test Winding</i> saat FAT dalam 10 menit	67
Tabel 4. 11	Hasil Perhitungan Indeks Polarisasi saat FAT	68
Tabel 4. 12	Hasil Pengujian Tahanan Isolasi <i>Core-Frame-Grounding</i>	69
Tabel 4. 13	Hasil Pengujian Kualitas Minyak Trafo	69



ABSTRAK

Salah satu permasalahan yang terjadi pada trafo daya adalah terkait dengan kelayakan isolasi trafo daya. Kerusakan isolasi trafo daya dapat diakibatkan karena hal-hal berikut antara lain kesalahan instalasi trafo, penurunan kualitas isolasi, dan terjadi-nya arus hubung singkat di dalam trafo di luar gangguan petir dan gangguan di jaringan transmisi. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya hotspot di trafo daya hingga kerusakan yang lebih lanjut. Solusi terhadap masalah ini adalah perlu dipastikan tahanan isolasi trafo sesuai standar.

Penelitian ini memfokuskan tentang evaluasi penentuan kelayakan tahanan isolasi pada trafo 60 MVA GI Cimanggis II. Parameter yang ditentukan antara lain: Insulation Resistance and Polarization Index (PI) of Winding and Test Core-Frame Grounding, Capacitance dan Tangent Delta Winding and Bushing, dan Oil Quality Test. Metode yang digunakan adalah menggunakan pengujian tahanan isolasi dan tangen delta.

Hasil menunjukkan bahwa uji kelayakan nilai tahanan isolasi $0\text{ M}\Omega$ dan nilai pengujian tan delta paling tinggi adalah 0,2931%. Nilai tahanan isolasi $0\text{ M}\Omega$ mengindikasikan adanya short circuit/hubung singkat di dalam trafo yang disebabkan karena kelembaban di dalam trafo yang cukup tinggi ditandai dengan nilai water content 14 ppm, sedangkan hasil pengujian tangen delta masih dalam kondisi baik. Sehingga trafo GI Cimanggis II tersebut tidak laik untuk beroperasi. Untuk menghilangkan tingginya kandungan air dan untuk meningkatkan nilai tahanan isolasi, dilakukan drying oven pada trafo dan purifikasi minyak trafo. Setelah dilakukan kedua proses tersebut nilai tahanan isolasi trafo meningkat menjadi $4.170\text{ M}\Omega$ (lebih tinggi dari nilai batas minimal yaitu $1.000\text{ M}\Omega$) dan nilai tangen delta turun menjadi 0,22% dengan nilai water content 3,11 ppm (maksimal nilai yang diizinkan adalah 5 ppm). Sehingga setelah dilakukan perbaikan, trafo GI Cimanggis berada pada kondisi yang baik dan laik operasi.

Kata kunci: Trafo Daya, Tahanan Isolasi Trafo, Tangen Delta.

ABSTRACT

One of the problems that occur in power transformers is related to the operability of transformer insulation. The leading cause of transformer failures is insulation failure. This category includes inadequate or defective installation, insulation deterioration, and short circuits, but not exterior surges such as lightning and line faults. It can cause a hotspot and further transformer failure. The solution of this problem is to ensure that the transformer insulation resistance is up to standard..

This study focuses on evaluating the operability of the insulation resistance of the 60 MVA transformer Cimanggis II Substation. Parameters determined: Insulation Resistance and Polarization Index (PI) of Winding and Test Core-Frame Grounding, Capacitance and Tangent Delta Winding and Bushing, and Oil Quality Test. The method used is to test the insulation resistance and tangent delta.

Based on the results of the tests carried out on the Cimanggis II Substation transformer, the results are the insulation resistance value of 0 M Ω and the highest tan delta test value is 0.2931%. The insulation resistance value of 0 M Ω indicates a short circuit in the transformer due to high humidity in the transformer, indicated by the water content of 14 ppm, while the tangent delta test results are still in good condition. So that the Cimanggis II Substations transformer is not feasible to operate. To eliminate the high-water content and to increase the insulation resistance value, a drying oven was carried out on the transformer and purification of the transformer oil. After the two processes were carried out, the transformer insulation resistance value increased to 4.170 M Ω (higher than the minimum limit value of 1000 M Ω) and the tangent delta value decreased to 0.22% with a water content value of 3.11 ppm (maximum permissible value is 5 ppm). So after the repairs, the Cimanggis Substaions transformer is in good condition and is feasible to operate.

Keywords: *Power Transformer, Transformer Insulation Resistance, Tangent Delta.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem tenaga listrik adalah suatu rangkaian sistem penyaluran tenaga listrik dari hulu ke hilir, dimana listrik dibangkitkan di sisi pembangkitan, kemudian ditransmisikan melalui jaringan transmisi tegangan tinggi dan gardu induk dan kemudian didistribusikan ke pelanggan/konsumen. Gardu induk adalah bagian yang berfungsi untuk menaikkan dan/atau menurunkan tegangan dan *switching* tenaga listrik yang di dalamnya terdiri dari material-material yaitu CB, CT, CVT, DS, DSE, dan trafo daya. Trafo daya adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet (Zuhal, 1991).

Permasalahan yang paling banyak terjadi pada saat pengoperasian trafo daya adalah terkait dengan kelayakan isolasi (Bartley, 2003). Sistem isolasi trafo daya dikatakan untuk layak operasi apabila nilai tahanan isolasi trafo tenaga tersebut memenuhi standar yang ditetapkan dalam SPLN, *IEEE*, dan *IEC*.

Penyebab ketidaklayakan isolasi trafo daya disebabkan oleh beberapa faktor yaitu kesalahan instalasi trafo, penurunan kualitas isolasi, dan terjadinya arus hubung singkat di dalam trafo di luar gangguan petir dan gangguan di jaringan transmisi.

Dampak yang ditimbulkan dari pengoperasian trafo daya dengan sistem isolasi yang tidak layak antara lain: terjadinya *hotspot* di trafo daya hingga kerusakan trafo daya yang lebih lanjut. Jika terjadi kerusakan trafo daya maka proses penyaluran tenaga listrik akan menjadi terganggu yang menyebabkan kerugian baik di sisi perusahaan penyedia tenaga listrik maupun di sisi konsumen.

PT PLN (Persero) merupakan perusahaan penyelenggara usaha penyediaan tenaga listrik bagi kepentingan umum dalam jumlah dan mutu yang memadai dalam rangka menunjang pembangunan negara. PT PLN (Persero) merencanakan pembangunan Gardu Induk 150 kV Cimanggis II yang bertujuan untuk mengambil alih sebagian beban Gardu Induk 150 kV Kedung Badak dan GI 150 kV Rawadenok, meningkatkan keandalan dan fleksibilitas operasi, serta untuk mempersiapkan pertumbuhan beban atau kebutuhan tenaga listrik di wilayah Depok dan sekitarnya.

Gardu Induk 150 kV Cimanggis II mempunyai dua unit trafo daya berkapasitas 60 MVA, dimana sejak trafo daya tersebut *on-site* atau duduk pada pondasi trafo pada bulan Mei 2018 sampai dengan bulan Juli 2021 belum dioperasikan. Dalam rangka PT PLN (Persero) menargetkan *energize* atau pengoperasian Gardu Induk 150 kV Cimanggis pada Desember 2021, maka perlu dilakukan pengujian tahanan isolasi untuk mengetahui kelayakan operasi dari dua unit trafo daya tersebut.

Berdasarkan uraian tersebut penelitian ini membahas tentang *Evaluasi dan Perbaikan Tahanan Isolasi Trafo 60 MVA* dengan menggunakan pengujian tangen delta dan pengujian tahanan isolasi. Penggunaan metode ini dikarenakan keakuratan dan keefektifan untuk mengetahui kelayakan tahanan isolasi pada trafo di suatu gardu induk. Penelitian ini mengambil data trafo No. 1 60 MVA Gardu Induk 150 kV Cimanggis II sebagai objek penelitian. Data-data yang digunakan adalah data pengujian tahanan isolasi, data tangen delta dan data *oil quality* yang dihitung dan dianalisis untuk mendapatkan hasil kelayakan operasi suatu trafo daya.

1.2. Perumusan Masalah

Dari uraian permasalahan pada penelitian ini, rumusan masalah yang diangkat adalah sebagai berikut:

1. Faktor apa sajakah yang menjadi indikator sebuah trafo daya 60 MVA yang laik operasi dan nilai tahanan isolasi yang baik.
2. Bagaimana kondisi tahanan isolasi pada trafo daya 60 MVA Cimanggis II.
3. Apa yang menjadi penyebab tidak terpenuhinya nilai tahanan isolasi trafo daya 60 MVA Cimanggis II.
4. Bagaimana langkah perbaikan nilai tahanan isolasi pada trafo daya 60 MVA Cimanggis II.
5. Bagaimana menentukan kelayakan tahanan isolasi trafo daya 60 MVA Cimanggis II.

1.3. Batasan Masalah

Dalam penyusunan penelitian ini, telah ditentukan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Transformator adalah trafo daya 150/20 kV dengan kapasitas 60 MVA.
2. Pengujian yang dilakukan pada trafo daya adalah pengujian:
 - a. *Insulation Resistance and Polarization Index (PI) of Winding.*
 - b. *Capacitance dan Tangent Delta Winding.*
 - c. *Capacitance dan Tangent Delta Bushing.*
 - d. *Insulation Resistance Test Core-Frame Grounding.*
 - e. *Oil Quality Test.*
3. Kerusakan pada trafo daya merupakan merupakan kerusakan pada isolasi trafo yang diakibatkan karena meningkatnya kelembaban di dalam trafo.
4. Perbaikan yang dilakukan pada transformator adalah dengan menghilangkan *water content* di dalam sistem isolasi.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang ingin dicapai dari dilakukannya penelitian mengenai “EVALUASI DAN PERBAIKAN TAHANAN ISOLASI

TRANSFORMATOR 60 MVA/150/20 KV CIMANGGIS II” adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui penyebab-penyebab tidak terpenuhinya nilai tahanan isolasi trafo daya 60 MVA Cimanggis II.
2. Mengetahui kelayakan nilai tahanan isolasi trafo daya 60 MVA Cimanggis II.
3. Mengetahui langkah perbaikan nilai tahanan isolasi trafo daya 60 MVA GI Cimanggis II.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menjamin kelayakan operasi trafo daya 60 MVA Cimanggis II.
2. Peneliti dapat lebih memahami tentang pengaruh nilai kadar air di dalam minyak trafo terhadap tahanan isolasi trafo.
3. Dapat menjadi referensi langkah perbaikan trafo jika didapatkan kondisi nilai tahanan isolasi yang tidak memenuhi standard dengan nilai indikator kandung air lebih besar dari 5 ppm.

1.6. Sistematika Penulisan

Pada penulisan penelitian ini sistematika penulisannya adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini memuat tentang latar belakang permasalahan, rumusan permasalahan, batasan masalah, sampai dengan pembatasan permasalahan dalam pembahasan. Kemudian mengidentifikasi manfaat dan tujuan dari penelitian serta mencantumkan sistematika dalam penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA & DASAR TEORI

Dalam bab ini menjelaskan teori pembandingan dan konsep dasar dalam penghitungan standar dan teori lainnya yang berhubungan dalam pembahasan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III ini menjelaskan tentang model penelitian, alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian, metode penelitian, dan tahapan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menganalisa data yang didapatkan baik pengukuran maupun perhitungan secara teoritis.

BAB V PENUTUP

Berisi kesimpulan serta saran dalam arah pengembangan penelitian dan juga pencegahan hal-hal yang tidak diinginkan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian tentang uji tahanan isolasi trafo daya telah dilakukan antara lain:

1. Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA di Gardu Induk 150 kV (Robbani, 2020). Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian indeks polarisasi, pengujian tan delta dan pengujian *breakdown voltage* minyak bawah dan minyak OLTC. Penggunaan metode ini adalah yang paling akurat dan efektif untuk mengetahui nilai kelayakan tahanan isolasi transformator pada gardu induk. Berdasarkan hasil perhitungan nilai Indeks Polarisasi (IP) dalam kondisi baik dengan hasil 1,26 dan 1,97. Hasil pengujian tangen delta rata-rata dalam keadaan baik yaitu di bawah 0,5%, nilai BDV minyak trafo diperoleh hasil rata-rata 69,9 kV dan 53,3 kV.
2. Analisa Tahanan Isolasi Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta dan *Breakdown Voltage* di Gardu Induk 150 kV Kentungan (Febriari, 2021). Hasil uji tangen delta nya pada tahun 2017 dan tahun 2019 nilai antar kapasitif nya sudah berada di rating 0,18% -0,37% atau <0,5% (kondisi bagus). Dan untuk hasil uji *break down voltage* pada tahun 2017 dan tahun 2019 rata-rata nilai tegangan tembusnya 59,6 kV/2,5 mm-67,7 kV/2,5 mm (kondisi bagus). Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa kondisi isolasi dari Transformator 2 di Gardu Induk 150 kV Kentungan tahun 2017 dan tahun 2019 dalam keadaan baik.
3. *Vapor Phase Drying for Moisture Removal from Transformer Coil Insulation* (Siddiqui, 2017). Transformator adalah salah satu peralatan penting dalam menjamin kontinuitas penyaluran tenaga listrik, dimana transformator harus mampu menahan tegangan tinggi selama proses transfer tenaga listrik dari belitan primer ke belitan sekunder. Untuk itu, transformator harus memiliki sistem isolasi yang baik,

dimana di dalam transformator sistem isolasi tersusun atas isolasi kertas, minyak, dan juga *pressboard insulation*. Penurunan kualitas isolasi kertas dan minyak sebagian besar dipengaruhi oleh kondisi kelembaban di dalam transformator. Untuk memperpanjang masa pakai transformator salah satunya adalah dengan menghilangkan kelembaban di dalam trafo. Teknologi yang digunakan untuk menghilangkan kelembaban di dalam trafo antara lain dengan menggunakan: *hot air*, *hot air with rough vacuum*, *vacuum drying oven*, *oil circulation*, *oil spray*, *vacuum pressure impregnation*, dan *vapor phase drying*. Teknologi *vapor phase drying (VPD)* adalah teknik pengeringan trafo secara vakum namun metode pemanasan tidak menggunakan udara melainkan uap pelarut dengan viskositas yang rendah seperti minyak tanah yang memiliki tingkat nyala yang lebih tinggi daripada udara. Teknologi *VPD* ini memiliki keunggulan yaitu konsumsi daya yang rendah dan proses yang lebih singkat.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Transformator

Transformator atau biasa yang disebut sebagai trafo daya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet (Zuhal, 1991). Penggunaan trafo dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan kerja yang sesuai dan ekonomis untuk berbagai keperluan; misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.



Gambar 2. 1 Transformator 60 MVA GI Cimanggis II.

1. Bagian-bagian trafo

Bagian utama dari sebuah trafo adalah sebagai berikut:

- a. Inti trafo atau *core* adalah salah satu bagian penting di dalam sebuah trafo yang terbuat dari besi yang dibuat menjadi lempengan-lempengan atau lembaran tipis yang berfungsi untuk mengurangi rugi-rugi besi yang disebabkan karena adanya *Eddy current*. Inti trafo berfungsi untuk mempermudah jalan fluks magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Bentuk dari inti trafo ditunjukkan seperti pada Gambar 2.2.



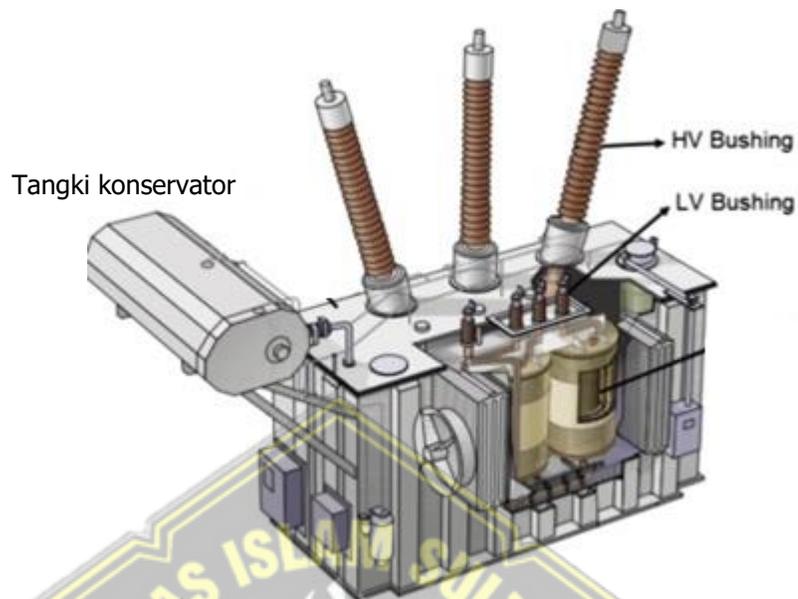
Gambar 2. 2 Inti Trafo.

- b. Kumbaran atau belitan adalah susunan kawat berisolasi yang membentuk kumbaran atau gulungan. Kumbaran tersebut terdiri dari kumbaran primer dan kumbaran sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun antar kumbaran dengan isolasi padat. Kumbaran disini sebagai alat transformasi tegangan dan arus. Bentuk dari inti trafo ditunjukkan seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Kumparan Trafo.

- c. Minyak trafo adalah isolasi yang berbahan cair yang digunakan sebagai bagian dari sistem isolasi dan juga merupakan sistem pendinginan pada trafo. Minyak atau oli trafo diwajibkan untuk memiliki kriteria-kriteria sebagai berikut: memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus dan mampu meredam panas yang ditimbulkan dari pengoperasian trafo.
- d. *Bushing* yaitu isolator yang digunakan untuk mengisolir badan suatu peralatan dalam hal ini *body* trafo dengan konduktor bertegangan tinggi yang menerobos badan peralatan tersebut. Bentuk dari *HV bushing* dan *LV bushing* ditunjukkan seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Gambar Bushing dan Tangki Konservator.

- e. Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena pengoperasian. Bentuk dari tangki konservator ditunjukkan seperti pada Gambar 2.4.
- f. Peralatan pendingin berfungsi untuk menjaga agar trafo bekerja pada suhu rendah. Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, yang dapat merusak isolasi. Secara alamiah media pendingin (minyak isolasi) mengalir karena perbedaan suhu tangki minyak dan sirip-sirip trafo (radiator). Untuk mempercepat pendinginan trafo dilengkapi dengan kipas yang dipasang di radiator trafo dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal. Sistem pendinginan pada trafo ditunjukkan pada Gambar 2.5.

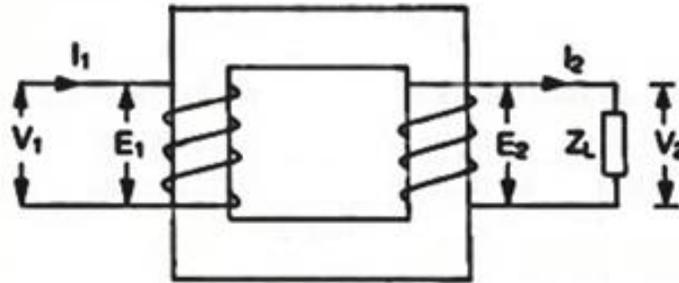


Gambar 2. 5 Sistem pendinginan pada trafo.

2. Cara kerja trafo

Cara kerja transformator adalah jika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC, sementara kumparan sekunder tidak terhubung ke beban, maka di kumparan primer mengalir arus yang disebut arus beban nol (I_0). Arus ini akan membangkitkan fluks bolak balik pada inti. Fluks bolak-balik ini dilingkupi oleh kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga di kedua kumparan tersebut timbul gaya gerak listrik.

Jika kumparan sekunder dibebani, maka pada kumparan tersebut mengalir arus sekunder (I_2). Arus sekunder akan menimbulkan fluks pada inti trafo yang berlawanan dengan fluks yang ditimbulkan oleh arus I_0 . Dengan kata lain, arus sekunder menimbulkan demagnetisasi pada inti trafo. Untuk mengimbangnya, maka arus di kumparan primer harus bertambah menjadi I_1 (Tobing, 2012).



Gambar 2. 6 Cara kerja trafo.

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$ dengan $\theta_2 =$ factor beban. Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (*ggm*) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (ϕ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_M (Zuhal, 1991). Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir I'_2 , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I'_2$$

Bila rugi besi diabaikan (I_c diabaikan) maka $I_0 = I_M$.

$$I_1 = I_M + I'_2$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar *ggm* yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M saja, berlaku hubungan:

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2$$

hingga

$$N_1 I'_2 = N_2 I_2$$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I'_2 = I_1$

Jadi, $N_1 I_1 = N_2 I_2$

GGL yang dibangkitkan pada kumparan menimbulkan medan elektrik yang kuat pada isolasi kumparan, terutama di isolasi di sekitar belitan kumparan tegangan tinggi. Arus yang mengalir pada kumparan akan menimbulkan rugi-rugi tembaga (i^2r). Fluks pada inti akan menimbulkan rugi-rugi arus *Eddy* dan rugi-rugi histerisis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Arus *Eddy*.

Pemanasan karena rugi-rugi di inti trafo dan rugi-rugi tembaga akan menaikkan temperatur isolasi trafo. Oleh karena itu, sistem isolasi harus memiliki syarat sebagai berikut: kekuatan dielektrik harus melebihi kuat medan listrik tertinggi yang ditemukan pada komponen trafo; sanggup memikul gaya mekanis yang ditimbulkan arus hubung singkat; dan dapat mendisipasikan panas yang terjadi pada trafo ke medium sekitar dengan baik (Tobing, 2012).

2.2.2. Isolasi pada Transformator

Masing-masing komponen pada sebuah trafo daya yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder harus diisolasi satu sama lain; elemen kumparan diisolasi juga terhadap inti dan *body* trafo terhubung dengan *ground* (Tobing, 2012). Dengan demikian isolasi trafo daya dapat dibagi atas tiga jenis, yaitu:

- Isolasi minor, adalah isolasi yang memisahkan satu belitan dengan belitan lain dalam satu elemen belitan.

- Isolasi mayor, adalah isolasi yang memisahkan belitan tegangan primer dengan belitan yang bertegangan sekunder. Isolasi ini terdiri atas isolasi utama, yaitu isolasi yang memisahkan belitan primer dengan belitan sekunder; dan isolasi *body*, yaitu memisahkan belitan dengan *body* trafo itu sendiri.
- Isolasi fasa, adalah isolasi yang memisahkan antara belitan tegangan tinggi antar fasa pada transformator 3 fasa..

2.2.3. Pengujian Isolasi Trafo

- Pengujian Tahanan Isolasi (*Insulation Resistance*), *Polarisation Index* dan *Core-Frame-Ground Tests*

Pengujian tahanan isolasi atau *insulation resistance test* (IR test) adalah metoda dasar untuk menentukan kualitas isolasi trafo, untuk mengetahui kerusakan isolasi trafo, kekeringan atau kegagalan pada isolasi antara belitan dengan *ground* antara dua belitan. Metoda yang umum digunakan adalah dengan memberikan tegangan DC dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan Mega Ohm. Tahanan yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Mega Ohm meter biasanya memiliki kapasitas pengujian 500 VDC, 1000 VDC, 2500 VDC atau 5000 VDC. Nilai ini sesuai dengan *standard* yang telah ditetapkan oleh IEEE 43:2000 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Standard Pengujian Tahanan Isolasi.

<i>Winding Rated Voltage (V)</i>	<i>Insulation Resistance Test Direct Voltage (V)</i>
<1000	500
1.000- 2.500	500-1.000
2.501-5.000	1.000-2.500
5.001-12.000	2.500-5.000
>12.000	5.000-10.000

Pengukuran tahanan isolasi dilakukan pada menit ke 1, 2, 5, 10, 50, dan 100 menit. Pengujian tahanan isolasi sangat bergantung dengan suhu dan kelembaban udara pada saat pengujian. Hasil *Insulation Resistance* (IR) berbanding terbalik dengan suhu. Nilai tahanan isolasi minimum dari sebuah trafo ditunjukkan sesuai persamaan (2.1) (S. D. Myers, 1981).

$$IR = \frac{C \times E}{\sqrt{kVA}} \quad (2.1)$$

dengan IR = Tahanan Isolasi (MΩ)

C = Koefisien (nilai 1,5 untuk *oil filled transformer*)

E = Rating Tegangan (Volt)

kVA = Rating kapasitas belitan yang diuji (kVA)

Lebih lanjut, dilakukan perhitungan indeks polarisasi (*polarization index*/PI). Variasi dari pengukuran IR test adalah dengan mengukur IR pada menit ke 1 dan menit ke 10. PI adalah rasio IR yang diukur pada menit ke 1 dan menit ke 10. Pengujian dilakukan secara kontinu dalam rentang waktu 10 menit dan apabila isolasi dalam keadaan baik, maka nilai tahanan isolasi akan semakin tinggi dimana mempunyai kemampuan untuk mengisi kapasitansi ke dalam isolasi trafo. Rasio pembacaan 10 menit dibandingkan pembacaan 1 menit dikenal sebagai *Polarization Index* (PI) atau Indeks Polarisasi. Jika nilai PI rendah, maka mengindikasikan bahwa isolasi telah terkontaminasi. Besarnya *Polarization Index* (PI) diperlihatkan pada persamaan (2.2) (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*, 2000).

$$PI = \frac{\text{Pengukuran } R_{iS} \text{ menit ke 10}}{\text{Pengukuran } R_{iS} \text{ menit ke 1}} \quad (2.2)$$

Standard indeks polarisasi transformator ditunjukkan pada Tabel 2.1.

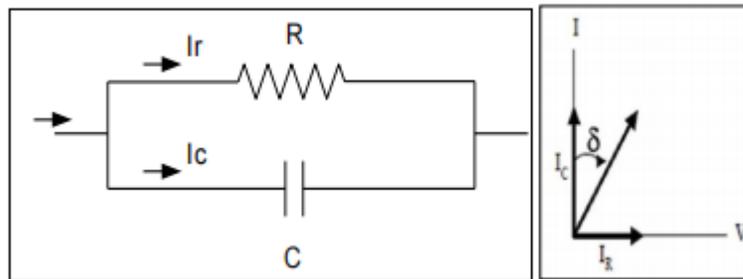
Tabel 2. 2 Standar indeks polarisasi tranformator menggunakan *IEEE* 43-2000

<i>Polarization Index</i>	<i>Insulation Condition</i>
<1.00	<i>Dangerous</i>
1.00 – 1.10	<i>Poor</i>
1.10 – 1.25	<i>Questionable</i>
1.25 – 2.00	<i>Fair</i>
>2.00	<i>Good</i>

b. Pengukuran tangen delta

Isolasi dalam keadaan murni bertindak sebagai kapasitor. Namun, aktualnya isolasi dapat mengandung kontaminan atau terkontaminasi dimana akan memiliki nilai resistansi. Pada kapasitor murni, arus (I) beserta tegangan (V) bergeser 90° dan arus melewati isolasi merupakan kapasitif. Apabila terdapat kandungan kontaminan pada isolasi, maka nilai tahanan dari isolasi berkurang dan mengakibatkan adanya arus resistif yang mengalir melewati bahan isolasi tersebut. Yang menyebabkan isolasi tersebut tidak lagi bersifat kapasitif murni. Tegangan dan arus tidak lagi bergeser 90° tapi akan bergeser kurang dari 90° . Besarnya selisih dari 90° merepresentasikan tingkat kontaminasi pada isolasi (Perusahaan Listrik Negara, 2014).

Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari sebuah isolasi dan diagram fasor arus kapasitansi dan arus resistif dari sebuah isolasi. Dengan mengukur nilai IR/IC dapat diperkirakan kualitas dari isolasi.



Gambar 2. 8 Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram fasor arus pengujian fasor arus pengujian tangen delta.

Keadaan isolasi pada transformator dapat diprediksi dengan mengetahui hasil pengujian tangen deltanya. Dimana untuk interpretasi hasil pengujian merujuk ke aturan standar ANSI C57.12.90. Perhitungan tangen delta menggunakan persamaan (2.3).

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \quad (2.3)$$

dengan δ = Delta (%)

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

C = Kapasitansi (F)

$\omega = 2\pi f$

Standard pengujian tan delta transformator ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 3 Standar pengujian tan delta menggunakan ANSI C 57.12.90

Hasil Uji	Insulation Condition
$\leq 0.5\%$	Baik
0.5% - 0.7%	Mengalami penurunan
$\geq 1.0\%$	Jelek

c. Pengujian kondisi minyak transformator

1. DGA (*Dissolved Gas Analysis*)

Salah satu metode untuk mengetahui ada tidaknya ketidaknormalan pada transformator adalah dengan mengetahui dampak dari ketidaknormalan itu sendiri. Untuk mengetahui dampak ketidaknormalan pada trafo digunakan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA). Pada saat terjadi ketidaknormalan pada trafo, minyak isolasi sebagai rantai hidrokarbon akan terurai akibat besarnya energi ketidaknormalan dan akan membentuk gas-gas hidrokarbon yang terlarut dalam minyak isolasi tersebut. Pada dasarnya DGA adalah proses untuk menghitung kadar/nilai dari gas-gas hidrokarbon yang terbentuk akibat ketidaknormalan. Dari komposisi kadar/nilai gas-gas itulah dapat diprediksi dampak-dampak ketidaknormalan apa yang ada di dalam trafo, apakah *overheat*, *arcing* atau *corona* (Perusahaan Listrik Negara, 2014).

2. Kandungan Air (*Water Content*)

Salah satu isolasi cair di dalam trafo adalah minyak trafo, dimana selain sebagai isolasi, minyak trafo juga berfungsi sebagai pendingin. Kualitas minyak trafo ini dapat menurun yang disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satu penyebabnya adalah adanya kandungan air pada minyak trafo tersebut. Sehingga pengujian kadar kandungan air di dalam minyak trafo menjadi penting untuk mengetahui besaran air yang ada di dalam minyak tersebut (Perusahaan Listrik Negara, 2014). Nilai *water content* yang diizinkan adalah ≤ 5 ppm menurut IEC 60422.

3. Pengujian Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage Test/BDV*)

Breakdown Voltage Test (BDV) adalah salah satu rangkaian pengujian minyak trafo, dimana pengujian ini berfungsi untuk mengetahui nilai

tegangan tembus sebuah minyak trafo untuk mengetahui kemampuannya dalam menahan tegangan. Minyak yang jernih dan kering akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Air bebas dan partikel solid, apalagi gabungan antara keduanya dapat menurunkan tegangan tembus secara signifikan (Perusahaan Listrik Negara, 2014).

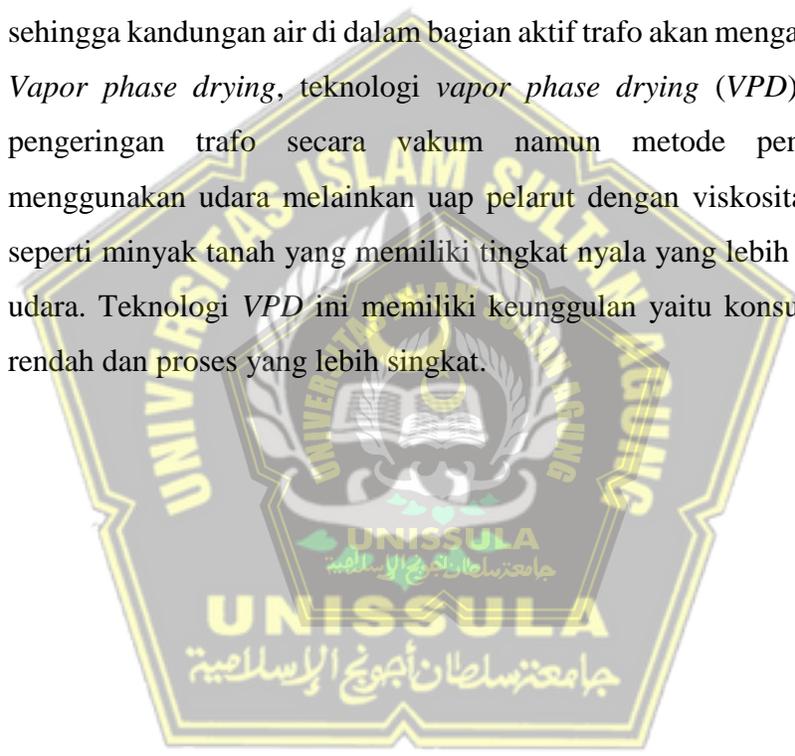
2.2.4. Perbaiki Nilai Tahanan Isolasi

Transformator adalah salah satu peralatan penting dalam menjamin kontinuitas penyaluran tenaga listrik, dimana transformator harus mampu menahan tegangan tinggi selama proses transfer tenaga listrik dari belitan primer ke belitan sekunder. Untuk itu, transformator harus memiliki sistem isolasi yang baik, dimana di dalam transformator sistem isolasi tersusun atas isolasi kertas, minyak, dan juga *pressboard insulation*. Penurunan kualitas isolasi kertas dan minyak sebagian besar dipengaruhi oleh kondisi kelembaban di dalam transformator. Untuk memperpanjang masa pakai transformator salah satunya adalah dengan menghilangkan kelembaban di dalam trafo.

Metode yang digunakan untuk menghilangkan kelembaban di dalam trafo antara lain dengan sistem penguapan menggunakan (Bangar, et al., 2012):

- *Hot air*, menghilangkan kelembaban di dalam transformator dengan menggunakan udara panas dengan suhu 120°C untuk memanaskan bagian aktif transformator. Isolasi trafo dipanaskan dengan uap panas hingga suhunya mencapai 105°C untuk menguapkan kadar air di dalamnya.
- *Vacuum drying oven*, di dalam proses ini, transformator diletakkan di dalam sebuah oven vakum dan dipanaskan dengan menggunakan mesin pemanas. Sehingga kandungan air di dalam isolasi trafo akan mengalami evaporasi dan dengan pompa vakum di dalamnya akan menghilangkan uap air yang terbentuk, sehingga hasil pengeringan dapat lebih maksimal.

- *Oil circulation*, pemurnian minyak trafo dilakukan dengan mengalirkan minyak trafo ke dalam mesin purifikasi. Minyak trafo disaring untuk menghilangkan partikel-partikel yang terkandung di dalamnya dan juga minyak dipanaskan hingga mencapai suhu 80° C. Di dalam *vacuum degassing unit*, semua gas sisa dihilangkan dan kelembabannya dapat turun hingga di bawah 5 ppm.
- *Oil spray*, melalui nozel, minyak diseprotkan ke dalam bagian aktif trafo, sehingga kandungan air di dalam bagian aktif trafo akan mengalami evaporasi.
- *Vapor phase drying*, teknologi *vapor phase drying (VPD)* adalah teknik pengeringan trafo secara vakum namun metode pemanasan tidak menggunakan udara melainkan uap pelarut dengan viskositas yang rendah seperti minyak tanah yang memiliki tingkat nyala yang lebih tinggi daripada udara. Teknologi *VPD* ini memiliki keunggulan yaitu konsumsi daya yang rendah dan proses yang lebih singkat.

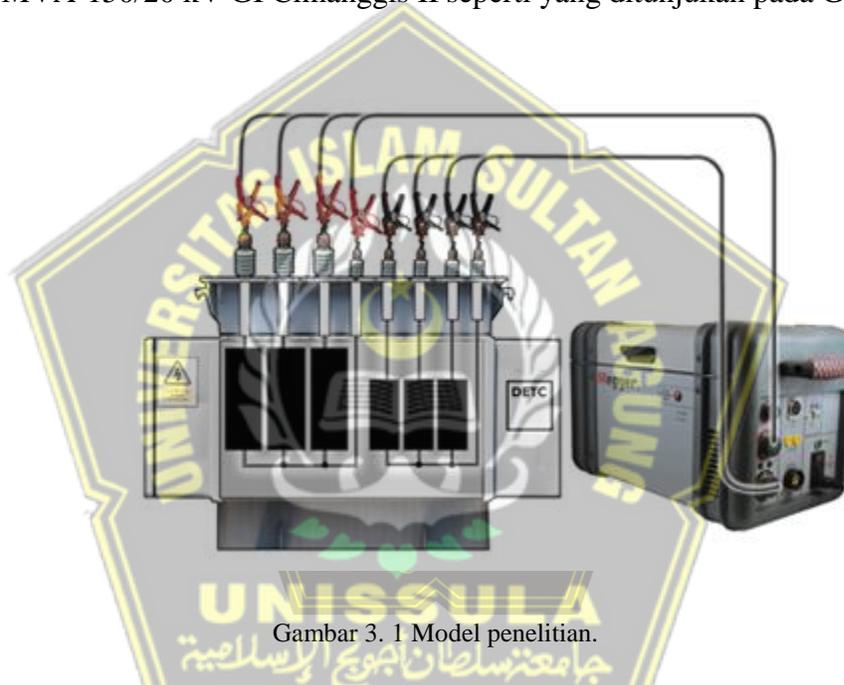


BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Model Penelitian

Model penelitian yang digunakan di dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan hasil pengujian tahanan isolasi dan tangen delta pada trafo 60 MVA-150/20 kV GI Cimanggis II seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Model penelitian.



Gambar 3. 2 Pelaksanaan Pengujian di Site.

Adapun lokasi penelitian dilakukan di Gardu Induk 150 kV Cimanggis II yang berlokasi di Desa Susukan, Kecamatan Bojong Gede, Kabupaten Bogor, Jawa Barat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan di pabrikan trafo daya PT Elsewedy Electric Indonesia (d/h PT CG Power System Indonesia) yang berlokasi di Kawasan Industri Menara Permai Kav. 10, Jalan Raya Narogong, Km. 23,852, Kecamatan Cileungsi, Kabupaten Bogor, Jawa Barat.

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Trafo yang akan dilakukan pengujian
2. *Insulation Resistance Test Set* merk Kyoritsu tipe 3125
3. *Tangen Delta Test Set* merk OMICRON Tipe CPC 100 + CPTD 1.
4. *Tangen Delta Test Set* merk ISA tipe STS 5000 + TD 5000.
5. Timer
6. Kabel Penghubung

3.3. Metode Penelitian

3.3.1. Jenis Penelitian

Jenis metode penelitian yang digunakan pada Penelitian mengenai Evaluasi Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Trafo 60 MVA pada PT PLN (Persero) UIP JBT ini adalah dengan metode kuantitatif deskriptif.

Metode kuantitatif deskriptif adalah metode penelitian dengan mengumpulkan data secara langsung untuk selanjutnya dilakukan analisa, serta pengambilan kesimpulan sesuai dengan data dan hasil analisis (Fadillah, 2019). Output dari analisis ini bertujuan mengetahui kondisi kualitas tahanan isolasi pada sebuah trafo untuk menjamin kehandalan operasi dan tidak adanya

penurunan kualitas tahanan isolasi yang akan menyebabkan kegagalan operasi dan kerusakan yang lebih lanjut.

3.3.2. Jenis Data

Data primer yang dalam penelitian ini adalah:

- Hasil pengujian trafo yang dilakukan pada saat *assesment* awal.
- Perbaikan trafo di pabrikan.
- Hasil pengujian trafo yang dilakukan di pabrikan atau *Factory Acceptance Test (FAT)*.

Sedangkan data sekunder dalam penelitian ini adalah:

- Standardisasi terkait sistem ketenagalistrikan yang telah ditetapkan/diatur dalam SPLN, *IEC*, maupun *IEEE*.
- Jurnal – jurnal penelitian lain yang berkaitan, baik dari dalam maupun luar negeri.
- Spesifikasi trafo daya 60 MVA.

3.3.3. Teknik Analisa Data

a. Pengujian dan Pengumpulan Data

Pengumpulan data dimulai dari pengamatan visual kondisi di lapangan dan dilanjutkan dengan melakukan pengujian tahanan isolasi baik di lapangan maupun di pabrikan trafo. Hasil pengujian dicatat, dikelompokkan dan disajikan dalam bentuk data.

b. Analisa Data

Menganalisa data yang diperoleh dari hasil pengujian tahanan isolasi dibandingkan dengan standar yang berlaku. Setelah dilakukan pengkajian data, maka akan diketahui parameter kondisi isolasi trafo dan tindak lanjut perbaikan apabila berdasarkan hasil analisa tahanan isolasi trafo tidak baik.

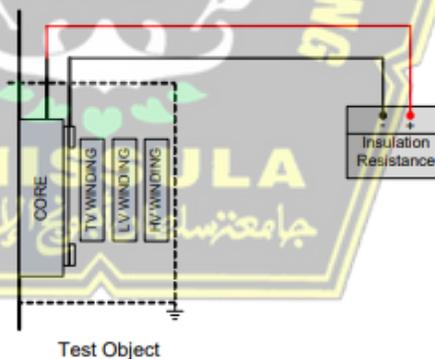
c. Kesimpulan

Proses penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisa data pengujian sebagai bagian akhir dari penelitian.

3.3.4. Pengujian Tahanan Isolasi Trafo

1. *Insulation Resistance Test Core-Frame-Grounding*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan instrument alat ukur *Insulation Resistance Test Set* merk Kyoritsu tipe 3125. Kriteria yang diizinkan untuk nilai tahanan isolasi *core-frame-grounding* adalah minimum 1.000 Mega Ohm diperoleh dari perhitungan persamaan (2.1) (S. D. Myers, 1981). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan nilai tahanan isolasi antara *core* dengan *frame*, *core* dengan *ground*, dan *frame* dengan *ground*. Adapun rangkaian pengujiannya ditunjukkan pada Gambar 3.3. Besaran nominal tegangan DC yang di-*inject* adalah 5.000 VDC.

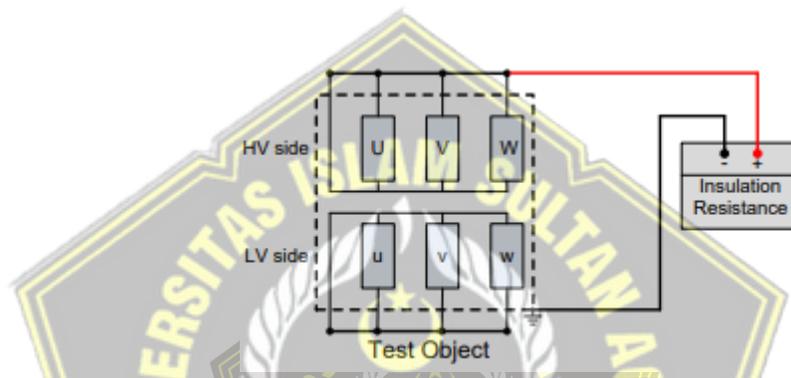


Gambar 3. 3 Gambar Rangkaian *Insulation Resistance Test Core-Frame Grounding*.

2. *Insulation Resistance Winding*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan instrument alat ukur *Insulation Resistance Test Set* merk Kyoritsu tipe 3125. Pengujian dilakukan dengan menginjeksi tegangan pengujian sebesar 5.000 VDC dan kemudian

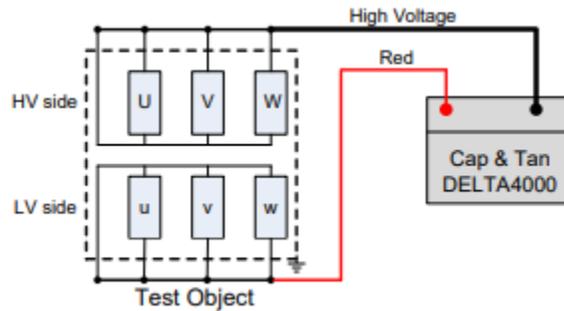
mengukur nilai tahanan isolasi antar belitan dan belitan dengan *ground* selama 10 menit. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dilakukan perhitungan nilai indeks polarisasi/*polarization index* dengan nilai yang diizinkan adalah >2.0 (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2000*). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan nilai tahanan isolasi antar masing-masing belitan dengan *ground* serta tahanan isolasi antar belitan. Adapun rangkaian pengujiannya ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Gambar Rangkaian *Insulation Resistance Winding Test*.

3. *Capacitance dan Tangent Delta (Tan δ) Winding*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan instrument alat ukur *Tangen Delta Test Set* merk OMICRON tipe CPC 100 + CPTD1. Kriteria yang diizinkan untuk nilai tangen delta adalah $\tan \delta \leq 0.5\%$. Adapun rangkaian pengujiannya ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Gambar Rangkaian *Capacitance dan Tangent Delta Winding (Tan δ) Test*.

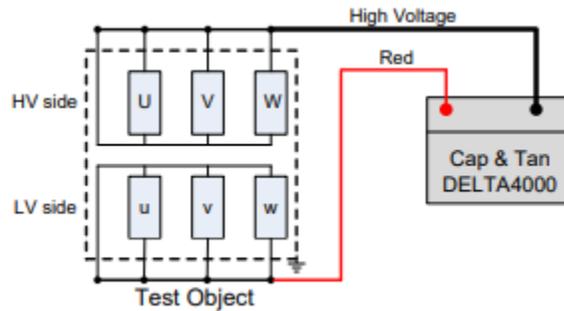
Nilai tegangan pengujian yang di-inject ke dalam alat ukur adalah tegangan 10.000 VDC ini sesuai dengan standard yang telah ditetapkan oleh IEEE 43:2000 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Standard Pengujian Tangen Delta.

<i>Winding Rated Voltage (V)</i>	<i>Tangen Delta Test Direct Voltage (V)</i>
<1000	500
1.000- 2.500	500-1.000
2.501-5.000	1.000-2.500
5.001-12.000	2.500-5.000
>12.000	5.000-10.000

4. *Capacitance dan Tangent Delta (Tan δ) Bushing*

Pengujian dilakukan dengan menggunakan instrument alat ukur *Tangen Delta Test Set* merk ISA tipe STS 5000 + TD 5000. Kriteria yang diizinkan untuk nilai tangen delta adalah $\tan \delta \leq 0.5\%$. Adapun rangkaian pengujiannya ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Gambar Rangkaian *Capacitance dan Tangent Delta Bushing (Tan δ) Test*.

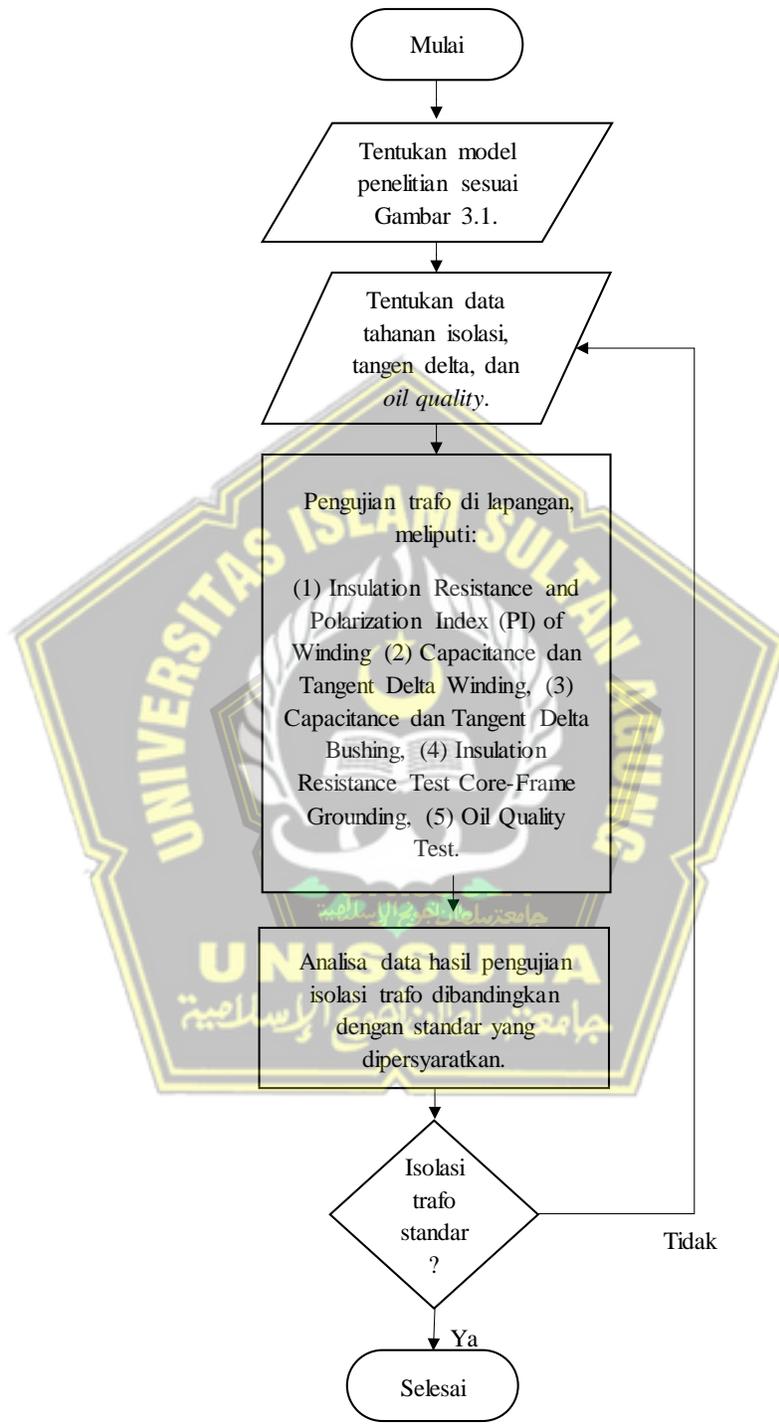
Nilai tegangan pengujian yang di-*inject* ke dalam alat ukur adalah tegangan 10.000 VDC ini sesuai dengan standard yang telah ditetapkan oleh IEEE 43:2000 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

5. *Oil Quality Test*

Pengujian minyak trafo untuk mengetahui nilai *DGA*, *BDV*, dan *water content*. *DGA* untuk menghitung nilai kekuatan dielektrik minyak trafo, semakin besar nilai tegangan tembus maka nilai kekuatan dielektriknya semakin baik. Tegangan tembus yang diizinkan/nilai *breakdown voltage* minyak trafo adalah minimal 50 kV. Sedangkan nilai *water content* yang diizinkan adalah ≤ 5 ppm (*International Electrotechnical Commission, 2013*).

3.4. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Tahapan peneitian.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengamatan Visual

Pengamatan visual dilakukan ke seluruh bagian trafo dan aksesoris trafo untuk memastikan kondisi trafo apakah dalam keadaan baik, rusak dan atau hilang pada tanggal 7-10 September 2021 di lokasi *site* GI 150 kV Cimanggis II. Dari hasil pengamatan visual ditemukan beberapa temuan, yaitu:

1. Konservator *main tank* & OLTC tidak terisi oli.
2. *Arching horn HV bushing* yang bagian bawah hilang untuk semua fasa (1U, 1V, 1W).
3. *Bushing* 1U tertukar dengan *bushing* 1V menunjuk ke laporan *FAT*.
4. Pemasangan *bushing* 1U & 1W salah dalam penempatan baut untuk *venting/degassing point*.
5. *Bushing* 1N, 2U, 2V, 2W, 2N, 3U2, 3W1: tidak memiliki *flag connector*, *NBR ring gasket "J"*, *brass spring washer*, *brass top washer "F"*, *Brass Nut* dan *arching horn*, *CU Bar tertiary bushing*. Material *gasket donut* masih kondisi terpasang.
6. Kabel *cooling fan* yang dari *local control panel* terputus di dekat *fan*.
7. Oli untuk *top-up* sebanyak 30 drum tidak ada.
8. Kabel *grounding* untuk trafo tidak terpasang.
9. Logo CG rusak (yang terpasang di konservator).
10. *Transducer* dalam Kontrol Panel trafo TR4 ditemukan dalam kondisi mati.
11. *Hydran M2* ditemukan masih menyala dengan dalam kondisi *display* yang buram.
12. Kontrol panel trafo ditemukan berkarat di bagian dalamnya.
13. *Air breather* ditemukan *silica gel* sudah berubah warna.
14. Trafo ditemukan masih dalam kondisi terendam oli trafo, dimana saat *venting* trafo di bagian cover trafo masih mengeluarkan oli.

15. *Motor drive* dan OLTC diawal dioperasikan secara manual ditemukan agak keras saat dioperasikan terutama saat perpindahan dari tap 9 ke tap 10 dan dari tap 9 ke tap 8. Operasi MD dan OLTC semakin lebih lancar setelah dioperasikan secara manual beberapa kali *cycle*.

4.2. Hasil Pengujian dan Perhitungan Tahanan Isolasi di *Site*

1. *Capacitance dan Tangent Delta Winding (Tan δ)*

Berdasarkan hasil pengujian Kapasitansi dan Tangen Delta pada belitan trafo yang dilakukan di *site* GI 150 kV Cimanggis II diperoleh hasil sebagaimana pada Tabel 4.1 (sesuai dengan lampiran pada halaman 9).

Tabel 4.1 Hasil Pengujian *Tan δ Winding* di *site*.

Test No	UST – GST Mode Test Type	Cap Symbol	Bridge Symbol	Applied Voltage (kV)	Power (Watt)	Capacitance (pF)	Tan δ	
							30°C	20°C
HV Winding								
1	GST	CHL+CHG	R+B+G	10	0,6201	10146,0	0,1946	0,1557
2	GST g-R	CHG	G	10	0,4236	5153,4	0,2619	0,2095
3	UST-R	CHL	R	10	0,2066	4976,2	0,1321	0,1057
LV Winding								
4	GST	CHL + CLG	R+B+G	10	1,608	2067,0	0,2478	0,1982
5	GST g-R	CLG	G	10	1,4427	15680,8	0,2931	0,2345
6	UST-R	CHL	R	10	0,2015	4976,0	0,1289	0,1031

Merujuk pada persamaan (2.3) maka perhitungan perhitungan tangen delta pada masing-masing *winding* diperoleh sebagai berikut:

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C}$$

dimana δ = Delta (%)

P = Daya (Watt) yang diperoleh dari alat ukur

V = Tegangan (Volt) merupakan besaran tegangan yang di-*inject* ke dalam alat ukur

C = Kapasitansi (F) yang diperoleh dari alat ukur

$$\omega = 2\pi f$$

a. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada Hubungan CHL + CHG

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C}$$

$$\tan \delta = \frac{0,6201}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 10146 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1946\%$$

b. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada Hubungan CHG

$$\tan \delta = \frac{0,4236}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 5153,46 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,2617\%$$

c. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada Hubungan CHL

$$\tan \delta = \frac{0,2066}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 4976,2 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1322\%$$

d. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada Hubungan CHL + CLG

$$\tan \delta = \frac{1,608}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 20670 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,24775\%$$

e. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada Hubungan CLG

$$\tan \delta = \frac{1,4427}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 15680,8 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,2930\%$$

f. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada Hubungan CHL

$$\tan \delta = \frac{0,2015}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 4976 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1289\%$$

Berdasarkan hasil pengujian dan perhitungan tangen delta ($\tan \delta$) di sisi belitan trafo daya GI 150 kV Cimanggis II didapatkan nilai $<0,5\%$, hasil tersebut mengindikasikan bahwa tingkat isolasi dari trafo dalam kondisi baik.

2. Capacitance dan Tangent Delta Bushing ($\tan \delta$)

Berdasarkan hasil pengujian Kapasitansi dan Tangen Delta pada *bushing* trafo yang dilakukan di site GI 150 kV Cimanggis II diperoleh hasil sebagaimana pada Tabel 4.2 (sesuai dengan lampiran pada halaman 10).

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Tan δ Bushing di site.

Test No	Bushing		Side	Test Mode	Power (Watt)	Applied Voltage (kV)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)
	Serial No.	Ph						30C
1	12B3162	1U1	HV	UST-R	0,020	10	268.9	0,2397
2	12B3163	1V1	HV	UST-R	0,022	10	268.5	0,2671
3	12B3164	1W1	HV	UST-R	0,020	10	267.9	0,2385

Merujuk pada persamaan (2.3) maka perhitungan perhitungan tangen delta pada masing-masing *bushing* diperoleh sebagai berikut.

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C}$$

dimana δ = Delta (%)

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

C = Kapasitansi (F)

$$\omega = 2\pi f$$

a. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada *Bushing* Fasa U

$$\tan \delta = \frac{0,020224}{5000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 268,9 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,239523\%$$

b. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada *Bushing* Phasa U

$$\tan \delta = \frac{0,022524}{5000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 268,5 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,267165\%$$

c. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada *Bushing* Phasa W

$$\tan \delta = \frac{0,020058}{5000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 267,9 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,238446\%$$

Berdasarkan hasil pengujian tangen delta ($\tan \delta$) di sisi *bushing* trafo daya GI 150 kV Cimanggis II didapatkan nilai $<0,5\%$, hasil tersebut mengindikasikan bahwa tingkat isolasi dari trafo dalam kondisi baik.

3. *Insulation Resistance Winding*

Dengan menggunakan alat ukur *insulation resistance test* diperoleh hasil pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.3 (sesuai dengan lampiran pada halaman 7).

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi *Winding* di site.

No (Minute)	<i>Insulation Resistance</i>					
	HV - LV	HV - TV	LV - TV	HV - G	LV - G	TV - G
	MΩ	MΩ	MΩ	MΩ	MΩ	MΩ
1	10.200	19.200	9.290	14.000	7.000	7.160
2	11.400	22.000	11.200	15.400	8.250	8.870
3	12.500	23.800	12.600	16.200	9.220	9.970
4	13.400	25.400	13.500	17.100	9.680	10.900

5	14.500	26.900	14.100	17.900	10.100	11.800
6	15.300	28.000	14.500	18.700	10.500	12.400
7	16.100	29.300	15.100	19.300	11.000	13.000
8	16.900	30.400	15.900	19.900	11.300	13.700
9	17.000	31.600	16.200	20.300	11.400	14.500
10	18.400	32.500	19.400	21.000	11.700	14.900

Kemudian dari hasil pengujian tersebut dilakukan perhitungan nilai polarisasi indeks (PI) dengan menggunakan persamaan (2.2) dengan hasil sebagai berikut:

a. Indeks Polarisasi HV - LV

$$PI = \frac{\text{Pengukuran } R_{is} \text{ menit ke 10}}{\text{Pengukuran } R_{is} \text{ menit ke 1}}$$

$$PI = \frac{18.400}{10.200} = 1,80$$

b. Indeks Polarisasi HV - TV

$$PI = \frac{32.500}{19.200} = 1,69$$

c. Indeks Polarisasi LV - TV

$$PI = \frac{19.400}{9.290} = 2,18$$

d. Indeks Polarisasi HV - G

$$PI = \frac{21.000}{14.000} = 1,50$$

e. Indeks Polarisasi LV - G

$$PI = \frac{11.700}{7.000} = 1,67$$

f. Indeks Polarisasi TV - G

$$PI = \frac{14.900}{7.160} = 2,08$$

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Nilai *Polarization Index* .

No (Minute)	<i>Insulation Resistance</i>					
	HV - LV	HV - TV	LV - TV	HV - G	LV - G	TV - G
PI	1,80	1,69	2,18	1,50	1,67	2,08
<i>Insulation Condition</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>	<i>Good</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>	<i>Good</i>

Berdasarkan Tabel 4.3 kondisi tahanan isolasi di dalam belitan trafo memiliki nilai IR >1000 MΩ menunjukkan bahwa bahan isolasi di dalam belitan trafo masih dalam kondisi baik atau tidak mengalami kerusakan atau mengalami penurunan kemampuan. Hal ini didukung dengan nilai perhitungan indeks polarisasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.4 adalah dalam rentang 1,25 – 2,2 dalam kriteria baik menunjukkan bahwa arus bocor dan arus konduksi dari isolasi belitan bernilai rendah.

4. *Insulation Resistance Test Core-Frame-Grounding*

Dengan menggunakan alat ukur *insulation resistance test* diperoleh hasil pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.5 5 (sesuai dengan lampiran pada halaman 8).

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi *Core-Frame-Grounding*.

<i>Test Voltage: 2500 VDC</i>	
<i>Acceptance Criteria: > 1.000 MΩ</i>	
Core – Frame	= 615 MΩ
Core – Ground	= 1.330 MΩ
Frame – Ground	= 0 MΩ

Nilai pengujian tahanan isolasi antara *core to ground* >1.000 Mega Ohm, menunjukkan bahwa kemampuan isolasi masih dalam kondisi baik atau tidak mengalami kerusakan atau mengalami penurunan kemampuan. Sedangkan nilai tahanan isolasi antara *core to frame* dan *frame to ground* adalah < 1.000 Mega Ohm MΩ, menunjukkan bahwa terjadi penurunan isolasi antara core dengan frame dan antara frame dengan ground trafo terjadi *short circuit*.

5. Oil Quality

Hasil pengujian *oil quality* yang dilakukan di pabrikan diperoleh hasil sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.6 (sesuai dengan lampiran pada halaman 11).

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Kualitas Minyak Trafo

Maintank Code	: E0699-0139	<i>Criteria</i>
Dissolved Gas Analysis	Normal	<i>Normal</i>
Breakdown Voltage (IEC 156/95)	71.6 kV/2.5 mm	<i>Good</i>
Loss factor. Tan delta (IEC 247)	0.00173	<i>Good</i>
Water content	14 ppm at 26.8 °C	<i>Fair</i>

Hasil pengujian DGA diperoleh hasil normal, ini berarti kandungan/kadar dari gas-gas yang ada dalam minyak trafo dalam kondisi baik. Atau tidak ada gas-gas hidrokarbon yang terbentuk dari proses overheat, arcing, maupun korona.

Hasil pengujian tegangan tembus (*Breakdown Voltage*) memiliki nilai kemampuan dielektrik sebesar 71,6 kV/2,5 mm sehingga kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan berada dalam kondisi baik. Minyak yang jernih dan kering akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi.

Dari hasil pengujian kualitas minyak trafo menunjukkan kondisi yang buruk dimana nilai kandungan air di dalam minyak trafo sebesar 14 ppm melebihi kriteria yang diizinkan sebesar ≤ 5 ppm.

Dari hasil pengujian *water content*, terdeteksi kerusakan isolasi minyak trafo. Sehingga dapat disimpulkan bahwa adanya tambahan kandungan air di dalam minyak trafo.

- Terjadi *short circuit* antara frame dengan ground dan *core* dengan *frame*.
- Kandungan air di dalam minyak trafo melebihi ketentuan yang ditetapkan IEC, berdampak pada kualitas isolasi minyak.
- Dari kedua indikasi tersebut, telah terjadi kerusakan isolasi minyak dikarenakan adanya air yang masuk ke dalam tangki trafo.

Maka dilakukan langkah perbaikan sebagai berikut:

- Mengidentifikasi penyebab adanya kandungan air di dalam trafo.
- Menghilangkan kandungan air di dalam tangki trafo dengan cara purifikasi minyak trafo dan juga pengeringan pada *active part* trafo.

4.3. Analisa Perbaikan Tahanan Isolasi

Selanjutnya dilakukan perbaikan di pabrikan trafo untuk memperbaiki short yang terjadi dan menurunkan kandungan air sehingga tercapai nilai *water content* sesuai dengan standar yang berlaku.

Untuk mengidentifikasi sumber kerusakan dan perbaikan kerusakan tahanan isolasi trafo yang diindikasikan dari *short circuit* pada frame dan ground serta tingginya nilai kandungan air di dalam minyak dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

a. *Untanking active part* trafo

Untanking active part trafo sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 adalah tahapan mengeluarkan bagian utama dari trafo yaitu *winding* dan *core* dari tangki. Tujuan dari tahap ini untuk mengetahui bagian mana dalam trafo yang mengalami kerusakan.



Gambar 4. 1 Proses *Untanking* Trafo.



Gambar 4. 2 Proses *Untanking* Trafo.

Proses ini dimulai dengan mengeluarkan seluruh minyak trafo dari dalam tangki, melepaskan *manhole cover*, *accessories*, *conservator*, *breather*, *fittings*, HV

dan LV bushing, dan memastikan peralatan-peralatan tersebut disimpan dalam kondisi baik. Langkah berikutnya mengangkat *active part* trafo keluar dari tangki dengan menggunakan mesin crane. Tahapan ini dilakukan secara perlahan dan hati-hati untuk memastikan tidak terjadi kerusakan bagian aktif trafo untuk kemudian diletakkan di tempat observasi.

b. Analisa penyebab kerusakan trafo

Di tahap ini dilakukan dengan cara menginspeksi/pengecekan seluruh bagian dalam trafo sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 untuk mengetahui bagian trafo yang mengalami kerusakan.



Gambar 4. 3 Identifikasi *Active Part* Trafo.

Gambar 4. 4 Kerusakan pada *frame* support trafo.

Adapun setelah dilakukan *untanking active part* dan pengecekan ditemukan kerusakan sebagai berikut:

1. Air bercampur oli di bagian bawah trafo dan ditemukan air terjebak di bagian dasar tanki sisi LV sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5. Air ini yang menyebabkan terjadinya *short circuit* antara *frame* dengan *ground*.



Gambar 4. 5 Air terjebak di bawah tangki trafo

2. Material isolasi bagian bawah *yoke frame (press pan)* ditemukan basah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Isolasi bagian bawah basah.

3. *Frame/Support LV lead* dan *press board* sisi LV ditemukan mengembang karena terkena air seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4. 7 *Pressboard* sisi LV mengembang.



Gambar 4. 8 *Pressboard* sisi LV mengembang.

Berdasarkan hasil *untanking* dan pengamatan visual bagian dalam trafo, penyebab tingginya *water content* di dalam minyak trafo dan *pressboard* sisi LV yang mengembang adalah *top terminal* semua bushing sisi LV dalam kondisi tidak terpasang dan terbuka terhadap udara luar dan hujan untuk waktu yang lama. Sehingga *top terminal bushing LV* inilah yang menjadi jalan masuknya air ke dalam trafo sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.9.

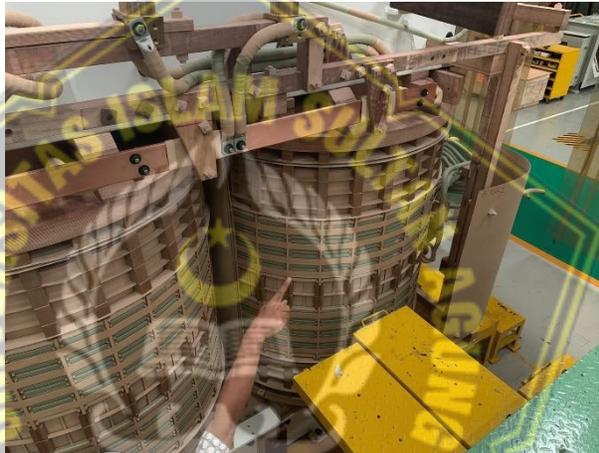


Gambar 4. 9 *Top terminal bushing* 1N, 2U, 2V, 2W, 2N, 3U2, 3W1 dalam kondisi terbuka.

c. Penggantian material yang rusak

Berdasarkan hasil temuan kerusakan yang terjadi, dilakukan perbaikan bagian aktif trafo sebagai berikut:

1. Pembersihan bagian dalam tanki dari air dan kotoran yang tersisa.
2. Penggantian material isolasi bagian bawah *yoke frame (press pan)* dengan material yang baru.
3. Penggantian *frame/support LV lead* yang terkena air.
4. Penggantian *press block* bagian atas winding sisi LV yang terkena air.



Gambar 4. 10 Trafo setelah dilakukan penggantian *support frame* dan *press block*.

d. Oven ulang *active part* trafo

Metode pengeringan trafo dengan menggunakan *VPD (Vapour Drying Phase)* digunakan untuk menghilangkan kandungan air atau kelembaban di dalam isolasi kertas dan frame support trafo yang terbuat dari bahan selulosa. Peralatan ini menggabungkan antara panas dan vakum udara secara bersamaan untuk proses pengeringan yang lebih cepat dan lebih efisien.

Proses *drying oven* dijabarkan seperti pada uraian berikut:

1. Tahap persiapan (*Preparation*)

Tahap persiapan ini trafo dimasukkan ke dalam ruang vakum kemudian *evaporator and condenser chamber* dikondisikan dalam keadaan vakum dengan tekanan sekitar 5 torr, disesuaikan dengan tekanan pada ruang vakum yaitu 5 torr.

2. Tahap pemanasan dan pengeringan (*Heating and Drying*)

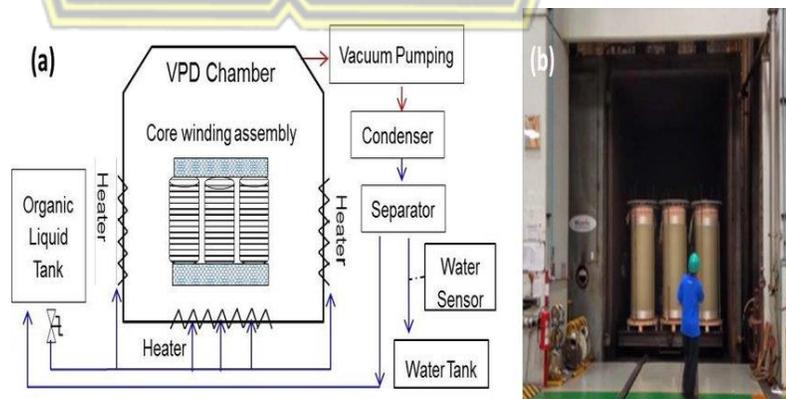
Tahap pemanasan dimulai ketika udara telah dikeluarkan dan ruang vakum dalam kondisi vakum. Katup dibuka untuk mengalirkan larutan ke dalam ruang vakum dan mengkondensasi seluruh bagian trafo. Proses pemanasan dan peningkatan suhu pada trafo terus berlangsung sehingga menyebabkan terjadinya evaporasi terhadap uap hasil kondensasi.

3. Tahap pengurangan tekanan (*Pressure Redaction*)

Selama tahap ini pasokan uap pelarut dihentikan dan sebagian besar uap pelarut yang diserap oleh isolasi kembali menguap, mengembun di kondensor dan akhirnya dikembalikan ke evaporator. Fase ini berlanjut sampai tekanan di dalam bejana mencapai 15-20 Torr.

4. Tahap vakum (*Vacuum*)

Ini adalah tahap akhir dari proses *VPD*. Ruang vakum dikurangi tekanannya hingga kurang dari 0,1 Torr. Ekstraksi air dipantau dan dicatat secara berkala. Ketika ekstraksi air mencapai di tingkat yang diinginkan maka siklusnya berhenti.



Gambar 4. 11 Proses *Vapor Drying Oven (VPD)*



Gambar 4. 12 Proses oven.

e. Purifikasi minyak di *storage tank* sampai kualitas minyak kembali baik

Purifikasi oli trafo merupakan proses permunian minyak trafo untuk mengurangi atau menghilangkan kontaminasi berupa partikel-partikel, kandungan air, kandungan gas, dan kontaminasi fisik lainnya melalui sebuah alat yang disebut sebagai *transformer oil purification plant*.

Alat/mesin *transformer oil purification plant* tersusun dari bagian-bagian berikut: pompa inlet, filter, pemanas, tabung vakum, dan pompa vakum. Pompa inlet memompa minyak yang telah terkontaminasi dari trafo ke dalam mesin filtrasi. Pemanas akan memanaskan minyak hingga mencapai 60-70°C. Minyak dipanaskan untuk mempercepat proses purifikasi. Selain itu juga untuk mengurangi tingkat keasaman minyak trafo. Filter berfungsi untuk memisahkan dengan partikel padat yang ada di dalam minyak. *Degassing and dehydration chamber* atau ruang vakum untuk menghilangkan kandungan gas terlarut dan kelembaban di dalam minyak. Pompa vakum untuk membuang gas-gas terlarut yang tidak diperlukan dalam minyak.

f. *Tanking dan Assembly Ulang*

Kegiatan yang dilakukan dalam tahap ini dimulai dari dimasukkannya *core* dan *winding* yang telah dioven ke dalam tangki. Setelah itu masing-masing aksesoris trafo akan dipasang dengan lengkap pada *tank cover*. Di antara aksesoris yang dipasang adalah:

- *HV dan LV Bushing*
- *Thermometer and dial thermometer*
- *Tap Changer*
- *Earthing Terminal*
- *Oil level indicator*
- *N₂ filling valve*

Kemudian dilakukan pengisian minyak ke dalam tanki, minyak yang dimasukkan ke dalam trafo adalah minyak yang telah melalui proses purifikasi.

g. *FAT (Factory Acceptance Test)*

Dilakukan pengujian kembali terhadap trafo yang telah dilakukan perbaikan. Pengujian ini dilakukan di pabrikan dengan disaksikan dari pemilik asset trafo dalam hal ini adalah PLN.

FAT terdiri dari beberapa macam test yang dilakukan, yaitu:

- *Voltage Ratio and Phase Relationship*
- *Winding Resistance*
- *Insulation Resistance Winding and Bushing*
- *Check of Core and Frame Insulation*
- *Capacitance and Tan Delta of windings and bushings*
- *No-Load Losses, excitation current and measurement of harmonics of the no-load current*
- *Short circuit impedance and Load Loss*
- *Test on On-Load Tap Changer*
- *Lightning Impulse Test*

- *Applied Voltage Test*
- *Line Terminal AC Test*
- *Induced Voltage Test with Partial Discharge Measurement (IVPD)*
- *Verification of ratio of Current transformer*
- *Sweet Frequency Response Analysis (SFRA)*

4.4. Hasil Pengujian dan Perhitungan Tahanan Isolasi pada saat FAT

1. Capacitance dan Tangent Delta ($Tan \delta$) Winding

Berdasarkan hasil pengujian Kapasitansi dan Tangen Delta pada belitan trafo yang dilakukan di pabrik PT Elsewedy diperoleh hasil sebagaimana pada Tabel 4.7 (sesuai dengan lampiran pada halaman 18).

Tabel 4.7 Hasil Pengujian $Tan \delta$ Winding saat FAT.

Test No	UST – GST Mode	Cap Symbol	Applied Voltage (kV)	Capacitance (pF)	Tan δ		I	P
	Test Type				30°C	20°C	Watt	Red
1	UST	CHL	10	4945.12	0.10	0.08	15.4589	0.1606
2	GST-L _{GR}	CHL + CHG	10	8.298.10	0.16	0.13	26.0742	0.4044
3	GST-L _{GU}	CHG	10	3360.00	0.22	0.18	10.5464	0.2354
4	UST	CHL	10	4945.55	0.10	0.08	15.5241	0.1531
5	GST-H _{GR}	CHL + CLG	10	18630.01	0.15	0.12	68.3550	0.8453
6	GST-H _{GU}	CLG	10	13694.05	0.16	0.13	42.9100	0.6757

Merujuk pada persamaan (2.3) maka perhitungan perhitungan tange delta pada masing-masing *winding* diperoleh sebagai berikut.

a. Hasil Perhitungan Tange Delta pada Hubungan CHL

$$\tan \delta = \frac{0,1606}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 4945,12 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1034\%$$

b. Hasil Perhitungan Tange Delta pada Hubungan CHL + CHG

$$\tan \delta = \frac{0,4044}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 8298,1 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1552\%$$

c. Hasil Perhitungan Tange Delta pada Hubungan CHG

$$\tan \delta = \frac{0,2354}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 3360 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,2231\%$$

d. Hasil Perhitungan Tange Delta pada Hubungan CHL

$$\tan \delta = \frac{0,1531}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 4945,55 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,0985\%$$

e. Hasil Perhitungan Tange Delta pada Hubungan CHL + CLG

$$\tan \delta = \frac{0,8453}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 18630,01 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1445\%$$

f. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada Hubungan CLG

$$\tan \delta = \frac{0,6757}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 13694,05 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1571\%$$

Berdasarkan hasil pengujian dan perhitungan tangen delta ($\tan \delta$) di sisi belitan trafo daya GI 150 kV Cimanggis II didapatkan nilai $<0,5\%$, hasil tersebut mengindikasikan bahwa tingkat isolasi dari trafo dalam kondisi baik.

2. *Capacitance dan Tangent Delta Bushing ($\tan \delta$)*

Berdasarkan hasil pengujian Kapasitansi dan Tangen Delta pada *bushing* trafo yang dilakukan setelah FAT diperoleh hasil sebagaimana pada Tabel 4.8 (sesuai dengan lampiran pada halaman 19).

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian $\tan \delta$ Bushing saat FAT.

Test No	Bushing		Side	Test Mode	Power (Watt)	Applied Voltage (kV)	Capacitance (pF)	Tan δ (%)
	Serial No.	Ph						30C
1	12B3162	1U1	HV	UST-R	0,0055	10	268.37	0,26
2	12B3163	1V1	HV	UST-R	0,0054	10	268.21	0.25
3	12B3164	1W1	HV	UST-R	0,0055	10	267.60	0.26

Merujuk pada persamaan (2.3) maka perhitungan perhitungan tangen delta pada masing-masing *bushing* diperoleh sebagai berikut.

a. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada *Bushing* Phasa U

$$\tan \delta = \frac{0,0055}{5000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 268,37 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,261071\%$$

b. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada *Bushing* Phasa V

$$\tan \delta = \frac{0,0054}{5000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 268,21 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,256477\%$$

c. Hasil Perhitungan Tangen Delta pada *Bushing* Phasa W

$$\tan \delta = \frac{0,0055}{5000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 267,6 \times 10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,261822\%$$

Berdasarkan hasil pengujian dan perhiungan tangen delta ($\tan \delta$) di sisi *bushing* trafo daya GI 150 kV Cimanggis, II didapatkan nilai $<0,5\%$, hasil tersebut mengindikasikan bahwa tingkat isolasi dari trafo dalam kondisi baik.

3. *Insulation Resistance Test Winding*

Hasil pengujian tahanan isolasi antar belitan dengan menggunakan alat ukur *insulation resistance test* ditunjukkan pada Tabel 4.9 (sesuai dengan lampiran pada halaman 15).

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian *Insulation Resistance Test Winding* saat FAT.

Test Voltage: 2500 VDC	
Acceptance Criteria: $> 1000 \text{ M}\Omega$	
HV – LV	= 7.830 $\text{M}\Omega$

HV – Ground	= 7.560 MΩ
HV – TV	= 9.220 MΩ
LV – TV	= 5.310 MΩ
LV – Ground	= 6.580 MΩ
TV – Ground	= 6.200 MΩ

Kemudian untuk menghitung nilai indeks polarisasi (PI) dilakukan pengujian kembali tahanan isolasi antara belitan dengan *ground* dengan durasi 10 menit untuk dicatat nilai perolehan tahanan isolasi untuk masing-masing menit yang ditunjukkan pada Tabel 4.10 (sesuai dengan lampiran pada halaman 16).

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian *Insulation Resistance Test Winding* saat FAT dalam 10 menit.

No (Minute)	<i>Insulation Resistance</i>		
	HV - G	LV - G	TV - G
	MΩ	MΩ	MΩ
1	7.560	6.580	6.200
2	7.730	7.390	7.400
3	7.960	8.150	8.220
4	8.390	8.800	8.880
5	9.340	9.120	9.130
6	10.150	9.850	9.690
7	10.200	10.100	10.190
8	10.850	10.500	10.540

9	11.150	10.820	10.910
10	11.430	11.290	11.120

Kemudian dari hasil pengujian tersebut dilakukan perhitungan nilai polarisasi indeks (PI) dengan menggunakan persamaan (2.2) dengan hasil sebagai berikut:

a. Indeks Polarisasi HV - G

$$PI = \frac{11.430}{7.560} = 1,51$$

b. Indeks Polarisasi LV - G

$$PI = \frac{11.290}{6.580} = 1,71$$

c. Indeks Polarisasi TV - G

$$PI = \frac{11.120}{6.200} = 1,79$$

Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Indeks Polarisasi saat FAT.

No (Minute)	<i>Insulation Resistance</i>	<i>Insulation Resistance</i>	<i>Insulation Resistance</i>
	HV - G	LV - G	TV - G
PI	1,51	1,71	1,79
<i>Insulation Condition</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>

Kondisi tahanan isolasi di dalam belitan trafo memiliki nilai IR >1000 MΩ menunjukkan bahwa bahan isolasi di dalam belitan trafo masih dalam kondisi baik atau tidak mengalami kerusakan atau mengalami penurunan kemampuan. Hal ini didukung dengan nilai perhitungan indeks polarisasi dalam rentang 1,25 – 2,00

dalam kriteria baik menunjukkan bahwa arus bocor dan arus konduksi dari isolasi belitan bernilai rendah.

4. *Insulation Resistance Test Core-Frame-Grounding*

Dengan menggunakan alat ukur *insulation resistance test* diperoleh hasil pengujian sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.12 (sesuai dengan lampiran pada halaman 17).

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi *Core-Frame-Grounding*.

<i>Test Voltage: 2500 VDC</i>	
<i>Acceptance Criteria: > 1.000 MΩ</i>	
Core – Frame	= 5.260 MΩ
Core – Ground	= 4.050 MΩ
Frame – Ground	= 4.170 MΩ

Nilai nilai tahanan isolasi antara *core to frame*, *core to ground*, dan *frame to ground* adalah >1000 Mega Ohm, menunjukkan bahwa kemampuan isolasi dalam kondisi baik.

5. *Oil Quality*

Hasil pengujian *oil quality* yang dilakukan di pabrikan diperoleh hasil sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.13 (sesuai dengan lampiran pada halaman 20-23).

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Kualitas Minyak Trafo.

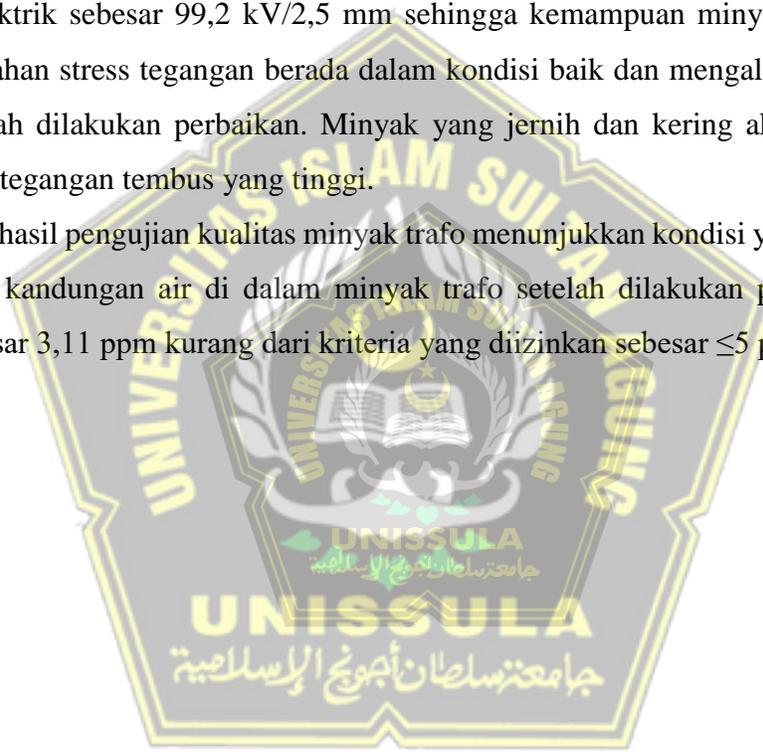
Maintank Code	: E0699-0139	<i>Criteria</i>
Dissolved Gas Analysis	Normal	<i>Normal</i>
Breakdown Voltage (IEC 156/95)	99,2 kV/2,5 mm	<i>Good</i>
Loss factor. Tan delta (IEC 247)	0,00173	<i>Good</i>

Water content	3,11 ppm at 20 °C	Good
---------------	-------------------	------

Hasil pengujian DGA diperoleh hasil normal, ini berarti kandungan/kadar dari gas-gas yang ada dalam minyak trafo dalam kondisi baik. Atau tidak ada gas-gas hidrokarbon yang terbentuk dari proses overheat, arcing, maupun korona.

Hasil pengujian tegangan tembus (*Breakdown Voltage*) memiliki nilai kemampuan dielektrik sebesar 99,2 kV/2,5 mm sehingga kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan berada dalam kondisi baik dan mengalami peningkatan setelah dilakukan perbaikan. Minyak yang jernih dan kering akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi.

Dari hasil pengujian kualitas minyak trafo menunjukkan kondisi yang baik dimana nilai kandungan air di dalam minyak trafo setelah dilakukan purifikasi adalah sebesar 3,11 ppm kurang dari kriteria yang diizinkan sebesar ≤ 5 ppm.



BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas tahanan isolasi dari sebuah trafo adalah sebagai berikut:
 - a. Kondisi permukaan pada terminal bushing dan kondisi kelembaban udara sekitar.
 - b. Kualitas dari minyak trafo.
 - c. Kualitas dari isolasi antar kumparan/belitan trafo.
2. Kondisi isolasi pada transformator 60 MVA Cimanggis II pada saat dilakukan pengujian di *site* adalah sebagai berikut:
 - a. Hasil pengujian kapasitansi dan tan delta ($Tan \delta$) pada belitan trafo maksimum di angka 0,2619% dimana hasil tersebut masih berada di bawah batas nilai $Tan \delta$ yang dipersyaratkan yaitu <0,5%.
 - b. Hasil pengujian kapasitansi dan tan delta ($Tan \delta$) pada bushing trafo maksimum di angka 0,2671% dimana hasil tersebut masih berada di bawah batas nilai $Tan \delta$ yang dipersyaratkan yaitu <0,5%.
 - c. Hasil perhitungan polarization index paling rendah di angka 1,50 dan masih dalam batas kriteria baik dan hasil pengujian tahanan isolasi untuk core-frame dan frame-ground masing-masing adalah 615 M Ω dan 0 M Ω sehingga tidak memenuhi kriteria karena nilai pengujiannya IR-nya adalah <1.000 M Ω .
 - d. Kandungan water content minyak trafo adalah 14 ppm, lebih tinggi dari batas maksimum yang dipersyaratkan yaitu <5 ppm.

Berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi trafo GI Cimanggis di site, trafo tersebut tidak laik operasi dikarenakan kualitas isolasi trafo tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan.

3. Penyebab kerusakan isolasi trafo GI Cimanggis II adalah adanya kandungan air di dalam trafo yang diakibatkan karena top terminal bushing sisi LV dalam kondisi terbuka terhadap udara luar dan hujan untuk waktu yang lama sehingga inilah yang menjadi jalan masuknya air ke dalam trafo dan kemudian air tersebut karena berat jenis yang lebih besar dari minyak trafo terjebak di bagian bawah pedestal trafo.
4. Perbaikan yang dilakukan untuk memperbaiki kerusakan isolasi trafo GI Cimanggis II adalah dengan menurunkan kandungan air pada trafo yaitu dengan melakukan *drying oven active part* trafo dan purifikasi minyak trafo.
5. Kondisi tahanan isolasi pada transformator 60 MVA Cimanggis II pada saat dilakukan pengujian FAT setelah dilakukan perbaikan adalah sebagai berikut:
 - a. Hasil pengujian kapasitansi dan tan delta ($Tan \delta$) pada belitan trafo maksimum di angka 0,22% dimana hasil tersebut masih berada di bawah batas nilai $Tan \delta$ yang dipersyaratkan yaitu $<0,5\%$.
 - b. Hasil pengujian kapasitansi dan tan delta ($Tan \delta$) pada bushing trafo maksimum di angka 0,26% dimana hasil tersebut masih berada di bawah batas nilai $Tan \delta$ yang dipersyaratkan yaitu $<0,5\%$.
 - c. Hasil perhitungan polarization index paling rendah di angka 1,51 dan masih dalam batas kriteria baik dan hasil pengujian tahanan isolasi untuk core-frame, core to ground dan frame-ground masing-masing 1.000 M Ω .
 - d. Kandungan water content minyak trafo adalah 3,11 ppm, di bawah batas maksimum yang dipersyaratkan yaitu <5 ppm.
6. Berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi trafo GI Cimanggis setelah dilakukan perbaikan pada saat FAT, trafo tersebut dalam kondisi telah laik untuk dioperasikan dengan memenuhi kualitas isolasi trafo yang ditetapkan.

5.2 Saran

1. Apabila trafo dalam kondisi telah *on-site* namun belum beroperasi maka perlu dilakukan pengecekan rutin terhadap material-material dan *accessories* trafo

seperti *bushing HV* dan *LV*, kipas pendingin, *grounding* dan lain-lain untuk menjaga trafo tersebut dalam kondisi baik.

2. Menutup celah-celah pada bagian trafo yang berpotensi menjadi jalan masuk air dan kontak dengan udara luar apabila trafo belum akan dioperasikan untuk meminimalisir meningkatnya kelembaban dan kandungan air di dalam trafo.
3. Jadwal pabrikasi trafo dan *on-site* di lapangan untuk dapat menyesuaikan dengan jadwal konstruksi di lapangan sehingga tidak ada jeda waktu yang terlalu jauh antara trafo *on-site* dengan operasi.



DAFTAR PUSTAKA

- Badaruddin & Firdianto, F. A., 2016. Analisa Minyak Transformator pada Transformator Tiga Fasa di PT X. *Jurnal Teknologi Elektro Universitas Mercu Buana*, Vol 7 No. 2, pp. 75-83.
- Bangar, A., Sharma , R., Tripathi , H. & Bhanpurka, A., 2012. Comparative Analysis of Moisture Removing Processes from Transformer which are Used to Increase its Efficiency. *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering Volume 12 Issue 5 Version 1.0*, pp. 7-11.
- Fadillah, F. C., 2019. *Analisis Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi dan Tangen Delta*. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Febriari, D. A., 2021. Analisa Tahanan Isolasi Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta dan breakdown Voltage di Gardu Induk 150 kV Kentungan. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*, pp. -.
- International Electrotechnical Commission, 2013. *IEC 60422 International Standard Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment – Supervision and Maintenance*. Geneva: IEC.
- Kadir, A., 2010. *Transformator*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- P.E., W. H. B., 2003. *Analysis of Transformer Failures*. Hartford: The Hartford Steam Boiler Inspection & Insurance Co..
- Robbani, M. F., 2020. Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV. *Elektrika*, Vol. 12 No. 2, pp. 60-66.
- S. D. Myers, J. J. K. R. H. P., 1981. *A Guide to Transformer Maintenance*. Ohio US: S D Myers Inc.
- Siddiqui, M. T., 2017. Vapor Phase Drying for Moisture Removal from Transformer Coil Insulation. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 8, Issue, pp. 20-24.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2000. *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. New Jersey: IEEE.

Tobing, B. L., 2012. *Peralatan Tegangan Tinggi, Edisi Kedua*. Jakarta: Erlangga.

Zuhal, 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: ITB Bandung.

