

**ANALISIS UJI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI TRAF0 30
MVA DI GI 150/20 KV PT APF DENGAN MENGGUNAKAN
INDEKS POLARISASI DAN TANGEN DELTA**

TUGAS AKHIR

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar S1

Pada Program Studi Teknik Elektro

Universitas Islam Sultan Agung



Di susun oleh :

REZA FARID RIFQYAWAN

NIM : 30601601882

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

2022

***ANALYSIS THE PRIVILEGED PRISONER ISOLATION
TRANSFORMATION OF 30 MVA TRANSFORMERS IN GI
150/20 KV PT APF USING THE POLARIZATION INDEX AND
TANGENT DELTA***

FINAL PROJECT

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



NIM 30601601882

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

2022

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul "*ANALISIS UJI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI TRAF0 30 MVA DI GI 150/20 KV PT APF DENGAN MENGGUNAKAN DAN TANGEN DELTA*" ini disusun oleh:

Nama : REZA FARID RIFQYAWAN

NIM : 30601601882

Program Studi : Teknik Elektro


Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari

Tanggal

Pembimbing I


Pembimbing II


Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.
NIDN : 0607018501


Gunawan S.T., M.T.
NIDN : 0607117101

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro


Jenny Putri Hapsari S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "*ANALISIS UJI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI TRAFO 30 MVA DI GI 150/20 KV PT APF DENGAN MENGGUNAKAN DAN TANGEN DELTA*" ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 24 Agustus 2022



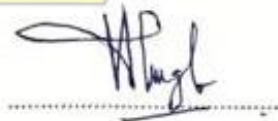
Tim Penguji

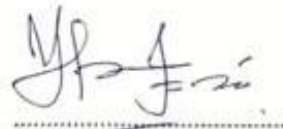
Tanda Tangan

Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.
NIDN : 0619076401
Ketua Penguji

Dedi Nugroho, S.T., M.T.
NIDN : 0617128802
Penguji II

Ir. Ida Widiastuti, M.T.
NIDN : 005036501
Penguji III





SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Reza Farid Rifqyawan
NIM : 30601601882
Fakultas : Teknologi Industri
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang dengan judul "ANALISIS UJI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI TRAFU 30 MVA DI GI 150/20 KV PT APF DENGAN MENGGUNAKAN DAN TANGEN DELTA", adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, 7 September 2022

Yang Menyatakan

Mah.


Reza Farid Rifqyawan
NIM. 30601601882

METERAI
TEMPEL

TA97AJX969861016

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Reza Fraid Rifqyawan

NIM : 30601601882

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan Judul :

ANALISIS UJI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI TRAF0 30 MVA DI GI 150/20 KV PT APF DENGAN MENGGUNAKAN DAN TANGEN DELTA,

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

Semarang, 7 September 2022

Yang Menyatakan



METERAI TEMPEL
2203E2AJX969861017

Reza Farid Rifqyawan

PERSEMBAHAN DAN MOTTO

“ Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan” (QS Al Insyirah 5)



KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirobbilalamin segala puja dan puji syukur yang tak terhingga atas kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan sekaligus laporan tugas akhir yang berjudul “Analisis uji kelayakan tahanan isolasi trafo 30MVA di GI 150/20 kV PT APF dengan menggunakan indeks polarisasi dan tangen delta” dengan sebaik-baiknya. Sholawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi besar kita Nabi Muhammad SAW.

Laporan tugas akhir merupakan salah satu syarat bagi mahasiswa/i untuk meraih gelar sarjana (S1) di program studi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas mendapat bantuan dari berbagai pihak. Dengan rasa setulus hati, penulis ingin menyampaikan banyak terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan ridhonya serta memberikan ketabahan, kesabaran dan kelapangan hati serta pikiran dalam menimba ilmu.
2. Kedua orang tua saya tercinta yang telah memberikan dukungan baik materiil maupun non materiil dan tidak pernah berhenti mendo'akan saya disetiap sujudnya.
3. Teman saya nurlita yang telah memberikan dukungan, dan nasehat kepada saya supaya tetap semangat saat mengerjakan tugas akhir ini
4. Dr. Novi Marlyana, ST, MT. selaku Dekan di Fakultas Teknologi Industri beserta jajarannya.
5. Jeny Putri Hapsari, ST, MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
6. Terimakasih kepada Dosen Pembimbing saya Dr. Ir. Muhamad Haddin, MT. dan Gunawan, ST, MT. yang telah membantu dan membimbing saya dengan sabar sampai laporan tugas akhir ini terselesaikan.
7. Dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu selama dibangku kuliah.

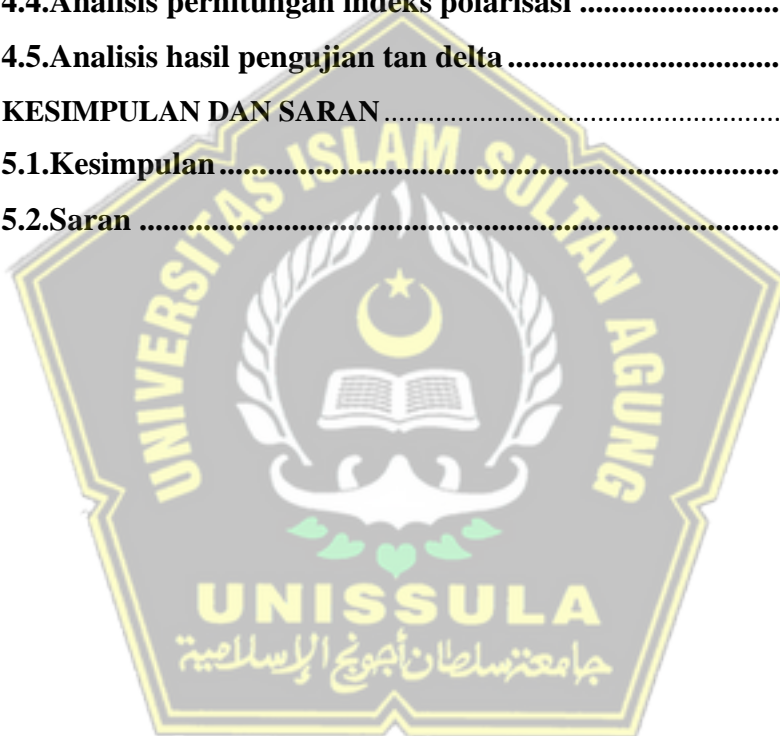
8. Staff dan Karyawan Fakultas Teknologi Industri yang sudah membantu dalam segala urusan tugas akhir mulai dari surat permohonan penelitian sampai sidang.
9. Terimakasih kepada saudara-saudara saya yang telah memberi dukungan dan do'a perhatian yang amat sangat berharga sehingga saya dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
10. Terimakasih kepada pihak Satpam APF Ibu Endang dan Bapak Hari yang telah memberikan ijin kepada saya untuk dapat melakukan penelitian di APF.
11. Terimakasih kepada Manager Elektical APF Bapak Adib, ST. dan pihak PT APF beserta Staf electrical yang telah membimbing saat melakukan penelitian di PT APF.
12. Terimakasih kepada teman seperjuangan yaitu seluruh mahasiswa Teknik Elektro 2016 yang telah memberikan semangat, nasehat dan dukungan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
13. Terimakasih kepada teman-teman organisasi yang telah membantu memberi semangat dalam mengerjakan laporan tugas akhir, dan lain sebagainya yang tidak mampu saya sebutkan satu persatu.
14. Dan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan memberi semangat pada saat penyelesaian laporan tugas akhir ini



DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	i
<i>FINAL PROJECT</i>	iii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
ABSTRAK	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Batasan Masalah	2
1.3.Tujuan Penelitian.....	2
1.3.Keuntungan Penelitian	2
1.4.Penataan Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	4
2.1.Tinjauan Pustaka	4
2.2.Dasar Teori	5
2.2.1.Gardu Induk.....	5
2.2.2.Trafo Tenaga	5
2.2.3.Bagian-bagian Transformator	8
2.2.4.Isolator	12
2.2.5.Pengujian Trafo.....	13
2.2.6.Tahanan Isolasi	14
2.2.7.Tingkat Ketahanan Isolasi (<i>Basic Impuls Insulation Level/BIL</i>)	16
2.2.8.Perawatan Trafo	17
2.2.9.Pengtesan Indeks Polarisasi pada trafo tenaga	18
2.2.10.Pengujian tangen delta	19
BAB III METODE PENELITIAN	22
3.1.Model Penelitian.....	22

3.2.Objek Penelitian	22
3.3.Diagram Alir Penelitian.....	23
3.4.Data Penelitian	24
3.5.Langkah Langkah Penelitian	24
BAB IV HASIL DAN ANALISA	27
4.1.Hasil Penelitian.....	27
4.2.Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi	27
4.3.Data Tahanan Isolasi Menggunakan Tan Delta.....	28
4.4.Analisis perhitungan indeks polarisasi	31
4.5.Analisis hasil pengujian tan delta	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	33
5.1.Kesimpulan	33
5.2.Saran	33



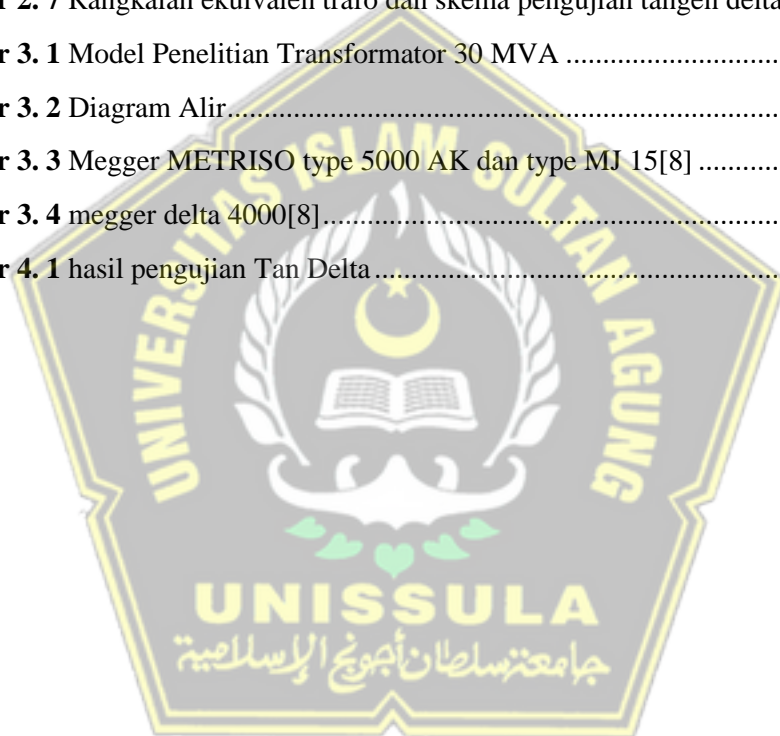
DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar indeks polarisasi trafo tenaga menggunakan IEEE 43-2000	18
Tabel 2. 2 Standar pengujian tangen delta menggunakan ANSI C 57.12.90	21
Tabel 3. 1 <i>Spesifikasi Transformator</i> 4 Gardu Induk 150 Kv PT APF.....	24
Tabel 4. 1 data indeks polarisasi transformator 1 tahun 2021	27
Tabel 4. 2 data indeks polarisasi transformator 2 tahun 2021	28
Tabel 4. 3 data tangen delta trafo 1 tahun 2021	29
Tabel 4. 4 data tangen delta trafo 2 tahun 2021	29



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 model tipe transformator	7
Gambar 2. 2 Inti besi	8
Gambar 2. 3 Susunan kumparan dari Transformator[5].....	9
Gambar 2. 4 Tangki Konservator	11
Gambar 2. 5 Bushing.....	11
Gambar 2. 6 Rangkaian isolasi dan diagram phasor arus pengujian tangen delta.....	19
Gambar 2. 7 Rangkaian ekuivalen trafo dan skema pengujian tangen delta	20
Gambar 3. 1 Model Penelitian Transformator 30 MVA	22
Gambar 3. 2 Diagram Alir.....	23
Gambar 3. 3 Megger METRISO type 5000 AK dan type MJ 15[8]	25
Gambar 3. 4 megger delta 4000[8].....	26
Gambar 4. 1 hasil pengujian Tan Delta.....	32



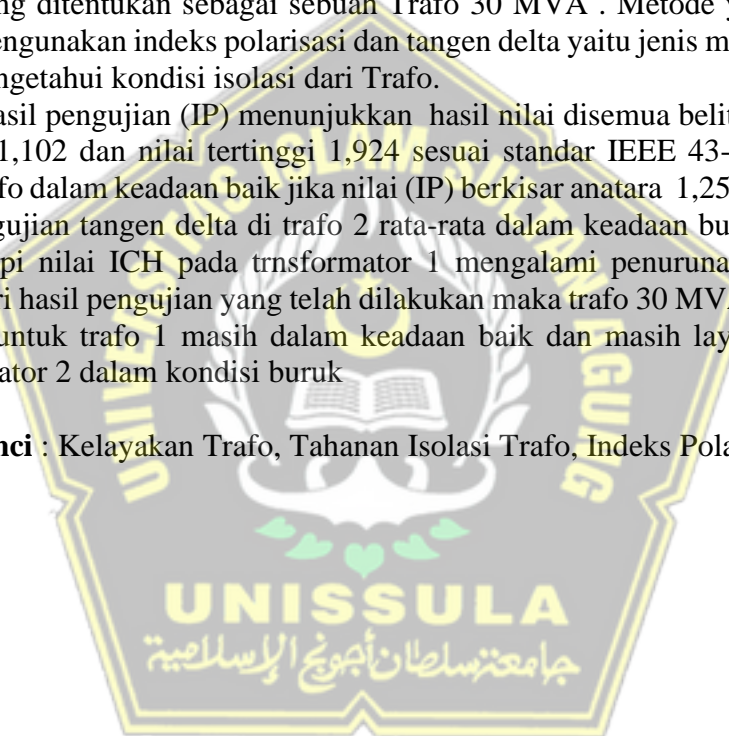
ABSTRAK

Salah satu permasalahan yang terjadi pada Trafo 30 MVA yang mensuplai listrik PT APF adalah kelayakan isolasi. Hal ini dikarenakan peralatan tersebut digunakan secara terus-menerus dalam rentang waktu lama. Hal ini dapat menyebabkan penurunan tahanan isolasi dan dapat menimbulkan terjadinya gangguan pada transformator. Sebab yang lain adalah terjadi faktor-faktor seperti tegangan lebih, kelembaban, suhu operasi yang tinggi maupun kerusakan mekanis sehingga berakibat terputusnya daya listrik ke konsumen. Solusi terhadap masalah ini adalah diperlukan evaluasi pengujian dan perawatan dilakukan secara rutin agar trafo dapat beroperasi sesuai masa pemakaian maksimalnya.

Penelitian ini dilakukan melalui uji kelayakan tahanan isolasi Trafo dengan model yang ditentukan sebagai sebuah Trafo 30 MVA. Metode yang digunakan adalah menggunakan indeks polarisasi dan tahanan delta yaitu jenis metode pengujian untuk mengetahui kondisi isolasi dari Trafo.

Hasil pengujian (IP) menunjukkan hasil nilai disemua belitan dengan nilai terendah 1,102 dan nilai tertinggi 1,924 sesuai standar IEEE 43-2000 dikatakan bahwa trafo dalam keadaan baik jika nilai (IP) berkisar antara 1,25-2. Berdasarkan hasil pengujian tahanan delta di trafo 2 rata-rata dalam keadaan buruk yaitu diatas 1,0% tetapi nilai ICH pada transformator 1 mengalami penurunan yaitu sebesar 0,8%. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan maka trafo 30 MVA di GI 150 kV PT APF untuk trafo 1 masih dalam keadaan baik dan masih layak tetapi untuk transformator 2 dalam kondisi buruk.

Kata Kunci : Kelayakan Trafo, Tahanan Isolasi Trafo, Indeks Polarisasi



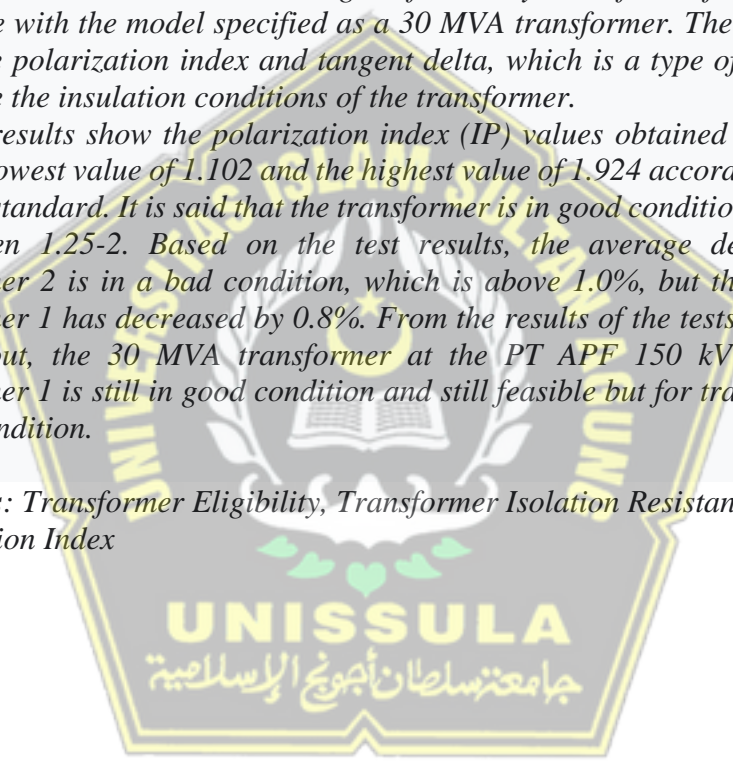
ABSTACT

One of the problems that occur in the 30 MVA transformer supplies electricity to PT APF is the feasibility of insulation. This is because the equipment is used continuously for a long period of time. This can cause a decrease in insulation resistance and can cause disturbances to the transformer. Another reason is that there are several factors such as overvoltage, humidity, high operating temperatures and mechanical damage, resulting in the loss of electrical power to consumers. The solution to this problem is that it is necessary to evaluate tests and maintenance needs to be carried out regularly so that the transformer can operate according to its maximum service life.

This research was conducted through a feasibility test of transformer insulation resistance with the model specified as a 30 MVA transformer. The method used is to use the polarization index and tangent delta, which is a type of test method to determine the insulation conditions of the transformer.

The test results show the polarization index (IP) values obtained in all windings with the lowest value of 1.102 and the highest value of 1.924 according to the IEEE 43-2000 standard. It is said that the transformer is in good condition if the IP value is between 1.25-2. Based on the test results, the average delta tangent in transformer 2 is in a bad condition, which is above 1.0%, but the ICH value in transformer 1 has decreased by 0.8%. From the results of the tests that have been carried out, the 30 MVA transformer at the PT APF 150 kV substation for transformer 1 is still in good condition and still feasible but for transformer 2 it is in bad condition.

Keywords: *Transformer Eligibility, Transformer Isolation Resistance, Polarization Index*



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan listrik sekarang semakim lama harus ditambahkan, karena kebutuhan perusahaan yang juga meningkat. PT. PLN Persero sebagai induk perusahaan yang bergerak di bidang penyaluran tenaga listrik di semua wilayah di Indonesia yang tentunya harus menjaga kebutuhan listrik. Menjaga kebutuhan listrik dapat dilakukan dengan cara memelihara peralatan-peralatan penyalur energi listrik, seperti trafo tenaga yang ada di gardu induk.

PT. APF adalah perusahaan Pemintalan yang mempunyai Gardu Induk 150/20 kV yang menggunakan trafo daya 30 MVA telah dipasang sejak tahun 1984 dan telah beroperasi selama hampir 36 tahun secara terus menerus serta bekerja 24 jam tanpa non stop. Permasalahan yang terjadi pada Trafo 30 MVA salah satunya adalah masalah tentang kelayakan isolasi. Hal ini dikarenakan peralatan tersebut digunakan secara terus dalam waktu lama. Hal ini dapat menyebabkan penurunan tahanan isolasi dan dapat menimbulkan terjadinya gangguan pada transformator. Sebab yang lain adalah terjadi berapa masalah antara lain kelembaban, tegangan berlebih, suhu yang tinggi penyebab kerusakan mekanis yang mengakibatkan terhentinya aliran listrik ke rumah-rumah konsumen. Sebab itu diperlukan evaluasi pengujian atau perawatan perlu dilakukan dalam skala rutin agar trafo dapat beroperasi sesuai masa pemakaian maksimalnya [1]. Evaluasi Uji kelayakan dan analisa dikerjakan untuk mengetahui suatu kualitas isolasi pada trafo tenaga serta memberikan rekomendasi ke pihak gardu induk 150 kV.

Mutu pada isolasi trafo tenaga ditentukan dari hasil ukur suatu tahanan isolasi, hasil ukur faktor rugi-rugi dielektri dan hasil ukur peluahan parsial dimana akan didapatkan nilai indeks polarisasi dengan mengacu pada standar IEEE 43-200 maka dapat menentukan kualitas suatu isolasi[2].

Pengetesan tahanan isolasi menggunakan metode Indeks Polarisasi (IP) dan tan delta. Cara ini lebih lengkap dibandingkan cara lain karna menggunakan satu pengetesan untuk menganalisis sebuah data. Pengetesan Indeks Polarisasi (IP)

bertujuan supaya tahu peralatan masih layak atau tidak, pengetesan ini membedakan hasil uji tahanan setelah pengecekan tegangan selama 10 menit dengan tahanan saat 1 menit pertama. Tahap kedua pengetesan tan delta, tujuan pengetesan ini ialah untuk pengukuran arus bocor kapasitif di trafo tersebut. Semakin buruknya kualitas isolasi dapat diamati saat nilai tan delta yang besar dan nilai tahanan isolasinya yang semakin mekecil.

1.2. Perumusan Masalah

Menurut latar belakang yang telah di bahas, maka bisa diambil perumusan masalah sebadai berikut :

- a. Trafo daya 30 MVA di Gardu Induk 150 kV di PT. APF dengan beban puncak 70%. Diperiksa terakhir tahun 2018 dengan kondisi baik. Bagaimana kondisi trafo setelah dioperasikan lagi setelah 2 tahun
- b. Bagaimana kondisi kelayakan trafo 1 dan 2 30 Mva di PT APF saat di uji dengan menggunakan indeks polarisasi dan tangen delta.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian batasan masalah sebagai berikut :

- a. Tempat penelitian yang di pakai adalah PT. APF Kendal, Jawa Tengah
- b. Penelitian ini hanya membahas mengenai pengujian tahanan isolasi pada trafo tenaga 30 MVA di GI 150/20 kV PT. APF
- c. Penelitian tidak dilakukan pengukuran melainkan hanya mengambil data tahanan.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

- a. Menperoleh data valid terkini kelayakan trafo 30 MVA di GI 150 kV PT. APF Kendal.
- b. Memperbaiki ketahanan isolasi trafo 30 MVA di GI 150 kV PT. APF Kendal.

1.5. Keuntungan Penelitian

keuntungan pada ulasan tugas akhir ini sebagai berikut ini :

- a. Ada pemecahan kasus mengenai keadaan trafo tenaga apakah masih dalam keadaan yang siapuntu dioperasikan atau pemeliharaan saja.

- b. Ada kabar tentang usia trafo yang mempengaruhi suatu nilai tahanan isolasi. Maka dari itu bisa menyarankan kepada pihak Gardu Induk 150 kV PT. APF mengenai kondisi isolasinya.

1.6. Penataan Penulisan

Supaya mempermudah pembuatan Tugas Akhir ini kemudian penulisan menjadi 5 bab, yang berisi berikut ini :

BAB I : PENDAHULUAN

Dalam bab berisikan latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini berisikan tentang jurnal-jurnal dan penelitian yang pernah dilakukan yang memiliki permasalahan ataupun metode yang digunakan pada penelitian yang akan dilakukan. Selain itu juga membahas tentang gardu induk, transformator tenaga, bagian-bagian transformator, isolator, pengujian transformator, tahanan isolasi, tingkat ketahanan isolasi, pemeliharaan transformator, pengujian indeks polarisasi, dan pengujian tan delta.

BAB III : METODE PENELITIAN

Bab yang mendeskripsikan model penelitian dan pengambilan data, objek penelitian, data penelitian, prosedur dalam penelitian dan diagram alir dalam penelitian Tugas Akhir.

BAB IV : HASIL DAN ANALISA

Bab ini berisi tentang data tahanan isolasi, indeks polarisasi tahun 2021, nilai tangen delta tahun 2021 di trafo 1 dan trafo 2 di PT APF, perhitungan nilai indeks polarisasi, perhitungan nilai tan delta, dan penentuan kelayakan tahanan isolasi pada trafo.

BAB V : PENUTUP

Sebagai penyelesaian tugas akhir ini, dapat dibuat pertimbangan dan rekomendasi berdasarkan temuan data penelitian dan analisis yang dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terhadulu tentang Analisis uji kelayakan tahanan isolasi Trafo Daya 30 MVA GI 150/20 telah dilakukan oleh para peneliti, antara lain:

- a. Analisis tahanan isolasi pada trafo di stasiun Wonogiri” dari hasil pengujian ini terdiri dari perhitungan nilai indeks polarisasi yang diperoleh diatas 1,1-1,25 dalam kondisi baik, dan jika nilai indeks polarisasi dibawah 1,1- 1,25, maka diperlukan layanan trafo. Menghitung delta tangen jika nilai delta tangen masih dalam kondisi baik, jika nilai delta tangen diatas 0,5% maka delta tangen dalam kondisi buruk dan perlu dilakukan pengolahan lebih lanjut jika nilai delta tangen baik.[3].
- b. Analisis hasil uji tahanan isolasi transformator berdasarkan uji polarisasi, delta tangen, rasio tegangan, BDV (tegangan tembus). Hasil penelitian merupakan hasil penelitian di stasiun Wonosari yang menunjukkan bahwa nilai indeks polarisasi mengalami penurunan di tingkat ground-baseline sebesar 0,95. Hasil stress ratio test menunjukkan kondisi masih baik dengan nilai rata-rata dibawah 0,5%. Pengujian nilai tangen delta menunjukkan penurunan pada mode CL sebesar 0,83-1,65%. Hasil pengujian di stasiun Sragen menunjukkan bahwa nilai indeks polarisasi masih sangat baik, nilai rata-rata di atas 1,1-1,25. Hasil stress ratio test menunjukkan kondisi masih baik dengan nilai rata-rata dibawah 0,5%. Pengujian nilai tangen delta menunjukkan penurunan nilai tangen delta negatif pada mode (UST) yaitu -0,12%, dan terdapat sedikit penurunan pada mode CL sebesar 0,55%..[4][4]
- c. Analisis uji isolasi transformator daya 60 mva pada gardu paralel [5]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semua tes dalam status baik atau memadai. Menurut standar IEEE Std 286TM-2000 (R2006), nilai indeks polarisasi adalah 1,42. Nilai rata-rata faktor disipasi (DF) adalah 0,11%..

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Gardu Induk

Gardu induk adalah tautan listrik yang terdiri dari struktur dan mesin listrik lainnya. Panduan operasi dan pemeliharaan berbasis PT. Gardu Induk Pusdiklat PLN berfungsi sebagai penghubung antara sistem tenaga listrik, yang terdiri dari berbagai perangkat listrik yang terpasang di satu lokasi, perangkat untuk menerima dan mentransmisikan energi tertentu, perangkat yang naik atau turun sesuai dengan level tegangan operasi, dan operasi switching dalam sistem tenaga listrik yang meningkatkan pasokan daya. sambungan sistem kelistrikan. Gardu Induk (GI) adalah sekelompok peralatan listrik tegangan tinggi yang mendistribusikan dan mengatur daya menggunakan unit transmisi utama (MTU). Trafo daya, trafo arus, trafo tegangan, rangkaian sirkuit, separator, dan arester adalah bahan transmisi primer (LA).:

Gardu induk berfungsi diantara lain :

- a. Pengaturan aliran tenaga listrik dari satu sistem transmisi ke sistem transmisi lainnya, yang kemudian disalurkan ke konsumen.
- b. Sebagai tempat untuk mengontrol berbagai perangkat listrik.
- c. Sebagai pelindung operasi sistem tenaga listrik.
- d. Sebagai tempat untuk menurunkan tegangan dari transmisi ke distribusi untuk konsumen.

Oleh karena itu, dari kelebihan dan kekurangan gardu induk tersebut, peralatan gardu induk harus memiliki sistem keandalan yang baik atau kualitas yang prima, sehingga dapat dikatakan harus beroperasi secara optimal agar tidak ditemui oleh masyarakat atau pelanggan karena masalah kinerja.

2.2.2. Trafo Daya

Transformator adalah perangkat elektromagnetik yang dapat diandalkan, sederhana, dan efisien yang digunakan untuk mengatur besaran tegangan AC. Sebuah transformator biasanya terdiri dari inti, gulungan primer, dan gulungan sekunder. Jumlah belitan pada kedua belitan mempengaruhi perubahan tegangan; dengan kata lain, tegangan berubah sesuai dengan jumlah kumparan. Trafo

memiliki lebih banyak putaran saat tegangan output naik. Trafo yang ideal menerapkan perbandingan pada persamaan (2.1)

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan: N_p = Banyak belitan di sisi Primer

N_s = Banyak belitan di sisi Sekunder

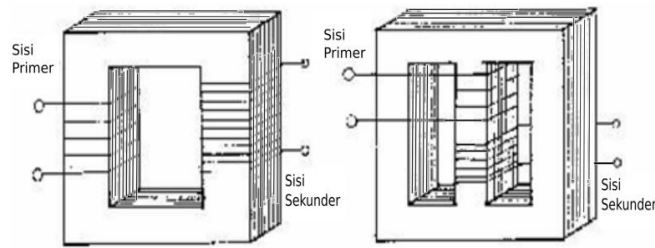
V_p = Tegangan di sisi Primer

V_s = Tegangan di sisi Sekunder

I_p = Arus Primer

I_s = Arus Sekunder

Transformator secara luas dapat dikategorikan menjadi dua jenis berdasarkan komponen strukturalnya: tipe inti besi dan yang disebut tipe cangkang. Setiap kaki memiliki dua kaki dalam tipe inti besi, dan setiap kaki dililitkan menjadi gulungan. Tipe inti, berdasarkan fungsinya, digunakan pada transformator dengan kemampuan daya yang besar. Model ini memiliki keuntungan menggunakan insulasi kawat rendah, dan tipe inti juga lebih hemat biaya untuk dioperasikan. Kerugian tipe ini dibandingkan tipe shell adalah kebocoran fluks yang sangat besar. Kaki tengah dari jenis cangkang berkaki tiga ini dibungkus dengan gulungan primer dan sekunder. Jenis ini biasanya sesuai untuk transformator dengan kemampuan daya yang lebih rendah. Jenis ini memiliki keuntungan karena mudah dibuat dan memiliki fluks bocor yang rendah, tetapi juga memiliki kelemahan yaitu membutuhkan inti besi yang besar, membuat penggunaan inti besi menjadi tidak ekonomis. [6], dan Gambar 2.1 mengilustrasikan hal ini.



Gambar 2. 1 Gambar transformator.

Gambar 2.1 menunjukkan dua buah belitan yang dihubungkan secara magnetik melalui inti. Belitan-belitan pada transformator tidak tersambung secara benar. Inti besi disebut bantalan. Penggunaan trafo yang sederhana dan handal menjadi alasan utama mengapa arus bolak-balik paling sering digunakan untuk kegiatan pembangkit listrik dan distribusi.

Prinsip kerja dari transformator ketika sumber tegangan dihubungkan ke belitan primer maka akan mengalir arus AC pada belitan primer. Tegangan yang mengalir pada lilitan primer menimbulkan medan magnet yang berubah pada intinya. Karena pembangkitan dan perubahan medan magnet, itu menghasilkan gaya gerak listrik yang diinduksi (GGL) di sisi primer.

Disuatu sistem tenaga listrik, pengelompokkan transformator dibagi menjadi 4 macam.

a. Transformator daya

Jenis transformator ini yang sering digunakan di Gardu Induk baik itu Gardu Induk pembangkit dan Gardu Induk distribusi, trafo ini memiliki daya tampung yang sangat besar. Fungsinya untuk mengaliri daya listrik dari tegangan yang tinggi ke tegangan yang rendah maupun sebaliknya.

b. Transformator Distribusi

Transformator ini fungsinya untuk menurunkan tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah dikarenakan fungsi transformator distribusi adalah untuk mendistribusikan energi listrik ke suatu GI pada konsumen atau masyarakat. Ciri dari transformator ini adalah jumlah belitan pada sisi primer jauh lebih banyak dibandingkan dengan belitan sekunder, tegangan pada sisi primer jauh lebih besar dibandingkan tegangan pada sisi sekunder terakhir kuat arus pada sisiprimer lebih kecil dibandingkan dengan kuat arus sisi sekunder.

c. Transformator Tegangan

Transformator tegangan adalah sebuah transformator yang dipergunakan untuk mengubah sistem tegangan yang lebih tinggi ke suatu sistem tegangan yang lebih rendah biasanya digunakan pada pengukuran agar lebih aman akurat dan teliti.

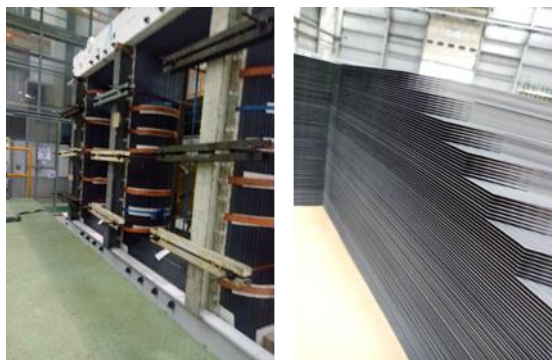
d. Transformator Arus

Transformator arus adalah sebuah transformator yang dipergunakan untuk mengukur arus yang besarnya ratusan atau ribuan ampere lebih yang mengalir pada suatu jaringan tegangan tinggi, transformator digunakan untuk sebagai alat ukur yang melindungi relai pada gardu induk, transformator arus mempunyai keunggulan pengukuran yang aman digunakan untuk pengukuran jumlah arus yang sangat besar dan juga tegangan tinggi.

2.2.3. Bagian-bagian Transformator

1. Inti Besi

Gulungan penghubung yang dapat digunakan untuk membawa fluks magnet adalah inti besi. Operasi normal membutuhkan kandungan silikon yang tinggi, permeabilitas tinggi, dan kerugian histeresis minimal pada besi yang digunakan dalam inti transformator. Fluks magnet yang diciptakan oleh arus yang melewati belitan dapat dibantu oleh inti besi. Itu sering dibangun dari sepotong besi tipis yang telah diisolasi untuk mengurangi panas yang dihasilkan oleh arus eddy, seperti kehilangan besi. Biasanya ada dua jenis inti yang digunakan dalam transformator, dan instalasi kumparan utama dan sekunder menentukan jenis inti yang digunakan. Jenis inti dan jenis cangkang adalah dua jenis inti. Contoh lempengan inti besi yang berada di trafo daya diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Inti besi.

2. Belitan Trafo

Pada trafo terdapat sebuah lilitan yang biasanya dililitkan pada inti besi. Belitan pada trafo adalah kawat hantar yang dialiri oleh arus pada belitan primer dan belitan sekunder yang dililitkan dibagian inti besi. Biasanya kumparan pada transformator disekat atau dibatasi menggunakan bahan isolasi padat (seperti Karton), pertinax dan lain sebagainya untuk membatasi kawat yang tidak beraturan. Umumnya, trafo mempunyai 2 belitan yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Jika belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan atau arus bolak-balik maka pada bagian belitan primer akan menghasilkan *fluks* (garis gaya) magnet. *Fluks* (garis gaya) magnet ini akan menginduksi tegangan, ketika belitan sekunder disambungkan dengan beban maka menghasilkan arus pada belitan tersebut. Karena itu, belitan trafo adalah alat untuk mengubah arus dan tegangan. Banyak belitan pada trafo dibagian primer dan sekunder itu menentukan apakah transformator digunakan untuk (*step up*) penaik tegangan atau (*step down*) penurun tegangan. Contoh tatanan pada kumparan trafo dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 tatanan kumparan dari Trafo[2]

3. Minyak Trafo

Minyak trafo berfungsi yaitu sebagai bahan isolasi dan juga untuk pendingin di dalam trafo. Bahan isolasi, minyak akan mengalir ke bagian antara belitan primer dan belitan sekunder agar tidak menyebabkan terjadinya tegangan tembus atau (*breakdown voltage*) antara kumparan tersebut. Oli trafo bekerja dengan baik sebagai pendingin karena dapat secara efektif menghilangkan panas dari kumparan.

Minyak *Shel Dialla B* adalah salah satu yang paling sering digunakan di Indonesia. Kebutuhan minyak trafo harus dipenuhi sesuai dengan hal-hal berikut karena karakteristik minyak trafo sebagai transmisi panas (bersirkulasi) dan bertindak sebagai isolator (memiliki tegangan tembus tinggi):

- a. Dielektrik harus berkekuatan tinggi
- b. Sebagai penyalur panas yang baik, massa minyak yang kecil, sehingga partikel minyak mengendap dengan cepat.
- c. Viskositas yang rendah, sehingga lebih mudah berganti, dan fungsi pendinginan yang menjadi lebih baik.
- d. Dapat berbahaya karna titik nyala yang tinggi dan sulit menguap
- e. Bahan isolasi padat dan sifat kimianya harus stabil supaya tidak mudah rusak

4. Tangki konservator

Tangki konservator digunakan sebagai tempat untuk menampung minyak transformator pada saat terjadinya pemuaiannya didalam transformator, dalam kondisi tertentu minyak pada transformator memuai oleh suhu panas akibat temperatur yang tinggi. Hasil pemuaiannya minyak disimpan dalam tempat yang disebut tangki konservator. Ketika terjadi suhu naik pada saat trafo bekerja atau beroperasi maka volume bertambah sehingga minyak isolasi akan memuai dan akan naik ke permukaan transformator. Sebaliknya apabila terjadi penurunan suhu didalam transformator maka kondisi dari minyak akan menyusut dan mengakibatkan volume minyak didalam transformator akan menurun. Seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 *Tangki Konservator*

5. Bushing

Menurut Gambar 2.5, busing mengacu pada hubungan antara kumparan transformator dan jaringan luar melalui konduktor yang dibungkus dengan isolator yang berfungsi sebagai isolator antara konduktor dan tangki transformator.



Gambar 2. 5 *Bushing*

6. Pendingin

Panas tinggi adalah alasan utama kegagalan transformator. Temperatur tinggi biasanya disebabkan oleh berbagai sumber, termasuk kehilangan besi, kelebihan beban, arus eddy, air, karat, proses oksidasi, dan lain-lain. Oleh karena itu, trafo membutuhkan bantuan sistem pendingin untuk mengelola panas tinggi yang

dihasilkan. Panas yang tinggi ini dengan cepat merusak peralatan di dalam trafo, menurunkan kualitasnya dan mempercepat masa pakai isolasi kertas dan minyak. Oli trafo berfungsi sebagai bahan pendingin sekaligus sebagai isolator trafo.. Panas ekstra dari belitan akan mengikuti oli di sepanjang jalur penggantian pendingin kipas saat oli diganti. Kipas angin dan pompa sirkulasi merupakan perangkat yang dapat membantu proses pendinginan bekerja lebih efektif.

2.2.4. Isolator

Bahan yang bertindak sebagai isolator tidak menghantarkan listrik. Selain itu, isolator berfungsi sebagai penghalang antara konduktor aktif dan komponen lain selain berfungsi sebagai penyangga konduktor. Karena konduktivitasnya yang lemah, dapat disebut sebagai isolator karena tidak banyak muatan elektron bebas yang ada dalam konduktornya (listrik atau panas). Pembahasan tentang isolator dikenal dengan metode isolasi termal. Isolasi termal adalah metode ataupun proses digunakan agar memperkecil perpindahan panas, bisa juga untuk mencegah perbedaan suhu supaya tidak terjadi *losses*. Model ini memiliki beberapa pertimbangan ciri khas dan tebal material yang dipergunakan. Selain itu, tebal tidaknya isolasi juga mempengaruhi terhadap isolasi itu sendiri. Isolasi yang gagal saat beroperasi bisa berdampak keburukan pada suatu peralatan, maka dari itu berdampak pada kelanjutan sistem yang akan tersendat.

Flashover dan pelepasan portal adalah dua istilah yang sering digunakan dalam pengujian. Peristiwa pelepasan percikan listrik yang dikenal sebagai pelepasan sebagian terjadi pada bahan isolasi padat. Peristiwa yang memungkinkan pembentukan rongga isolasi yang berdekatan dengan elektroda, rongga antara elektroda, titik elektroda dengan bentuk saluran, atau rongga isolasi dengan bentuk saluran. Bahan isolasi yang banyak digunakan yaitu isolator gas, isolator padat dan isolator cair.

a. Isolator Padat

Jenis isolator ini biasanya digunakan dengan kabel tegangan tinggi. Isolator padat lebih tahan daripada isolator gas, tetapi lebih sulit untuk dikembalikan ke keadaan awal setelah kegagalan. Mereka termasuk PVC, keramik, dan kertas.

b. Isolator Cair

Manfaat isolator cair adalah pemisah antara unit yang memiliki beda tegangan supaya antara bagian tidak terjadi percikan bunga api. Dilain itu, isolator ini dapat dipergunakan untuk pendingin yang sering dipergunakan pada transformator, pemutus tegangan dan lainnya. Salah satu contoh merupakan minyak trafo.

c. Isolator Gas

Rangkaian tegangan tinggi memiliki (*switching*) waktu buka dan juga tutup. Hal yang bisa menyebabkan (*arching*) busur api penyebab (*transient*) tegangan sementara. Busur api harus segera padam, jika tegangan sementara (*transient*) ini dibiarkan dalam jangka waktu yang panjang, peralatan yang terpasang akan cepat rusak. Disaat tegangan rendah dan busur api tidak terlalu besar maka media udara sudah dapat dipadamkan. Contoh dari isolator gas ini adalah SF₆ (*sulfur heksafluoride*).

2.2.5. Pengujian Trafo

Tes ini merupakan prosedur untuk mempelajari lebih lanjut tentang kondisi transformator. Evaluasi dan analisis dilakukan berdasarkan data yang dikumpulkan untuk memutuskan apa yang harus dilakukan selanjutnya. Pengujian trafo dilakukan untuk menjaga trafo dalam kondisi baik dan memastikannya dapat berfungsi sebagaimana mestinya. untuk menjaga ketersediaan, ketergantungan, dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Sistem isolasi adalah komponen terpenting dari peralatan listrik tegangan tinggi. Transformator menggunakan berbagai bahan insulasi, termasuk insulasi kertas (padat) dan minyak (cair). Karena memiliki dampak yang signifikan pada umur pendek transformator, isolasi merupakan komponen penting. Ada dua kategori untuk tes ini, yaitu: pada saat trafo dioperasikan dan pengujian dalam keadaan mati atau padam.

Tujuan pengujian transformator saat kondisi beroperasi adalah bertujuan mengetahui kondisi trafo tanpa perlu memadamkan trafo. pengujian yang dilakukan meliputi:

a. *Dissolve Gas Analisis (DGA)*

b. *Thermovisi / Thermal image*

- c. Pengujian Furan
- d. Pengetesan mutu oli isolasi
- e. Pengetesan *portial discharge*
- f. Pengetesan *corrosive sulfur*
- g. *Noise* dan *Vibrasi*

Pengujian trafo ini dalam kondisi padam karna pengujian yang dilaksanakan pada saat kondisi dari trafo tidak bertegangan. Pengujian trafo dilakukan secara berjangka, dalam hal ini dilakukan pengujian setiap 2 tahun sekali (dua tahunan) dan mengacu pada *instruction manual* dari perusahaan yang membuat trafo, standar-standar yang digunakan adalah (ANSI, IEC, CIGRE, dll.) dan berpengalaman operasi di lapangan. Pengujian trafo dalam keadaan padam atau saat dimana trafo menagalami kinerja yang rendah saat beroperasi.

Pengujian ini dilakukan pada komponen dari trafo yang penting, antara lain busing, belitan atau kumparan, *on load tap changer* (OLTC) dan proteksi internal pada trafo[2].

2.2.6. Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi tergantung pada kondisi peralatan bernilai tahanan terhadap tegangan untuk terhindar dari hubung singkat dan keburukan yang lain. Resistansi yang berkembang antara dua komponen tegangan dan ground dikenal sebagai resistansi isolasi. Hambatan antara dua konduktor yang dibatasi oleh bahan isolasi dikenal sebagai resistansi isolasi (IEV, 212-11-07). Arus bocor melalui isolasi diukur dengan resistansi isolasi. Temperatur dan lama waktu belitan terkena tegangan adalah dua elemen yang harus dipertimbangkan saat mengukur resistansi[7].

Untuk menentukan apakah suatu peralatan aman untuk terkena tegangan atau tidak, digunakan tahanan isolasi. Pada peralatan yang menghubungkan komponen yang menerima tegangan ke bodi yang diarde, resistansi isolasi diukur. Namun, penting untuk diingat bahwa peralatan tidak sedang digunakan atau dihidupkan saat resistansi isolasi diukur (mati). Ada banyak jenis peralatan listrik, termasuk: trafo, kabel, sakelar, motor, dan lain sebagainya, ditutup dengan isolasi

listrik dengan waspada. Untuk menyalakan peralatan listrik, peralatan biasanya terbuat dari tembaga atau aluminium, yang dikenal sebagai penghantar arus listrik yang baik. Konduktor, yang dimaksudkan untuk menahan arus dan membuatnya tetap bergerak di sepanjang konduktor, harus berhadapan dengan lapisan isolasi. Untuk memahami bagaimana resistansi isolasi diukur, seseorang harus terbiasa dengan persamaan langsung, khususnya “Hukum Ohm” (2.2).

$$V = I \times R \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan

V: Tegangan (Volt)

I: Kuat arus (Ampere)

R: Tahanan (Ohm)

Semakin tinggi tegangan, semakin besar arus. Juga, semakin rendah tegangan yang ada, semakin besar arus yang diperoleh pada tegangan yang sama. Tegangan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak arus isolasi. Kecilnya arus yang didapat pada lapisan isolasi tidak merusak lapisan isolasi yang baik, tetapi menjadi masalah jika lapisan isolasi tersebut mengalami kerusakan [8].

Hubungan antara hambatan (resistance) dan arus dan tegangan ditemukan oleh seorang fisikawan bernama George Simon Ohm. Ohm didapati bahwa nilai arus dipengaruhi oleh tegangan dan hambatan (resistance).

Kita telah mengetahui pada dasarnya, isolasi yang baik berarti resistansi yang relatif tinggi terhadap arus. Selain itu hambatan yang besar juga berarti memiliki kemampuan untuk mempertahankan daya tahan yang tinggi. Kita dapat melakukan pengukuran rutin untuk mengetahui tren kondisi isolasi.

Kebenaran, tahanan isolasi bisa lebih tinggi atau lebih rendah tergantung pada faktor seperti suhu dan kelembaban. Penurunan isolasi biasanya turun secara bertahap jika diperiksa secara berkala, yang disebut dengan pemeliharaan preventif. Pemeriksaan semacam ini memungkinkan adanya perbaikan terencana sebelum terjadi kegagalan atau kerusakan. Jika pemeriksaan rutin tidak dilakukan, peralatan listrik dapat berbahaya apabila disentuh ketika dalam keadaan bertegangan, karena isolasi itu sendiri telah menjadi konduktor parsial.

Dalam keadaan saat ini, sejumlah penyebab, seperti kerusakan mekanis pada peralatan, suhu tinggi, kotoran, uap korosif, kelembaban, dan lain-lain, dapat mengakibatkan penurunan resistansi isolasi atau kerusakan isolasi. Komponen-komponen yang telah dibahas dapat bercampur dengan tegangan listrik, seperti yang sudah diketahui umum, yang sudah ada. Ketika isolator memiliki retakan, kelembaban, atau kotoran asing di permukaannya, variabel-variabel ini dapat menyebabkan insulasi menurun, yang dapat mengakibatkan resistansi (resistensi) listrik yang rendah..

Prosedur yang sama harus digunakan setiap kali untuk inspeksi rutin. Dengan kata lain, menggunakan koneksi uji yang sama, voltase uji yang sama, dan mengingat untuk melakukan pengukuran dengan tetap memperhatikan suhu dan kelembaban.

Standar global untuk mengukur tahanan isolasi adalah IEEE 43-2000, sedangkan PLN menggunakan katalog VDE 228/4 yaitu $> 1M/1 \text{ kV}$. Indeks Polarisasi (IP), pengukuran yang digunakan untuk menentukan apakah peralatan masih layak untuk digunakan atau dioperasikan, dikenal sebagai indeks polarisasi transformator. Indeks yang dikenal sebagai penyerapan dielektrik, yang diperoleh dari pembacaan terus menerus selama periode waktu yang lama pada sumber tegangan konstan, sering digunakan untuk menampilkan data resistansi isolasi transformator. Setelah sepuluh menit pengukuran terus menerus, kapasitansi tinggi isolasi trafo dapat diisi. Jika insulasi kering dan bersih, pengukuran resistansi akan meningkat lebih cepat. Indeks Polarisasi (IP) atau Indeks polarisasi adalah rasio pengukuran 10 menit dengan pengukuran 1 menit (PI). Lapisan isolasi telah terkontaminasi jika nilai IP lebih rendah dari nilai standar.[9]

2.2.7. Tingkat Ketahanan Isolasi (*Basic Impuls Insulation Level/BIL*)

Ketahanan oli isolasi bisa berpengaruh saat kondisi suhu dan kelembaban udara di daerah sekitar. Temperatur minyak yang tinggi dan oksigen atmosfer akan menyebabkan permukaan minyak teroksidasi, meningkatkan keasaman minyak. Pengukuran kerusakan (deterisasi) dari bahan isolasi adalah kandungan asam dari minyak. Dinding transformator dan lapisan insulasi belitan akan menghasilkan

endapan jika keasaman oli berlebihan, yang akan membuat proses pendinginan menjadi sulit. Endapan yang hanya setebal 0,2 mm hingga 0,4 mm akan menaikkan suhu di sekitarnya. 10°C - 15°C .

Selain itu, endapan ini berpotensi memicu percikan api di antara komponen transformator yang terbuka. Jika oli mengandung uap air, akan terbentuk jalur yang dapat menyebabkan korsleting. Kelembaban dapat mempengaruhi komponen transformator seperti gulungan isolasi, yang dapat merusak kumparan kawat tembaga transformator, selain mengurangi resistansi isolasi minyak. Untuk mencegah efek negatif dari kerusakan isolasi yang menyebabkan pemadaman, perawatan oli transformator secara rutin sangat disarankan. Sebuah transformator yang telah berfungsi dengan sukses untuk waktu yang lama dapat tiba-tiba gagal karena kegagalan isolasi. Cara terbaik untuk menjaga kondisi operasional trafo tetap terlindungi sehingga umur fungsinya bisa relatif lama adalah melalui perawatan rutin minyak trafo.[9].

2.2.8. Perawatan Trafo

Istilah "pemeliharaan" mengacu pada serangkaian prosedur atau tindakan yang dapat digunakan untuk menjaga agar peralatan listrik tegangan tinggi tetap berfungsi dengan baik dan untuk mencegah gangguan agar tidak merusaknya. Untuk menjaga kelangsungan pelayanan kelistrikan, maka pemeliharaan juga dapat diartikan sebagai upaya untuk menjaga atau memulihkan peralatan agar dapat berfungsi secara normal dan dengan keandalan yang tinggi.

Untuk menjamin antara lain kontinuitas dan keandalan pendistribusian tenaga listrik, peralatan listrik tegangan tinggi harus dipelihara.:

- a. Memperpanjang masa pakai peralatan.
- b. Untuk meningkatkan keadalan, efesiensi, dan ketersediaan.
- c. Mengurangi risiko kerusakan alat.
- d. Meningkatkan keamanan pada peralatan
- e. Agar tidak mengalami gangguan pada saat beroperasi.

2.2.9. Pengetesan Indeks Polarisasi pada trafo tenaga

Status insulasi antara dua belitan atau antara belitan dan tanah dapat dinilai dengan mengukur tahanan insulasi pada belitan. Anda dapat menemukan resistansi isolasi dalam megaohm dengan mengirimkan sumber arus DC. Perangkat yang dikenal sebagai megaohm meter yang biasanya memiliki kapasitas pengujian 500, 1000, atau 2500 kV digunakan dalam situasi ini.

Arus bocor melalui insulasi atau saluran kebocoran pada permukaan luar menentukan resistansi insulasi yang terukur. Suhu, kelembaban, dan kotoran yang menempel pada insulasi semuanya berdampak pada jalur kebocoran di permukaan. Meskipun kebocoran arus tidak dapat dicegah, itu harus mematuhi syarat dan ketentuan yang relevan.. Perhitungan indeks polarisasi adalah seperti persamaan (2.3).

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1} \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan :

IP = Indeks Polarisasi

R10 = Pengujian yang dilakukan pada menit ke-10

R1 = Pengujian yang dilakukan pada menit ke-1[10]

Rekomendasi indeks polarisasi Trafo tenaga ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Standar indeks polarisasi trafo tenaga menggunakan IEEE 43-2000

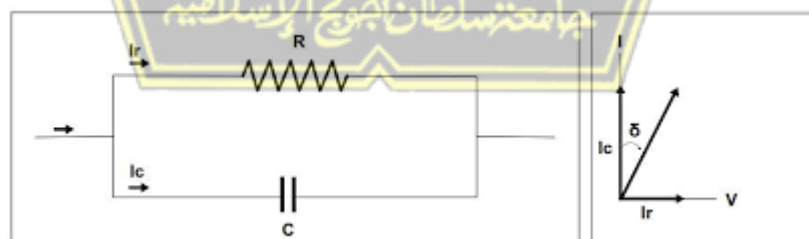
Hasil pengujian	Keterangan	Rekomendasi
<1	Berbahaya	Ditindak lanjuti
1-1,1	Buruk	Ditindak lanjuti
1,1-1,25	Dipertanyakan	Uji kadar minyak, uji tan delta
1,25-2	Baik	-
>2	Sangat baik	-

2.2.10. Pengujian tangen delta

Kegagalan peralatan listrik tegangan tinggi dalam pengoperasiannya seringkali disebabkan oleh memburuknya kondisi isolasi akibat kegagalan komponen. Tan delta atau biasa dikenal dengan istilah loss angle atau disipasi factor test merupakan metode diagnostik elektrik untuk mengetahui kondisi insulasi. Jika insulasi tidak rusak, maka insulasi akan menjadi kapasitif sempurna, seperti isolator antara dua elektroda pada kapasitor.

Kapasitor yang sempurna akan memimpin tegangan saat menggunakan daya AC pada sudut 90° derajat. Jika insulasi terkontaminasi maka nilai resistansi insulasi akan turun, yang akan berdampak pada tingginya arus resistansi yang melewati insulasi. Isolasi tidak lagi berfungsi sebagai kapasitor yang ideal. Tegangan dan arus sekarang memiliki deviasi kurang dari 90° satu sama lain. Derajat kontinuitas dalam insulasi diwakili oleh besarnya perbedaan perpindahan 90° . [11].

Ini adalah contoh gambar rangkaian ekivalen dari isolasi dan diagram phasor arus kapasitansi dan arus resistif dari sebuah isolasi. Dan mengukur nilai I_r / I_c dapat diprediksi kualitas dari isolasi. Isolasi yang sempurna ini, sudut akan mendekati nol. Meningkatnya sudut akan meningkatkan arus resistif yang terlewat isolasi yang berarti kontaminasi. Bertambahnya besar sudut akan semakin buruk kondisi suatu isolasi. Dicontohkan pada Gambar 2.6.



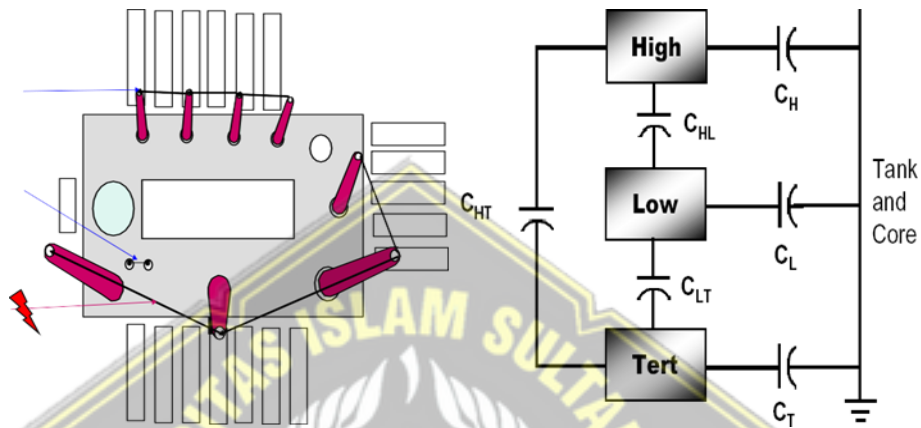
Gambar 2. 6 Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian tangen delta

Sistem isolasi pada trafo umumnya terdiri atas isolasi belitan beserta ground dan dua bagian belitan dengan isolasi.

- Primer – ground
- Sekunder – ground
- Tertier – ground

- Primer – sekunder
- Sekunder – tertier
- Primer – tertier

Adapun contoh rangkaian ekuivalen isolasi dan skema pengujian tan delta (2.7).



Gambar 2. 7 Rangkaian ekuivalen isolasi pada trafo dan skema pengujian tan delta

Memprediksi keadaan isolasi pada transformator dapat diketahui dengan hasil pengujian tan delta. Dari data interpretasi hasil pengujian merujuk ke aturan standar ANSI C57.12.90.

Perhitungan tangen delta menggunakan persamaan (2.4). sampai (2.11).

$$S = \frac{V^2}{Z} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$Z = \frac{V^2}{S} \dots\dots\dots(2.5)$$

Mencari Xc :

$$Xc = \frac{V^2}{Q} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$Xc = \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana, Xc di dapat persamaan (2.8). sampai (2.10). :

$$Q = \frac{V^2}{Xc} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$Q = \frac{V^2}{\frac{1}{\omega C}} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$Q = V^2 \omega C \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

Sehingga, persamaan tangen delta didapat (2.11). :

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

dengan : δ = Delta

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

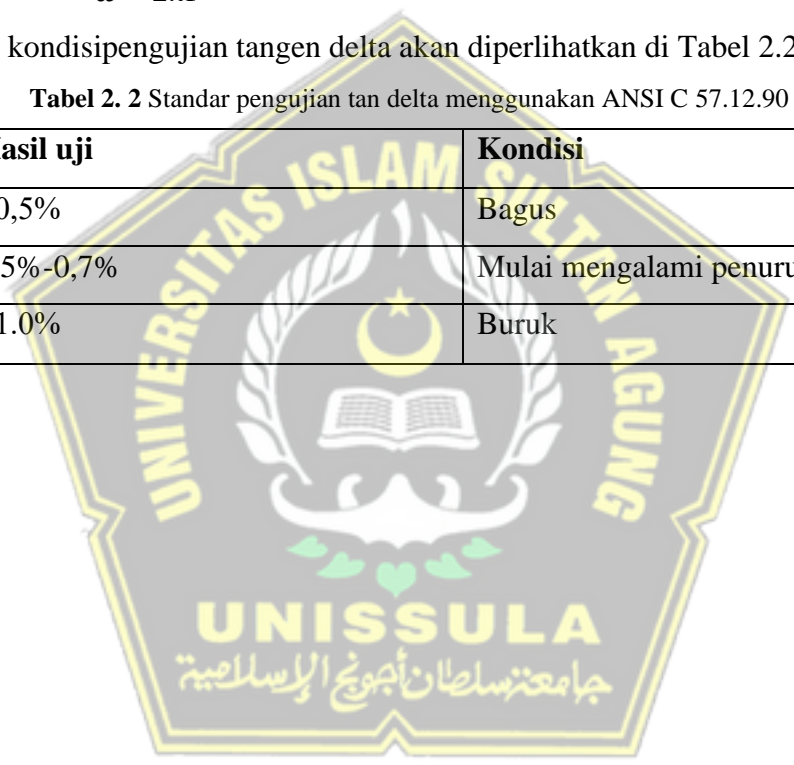
C = *Capacitance*(F)

$\omega = 2\pi f$

Contoh kondisipengujian tangen delta akan diperlihatkan di Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Standar pengujian tan delta menggunakan ANSI C 57.12.90 [10]

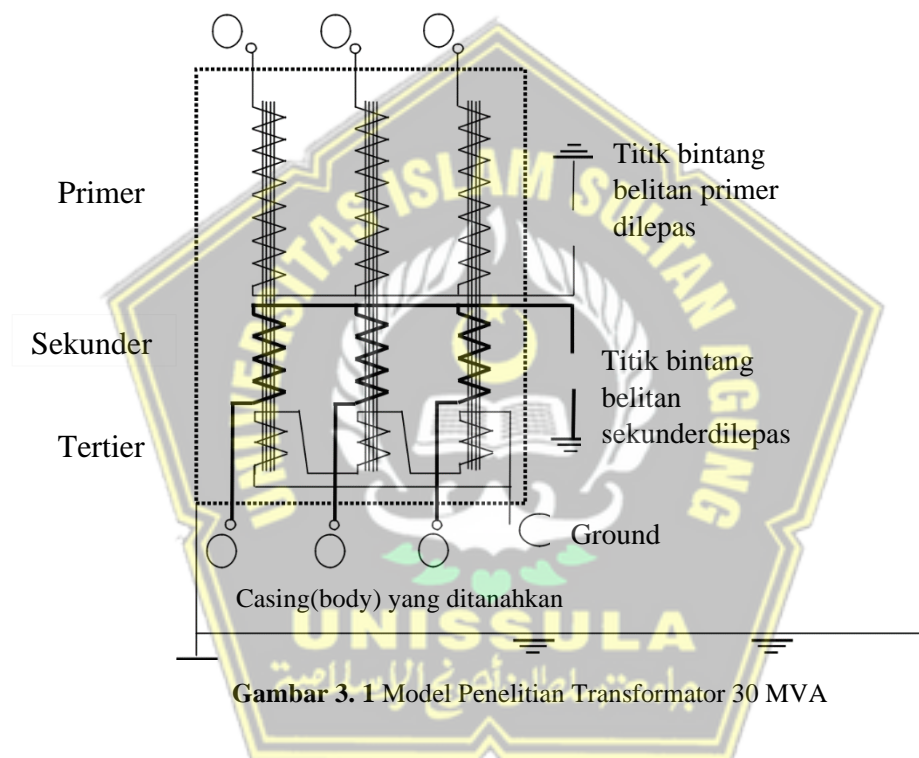
Hasil uji	Kondisi
$\leq 0,5\%$	Bagus
0,5%-0,7%	Mulai mengalami penurunan
$\geq 1.0\%$	Buruk



BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Model Penelitian

Model penelitian ini merupakan objek transformator tenaga pada gardu induk 150 Kv PT APF yang dilakukan pengujian tahanan isolasi pada bagian belitan, yang di tunjukan pada Gambar 3.1.

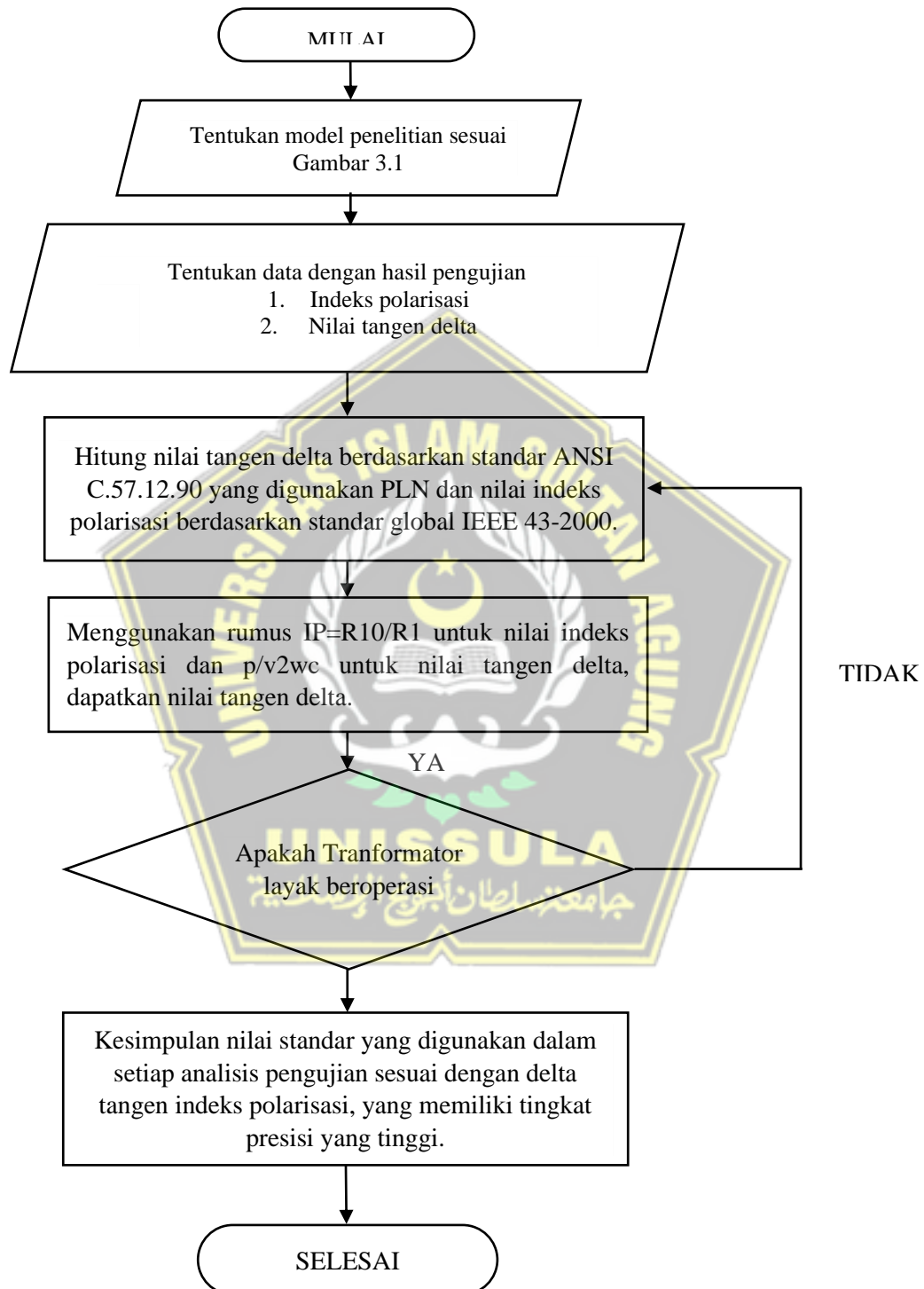


3.2. Objek Penelitian

Objek yang dilakukan pada penelitian ini yaitu :

- a. Trafo tenaga dengan kapasitas 30 MVA di Gardu Induk (GI) 150/20 kV PT. Asia Pacific Fibers Tbk bertempat di Kaliwungu, Kendal, Jawa Tengah

3.3. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram Alir

3.4. Data Penelitian

Adapun data penelitian yang akan di ambil sebagai berikut :

- a. Data transformator tenaga di Gardu Induk PT APF
- b. Data Pengujian Indeks polarisasi transformator 1 dan transformator 2 tahun 2021 di Gardu Induk PT APF
- c. Pengujian tangen delta transformator 1 dan transformator 2 tahun 2020 di Gardu Induk PT APF

3.5. Langkah Langkah Penelitian

1. Observasi Lapangan

Peneliti mewawancarai pengelola gardu induk PT APF 150 kV tentang transformator daya khususnya bagian tahanan isolasi, data uji tahanan isolasi terakhir yang dilakukan dan metode pengujian yang digunakan pada Gardu Induk 150 kV. PT APF.

2. . Data

Data di dapat dari Gardu Induk PT. APF 150 kV. Terutama komputasi. Berikut data yang diperoleh dari data hasil survey:

- a. Transformator Daya

Berikut spesifikasi trafo yang diperoleh dari data hasil survey, lihat Tabel 3.1:

Tabel 3. 1 Spesifikasi Transformator Gardu Induk 150 Kv PT APF

<i>Merk</i>	Pauwels	<i>Circuit</i>	TRAFO
	Trafo	<i>Designation</i>	
<i>Yr.manufactured</i>	2010	<i>Configuration</i>	Y-Y-D
<i>VA Rating</i>	60 MVA	<i>Oil Volume</i>	16500 kg
<i>KV Voltage</i>	150,20	<i>Class</i>	ONAN/ONAF
<i>Serial number</i>	3011070078	<i>Impedansi</i>	13,577%

- a. Data (IP) Indeks Polarisasi di trafo 1 dan trafo 2 tahun 2021 di Gardu Induk 150 Kv PT APF Kendal .

- b. Data tan delta di trafo 1 dan trafo 2 tahun 2021 di Gardu Induk 150 Kv PT APF Kendal.

3. Proses pengambilan data

- a. Pengujian Indeks Polarisasi

Merupakan suatu pengukuran yang digunakan untuk memberikan suatu informasi mengenai keadaan isolasi antara belitan dengan belitan ataupun belitan dengan ground. Dengan memberikan sumber tegangan DC akan diperoleh nilai indeks polarisasi dalam mega ohm. Dalam hal pengukuran digunakan alat yang bernama Megaohm merk METRISO type 5000 AK dan type MJ 15. Yang di tunjukan pada Gambat 3.3.



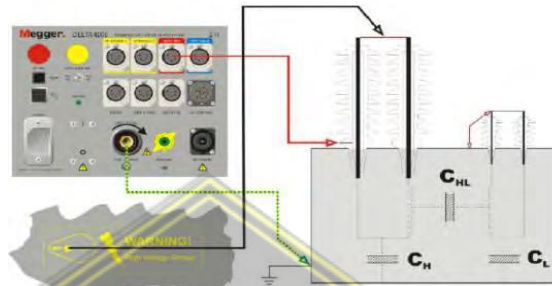
Gambar 3. 3 Megger METRISO type 5000 AK dan type MJ 15[9]

Pengukuran pada pengujian tahanan isolasi menggunakan indeks polarisasi adalah arus bocor yang melalui permukaan isolasinya maupun melalui permukaan eksternal. Faktor-faktor yang mempengaruhi penurunan isolasi adalah kelembaban, suhu, dan jalur bocor di permukaan pengaru oleh kotoran yang menempel pada isolasi, selain itu kebocoran pada arus tidak dapat dihindari, namun harus lolos syarat ataupun standar yang ditetapkan agar trafo tidak mengalami kerusakan.

- b. Pengujian Tangen delta

Tangen delta dilakukan untuk memberikan suatu informasi mengenai kualitas isolasi yang ada dibagian belitan apabila suatu isolasi terbebas dari kontaminasi maka isolasi tersebut akan bersifat kapasitif sempurna. Proses pengujiannya dengan membersihkan bagian transformator dan isolasinya kemudian melepaskan seluruh konduktor pada bushing setelah itu

menghubungkan kabel kontrol HV, LV dan kabel ground dari alat uji ke objek uji dan setelah itu melakukan proses pengujian. Suatu nilai tangen delta yang bagus menurut ANSI C adalah yang nilainya dibawah 0,5%. Dicontohkan pada Gambar 3.4



Gambar 3. 4 megger delta 4000[9]

Pengukuran indeks polarisasi menggunakan alat ukur megger, dengan menyiapkan peralatan saat pengujian, memastikan peralatan yang di gunakan dalam keadaan baik, mempersiapkan sumber tegangan, melakukan pengukuran dengan menggunakan megger untuk mengetahui nilai indeks polarisasi tangen delta sesuai standar yang diizinkan.

Pengukuran untuk mendapatkan hasil yang akurat dilakukan dengan jangka waktu 1 menit dan 10 menit untuk mengetahui nilai selisih antara pengukuram waktu 1 menit dibandingkan waktu 10 menit yang lebih stabil, sehingga nilai indeks polarisasi dapat di ketahui, apakah sesuai dengan standar yang diizinkan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1. Hasil Penelitian

Data ini di peroleh saat observasi dilapangan mengenai tahanan isolasi trafo dapat mengetahui bagaimana cara pemeliharaan trafo dan hasil uji pada trafo di Gardu Induk 150 kV PT APF. Data yang di peroleh dan analisis tahanan isolasi dari pengujian ini antara lain *Polaritation Indeks* dan tan delta di trafo pada Gardu Induk 150 kV PT APF. Dalam bab ini, data resistansi isolasi untuk Transformer 1 dan 2 serta data delta tan untuk Transformator 1 dan 2 2020 dibahas. dari masing-masing metode yang kemudian dinilai apakah masih dalam kategori layak dioperasikan atau harus memerlukan pemeliharaan lebih lanjut dengan mengacu pada standar-standar yang digunakan pada pengujian tahanan isolasi.

4.2. Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi

Data tahanan isolasi yang diperoleh di PT. PLN (Persero) Gardu Induk PT APF 150 kV ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan 4.2.

Tabel 4. 1 data indeks polarisasi transformator 1 tahun 2021

Channel	CH1
Capacitance @ 50 Hz	5,367 Nf
Capacitance @ 60 Hz	5,366 nF
Tan δ / power factor @ 50 Hz	0,24% / 0,24%
Tan δ / power factor @ 60 Hz	0,24% / 0,24%
C (10 mHz) / C (50 Hz)	1,410
Barriers (X)	22 %
Spacers (Y)	16 %
Polarization index	1,924
DAR	1,248

Tabel 4. 2 data indeks polarisasi transformator 2 tahun 2021

Channel	CH1
Capacitance @ 50 Hz	5,170 nF
Capacitance @ 60 Hz	5,167 nF
Tan δ / power factor @ 50 Hz	0,65% / 0,65%
Tan δ / power factor @ 60 Hz	0,61% / 0,61%
C (10 mHz) / C (50 Hz)	1,233
Barriers (X)	10 %
Spacers (Y)	10 %
Polarization index	1,102
DAR	1,037

Resistansi isolasi belitan diukur dengan indeks polarisasi. Ketika pengujian ini dilakukan sekali dan dua kali, tegangan DC kondisi tunak akan menghasilkan jeda waktu masing-masing 10 menit (R10) dan satu menit (R1). Kedua nilai resistor sebanding jika diasumsikan bahwa R1 dan R10 diukur pada suhu yang sama.. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui apakah kondisi peralatan masih beroperasi atau sudah waktunya untuk diservis.

Dari hasil pengukuran resistansi isolasi di trafo di gardu induk 150 kV PT APF pada tahun 2021 didapatkan nilai indeks polarisasi pada traformator 1 primer-sekunder adalah 1,924 dan transformator 2 primer-sekunder adalah 1,102. Sedangkan menurut aturan Standar indeks polarisasi trafo tenaga IEEE 43-2000, nilai indeks polarisasi dikatakan baik apabila nilainya diatas 1,25. Jadi untuk kondisi nilai indeks polarisasi transformator 1 dalam kategori baik dan untuk transformator 2 dalam kategori *dipertanyakan*.

4.3. Data Tahanan Isolasi Menggunakan Tan Delta

Isolasi pada transformator yang dilakukan pengujian tangen delta diibaratkan seperti sebuah kapasitor. Kapasitor yang murni atau yang baik adalah apabila arusnya mendahului tegangan (leading) sebesar 90 derajat. Akan di tunjukan pada tabel 4.2 dan 4.3 berikut:

Tabel 4. 3 data tangen delta trafo 1 tahun 2021

No	Meas.	Tan δ	Freq.	V out	I out (mA)	Watt losses	DF meas	DF corr	Cap. Meas pF
1	ICH+ICH	0,504358	50,0	1000	29,1	1,4674	0,50	0,37	9266,
	L	3	0 Hz	0	2	9	%	%	3
2a	ICH	0,854099	50,0	1000	12,2	1,0458	0,85	0,62	3899,
		7	0 Hz	0	6	5	%	%	7
3a	ICHL	0,248501	50,0	1000	16,8	0,4187	0,25	0,18	5366,
			0 Hz	0	6	6	%	%	7
Cross check: calculated ICHL					16,8	0,4216	0,25		5366,
					6	4	%		6

Tabel 4. 4 data tangen delta trafo 2 tahun 2021

No.	Meas.	Tan δ	Freq.	V out	I out (mA)	* Watt losses	DF meas	DF corr	Cap. Meas
1	ICH+ICHL	1,1731781	50,00 Hz	10000	29,73	3,48515	1,17%	0,90%	9460,8
2a	ICH	1,7793714	50,00 Hz	10000	13,49	2,39692	1,78%	1,37%	4290
3a	ICHL	0,6732125	50,00 Hz	10000	16,24	1,09307	0,67%	0,52%	5170,9
Cross check: calculated ICHL					16,25	1,08823	0,67%		5170,8

Teknik diagnostik listrik yang disebut tangen delta digunakan untuk menilai keadaan insulasi. Transformator dianggap sebagai kapasitor murni. Kehilangan daya pada tangen delta sebagai akibat dari kapasitor yang rusak. Perhitungan nilai tangen delta diperlukan untuk menentukan apakah masih dalam kondisi prima; semakin rendah nilai tangen delta, semakin baik. Jika kondisi tangen delta buruk, maka akan memiliki nilai yang lebih besar.

Keterangan pengukuran pada tabel 4.2 dan 4.3 :

ICHL: Injeks Capacitance high low (titik pengukuran di sisi primer trafo dengan sekunder trafo)

ICH : Injeks Capacitance high (titik pengukuran di sisi premer trafo dengan grounding trafo)

Ada macam istilah saat ukur tangen delta yaitu:

UST : *Ungrounded Speciment Test* (tes tidak didukung) diketanahkan

GST : *Grounded Speciment Test* (tes didukung) diketanahkan

GSTg: *Grounded Speciment Test with guard* (menguji *guard*)

Didapat persamaan 2.11 tangen delta sebagai berikut

Hasil hitung tan delta trafo 1 tahun 2021 Gardu Induk 150 kV PT APF yang ditunjukkan pada tabel diatas ICH + ICHL :

Diketahui :

P : 1,467 watt

V : 10.000 Volt

C : $9266,3 \times 10^{-12}$ F

ω : $2 \pi f$

$$\begin{aligned} \text{Tan } \delta &= \frac{1,467}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 9266,3 \times 10^{-12}} \times 100\% \\ &= 0,5\% \end{aligned}$$

Hasil hitung tan delta trafo 2 tahun 2021 di Gardu Induk 150 kV PT APF yang ditunjukkan pada tabel diatas ICH + ICHL :

Diketahui :

P : 3,485 Watt

V : 10000 Volt

C : $9460,8 \times 10^{-12}$ F

ω : $2 \pi f$

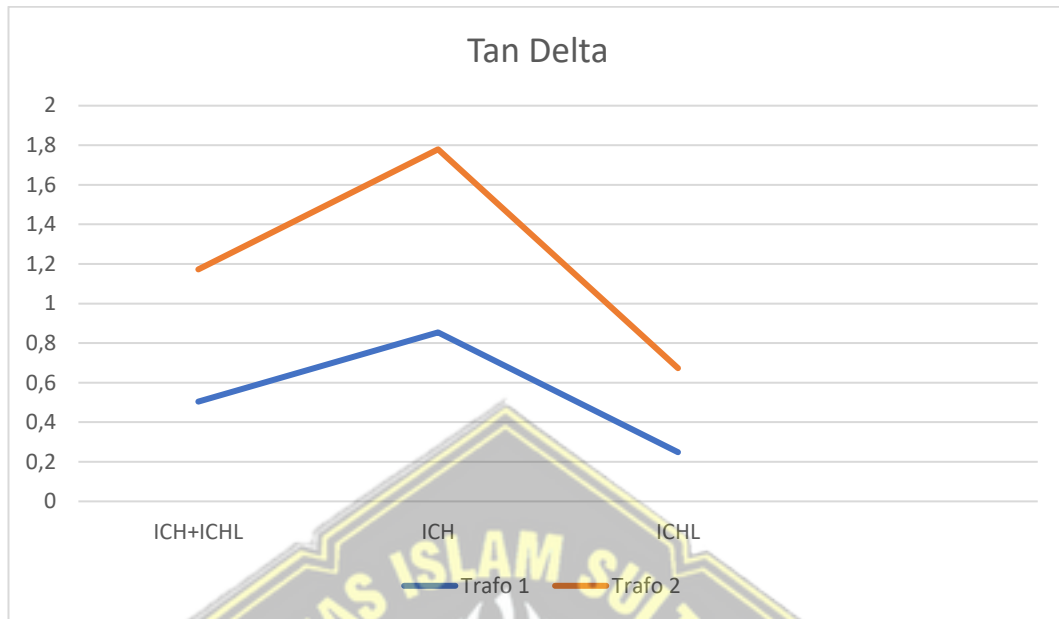
$$\begin{aligned} \text{Tan } \delta &= \frac{3,485}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 9460,8 \times 10^{-12}} \times 100\% \\ &= 1,17\% \end{aligned}$$

Hasil Perhitungan tangen delta mode ICH + ICHL menandakan bahwa tahanan isolasi pada trafo di Gardu Induk 150 kV PT APF menggunakan tangen delta masih dalam keadaan baik menurut aturan Standar ANSI C 57.12.90 . Nilai tangen delta dikatakan baik apabila nilainya dibawah 0,5%. Karena apabila nilai di atas 0,5 akan mengalami penurunan kondisi, dan supaya terhindar dari hal-hal yang tidak diinginkan maka dilakukan perbaikan secepat mungkin pada trafo yang mengalami perubahan nilai tersebut

4.4. Analisis perhitungan indeks polarisasi

Hasil dari perhitungan (IP) indeks polarisasi didapatkan hasil pada transformator 1 30 MVA Gardu Induk 150 kV PT APF di tahun 2021 dalam keadaan baik, akan tetapi untuk transformator 2 kondisinya dipertanyakan. Sedangkan nilai (IP) indeks polarisasi terendah yaitu sebesar 1,102 di transformator 2 primer,-sekunder mendekati batas dipertanyakan merujuk pada IEEE yaitu sebesar 1,1-1,25. Untuk menghindari hal yang tidak diinginkan maka perlu ditindak lanjuti minimal melakukan pengecekan pada lilitan apakah ada masalah seperti lembab atau adanya kotoran yang sudah menumpuk. Jika merancu pada data yang ada maka nilai (IP) indeks polarisasi di trafo 1 dalam kondisi yang baik yakni bernilai diatas 1,25 tetapi untuk trafo 2 kondisinya dipertanyakan, sehingga kesimpulan yang di dapat bahwa trafo 1 kondisinya memenuhi standar IEEE sehingga pengoperasian dari trafo tidak berbahaya untuk dialiri tegangan dan akan terhindar dari kegagalan isolasi atau problem lainnya. Tetepi tidak dengan trafo 2 karna nilai yang dihasilkan 1,102 atau dalam keadaan dipertanyakan sebaiknya dilakukan perawatan supaya tidak terjadi hal di luar dugaan.

4.5. Analisis hasil pengujian tan delta



Gambar 4. 1 hasil pengujian Tan Delta

Dari hasil perhitungan nilai tangen delta berdasarkan Gambar 4.1 didapatkan hasil pada transformator 1 masih keadaan baik karna rata-rata di bawah 0,5% dan pada transformator 2 30 Mva di gardu induk 150 Kv PT APF pada tahun 2021 rata-rata dalam keadaan buruk yaitu diatas 0,5 % mengacu dengan standar yang diizinkan menurut ANSI C 57.12.90. Dan juga hasil pengujian di tahun 2021 transformator 1 dan transformator 2 terjadi perubahan nilai yang signifikan, hanya dibagian ICH mengalami kenaikan yaitu pada tranformator 1 dan transformator 2 sebesar 0,85 % menjadi 1,77 % dan pada tangen delta bagian ICH+ICHL terjadi kenaikan pada transformator 1 dan transformator 2 yang semula 0,5 menjadi 1,17, dan diperhitungan tangen delta mode ICHL transformator 1 nilainya adalah 0,2% hasil ini bagus karena nilai tangen delta yang bagus adalah dibawah 0,5 % menurut standar ANSI C 57.12.90

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan berdasarkan perhitungan dan analisis tahanan isolasi pada trafo 30 MVA menggunakan metode indeks polarisasi (IP) dan delta tangen pada gardu induk 150 kV PT APF Tbk adalah sebagai berikut::

1. Berdasarkan nilai indeks polarisasi (IP) diperoleh hasil nilai disemua belitan dengan nilai terendah 1,102 dan nilai tertinggi 1,924 sesuai dengan standar IEEE 43-2000 dikatakan bahwa transformator dalam keadaan baik jika nilai IP berkisar antara 1,25-2. Berdasarkan hasil pengujian tangen delta di transformator 2 rata-rata dalam keadaan buruk yaitu diatas 1,0% tetapi nilai ICH pada trnsformator 1 mengalami penurunan yaitu sebesar 0,8%.
2. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan maka transformator 30 MVA di gardu induk 150 Kv PT APF untuk transformator 1 masih dalam keadaan yang baik dan masih layak tetapi untuk transformator 2 dalam kondisi buruk.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian ini dapat dikembangkan dengan menggunakan software yang lebih baru dan juga untuk pemeliharaan tahanan isolasi khususnya pada transformator yang sudah cukup lama bisa dilakukan setiap tahun sekali, karena usia dari transformator yang lama lebih rentan terkena permasalahan dan gangguan kelistrikan. Khususnya pada transformator 2 segera dilakukan pengecekan dan *maintanace*

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Saputro Tomy, "ANALISIS HASIL PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA BERDASARKAN HASIL UJI INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA, RASIO TEGANGAN, BDV(BREAK DOWN VOLTAGE)," *Univ. Muhammadiyah Surakarta*, vol. 48, no. 2, pp. 123–154, 2018.
- [2] B. P. Pemeliharaan, "Buku pedoman pemeliharaan transformator tenaga," 2014.
- [3] M. S. Anindyantoro, "Analisa tahanan isolasi pada Transformator Tenaga di gardu induk wonogiri," 2017.
- [4] T. A. Saputro, "Analisis hasil pengujian tahanan isolasi transformator daya."
- [5] Dwi Ari Wibowo, "Analisa pengujian isolasi transformator daya 60 MVA Pada gardu induk jajar," *Anal. Penguji. ISOLASI Transform. DAYA 60 MVA PADA GARDU INDUK JAJAR*, vol. 2, pp. 227–249, 2018.
- [6] F. Nanda, "Peningkatan Kualitas dan Karakterisasi Transformator Step up Satu Fasa 250 VA , 10 kV , 50 Hz," 2018.
- [7] K. Arismunandar, *Teknik Tenaga Listrik*, no. 806365412. 1991.
- [8] Supriono, "Buku ajar teknik tegangan tinggi," *Buku Ajar Tek. Tegangan Tinggi*, no. Pengenalan Teknik Tegangan Tinggi, p. 99, 2014.
- [9] P. Persero, "Pengukuran data teknik," p. 380366, 2010.
- [10] I. Std, I. Power, E. Society, and I. S. Board, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery IEEE Power and Energy Society," vol. 2000, pp. 9–14, 2013.
- [11] B. Zen, "Analisis kondisi hasil pengukuran IBT 1 500/150 kv dalam keadaan padam pada GITET Gandul," 2011.