

LAPORAN TUGAS AKHIR

EVALUASI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI UNIT AUXILIARY TRANSFORMER 30 MVA PLTU CIREBON DENGAN MENGGUNAKAN METODE INDEKS POLARISASI DAN TANGEN DELTA

Laporan Ini Disusun Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana (S1)

Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Sultan Agung

Semarang



Disusun oleh:

MUHAMMAD ERWIN GUNAWAN

NIM : 30601900031

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

2025

**EVALUATION OF THE FEASIBILITY OF THE ISOLATION
RESISTANCE OF THE CIREBON PLTU 30 MVA AUXILIARY
TRANSFORMER UNIT USING THE POLARIZATION INDEX
AND DELTA TANGEN METHOD**

This report is prepared to fulfill the requirements for obtaining a

Bachelor's degree in the Electrical Engineering

Program Faculty of Industrial Technology

Universitas Islam Sultan Agung

Semarang



Written By :

Muhammad Erwin Gunawan

NIM: 30601900031

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG

SEMARANG

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “EVALUASI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI UNIT AUXILIARY TRANSFORMER 30 MVA PLTU CIREBON DENGAN MENGGUNAKAN METODE INDEKS POLARISASI DAN TANGEN DELTA ” ini disusun oleh:

Nama : Muhammad Erwin Gunawan

NIM : 30601900031

Program Studi : S1 Teknik Elektro

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada:

Hari :

Tanggal :

Pembimbing



Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin,
M.T.
NIDN. 0618066301

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik
Elektro



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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “EVALUASI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI UNIT AUXILIARY TRANSFORMER 30 MVA PLTU CIREBON DENGAN MENGGUNAKAN METODE INDEKS POLARISASI DAN TANGEN DELTA ” ini telah dipertahankan di depan penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Rabu

Tanggal : 5 Maret 2025

Penguji I

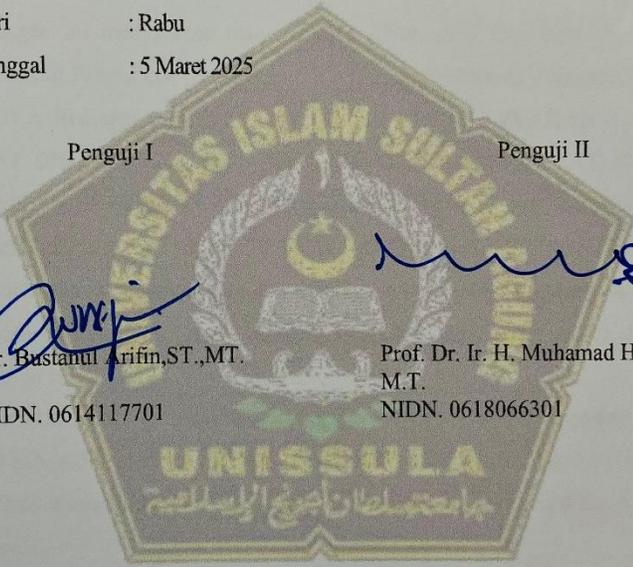
Penguji II


Dr. Bustanul Arifin, ST., MT.

NIDN. 0614117701


Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin,
M.T.

NIDN. 0618066301


Ketua penguji


Dedi Nugroho, ST., MT.
NIDN. 0617128802

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Erwin Gunawan

NIM : 30601900031

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 **“EVALUASI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI UNIT AUXILIARY TRANSFORMER 30 MVA PLTU CIREBON DENGAN MENGGUNAKAN METODE INDEKS POLARISASI 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, 10 Maret 2025
Yang Menyatakan Mahasiswa



Muhammad Erwin Gunawan.
NIM.30601900004

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Erwin Gunawan

NIM : 30601900031

Fakultas : Teknologi Industri

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul: **“EVALUASI KELAYAKAN TAHANAN ISOLASI UNIT AUXILIARY TRANSFORMER 30 MVA PLTU CIREBON DENGAN MENGGUNAKAN METODE INDEKS POLARISASI DAN TANGEN DELTA”**,

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, 10 Maret 2025
Yang Menyatakan Mahasiswa



Muhammad Erwin Gunawan.
NIM.30601900004

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

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 “Evaluasi Kelayakan Tahanan Isolasi Unit Auxiliary Transformer 30 MVA PLTU Cirebon Dengan Menggunakan Metode 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. Penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas mendapat bantuan dari berbagai pihak. Penulis ingin menyampaikan banyak terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., MH selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST., MT., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Terimakasih Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T., Selaku Dosen Pembimbing saya yang telah memberikan bimbingan dan dukungan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan, dan bantuannya sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Kedua orang tua saya tercinta yang telah memberikan dukungan baik materiil maupun non materiil dan tidak pernah berhenti mendo'akan saya disetiap sujudnya.

7. Kepada sahabat seperjuangan saya, Mahasiswa Teknik Elektro angkatan 2019 yang membantu dalam pembuatan laporan tugas akhir ini.
8. Kepada Bapak Margono Gunawan yang telah membantu saya dalam pengambilan data di PLTU CIREBON.
9. Kepada teman teman saya yang selalu ada dalam proses penyusunan Tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan, baik dari segi materi maupun penyajiannya. Penulis meminta maaf dan juga membutuhkan kritik maupun saran yang membangun dari berbagai pihak, sehingga kedepan Tugas Akhir ini dapat menjadi lebih baik. Akhirnya penulis berharap, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan wawasan bagi para pembaca dan khususnya bagi penulis.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

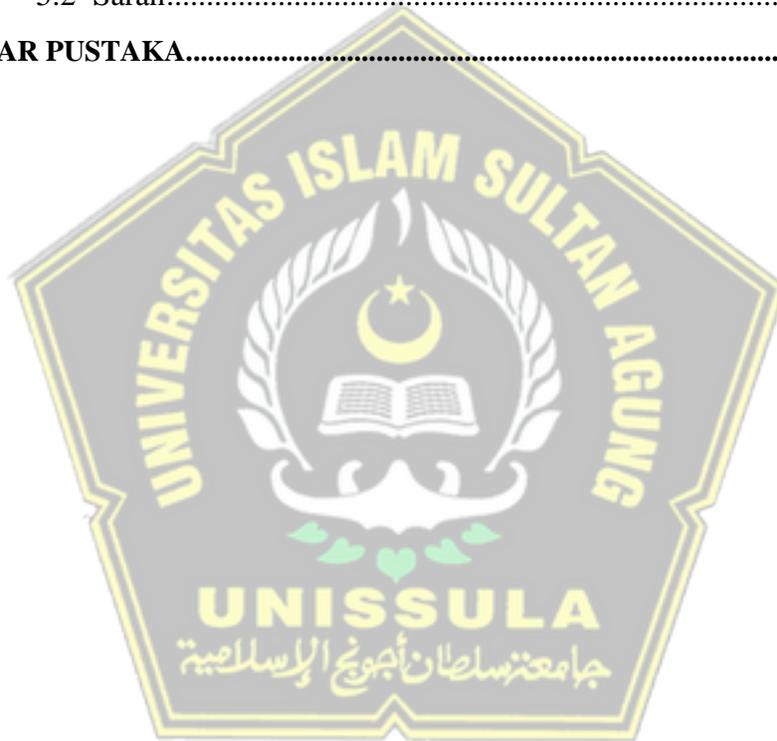
Semarang, Februari 2025

Muhammad Erwin Gunawan

DAFTAR ISI

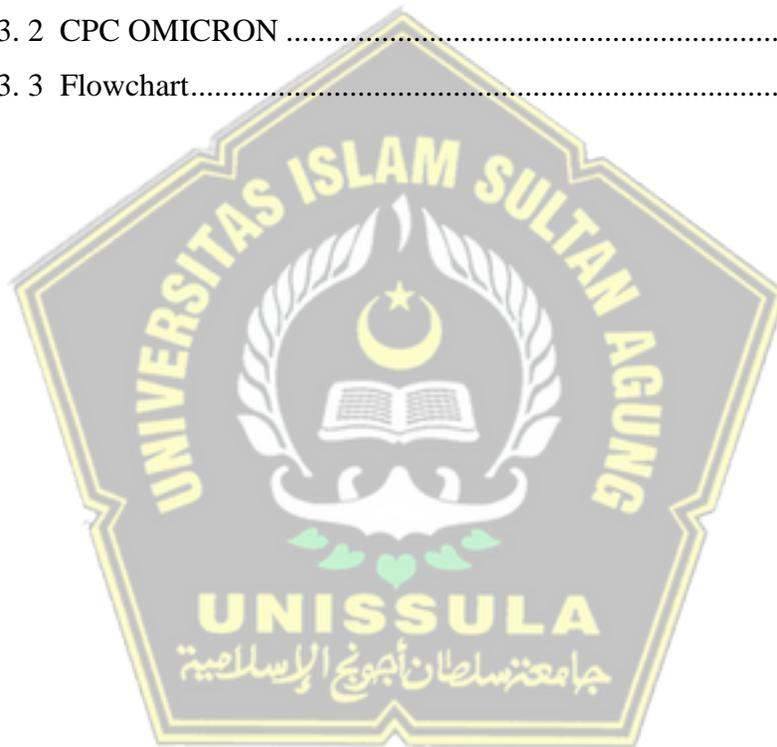
HALAMAN JUDUL	i
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	xiii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Pengujian	3
1.5 Manfaat Pengujian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Transformator pada PLTU	9
2.2.2 UAT (Unit auxiliary Transformer) 30 MVA	9
2.2.3 Transformator Tiga Fasa	12
2.2.4 Pemeliharaan Transformator Tenaga	12
2.2.5 Breakdown Voltage	23
2.2.6 Rasio Tegangan	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Model Penelitian	26
3.2 Tempat penelitian	27
3.3 Metode Pengujian	27
3.4 Cara Pengukuran Tahanan Isolasi	27
3.5 Data Spesifikasi <i>Unit Auxiliary Transformer</i>	28
3.6 Komponen Pegujian	31
3.7 Flowchart Pengujian	32
BAB IV HASIL DAN ANALISA	33

4.1. Pengujian Indeks Polarisasi dan tangen delta	33
4.2. Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi.....	33
4.3. Pengukuran dan Perhitungan Tahanan Isolasi Tangen Delta.....	36
4.4. Analisis Perhitungan Indeks Polarisasi	40
4.5. Analisis Hasil Pengujian Tan Delta	42
BAB V PENUTUP	44
5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	46



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Trafo Sederhana.	8
Gambar 2. 2 Unit Auxiliary Transformer 30 MVA.	10
Gambar 2. 3 Minyak Trafo.....	12
Gambar 2. 4 Gambar Rangkaian Ekivalen Isolasi & Diagram Phasor Arus	20
Gambar 2. 5 Gambar Rangkaian Ekivalen Isolasi pada Skema Pengujian.....	21
Gambar 3. 1 Pengukuran Tahanan Isolasi.....	26
Gambar 3. 2 CPC OMICRON	31
Gambar 3. 3 Flowchart.....	32



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar Nilai Tahanan Isolasi Sesuai Dengan Standar IEEE 43-2000	17
Tabel 2. 2 Standarisasi Tangen Delta Menggunakan Aturan Yang Mengacu Pada ANSI C57.12.90.....	23
Tabel 3. 1 Tabel 3. 1 Data Unit Auxiliary Transformer.....	29
Tabel 3. 2 Data Unit Auxiliary Transformer.....	30
Tabel 4. 1 Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi HV-LV1+LV2+GND.....	34
Tabel 4. 2 Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi LV1-HV+LV2+GND.....	34
Tabel 4. 3 Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi LV2-HV+LV1+GND.....	35
Tabel 4. 4 Data uji pengukuran 1 menit dan 10 menit.....	35
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Dengan Metode Indeks Polarisasi	36
Tabel 4.6 Data Tangen Delta Block 1: injection at Primer.....	37
Tabel 4. 7 Data Tangen Delta Block 2: injection at Secunder.....	38
Tabel 4. 8 Data Tangen Delta Block 3: injection at Tertier.....	38
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Dengan Metode Tangen Delta.....	40



ABSTRAK

Permasalahan yang terjadi pada Unit Auxiliary Transformer (UAT) Daya 30 MVA adalah masalah kelayakan isolasi akibat penggunaan secara terus-menerus dalam waktu yang lama. Kondisi ini dapat menyebabkan terjadinya tegangan lebih dan penurunan tahanan isolasi yang berdampak terjadinya gangguan pada transformator. Kelembaban dan suhu tinggi juga menjadi faktor yang dapat menyebabkan kerusakan mekanis yang mengakibatkan terhentinya aliran listrik ke beban. Solusinya adalah bagaimana memastikan trafo pada kondisi layak operasi, diperlukan evaluasi uji kelayakan tahanan isolasi pada unit auxiliary transformer 30 MVA.

Penelitian ini membahas tentang kelayakan tahanan isolasi unit auxiliary transformer 30 MVA. Parameter yang ditentukan: tahanan isolasi yang didapatkan melalui pengukuran. Metode yang digunakan menggunakan indeks polarisasi dan tangen delta, meliputi nilai tahanan isolasi antara belitan primer, sekunder dan ground, serta faktor rugi-rugi dielektrik. Metode pengujian menggunakan standar IEEE 43-2000 untuk pengukuran Indeks Polarisasi dan ANSI C57.12.90 untuk pengukuran Tan Delta, dengan pengujian dilakukan menggunakan alat CPC Omicron saat transformator dalam kondisi padam.

Hasil menunjukkan bahwa metode Indeks Polarisasi dan tangen delta mampu digunakan untuk uji kelayakan Unit Auxiliary Transformer 30 MVA. Hasil menunjukkan bahwa nilai indek polarisasi 1,91 untuk HV-LV1+LV2+GND, 2,49 untuk LV1-HV+LV2+GND, dan 1,87 untuk LV2-HV+LV1+GND. Nilai Tangen delta pada pengukuran Unit Auxiliary Transformer 30 MVA sebesar nilai 0,323% untuk, 0,949% untuk Secunder dan 0,834% untuk Tertier nilai-nilai tersebut mengindikasikan bahwa kondisi isolasi UAT masih dalam keadaan baik dan layak operasi.

Kata kunci: *Kelayakan Tahanan Isolasi Unit Auxiliary Transformer 30 MVA, Indeks Polarisasi, Tan Delta.*

ABSTRACT

The problem that occurs in the 30 MVA Power Auxiliary Transformer (UAT) Unit is the problem of insulation suitability due to continuous use for a long time. This condition can cause overvoltage and decreased insulation resistance which results in interference with the transformer. Humidity and high temperature are also factors that can cause mechanical damage which results in the cessation of electricity flow to the load. The solution is how to ensure that the transformer is in a condition that is fit for operation, an evaluation of the insulation resistance feasibility test is required on the 30 MVA auxiliary transformer unit.

This study discusses the feasibility of the insulation resistance of the 30 MVA auxiliary transformer unit. The parameters determined: insulation resistance obtained through measurement. The method used uses the polarization index and tangent delta, including the insulation resistance value between the primary, secondary and ground windings, as well as the dielectric loss factor. The test method uses the IEEE 43-2000 standard for measuring the Polarization Index and ANSI C57.12.90 for measuring Tan Delta, with testing carried out using the Omicron CPC tool when the transformer is off.

The results show that the Polarization Index and tangent delta methods can be used for the feasibility test of the 30 MVA Auxiliary Transformer Unit. The results show that the polarization index value is 1.91 for HV-LV1 + LV2 + GND, 2.49 for LV1-HV + LV2 + GND, and 1.87 for LV2-HV + LV1 + GND. The tangent delta value in the measurement of the 30 MVA Auxiliary Transformer Unit is 0.323% for, 0.949% for Secondary and 0.834% for Tertiary. These values indicate that the UAT insulation condition is still in good condition and is feasible to operate.

Keywords: Feasibility of Insulation Resistance of 30 MVA Auxiliary Transformer Unit, Polarization Index, Tan Delta.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabupaten Cirebon, Indonesia ialah rumah bagi P.T. Cirebon Electric Power, yang lebih dikenal sebagai PLTU CIREBON. Proyek pembangkit listrik 35.000 MW telah disetujui oleh pemerintah Indonesia sebagai solusi atas kekurangan listrik di Indonesia, yang kemudian berujung pada pendirian PT. Cirebon Electric Power. Guna memenuhi kebutuhan internalnya sendiri, unit pembangkit pembangkit listrik Cirebon mengambil daya dari jaringan listrik. Tetapi tegangan output generator terlalu tinggi untuk penggunaan pribadi; perangkat pengurangan tegangan diperlukan untuk menurunkan tegangan output ke tingkat yang lebih mudah dikelola. Motor-motor pabrik, pompa, kompresor udara, kipas angin, dan sistem eksitasi generator semuanya menerima daya dari Auxiliary Transformer Unit (ATU) 30 MVA, sebuah trafo. Catu daya pemakaian sendiri tersebut diperoleh dari sebagian hasil produksi pusat listrik. Berbeda dengan transformator daya yang bebannya selalu berubah sepanjang waktu, beban pada UAT 30 MVA cenderung tetap. UAT 30 MVA beroperasi sepanjang waktu dan hanya berhenti beroperasi bila terjadi gangguan atau pemeliharaan. Guna memberikan proses pembangkitan listrik yang lancar, UAT 30 MVA dimaksudkan untuk bekerja secara konstan. Unit trafo tambahan (UTR) berkapasitas 30 MVA telah beroperasi di PLTU Cirebon sejak tahun 2012 dan terus beroperasi tanpa henti, sepanjang waktu [1].

Kelayakan isolasi ialah akar penyebab kesulitan pada UAT 30 MVA. Tegangan lebih, penurunan resistansi isolasi, dan gangguan transformator ialah hasil dari penggunaan peralatan jangka panjang dan terus menerus. Kerusakan mekanis yang disebabkan oleh suhu dan kelembapan yang tinggi mengganggu aliran daya ke beban.

Agar trafo berfungsi sebagaimana mestinya selama masa pakai, diperlukan pengujian atau pemeliharaan rutin. Kualitas insulasi trafo UAT 30 MVA dievaluasi serta dinilai melalui uji kelayakan. Saat trafo mati atau tidak dipergunakan, resistansi

insulasi diperiksa dan diukur di PLTU CIREBON, jadwal perbaikan pada transformator ditentukan oleh pihak PLTU CIREBON berdasarkan jadwal perusahaan dalam kondisi shutdown atau tidak beroperasi, dalam beberapa tahun belakang untuk jadwal perbaikan itu dilakukan setiap kurang waktu dua tahun sekali saat masa shutdown, hal ini memungkinkan untuk dilakukan pengecekan, pengukuran serta perbaikan pada transformator [2]. Guna menentukan kualitas insulasi transformator UAT 30 MVA, kita perlu mengukur resistansi insulasi, faktor rugi-rugi pada bagian kelistrikan, dan resistansi permukaan. Selanjutnya, akan diperoleh nilai indeks polarisasi merujuk standar IEEE 43-200 [3]. kemudian dapat menilai kualitas isolasi mengacu standar ANSI C 57.12.90 untuk mengukur nilai Delta Tangen [4].

Beberapa teknik yang ada untuk mengukur resistensi isolasi, termasuk Indeks Polarisasi (PI), Breakdown Voltage (BDV), Analisis Gas Terlarut (DGA), serta Delta T. Nilai pengujian resistensi isolasi rentan terhadap faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu, dan kotoran atau kebocoran pada insulasi atau bushing. Oleh karenanya, studi ini mengandalkan metode Indeks Polarisasi dan Delta Tester, yang menggunakan pengujian tunggal untuk menganalisis data secara lebih komprehensif dan memberikan hasil yang lebih akurat. Mengetahui dan memverifikasi bahwa peralatan masih beroperasi adalah tujuan pengujian Indeks Polarisasi.

Pengujian ini membedakan antara data sepuluh menit pertama dengan pengujian resistansi tegangan. Sementara hal ini berlangsung, arus bocor kapasitif pada transformator akan diukur pada tahap kedua pengujian Delta Tester. Ketika pembacaan Delta Tester relatif tinggi, setidaknya 1,0%, penurunan kualitas insulasi akan terlihat.

Nilai hasil yang didapat pada pengukuran serta perhitungan tahanan isolasi, maka akan dilakukan perbandingan nilai pada data pengukuran serta data perhitungan dengan mengacu pada standarisasi yang ada[5].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada , maka diambil perumusan masalah sebagai berikut:

- a. Berapa nilai tahanan isolasi pada unit auxiliary transformer 30 MVA apakah memenuhi standar keandalan yang berlaku setelah terakhir diperiksa pada tahun 2022 ?
- b. Bagaimana melakukan pengujian tahanan isolasi dengan menggunakan indeks polarisasi dan tan delta ?
- c. Bagaimana kondisi kelayakan unit auxiliary transformer 30 MVA di pltu Cirebon setelah dilakukan pengujian indeks polarisasi dan tan delta ?

1.3 Batasan Masalah

Agar pengujian ini dapat dilakukan dan mendalam, maka penulis membatasi permasalahan yang diangkat sebagai berikut:

- a. Trafo UAT 30 MVA dilakukan pengujian setiap 2 tahunan.
- b. Penelitian ini hanya berfokus pada tahanan isolasi UAT 30 MVA.
- c. Pengujian ini menggunakan indeks polarisasi dan tan delta.

1.4 Tujuan Pengujian

Tujuan pengujian ini adalah:

- a. Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pengujian tahanan isolasi pada UAT 30 MVA.
- b. Nilai tahanan isolasi pada UAT 30 MVA memenuhi standar keselamatan dan keandalan yang berlaku.
- c. Diketahuinya data tahanan isolasi UAT 30 MVA di PLTU CIREBON.

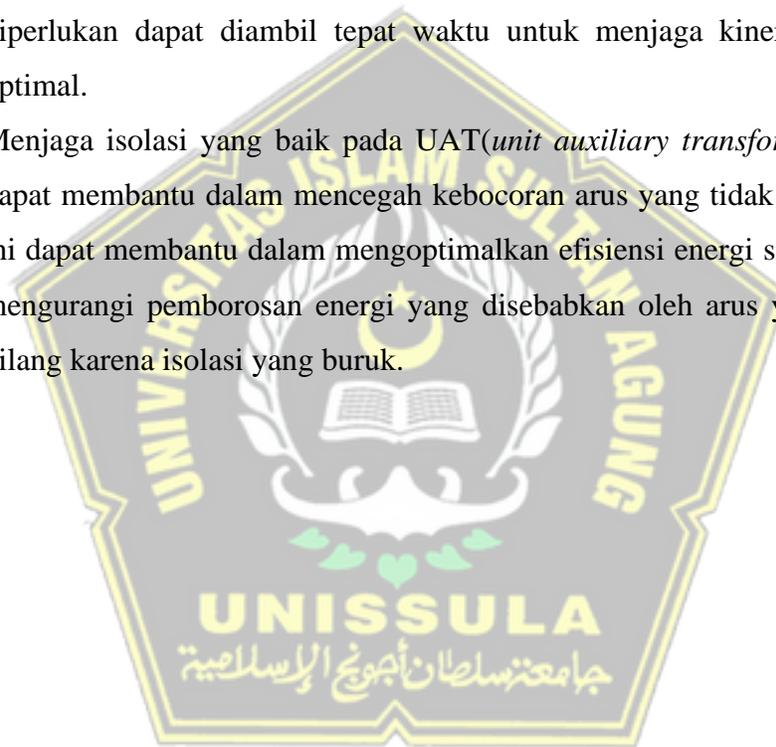
1.5 Manfaat Pengujian

Manfaat dari penyusunan pengujian ini adalah :

- a. Diketahuinya tahanan isolasi dari uji kelayakan tahanan isolasi menggunakan indek polarisasi tangen delta pada panel Trafo UAT(*unit auxiliary*

transformers) 30 MVA, membantu dalam mendeteksi potensi kebocoran arus atau kerusakan isolasi. Ini penting untuk mencegah kecelakaan listrik, korsleting, atau kerusakan sistem yang lebih besar yang dapat mengancam keselamatan operator dan peralatan.

- b. Menganalisis tahanan isolasi pada UAT(*unit auxiliary transformer*) 30 MVA, membantu identifikasi masalah isolasi yang dapat mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. tindakan perbaikan atau pemeliharaan yang diperlukan dapat diambil tepat waktu untuk menjaga kinerja sistem yang optimal.
- c. Menjaga isolasi yang baik pada UAT(*unit auxiliary transformer*) 30 MVA, dapat membantu dalam mencegah kebocoran arus yang tidak diinginkan. Hal ini dapat membantu dalam mengoptimalkan efisiensi energi sistem listrik dan mengurangi pemborosan energi yang disebabkan oleh arus yang bocor atau hilang karena isolasi yang buruk.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan Pustaka ini dibuat sebagai referensi dan pembanding dengan penelitian yang akan dilakukan, beberapa penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya, antara lain:

- a. Analisis tahanan isolasi pada trafo di stasiun Wonogiri [3]. Dengan asumsi transformator dalam kondisi kerja yang sangat baik, pengujian menghasilkan nilai indeks polarisasi antara 1,1 dan 1,25; jika berada di bawah kisaran ini, perlu dilaksanakan pemeliharaan. Ketika nilai delta tangen kurang dari atau sama dengan 0,5, hal ini mengindikasikan bahwa delta tangen dalam kondisi yang baik; jika tidak, hal ini mengindikasikan bahwa delta tangen membutuhkan lebih banyak pemrosesan.
- b. Analisis hasil uji tahanan isolasi transformator berdasarkan uji polarisasi, delta tangen, rasio tegangan, BDV (Breakdown Voltage)[4]. Pada level ground-baseline, nilai indeks polarisasi berkurang sebesar 0,95 berdasarkan investigasi yang dilaksanakan di stasiun Wonosari. Dengan nilai rata-rata di bawah 0,5%, hasil uji rasio tegangan memperlihatkan bahwa kondisinya masih memuaskan. Modus CL mengalami penurunan sebesar 0,83-1,65% saat pengujian nilai delta tangen. Nilai indeks polarisasi masih cukup baik, dengan nilai rata-rata 1,1-1,25, sesuai dengan hasil pengujian di stasiun Sragen. Kondisi tetap baik, sesuai dengan hasil pengujian stress ratio yang menunjukkan nilai rata-rata di bawah 0,5%. Modus CL turun 0,55%, dan nilai tangen delta negatif turun 0,12%, merujuk uji nilai tangen delta.
- c. Uji kelayakan belitan unit auxiliary transformer (UAT) PLTU Rembang [5]. Hasil menunjukkan perlu pengujian secara rutin dan terjadwal agar UAT dapat beroperasi dengan baik, meminimalisir gangguan dan kerusakan serta memperpanjang umur UAT. Hubung singkat antar belitan dapat dideteksi dengan

melakukan pengujian Transformer Turn Ratio. Hasil pengujian Transformer Turn Ratio antara kumparan primer (HV) dengan kumparan sekunder (LV1) masing-masing fasanya adalah 5,2470 untuk fasa U, 5,2473 untuk fasa V, dan 5,2472 untuk fasa W. Rasio tegangan antara kumparan primer (HV) dengan kumparan tersier (LV2) adalah fasa U 5,2472, fasa V 5,2472, dan fasa W 5,2471. Pesentase error antara rasio referensi dengan rasio hasil pengujian tiap fasa yaitu sebesar 0,03% sehingga tidak melebihi toleransi standar IEEE C57.152-2013 yaitu sebesar 0,5%. Belitan pada UAT masih dalam keadaan layak dan tidak memerlukan perbaikan sehingga proses pembangkitan listrik di PLTU Rembang dapat dilakukan dengan lancar.

- d. Analisis Kegagalan Autotransfer Antara UAT (Unit Auxiliary Transformer) dan SST (Station Service Transformer) di Kawasan GTG Indonesia Power Semarang [9]. Salah satu bagian terpenting dari sistem yang menghasilkan listrik adalah Unit Trafo Tambahan, atau disingkat UAT. Ketika beban dari sistem listrik konsumsi sendiri membutuhkan sumber daya bertegangan rendah, trafo step-down, atau UAT, dipergunakan. Sebagai satu unit berdasarkan area yang dikelompokkan, SST (Station Service Transformer) melayani beban dari sistem kelistrikan konsumsi sendiri. Ini adalah transformator step-down. Sama seperti UST, beban yang biasanya dilayani SST ialah peralatan pembangkit listrik yang dapat dikonsumsi sendiri.

2.2 Landasan Teori

Guna mengalihkan tegangan arus bolak-balik, perangkat magnetoelektrik yang mudah, dapat diandalkan, dan efektif yang dikenal sebagai transformator dipergunakan. Dua belitan - primer dan sekunder - dan inti besi yang dilapisi membentuk konstruksi dasar transformator. Dengan kata lain, tegangan sebanding dengan belitan, dan rasio jumlah belitan pada dua belitan menentukan rasio perubahan tegangan. Jumlah belitan meningkat seiring dengan naiknya nilai tegangan. Persamaan (2.1) menggambarkan transformator ideal dalam hal rasionya.

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

dengan:

N_p = Banyaknya belitan pada sisi Primer

N_s = Banyaknya belitan pada sisi Sekunder

V_p = Tegangan pada sisi Primer

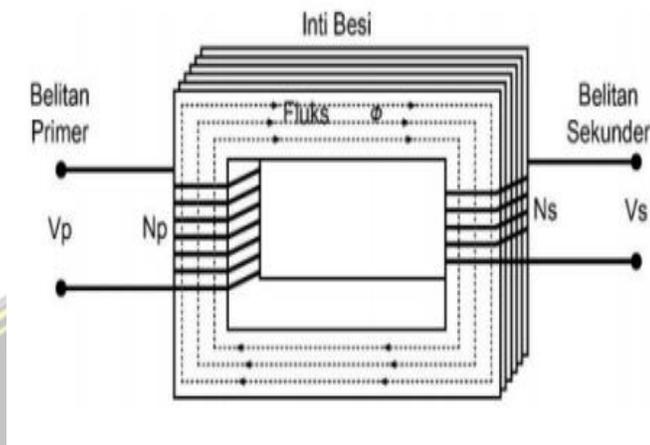
V_s = Tegangan pada sisi Sekunder

I_p = Arus pada sisi Primer

I_s = Arus pada sisi sekunder

Berdasarkan komponen strukturalnya, transformator secara kasar dapat dibagi menjadi dua jenis: jenis inti besi dan yang disebut jenis cangkang. Ada dua kaki inti besi di setiap kaki, dan keduanya melingkar. Trafo yang kuat menerapkan tipe inti dikarenakan perannya yang spesifik. Penggunaan insulin kawat rendah adalah keuntungan dari model ini, dan juga lebih hemat biaya untuk dijalankan daripada jenis lainnya. Kebocoran fluks yang sangat tinggi adalah kelemahan utama dari jenis ini jika dibandingkan dengan jenis cangkang. Gulungan primer dan sekunder membungkus kaki tengah dari jenis cangkang berkaki tiga ini. Transformator dengan kapasitas daya yang lebih rendah biasanya lebih cocok

untuk jenis ini. Meskipun fluks bocornya rendah dan kemudahan fabrikasi, jenis ini membutuhkan inti besi yang besar, yang membuat penggunaan inti besi secara ekonomis tidak layak. Gambar 2.1 menggambarkan transformator dasar.



Gambar 2. 1 Trafo Sederhana.

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.1, pengoperasian transformator diturunkan dari konsep induktansi timbal balik antara dua belitan yang dihubungkan oleh fluks magnet. Dengan memanfaatkan Hukum Faraday sebagai panduan, transformator ini beroperasi sebagaimana mestinya. Mengacu Hukum Faraday, yang dapat ditunjukkan pada persamaan (2.2) dan (2.3), gaya gerak listrik yang diinduksi dalam rangkaian tertutup sama dengan laju negatif perubahan fluks terhadap waktu.

$$\phi = \lambda N \dots \dots \dots (2.2)$$

$$e = -N. \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan: λ = total fluks linkage

ϕ = fluks

$d\phi$ = perubahan garis gaya magnet

dt = perubahan waktu

N = jumlah belitan

e = GGL Induksi

2.2.1 Transformator pada PLTU

Sistem PLTU terdapat 3 macam transformator, yaitu :

a. UAT (Unit Auxiliary Transformer)

Guna menurunkan tegangan pembangkitan dari 20 kV ke 6,3 kV, Unit Trafo Tambahan-trafo utama untuk penggunaan sendiri-dipasang secara paralel dengan trafo generator. Trafo ini biasanya memasok semua daya listrik yang dibutuhkan untuk perangkat listrik dan lampu sistem.

b. SST (Standby Startup Transformer)

Trafo cadangan dari SST dipasang di pembangkit listrik tenaga batu bara. Trafo cadangan ini mengambil listrik dari bus 150 kV untuk menyalakan unit jika trafo utama gagal karena kerusakan atau perbaikan pada generator. Akibatnya, tegangan turun dari 150 KV ke 6,3 KV berkat trafo ini.

c. Transformator Generator (Generator Transformer)

Dalam sistem interkoneksi Jawa, trafo generator bertanggung jawab untuk menaikkan tegangan pembangkitan dari 20 KV ke 150 KV, yang kemudian dihubungkan langsung ke saluran transmisi.

2.2.2 UAT (Unit auxiliary Transformer) 30 MVA

Unit Trafo Pembantu Hulu 30 MVA Ada lebih banyak komponen daripada hanya turbin dan generator yang membentuk sebuah sistem yang menghasilkan listrik. Namun, ada berbagai macam motor dan suku cadang tambahan yang perlu dipertimbangkan. Peralatan bantu atau peralatan yang dbisa dipakai sendiri ialah klasifikasi umum untuk peralatan pendukung generator. Motor untuk pompa, katup

kontrol, serta komponen lainnya ialah umum dalam sistem yang dapat digunakan sendiri (Gambar 2.2).



Gambar 2. 2 Unit Auxiliary Transformer 30 MVA.

Komponen-komponen utama Pada UAT 30 MVA

1. Inti Trafo

Meskipun besi ialah bahan yang paling umum dimanfaatkan untuk inti transformator, bahan lain seperti udara juga dapat digunakan untuk tujuan ini. Untuk meminimalkan kehilangan panas, inti besi bertindak sebagai saluran untuk fluks atau medan magnet yang terbentuk ketika kumparan dinyalakan.

2. Kumparan

Beberapa lilitan kawat tembaga berinsulasi membentuk kumparan. Dua kumparan, primer dan sekunder, terbungkus dalam isolasi padat, seperti karton, dan terisolasi terhadap inti besi. Dengan menggunakan koil, dapat mengubah tegangan dan arus. Seberapa besar arus dan tegangan yang ada pada sisi sekunder tergantung pada jumlah lilitan. Oli transformator berfungsi sebagai pendingin kumparan pada transformator daya besar.

3. CT (Current Transformer)

Guna mengukur nilai tegangan pada UAT, alat pengukur dapat dipergunakan bersama dengan current transformer, yang berfungsi sebagai penurun level tegangan.

4. Off-Circuit Tap- Changer

Ketika transformator tidak digunakan, atau terputus dari beban, pengubah keran jenis khusus ini mengubah keran pada transformator.

5. Conservator

Memisahkan minyak transformator dari udara sekitar difasilitasi oleh fitur pernafasan dehidrasi yang ditemukan pada conservator tipe diafragma.

6. Minyak Trafo

Cairan yang dipakai untuk mengisolasi trafo. Oli isolasi transformator mencegah oksidasi belitan, mendinginkan sistem, dan mengisolasi media. Oli transformator sangat dielektrik dan mempunyai karakteristik transmisi panas. Oli transformator harus tahan terhadap bahan isolasi padat, mempunyai kualitas kimiawi yang stabil untuk mencegah kerusakan, dan tipis sehingga dapat disirkulasikan dengan mudah dan mendinginkan secara efektif. Pengamatan gambar minyak isolasi transformator dapat dilihat pada Gambar 2.3.

7. Klem (Terminal / Bushings)

Fungsi: Klem atau bushings adalah bagian yang menghubungkan kumparan transformator dengan sistem listrik eksternal. Klem ini digunakan untuk memasang kabel atau saluran listrik yang terhubung dengan kumparan primer dan sekunder.

Material: Biasanya terbuat dari material yang tahan panas dan listrik seperti porselen atau komposit untuk memastikan isolasi yang baik.



Gambar 2. 3 Minyak Trafo

2.2.3 Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa Saat ini, sebagian besar tenaga listrik dihasilkan, ditransmisikan, dan didistribusikan menggunakan sistem tiga fasa karena alasan efisiensi dan ekonomi. Daya tiga fasa dapat disalurkan dengan baik menggunakan satu transformator tiga fasa atau tiga transformator satu fasa identik yang terhubung untuk operasi sistem tiga fasa. Dibandingkan dengan tiga transformator satu fasa yang saling terhubung, transformator tiga fasa memiliki bobot yang lebih ringan, murah, membutuhkan ruang yang lebih sedikit, dan mempunyai efisiensi yang lebih tinggi.

2.2.4 Pemeliharaan Transformator Tenaga

Maksud dari pemeliharaan rutin pada peralatan listrik tegangan tinggi ialah untuk menjaganya tetap berfungsi dengan baik dan bebas dari gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan. Secara sederhana, pemeliharaan ialah proses yang bertujuan untuk menjaga atau mengembalikan ke tingkat kinerja awal saat beroperasi dengan andal, untuk memenuhi tujuan layanan daya tanpa gangguan.

Memastikan kontinuitas serta keandalan catu daya ialah sasaran utama pemeliharaan peralatan listrik bertegangan tinggi. Ini termasuk:

- a. Untuk meningkatkan reliability, availability dan efficiency.
- b. Agar peralatan bertahan lebih lama atau lebih bermanfaat.
- c. Dalam upaya mengurangi kemungkinan kerusakan atau bahaya pada peralatan.
- d. Untuk meningkatkan keamanan mesin, pekerja, dan area sekitarnya.
- e. Untuk mengurangi durasi pemadaman listrik yang disebabkan oleh gangguan yang tidak terduga.

1. In Service Inspection

In Service inspection ialah proses pemeriksaan yang dilaksanakan saat transformator aktif atau berjalan untuk menemukan masalah yang mungkin timbul pada transformator tanpa mematikannya.

2. In Service Measurement

In Service Measurement ialah proses pemeriksaan yang dilaksanakan saat transformator aktif atau berjalan untuk mengetahui lebih lanjut tentang status transformator tanpa mematikannya.

3. Thermovisi / Thermal image

Kapan pun transformator dipergunakan, bagian yang dialiri listrik akan menghasilkan panas. Panas yang naik dari belitan transformator dan mengendap di dalam tangki utama dan radiator mengikuti gradien suhu normal, dengan bagian atas lebih panas daripada bagian bawah. Untuk bushing, klem yang diikatkan pada stud akan lebih panas daripada udara di sekelilingnya. Trafo dengan suhu yang sangat tinggi atau rendah dapat mengindikasikan adanya masalah di area tersebut.

19 Menerapkan thermovision/kamera pencitraan termal adalah cara yang mencakup semua untuk memantau suhu transformator untuk mendeteksi anomali.

4. Dissolved Gas Analysis (DGA)

Minyak isolasi ialah rantai hidrokarbon yang, ketika terkena energi tinggi dari anomali transformator, akan hancur dan melepaskan gas yang mengandung hidrokarbon. Panas berlebih, korona, dan lengkung adalah efek dan konsekuensi yang umum terjadi. Dengan menggunakan pendekatan DGA (Analisis Gas Terlarut), pengaruh anomali pada transformator dapat ditentukan. Tujuan utama

analisis gas diferensial (DGA) adalah untuk menentukan jumlah dan nilai gas hidrokarbon yang dihasilkan sebagai akibat dari anomali. Gas gas yang dideteksi dari hasil pengujian DGA adalah H₂ (hidrogen), CH₄ (Methane), N₂ (Nitrogen), O₂ (Oksigen), CO (Carbon monoksida), CO₂ (Carbondioksida), C₂H₄ (Ethylene), C₂H₆ (Ethane), C₂H₂ (Acetylene).

5. Pengujian kualitas minyak isolasi (Karakteristik)

Minyak kehilangan beberapa sifat isolasinya dikarenakan terdegradasi akibat oksidasi dan pengotor. Faktor lain yang menurunkan kualitas kertas insulasi transformator adalah oksidasi pada oli yang digunakan untuk insulasi. Minyak isolasi akan menjadi asam saat teroksidasi. Ketika dikombinasikan dengan air dan dipanaskan hingga suhu tinggi, asam ini akan menyebabkan isolasi kertas mengalami hidrolisis. Kualitas kertas isolasi akan berkurang selama proses hidrolisis ini. Ada sejumlah pengujian yang menggunakan kriteria PLN sebagai bagian dari uji kualitas minyak. Di bawah ini adalah berbagai jenis pengujian:

a. Pengujian kadar air

Integritas transformator dapat dikompromikan dengan adanya air. Korosi, produksi asam, endapan, dan umur transformator yang jauh lebih pendek adalah gejala dari konsentrasi air dan oksigen yang tinggi. Penelitian yang dilakukan oleh EPRI mengungkapkan bahwa umur insulasi berkurang setengahnya untuk setiap peningkatan dua kali lipat kadar air pada suhu yang sama. Salah satu sumber air yang mungkin terjadi pada transformator adalah ketika transformator dibuka untuk diperiksa; yang lainnya adalah ketika terjadi kebocoran, dan uap air akan masuk ke dalam transformator karena perbedaan tekanan parsial keduanya.

b. Pengujian tegangan tembus

Menemukan tegangan tembus isolasi minyak transformator ialah tujuan dari pengujian ini.

c. Pengujian kadar asam

Ketika oli teroksidasi, oli akan melepaskan zat asam yang merusak kertas isolasi trafo. Selain itu, komponen tembaga dan logam transformator rentan

terhadap korosi oleh asam ini.

d. Pengujian tegangan antar muka / Interfacial Tension (IFT) ‘

Pengukuran tegangan antara permukaan minyak dan air. Merujuk ASTM D-971, nilai IFT adalah gaya yang dibutuhkan untuk mengangkat cincin setebal satu sentimeter melalui antarmuka fluida antara air dan minyak. Minyak yang masih segar dan dalam kondisi baik mempunyai nilai IFT sebesar 40 hingga 50 dyne/cm. Oksidasi minyak dan kertas menghasilkan sejumlah besar partikel mikroskopis, yang memengaruhi nilai IFT. Minyak akan menjadi lebih asam, pengendapan (sludge) dapat terjadi pada keadaan tertentu, dan air akan dihasilkan selama oksidasi.

e. Pengukuran tahanan isolasi

Sasaran dari pengukuran ini ialah untuk memastikan kondisi isolasi antara belitan dan arde atau belitan lain. Hasil pengujian transformator selanjutnya didukung oleh Uji Indeks Polarisasi, yang mengukur rasio resistansi isolasi dari menit ke 10 hingga menit ke 1 sambil mempertahankan tegangan konstan.

f. Pengukuran SFRA (Sweep Frequency Response Analyzer)

Keberadaan pergeseran pada inti dan belitan transformator dapat ditentukan dengan memanfaatkan instrumen SFRA. Pengujian dapat mengungkapkan cara belitan menghantarkan sinyal tegangan rendah pada berbagai frekuensi.

g. Pengukuran tahanan DC (R_{dc})

Belitan transformator ialah bahan konduktif yang dililitkan di sekitar inti besi; ia memiliki sifat induktansi (XL) dan resistivitas (R) dari tegangan arus bolak-balik (alternating current) yang diterapkan. Nilai resistif (R) dari belitan hanya dapat diukur dengan memberikan DC (direct current) ke belitan tersebut, dan inilah yang dimaksud dengan pengujian resistansi DC. Oleh karenanya, uji resistansi DC ialah nama yang diberikan untuk prosedur ini.

h. Pengujian HV Test

Maksud dari pengujian ini ialah untuk memverifikasi bahwa resistansi isolasi transformator dapat menahan tegangan. Insulasi ini berkaitan dengan lapisan yang berada di antara arde, sambungan ke arde, dan komponen aktif (belitan), serta lapisan yang berada di antara belitan itu sendiri.

i. Pengujian Indeks Polarisasi (IP)

Pengujian indeks polarisasi (IP) adalah metode pengujian yang digunakan guna mengukur integritas polarisasi pada peralatan listrik. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi sejauh mana isolasi pada peralatan listrik dapat mempertahankan resistansi terhadap arus bocor dalam jangka waktu tertentu. Pada pengujian indeks polarisasi, tegangan DC (arus searah) diterapkan pada peralatan yang diuji, seperti transformator, motor listrik, generator, atau kabel. Tegangan ini biasanya diterapkan dalam waktu yang cukup lama, biasanya 10 menit atau lebih. Penerapan tegangan arus bocor melalui isolasi. Nilai polarisasi dapat dihitung seperti persamaan (2.4).

$$IP = R_{10} / R_1 \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan : IP = Indeks Polarisasi

R_{10} = Pengujian pada menit ke-10

R_1 = Pengujian pada menit ke-1

Indeks polarisasi diperoleh dengan membagi nilai resistansi isolasi pada waktu tertentu, biasanya setelah 10 menit (R_{10}). Indeks polarisasi dapat dihitung dengan rumus melalui persamaan 2.(4) dan pengkategorian kondisi isolasi berdasarkan hasil pengujian indeks polarisasi memiliki standar nilai yang dapat disimpulkan suatu nilai tahanan isolasi sesuai dengan standar IEEE 43-2000, bisa dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Standar Nilai Tahanan Isolasi Sesuai Dengan Standar IEEE 43-2000

Hasil Pengujian	Keterangan	Rekomendasi
<1	Berbahaya	Investigasi
1 – 1,1	Jelek	Investigasi
1,1 - 1,25	Dipertanyakan	Uji Kadar Minyak, Uji Tangen Delta
1,25 - 2	Baik	-
>2	Sangat Baik	-

Indeks Polarisasi ialah rasio antara resistansi isolasi pada waktu yang lebih lama dengan resistansi isolasi pada waktu yang singkat. Nilai IP yang tinggi menunjukkan isolasi yang baik, karena resistansi isolasi tetap tinggi seiring waktu. Sebaliknya, jika nilai IP rendah, itu dapat menunjukkan adanya kebocoran isolasi atau kerusakan pada peralatan.

J. Tangen delta

Tangen delta ($\tan \delta$) adalah ukuran dari dissipasi energi dalam material isolasi atau bahan dielektrik, dan itu berkaitan dengan kehilangan daya dalam sistem listrik, terutama pada kapasitor dan transformator. Beberapa parameter yang mempengaruhi tangen delta antara lain:

1. Frekuensi:

Tangen delta dipengaruhi oleh frekuensi sinyal listrik yang diterapkan pada material. Biasanya, semakin tinggi frekuensinya, semakin tinggi nilai tangen delta, meskipun ada beberapa bahan yang mungkin memiliki nilai yang lebih stabil di berbagai frekuensi.

2. Suhu:

Suhu yang lebih tinggi cenderung meningkatkan nilai tangen delta. Hal ini dikarenakan peningkatan suhu dapat menyebabkan peningkatan konduktivitas internal dan kerugian dielektrik dalam bahan.

3. Kelembapan:

Kelembapan dapat meningkatkan tangen delta, terutama pada bahan organik atau material yang memiliki sifat higroskopis (menyerap kelembapan). Kelembapan dapat menurunkan isolasi dan meningkatkan konduktivitas, yang pada gilirannya meningkatkan tangen delta.

4. Kualitas Bahan Isolasi:

Jenis dan kualitas bahan dielektrik (seperti bahan isolator pada kabel, kapasitor, dan transformator) mempengaruhi nilai tangen delta. Material dengan konduktivitas rendah, seperti polimer tertentu, cenderung memiliki tangen delta yang lebih rendah.

5. Kepadatan Material:

Kepadatan bahan dapat mempengaruhi struktur internal dan bagaimana bahan merespons medan listrik. Bahan dengan kepadatan lebih tinggi cenderung memiliki lebih sedikit ruang untuk pergerakan muatan, yang dapat mempengaruhi kehilangan daya.

6. Tegangan Aplikasi:

Tegangan yang diterapkan pada material dielektrik dapat mempengaruhi nilai tangen delta. Tegangan yang lebih tinggi dapat menyebabkan lebih banyak kerugian dielektrik, yang akan meningkatkan nilai tangen delta.

7. Usia Material:

Seiring waktu, material isolasi bisa mengalami penuaan yang menyebabkan perubahan dalam sifat dielektriknya. Proses penuaan dapat menyebabkan peningkatan konduktivitas dan kehilangan daya, yang meningkatkan tangen delta. Secara umum, nilai tangen delta yang rendah memperlihatkan bahwa material mempunyai sifat isolasi yang baik, sementara nilai yang tinggi memperlihatkan adanya banyak kerugian dalam bentuk panas atau energi, yang bisa merugikan dalam aplikasi listrik.

Rugi dielektrik pada transformator terjadi karena adanya kerugian energi yang disebabkan oleh sifat isolasi bahan dielektrik di dalam transformator. Dalam

konteks transformator, bahan dielektrik umumnya merujuk pada minyak isolasi (pada transformator minyak) atau bahan isolasi padat (seperti kertas atau resin) yang dipakai dalam gulungan dan inti transformator. Berikut adalah beberapa faktor yang menyebabkan rugi dielektrik pada transformator:

1. Kehilangan Dielektrik atau Kerugian dalam Isolasi

Kehilangan dielektrik (juga dikenal sebagai kerugian dielektrik) terjadi karena medan listrik yang diterapkan pada bahan isolasi dalam transformator. Ketika medan listrik diterapkan, beberapa energi diubah menjadi panas akibat pergerakan partikel dalam bahan isolasi yang tidak dapat sepenuhnya mengikuti fluktuasi medan listrik. Ini berkontribusi pada rugi dielektrik, yang dapat dihitung dengan parameter tangen delta ($\tan \delta$).

2. Penyebab Kehilangan Dielektrik pada Transformator

Kualitas Isolasi yang Menurun: Seiring waktu, bahan isolasi dalam transformator (misalnya minyak atau kertas) dapat mengalami degradasi, terutama karena faktor lingkungan seperti suhu tinggi dan kelembapan. Hal ini mengurangi kemampuannya untuk menahan tegangan tanpa mengalami konduktivitas yang lebih tinggi.

Tegangan Tinggi: Ketika transformator beroperasi pada tegangan tinggi, medan listrik yang diterapkan pada isolasi bisa menyebabkan terjadinya kerugian dalam bentuk energi panas. Kehilangan dielektrik ini meningkat dengan tingginya tegangan.

Frekuensi Operasi: Seiring dengan meningkatnya frekuensi arus yang mengalir, kerugian dielektrik pada transformator juga akan meningkat. Hal ini disebabkan oleh adanya interaksi antara medan listrik dan partikel di dalam material isolasi pada frekuensi tinggi.

Dampak dari Rugi Dielektrik:

Pemanasan: Kehilangan dielektrik menghasilkan energi panas yang dapat merusak bahan isolasi jika tidak dikelola dengan baik.

Pengurangan Kinerja: Kerugian dielektrik yang tinggi dapat menurunkan

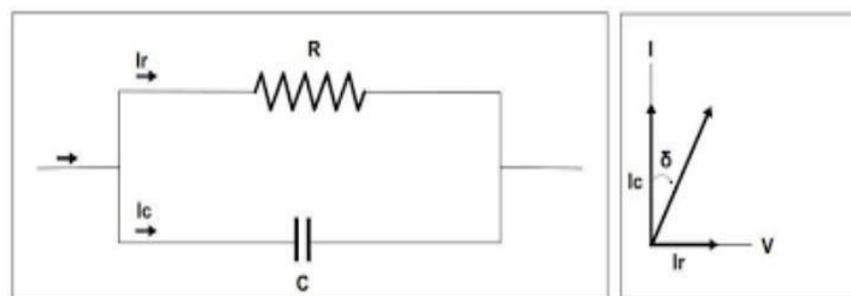
efisiensi transformator, karena energi yang seharusnya digunakan untuk mentransfer daya listrik terbuang dalam bentuk panas.

Penuaan Material: Kerugian dielektrik yang tinggi dapat mempercepat proses penuaan bahan isolasi dalam transformator.

Pengujian Tan Delta:

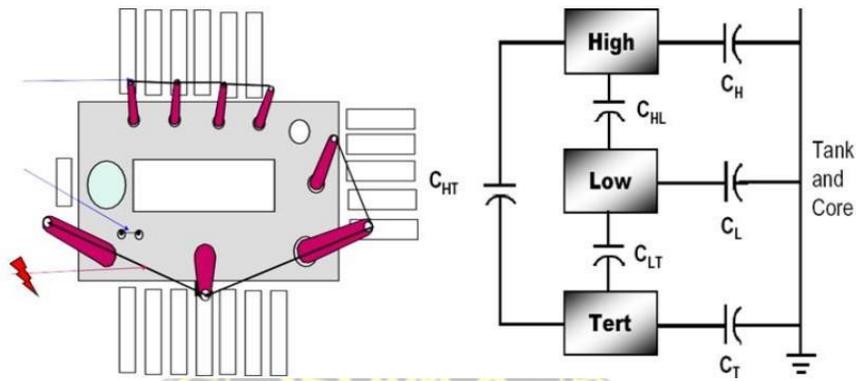
Salah satu cara guna memeriksa faktor kehilangan atau menilai integritas insulasi peralatan adalah dengan uji Tan Delta, yang juga disebut uji sudut kehilangan atau faktor disipasi. Pada dasarnya, metode tangen delta melibatkan pengukuran faktor daya atau faktor rugi pada material isolasi. Material isolasi yang ideal memiliki faktor daya yang sangat rendah, menunjukkan bahwa isolasi tersebut memiliki resistansi yang tinggi terhadap arus bocor. Proses pengujian tangen delta melibatkan penerapan tegangan AC pada peralatan atau komponen yang akan diuji, seperti transformator, kabel, atau kapasitor.

Rangkaian ekivalen dari isolasi dan diagram fasor arus kapasitansi serta arus resistif dari sebuah isolasi, pengukuran I_r / I_c dapat diprediksi kualitasnya dari isolasinya. Isolasi yang sempurna memiliki sudut mendekati nol. Meningkatnya sudut akan meningkatkan arus resistif yang melewati isolasi, hal ini berarti sudah terdapat suatu kontaminasi pada isolasi. Bertambahnya besar sudut akan semakin buruk kondisi suatu isolasi, dalam penjelasan ini dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rangkaian Ekuivalen Isolasi & Diagram Fasor Arus

Penjelasan mengenai Tangen Delta serta gambar pada sebelumnya yang menjelaskan tentang rangkaian ekivalen, Gambar 2.5 menunjukkan salah satu contoh gambar rangkaian ekivalen dan skema pengujian Tangen Delta.



Gambar 2. 5 Rangkaian Ekivalen Isolasi pada Skema Pengujian

Selama pengujian ini membandingkan fase antara tegangan dan arus yang mengalir melalui isolasi untuk mengukur faktor daya atau faktor rugi. metode tangen delta, pengukuran dilakukan pada frekuensi dan tegangan yang ditentukan, dan hasilnya digunakan untuk mengevaluasi keadaan isolasi. Komponen umum dari sistem isolasi transformator meliputi arde, isolasi pada belitan, dan konfigurasi isolasi berikut: primer-sekunder, primer-tingkat, sekunder-tingkat, primer-tanah, sekunder-tingkat, primer-tingkat, primer-tingkat. Temuan dari uji tan delta dapat memberikan perkiraan status insulasi transformator. Menurut standar ANSI C57.12.90, hasil pengujian harus diinterpretasikan. Persamaan (2.5) hingga (2.8) memberikan rumus untuk delta tangen.

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

$$Z = \frac{V^2}{S} \dots\dots\dots(2.6)$$

Mencari Xc:

$$Xc = \frac{V^2}{Q} \dots\dots\dots(2.7)$$

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

Dimana, X_c didapat persamaan pada persamaan (2.9) sampai (2.11).

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

$$S = \frac{V^2}{\omega C} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$S V^2 \omega C \dots\dots\dots(2.11)$$

Sehingga didapatkan persamaan Tangen Delta didapat pada persamaan (2.12).

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan:

Tan δ = Tan Delta

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

C = Kapasitansi (F)

ω = $2\pi f$

Untuk lebih jelasnya nilai DF atau tangen delta dihitung menggunakan rumus persamaan (2.13).

$$\text{tan } \delta = \frac{P}{2\pi f C V_{out}^2} \times 100\% \dots\dots\dots(2.13)$$

dengan rincian sebagai berikut:

- a. P adalah *watt losses* (kerugian daya) dalam miliwatt (mW).
- b. f adalah frekuensi pengujian dalam Hertz (Hz).
- c. C adalah kapasitansi yang terukur dalam picofarad (pF).
- d. V_{out} adalah tegangan keluaran dalam kilovolt (kV).

Persamaan (2.13) menjelaskan tentang pegujian tahanan isolasi menggunakan metode tangen delta didapatkan sebuah standarisasi untuk mengacu pada hasil pengukuran atau perhitungan yang didapatkan dari sebuah tahan isolasi, standarisasi tangen delta menggunakan aturan yang mengacu pada ANSI C57.12.90 yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Standarisasi Tangen Delta Menggunakan Aturan Yang Mengacu Pada ANSI C57.12.90

Hasil uji	Kondisi
$\leq 0,5 \%$	Bagus
0,5 – 0,7 %	Mulai mengalaih penurunan
$\geq 1,0 \%$	Buruk

2.2.5 Breakdown Voltage

Menilai kualitas minyak isolasi dilaksanakan dengan pengujian ketahanan isolasi, yang melibatkan penerapan teknik tegangan tembus (BDV) pada minyak transformator. Untuk perangkat tegangan tinggi, bahan isolasi dapat berbentuk padat atau cair. Sebagai dielektrik, minyak isolasi sangat penting untuk berfungsinya sistem kelistrikan tegangan tinggi.

Salah satu cara guna menentukan apakah minyak isolasi dapat menahan tegangan listrik ialah dengan melaksanakan pengujian breakdown voltage. Tegangan tembus yang tinggi biasanya terjadi pada oli yang jernih dan kering. Keberadaan kotoran, seperti air dan partikulat, dapat dideteksi dengan pengujian ini. Meskipun tegangan tembus yang tinggi tidak selalu berarti bahwa oli sepenuhnya bebas dari segala bentuk polutan, nilai tegangan tembus yang rendah dapat mengindikasikan adanya kontaminan ini. Memastikan tegangan tembus minyak transformator layak ialah tujuan utama dari pengujian ini.

Akan lebih efisien untuk melaksanakan pengujian saat transformator tidak dipakai. Pada pengujian ini, minyak dikenai tegangan frekuensi dengan menggunakan teknik penempatan dua elektroda sistem, dengan jarak antar elektroda dikalibrasi sesuai standar yang berlaku, dalam hal ini standar IEC 60156-02 [10]. Persamaan (2.13), ketika diterapkan pada minyak transformator, menghasilkan kekuatan dielektrik.

$$E_{rata-rata} = \frac{V_{b(rata-rata)}}{d} \dots\dots\dots (2.13).$$

dengan:

E = Kekuatan dielektrik (kv/mm)

V_b = Tegangan Tembus (kv)

d = Jarak sela (mm)

2.2.6 Rasio Tegangan

Maksud dari pengujian rasio tegangan ialah untuk mengidentifikasi masalah pada tap charger atau bagian lain dari sistem isolasi transformator, seperti belitan atau korsleting. Ide dasar di balik pengisi daya keran adalah untuk menyediakan tegangan sekunder yang dapat disesuaikan agar sesuai dengan kebutuhan yang berbeda dengan menyesuaikan varian rasio belitan transformator. Penurunan tegangan yang diinginkan menunjukkan bahwa rasio transformator beroperasi sebagaimana mestinya. Tegangan output akan menyimpang dari persyaratan pelat nama transformator jika terjadi anomali.

Jadi, guna memastikan transformator berfungsi dan aman dipakai, pengujian rasio tegangan sangat penting. Pengujian ini termasuk dalam pengujian rutin, yang dilakukan pada transformator yang baru diproduksi. Pengujian rasio tegangan harus mengacu pada standar yang berlaku, dengan PLN biasanya menggunakan standar IEC 60076-33 01. Pada pengujian ini, digunakan rumus dasar yang mengacu pada perhitungan rasio transformator untuk menentukan hasilnya secara sistematis pada persamaan (2.14).

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_p}{I_s} \dots\dots\dots (2.14).$$

dengan:

V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan sekunder

N_p = Jumlah lilitan Primer

N_s = Jumlah lilitan Sekunder

I_p = Arus Primer

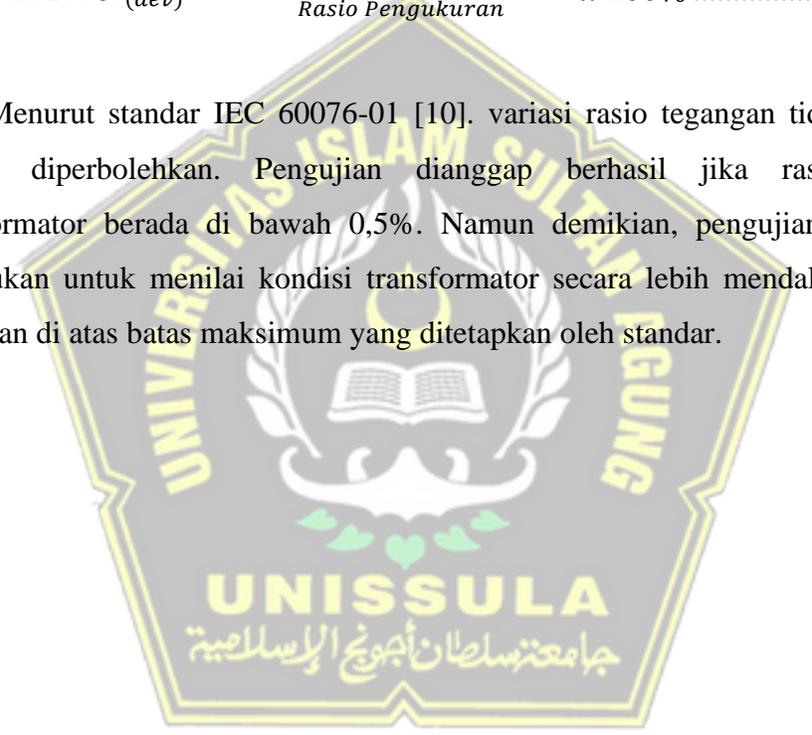
I_s = Arus Sekunder

Sementara itu, parameter pengukuran toleransi untuk uji ratio transformator dapat dinyatakan secara sistematis pada persamaan (2.15) dan (2.16).

$$Rasio_{(teori)} = \frac{V_p}{V_s} \dots\dots\dots (2.15).$$

$$R. Error_{(dev)} = \frac{Rasio Pengukuran - Rasio Teori}{Rasio Pengukuran} \times 100\% \dots\dots\dots (2.16).$$

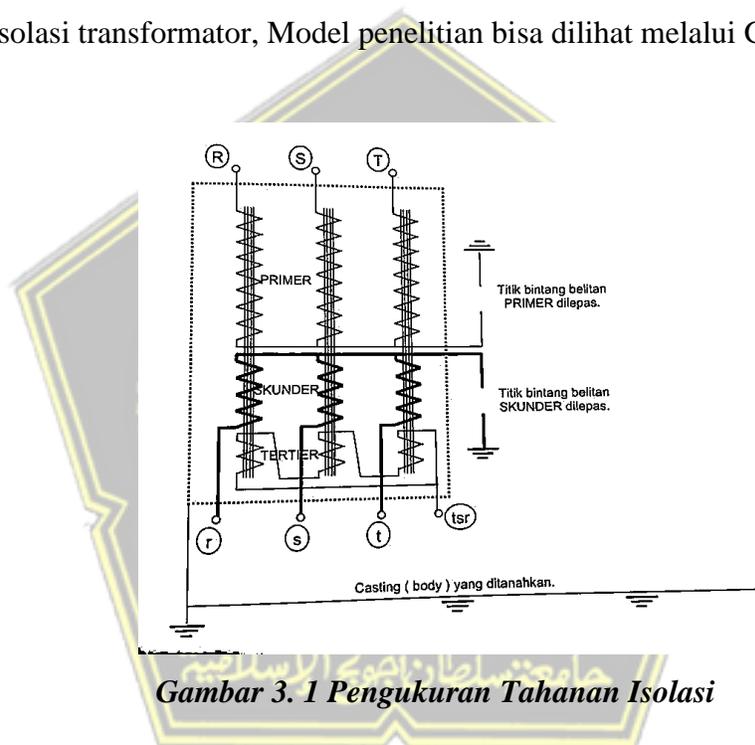
Menurut standar IEC 60076-01 [10], variasi rasio tegangan tidak lebih dari $\pm 0,5\%$ diperbolehkan. Pengujian dianggap berhasil jika rasio tegangan transformator berada di bawah 0,5%. Namun demikian, pengujian lebih lanjut diperlukan untuk menilai kondisi transformator secara lebih mendalam jika rasio tegangan di atas batas maksimum yang ditetapkan oleh standar.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Studi ini memakai metode analisis untuk menguji kelayakan tahanan isolasi pada *Unit Auxiliary Transformer (UAT)* daya 30 MVA di PLTU Cirebon. Pengujian dilakukan dengan menggunakan metode indeks polarisasi dan tan delta untuk menilai kondisi isolasi transformator, Model penelitian bisa dilihat melalui Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Pengukuran Tahanan Isolasi

Melalui uji kelayakan ini, kita dapat mengidentifikasi potensi degradasi isolasi yang dapat mempengaruhi kinerja dan keandalan transformator. Metode indeks polarisasi digunakan untuk menilai kemampuan dielektrik isolasi terhadap pengisian muatan, sementara tan delta digunakan untuk mengukur rugi rugi dielektrik pada isolasi, sehingga memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap kondisi transformator di PLTU Cirebon .

3.2 Tempat penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilaksanakan di P.T Cirebon Electric Power (PLTU CIREBON). Penelitian yang dilakukan adalah menganalisis kelayakan tahanan isolasi Unit Auxiliary Transformer berdasarkan dari hasil pengukuran Transformer indeks polarisasi dan tan delta.

3.3 Metode Pengujian

Metode pengujian berisi mengenai metode yang dipakai dalam melaksanakan pengujian tugas akhir ini, metode pengujian yang dilaksanakan oleh penulis sebagai berikut:

Data yang dipakai guna penelitian ialah data sekunder dari PLTU CIREBON meliputi data tahunan 2024 untuk nilai indeks polarisasi dan tangen delta. Penulis melaksanakan wawancara dengan pihak supervisory PLTU CIREBON mengenai Unit Auxiliary Transformer(UAT) terutama dibagian tahanan isolasinya serta metode pengujian yang dipakai disini. Data yang di peroleh dari PLTU CIREBON. Berikut ialah data yang di peroleh dari hasil survei:

- a. Data spesifikasi Unit auxiliary transformer 30 MVA.
- b. Data indeks polarisasi pada Unit auxiliary transformer tahun 2024 di PLTU CIREBON.
- c. Data tangen delta pada Unit auxiliary transformer tahun 2024 di PLTU CIREBON.

3.4 Cara Pengukuran Tahanan Isolasi

Mengikuti Prosedur Kerja untuk Instalasi Listrik Tegangan Tinggi/Ekstra Tinggi, terminal primer, sekunder, tersier (jika ada), dan terminal titik bintang harus dilepaskan dari objek yang diukur (mis. transformator) untuk melepaskannya dari tegangan[11].

1. Pemasangan pentanahan local (*Local Grounding*) disisi primer maupun sekunder dengan tujuan membuang *Induksi Muatan* (Residul Current) yang masih tersisa pada belitan.

2. Pelepasan terminal sisi primer (*Jumper Conductor Bay T/R*), terminal sisi sekunder (*Fleksibel Conductor Plat / anyaman / pilin*), terminal belitan tertier dan titik netral (bintang).
3. Untuk mendapatkan pembacaan yang akurat dari pengukuran, perlu menyeka permukaan bushing postel primer, sekunder, tersier, dan netral dengan menggunakan pembersih dan kain yang halus dan tidak abrasif.
4. Melakukan pengukuran tahanan isolasi antara :
 - a. Terminal primer (R,S,T) Terhadap Cashing (body) / tanah.
 - b. Terminal sekunder (r,s,t) terhadap cashing (body) / tanah.
 - c. Terminal tertier (tsr) terhadap cashing (body) / tanah.
 - d. Terminal primer (R,S,T) terhadap terminal sekunder (r,s,t).
 - e. Terminal primer (R,S,T) terhadap terminal tertier (tsr).
 - f. Terminal sekunder (r,s,t) terhadap terminal tertier (tsr).
5. Mencatat hasil pengukuran tahanan isolasi serta suhu / temperatur minyak trafo.
6. Hasil pengukuran ini merupakan data terbaru hasil pengukuran dan sebagai bahan evaluasi pembandingan dengan hasil pengukuran sebelumnya.
7. Memasang kembali terminal sisi primer (*Jumpwe Conductor Bay T/R*), terminasi sisi sekunder (*Fleksibel Conductor Plat / anyaman / pilin*), terminasi belitan tertier dan titik netral (bintang).
8. Melepas pentanahan local sambil pemeriksaan final untuk persiapan pekerjaan selanjutnya.

3.5 Data Spesifikasi *Unit Auxiliary Transformer*

Berikut ini adalah data spesifik mengenai Unit Auxiliary Transformer (UAT) yang digunakan dalam sistem kelistrikan. Data yang ada mencakup berbagai parameter penting, seperti daya nominal, rasio tegangan, konfigurasi, dan karakteristik isolasi. Informasi ini sangat penting untuk memahami fungsi dan kinerja UAT dalam mendukung operasional pembangkit listrik. Data ini menjadi referensi

penting bagi pengambilan keputusan dalam hal pemeliharaan dan perbaikan sistem kelistrikan dilihat pada Tabel 3.1 dan 3.2.

Tabel 3. 1 Data Unit Auxiliary Transformer

Transformer nameplate data			
Serial number	P060ECC571	Apparatus ID	
Manufacturer	UNINDO	Feeder	UNIT AUXILIARY TRANSFORMER
Manufacturing year	2009	No. phases	3
Manufacturer type		Vector group	Dyn1yn1
Voltage ratings			
Winding	Voltage L-L	Voltage L-N	Insul. level L-L
Prim	23.000 kV	kV	125 kV
Sec	11.500 kV	6.640 kV	75 kV
Tert	11.500 kV	6.640 kV	75 kV
Power ratings			
Rated power	Cooling class	Temp. rise wind.	
48.000 MVA	ONAN	60	
60.000 MVA	ONAF	60	
Current ratings at rated power			
Winding			
Prim	Sec	Tert	Rated power
1204.900 A	1204.900 A	1204.900 A	48.000 MVA
1506.100 A	1506.100 A	1506.100 A	60.000 MVA

Tabel 3. 2 Data Unit Auxiliary Transformer

Short-circuit rating					
Max. short-circuit current	kA	s			
Impedances					
Ref. temp.	75 °C				
Short-circuit impedance Prim - Sec					
uk[%]	Base power	Base voltage	Load losses Pk	OLTC position	DETC position
8.080 %	30.000 MVA	23.000 kV	W		
Short-circuit impedance Prim - Tert					
uk[%]	Base power	Base voltage	Load losses Pk	OLTC position	DETC position
8.200 %	30.000 MVA	23.000 kV	W		
Short-circuit impedance Sec - Tert					
uk[%]	Base power	Base voltage	Load losses Pk	OLTC position	DETC position
17.150 %	30.000 MVA	11.000 kV	W		
Zero sequence impedance					
Base power	48.00 MVA				
Base voltage	23.000 kV				
Description	Z0[%]				
Secondary	%				
Tertiary	%				
Others					
Category	Other				
Status	In operation				
Tank type	Sealed conservator				
Insulation medium	Mineral oil				
Fluid insulation volume	L				
Fluid insulation weight	15200 kg				
Total weight	74100 kg				

3.6 Komponen Pegujian

Pengujian ini menggunakan alat yang bernama CPC Omicron . CPC Omicron sendiri adalah perangkat pengujian yang dirancang khusus untuk pengujian sistem perlindungan dan pengukuran impedansi dalam sistem kelistrikan. CPC merupakan singkatan dari "Capacitance and Power Quality Analyzer." Perangkat ini digunakan oleh insinyur dan teknisi untuk melakukan berbagai pengujian pada peralatan listrik, termasuk transformator, pemutus sirkuit, dan sistem proteksi lainnya.

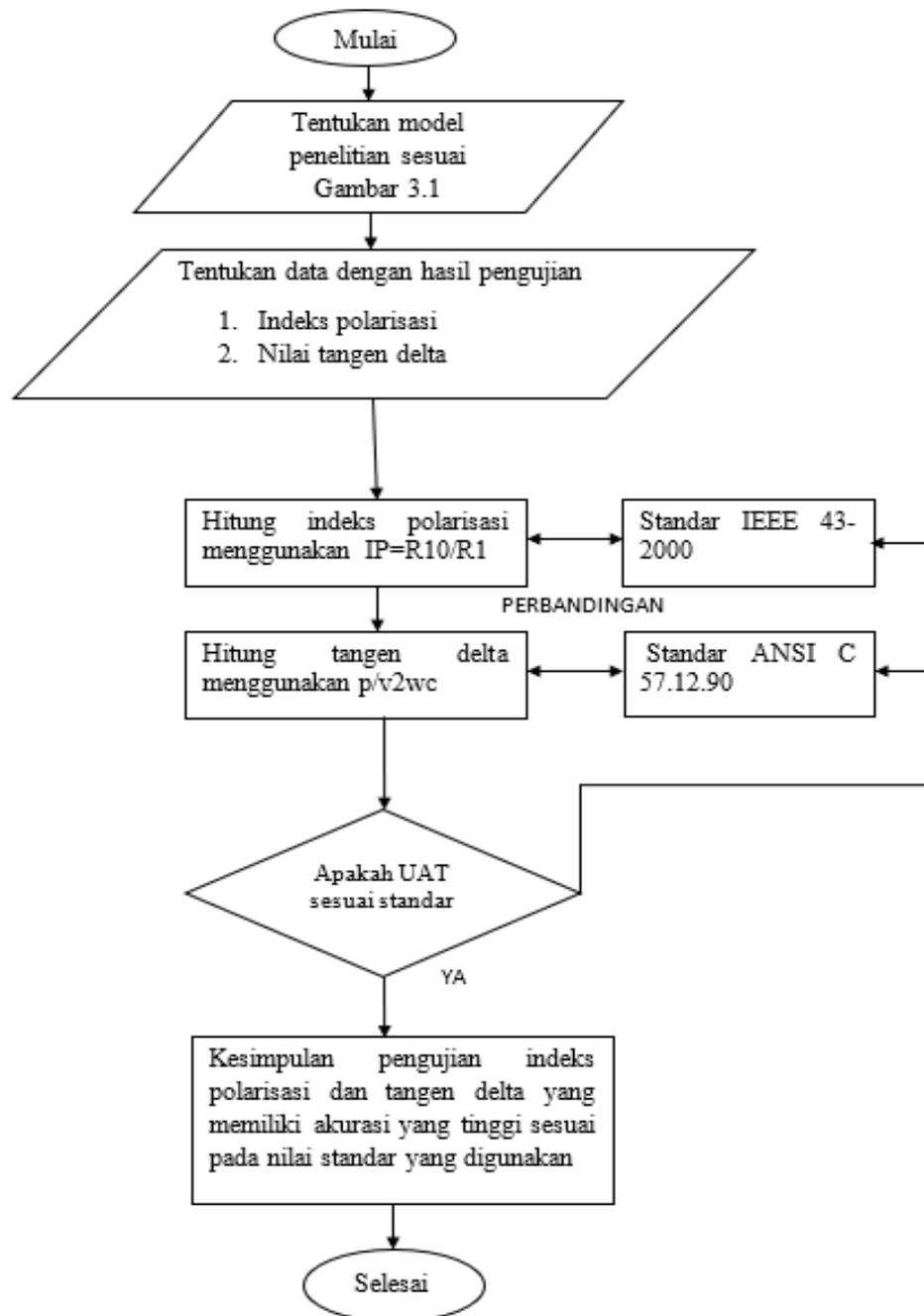


Gambar 3. 2 CPC Omicron

Berikut adalah beberapa fitur dari alat ukur CPC Omicron:

1. Pengujian Proteksi Tegangan Lebih.
2. Pengujian Grounding dan Impedansi Tanah.
3. Pengujian Sistem Proteksi.
4. Pengujian Rangkaian Pemutus Sirkuit (Circuit Breaker).
5. Pengujian Kapasitansi dan Tegangan Tinggi.
6. Portabilitas dan Kemudahan Penggunaan.
7. Integrasi dengan Perangkat Lunak Omicron.
8. Pengujian Relai Proteksi.

3.7 Flowchart Pengujian



Gambar 3. 3 Flowchart

BAB IV

HASIL DAN ANALISA

Merujuk pada model penelitian sesuai Gambar 3.1 dan data hasil uji indeks polarisasi pada Tabel 4.4 dan data hasil uji tan delta pada Tabel 4.6, selanjutnya digunakan untuk penentuan kelayakan unit auxiliary transformer 30 MVA.

4.1. Pengujian Indeks Polarisasi dan tangen delta

Pengujian yang dilakukan di PLTU Cirebon bertujuan untuk mengevaluasi kondisi isolasi pada trafo UAT berdaya 30 MVA. Melalui metode Indeks Polarisasi (PI) dan Tan Delta, hasil pengujian menunjukkan kualitas isolasi yang dapat mempengaruhi kinerja dan keandalan trafo. Pengukuran ini penting untuk mendeteksi degradasi isolasi dini sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan untuk mengurangi resiko gangguan operasional di PLTU Cirebon.

Pengujian tahanan isolasi pada trafo UAT menggunakan dua metode yaitu, Indeks Polarisasi (PI) dan Tan Delta, terdapat standar IEEE dan ANSI yang relevan menetapkan kriteria batas tertentu untuk menentukan apakah kondisi isolasi dianggap baik atau buruk. Indeks Polarisasi (PI), menurut IEEE Std 43-2000, nilai PI minimal yang diterima untuk transformator daya yaitu $PI \geq 2$ menunjukkan isolasi dalam kondisi baik dan $PI < 2$ menunjukkan isolasi mungkin mengalami degradasi. Sedangkan Tan Delta (Dissipation Factor), berdasarkan standar IEEE C57.12.90 dan ANSI/NETA ATS, nilai Tan Delta yang diterima untuk trafo daya berkisar yaitu, Tan Delta $< 0,5\%$ (atau 0,005) menunjukkan isolasi dalam kondisi baik dan Tan Delta $> 0,5\%$ menunjukkan adanya degradasi pada isolasi, sehingga perlu pemeriksaan lebih lanjut.

4.2. Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi

Tabel 4.1 sampai dengan 4.3 menunjukkan data tahunan tahanan isolasi UAT 30 MVA di PLTU Cirebon yang diperoleh melalui pengukuran Indeks Polarisasi. Proses

pengukuran ini melibatkan teknik pengujian resistansi secara berkala, dengan interval pengukuran setiap 1 menit dan 10 menit. Tabel 4.1 adalah data tahanan isolasi indeks polarisasi pada pengukuran **HV-LV1+LV2+GND**, Tabel 4.2 adalah data tahanan isolasi indeks polarisasi pada pengukuran **LV1-HV+LV2+GND**, dan Tabel 4.3 adalah data tahanan isolasi indeks polarisasi pada pengukuran **LV2-HV+LV1+GND** data ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja isolasi UAT dan mengidentifikasi potensi permasalahan.

Tabel 4. 1 Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi HV-LV1+LV2+GND

Name HV-LV1+LV2+GND				
PI	1.92			
Time	R meas	R corr	V DC	IDC
60 s	4.850 GΩ	4.850 GΩ	5.00 kV	1.031 μA
120 s	6.200 GΩ	6.200 GΩ	5.00 kV	806.452 nA
180 s	6.950 GΩ	6.950 GΩ	5.00 kV	719.424 nA
240 s	7.510 GΩ	7.510 GΩ	5.00 kV	665.779 nA
300 s	7.940 GΩ	7.940 GΩ	5.00 kV	629.723 nA
360 s	8.310 GΩ	8.310 GΩ	5.00 kV	601.685 nA
420 s	8.630 GΩ	8.630 GΩ	5.00 kV	579.374 nA
480 s	8.900 GΩ	8.900 GΩ	5.00 kV	561.798 nA
540 s	9.220 GΩ	9.220 GΩ	5.00 kV	542.299 nA
600 s	9.310 GΩ	9.310 GΩ	5.00 kV	537.057 nA

Tabel 4. 2 Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi LV1-HV+LV2+GND

Name LV1-HV+LV2+GND				
PI	2.49			
Time	R meas	R corr	V DC	IDC
60 s	4.910 GΩ	4.910 GΩ	5.00 kV	1.018 μA
120 s	7.040 GΩ	7.040 GΩ	5.00 kV	710.227 nA
180 s	8.480 GΩ	8.480 GΩ	5.00 kV	589.623 nA
240 s	9.510 GΩ	9.510 GΩ	5.00 kV	525.762 nA
300 s	10.320 GΩ	10.320 GΩ	5.00 kV	484.496 nA
360 s	10.880 GΩ	10.880 GΩ	5.00 kV	459.559 nA
420 s	11.340 GΩ	11.340 GΩ	5.00 kV	440.917 nA
480 s	11.700 GΩ	11.700 GΩ	5.00 kV	427.350 nA
540 s	12.000 GΩ	12.000 GΩ	5.00 kV	416.667 nA
600 s	12.230 GΩ	12.230 GΩ	5.00 kV	408.831 nA

Tabel 4. 3 Data Tahanan Isolasi Indeks Polarisasi LV2-HV+LV1+GND

Name		LV2-HV+LV1+GND		
PI	1.87			
Time	R meas	R corr	V DC	I DC
60 s	3.650 GΩ	3.650 GΩ	5.00 kV	1.370 μA
120 s	4.650 GΩ	4.650 GΩ	5.00 kV	1.075 μA
180 s	5.300 GΩ	5.300 GΩ	5.00 kV	943.396 nA
240 s	5.730 GΩ	5.730 GΩ	5.00 kV	872.600 nA
300 s	6.020 GΩ	6.020 GΩ	5.00 kV	830.565 nA
360 s	6.250 GΩ	6.250 GΩ	5.00 kV	800.000 nA
420 s	6.440 GΩ	6.440 GΩ	5.00 kV	776.398 nA
480 s	6.580 GΩ	6.580 GΩ	5.00 kV	759.878 nA
540 s	6.890 GΩ	6.890 GΩ	5.00 kV	725.689 nA
600 s	6.810 GΩ	6.810 GΩ	5.00 kV	734.214 nA

Tabel 4. 4 Data uji pengukuran 1 menit dan 10 menit

	Tabel 4.1	Tabel 4.2	Tabel 4.3
Primary-Sekunder (1 min)	4.850 GΩ	4.910 GΩ	3.650 GΩ
Primary-Sekunder (10 min)	9.310 GΩ	12.230 GΩ	6.810 GΩ

Merujuk dari data hasil pengujian tahanan isolasi dari trafo UAT 30 MVA pada Tabel 4.4 didapatkan hasil perhitungan tahanan isolasi menggunakan metode Indeks Polarisasi pada primer-sekunder trafo 30 MVA menggunakan persamaan (2.4) maka:

HV-LV1+LV2+GND

$$IP = \frac{9.310}{4.850} = 1,91 \text{ G}\Omega$$

LV1-HV+LV2+GND

$$IP = \frac{12.230}{4.910} = 2,49 \text{ G}\Omega$$

LV2-HV+LV1+GND

$$IP = \frac{6.810}{3.650} = 1,87 \text{ G}\Omega$$

Setelah mendapatkan data pengukuran serta perhitungan pada tahanan isolasi UAT 30 MVA dengan metode indeks polarisasi didapatkan suatu nilai hasil pengujian yang menganut aturan standarisasi IEEE 43-2000, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Dengan Metode Indeks Polarisasi

Trafo Daya 30 mva	Data Perhitungan	Nilai Standar IEEE 43-2000	Keterangan
HV-LV1+LV2+GND	1,91 GΩ	<1,25-2 GΩ	Baik
LV1-HV+LV2+GND	2,49 GΩ	>2 GΩ	Sangat Baik
LV1+HV+LV2+GND	1,87 GΩ	<1,25-2 GΩ	Baik

4.3. Pengukuran dan Perhitungan Tahanan Isolasi Tangen Delta

Pengukuran tahanan isolasi dan *tangen delta* adalah metode yang digunakan untuk menilai kualitas bahan isolasi pada peralatan listrik seperti transformator, kabel, dan kapasitor daya. Kedua pengujian ini penting untuk memastikan bahwa isolasi pada peralatan tersebut masih dalam kondisi baik dan dapat menahan arus bocor dengan aman.

Pengukuran tahanan isolasi, alat yang umum digunakan adalah mega ohmmeter atau Megger, yang menghasilkan tegangan tinggi (500 V hingga beberapa kV) untuk mengukur tahanan bahan isolasi dalam satuan megaohm (MΩ). Semakin tinggi nilai tahanan isolasi, semakin baik bahan isolasi dalam menahan arus bocor, yang berarti isolasi tersebut berada dalam kondisi yang lebih baik. Pengukuran tahanan isolasi ini dipengaruhi oleh suhu, kelembaban, dan kondisi fisik bahan isolasi, sehingga sering diterapkan faktor koreksi untuk menyesuaikan hasil pengukuran pada suhu standar, misalnya 20°C atau 30°C.

Di sisi lain, pengukuran tangen delta ($\text{Tan } \delta$) atau yang juga disebut sebagai *Dissipation Factor (DF)*, dilakukan untuk mengukur kerugian daya pada bahan

isolasi akibat adanya arus bocor yang melewati isolasi tersebut. Nilai $\tan \delta$ adalah perbandingan antara komponen resistif dan kapasitif dari arus bocor, dan dinyatakan dalam bentuk desimal atau persen (%). Semakin rendah nilai $\tan \delta$, semakin kecil kerugian daya pada isolasi yang menunjukkan isolasi dalam kondisi yang lebih baik. Pengukuran $\tan \delta$ biasanya dilakukan dengan alat Power Factor Test Set yang memberikan tegangan AC pada frekuensi tertentu (umumnya 50 atau 60 Hz).

Sebelum melakukan pengukuran, dilakukan persiapan seperti memastikan peralatan bebas dari debu atau kelembaban yang dapat mempengaruhi hasil. Pengujian dimulai dengan menerapkan tegangan sesuai spesifikasi, kemudian membaca dan mencatat data seperti tegangan keluaran, arus keluaran, kerugian daya, dan kapasitansi.

Interpretasi hasil pengukuran biasanya ditunjukkan dalam bentuk nilai tahanan isolasi dan $\tan \delta$. Jika nilai tahanan isolasi rendah atau nilai $\tan \delta$ tinggi, hal ini bisa menjadi indikasi bahwa isolasi mengalami degradasi, kelembaban. [12] atau penurunan kualitas. Sebaliknya, nilai tahanan isolasi yang tinggi dan $\tan \delta$ yang rendah menunjukkan isolasi yang masih dalam kondisi baik. Berdasarkan standar yang berlaku, hasil pengukuran ini diberikan penilaian “Pass” atau “Fail,” yang menentukan apakah peralatan tersebut masih layak atau perlu dilakukan perawatan seperti ditunjukkan Tabel 4.6 sampai dengan Tabel 4.8.

Tabel 4.6 Data Tangen Delta Block 1: injection at Primer

No.	Meas.	Test mode	Freq (Hz)	V out (kV)	* I out (mA)	* Watt losses (mW)	DF meas %	DF corr %	Cap. meas (pF)
1	ICH+ICHL+ICHT	GST	50.00	10.00	67.36	2177.37	0.3232	0.2521	21440.4
2	ICH	GSTg-A+B	50.00	10.00	7.36	309.71	0.4208	0.3282	2339.8
3	ICHL	UST-A	50.00	10.00	29.48	898.87	0.3049	0.2378	9383.4
4	ICHT	UST-B	50.00	10.00	30.53	969.35	0.3175	0.2477	9716.8
Cross check: calculated ICHL					29.48	898.31	0.3048		9383.8

Tabel 4. 7 Data Tangen Delta Block 2: injection at Secunder

No.	Meas.	Test mode	Freq (Hz)	V out (kV)	* I out (mA)	* Watt losses (mW)	DF meas %	DF corr %	Cap. meas (pF)
5	ICL+ICLT+ICLH	GST	50.00	6.00	49.87	1703.74	0.3416	0.2665	15870.3
6	ICL	GSTg-A+B	50.00	6.00	19.20	717.42	0.3736	0.2914	6109.1
7	ICLT	UST-B	50.00	6.00	1.19	86.19	0.7258	0.5662	378.0
8	ICLH	UST-A	50.00	6.00	29.48	897.69	0.3045	0.2375	9383.5
Cross check: calculated ICLT					1.19	88.63	0.7457		377.7

Tabel 4. 8 Data Tangen Delta Block 3: injection at Tertier

No.	Meas.	Test mode	Freq (Hz)	V out (kV)	* I out (mA)	* Watt losses (mW)	DF meas %	DF corr %	Cap. meas (pF)
9	ICT+ICTH+ICTL	GST	50.00	6.00	54.58	1639.48	0.3004	0.2343	17371.1
10	ICT	GSTg-A+B	50.00	6.00	22.87	582.10	0.2545	0.1985	7276.9
11	ICTH	UST-B	50.00	6.00	30.52	967.77	0.3170	0.2473	9716.3
12	ICTL	UST-A	50.00	6.00	1.19	86.08	0.7249	0.5654	378.0
Cross check: calculated ICTH					30.53	971.30	0.3182		9716.2

Tabel 4.6 sampai 4.8 menjelaskan bahwa:

- a. *ICHL* : *Injeks Capacitance high low (titik pengukuran di sisi primer trafo dengan sekunder trafo).*
- b. *ICH* : *Injeks Capacitance high (titik pengukuran di sisi primer trafo dengan grounding trafo).*
- c. *ICTH* : *Injeks Capacitance high Tersier.*
- d. *ICL* : *Injeks Capacitance Low.*
- e. *ICLT* : *Injeks Capacitance Low Tersier.*
- f. *ICLH* : *Injeks Capacitance Low High.*

Ada macam istilah saat ukur tangen delta yaitu:

- g. *UST* : *Ungrounded Speciment Test (tes tidak didukung) diketanahkan.*
- h. *GST* : *Grounded Speciment Test (tes didukung) diketanahkan.*

i. GSTg: Grounded Speciment Test with guard (menguji guard).

Merujuk dari data hasil pengujian tahanan isolasi UAT 30 MVA pada Tabel 4.6 sampai dengan Tabel 4.8 menunjukkan bahwa terdapat data hasil pengukuran berbagai parameter yang digunakan untuk menilai kondisi isolasi trafo di antaranya *watt losses*, kapasitansi, dan faktor disipasi (DF). Perhitungan tangen delta atau faktor disipasi (DF) pada isolasi trafo dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kerugian daya dalam isolasi tersebut, yang bisa menjadi indikasi kualitas isolasi. Nilai tangen delta dihitung menggunakan persamaan (2.13) dan hasil pengukuran Tangen delta sesuai Tabel 4.6 sampai dengan 4.8.

$$P : 2,1774 \text{ W}$$

$$f : 50 \text{ Hz}$$

$$C : 21440,4 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$V_{out} : 10.000 \text{ V}$$

$$\tan \delta = \frac{2,1774}{2,3,14,50,21440,4 \times 10^{-12}, 10.000^2} \times 100 \%$$

$$\tan \delta = \frac{2,1774}{673,22} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,323\%$$

$$P : 1,70374 \text{ W}$$

$$f : 50 \text{ Hz}$$

$$C : 15870,3 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$V_{out} : 6000 \text{ V}$$

$$\tan \delta = \frac{1,7037}{2,3,14,50,15870,3 \times 10^{-12}, 6000^2} \times 100 \%$$

$$\tan \delta = \frac{1,7037}{179,39} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,949\%$$

$$P : 1,63948 \text{ W}$$

$$f : 50 \text{ Hz}$$

$$C : 17371,1 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$V_{out} : 6000 \text{ V}$$

$$\tan\delta = \frac{1,63948}{2,3,14.50.17371,1 \times 10^{-12}.6000^2} \times 100 \%$$

$$\tan\delta = \frac{1,63948}{196,36} \times 100\%$$

$$\tan\delta = 0,834 \%$$

Setelah mendapatkan data pengukuran serta perhitungan pada tahanan isolasi UAT 30 MVA dengan metode Tangen Delta didapatkan suatu nilai hasil pengujian yang menganut aturan standarisasi ANSI C57.12.90, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Dengan Metode Tangen Delta

Trafo Daya 30 mva	Data Perhitungan	Nilai Standar ANSI C57.12.90	Keterangan
Primer	0,323%	$\leq 0,5 \%$	Baik
Secunder	0,949%	$\geq 0,7 \% \leq 1.0\%$	Investigasi
Tersier	0,834 %	$\geq 0,7 \% \leq 1.0\%$	Investigasi

4.4. Analisis Perhitungan Indeks Polarisasi

Hasil pengukuran dan perhitungan tahanan isolasi pada Unit Auxiliary Transformer (UAT) 30 MVA di PLTU Cirebon menggunakan metode Indeks Polarisasi (PI) menunjukkan bahwa kondisi isolasi transformator berada dalam kategori baik. Berdasarkan standar IEEE 43-2000 nilai PI yang menunjukkan isolasi dalam kondisi baik adalah lebih dari 2,0. Nilai ini menunjukkan bahwa bahan isolasi pada transformator masih memiliki kualitas yang memadai untuk memastikan keandalan operasi dan keamanan transformator dalam jangka panjang. Pengujian ini

juga menjadi indikator penting untuk mengetahui apakah isolasi bebas dari kelembapan, kontaminasi, atau degradasi yang dapat membahayakan performa transformator.

Metode Indeks Polarisasi menjadi salah satu teknik pengujian yang diandalkan karena dapat mengidentifikasi perubahan karakteristik bahan isolasi berdasarkan respons waktu terhadap tegangan uji. Pengukuran ini nilai tahanan isolasi diukur pada interval waktu tertentu, yaitu 1 menit dan 10 menit untuk mendapatkan perbandingan. Nilai yang lebih tinggi setelah 10 menit dibandingkan dengan 1 menit menunjukkan bahwa bahan isolasi mampu mengurangi arus permukaan yang disebabkan oleh kelembapan atau kontaminan sehingga memastikan isolasi dalam kondisi baik.

Namun, hasil pengukuran PI sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti suhu, kelembapan dan kondisi lingkungan saat pengujian. Suhu memengaruhi resistansi isolasi karena sifat material isolasi yang cenderung menurunkan nilai resistansi pada suhu yang lebih tinggi. Oleh karena itu, standar IEEE 43-2000 merekomendasikan koreksi hasil pengukuran ke suhu referensi 20°C untuk memperoleh hasil yang lebih konsisten dan dapat dibandingkan. Selain itu, kelembapan udara di sekitar lokasi pengujian juga memiliki peran signifikan. Kehadiran kelembapan dapat meresap ke dalam bahan isolasi, menurunkan nilai resistansi, dan memengaruhi hasil perhitungan PI.

Kondisi lingkungan lainnya seperti debu, polusi atau keberadaan kontaminan kimia, juga harus dipertimbangkan karena dapat menyebabkan arus bocor yang tidak diinginkan pada permukaan isolasi. Oleh sebab itu, menjaga kondisi lingkungan yang seragam dan terkontrol selama pengujian menjadi hal yang sangat penting. Pengukuran sebaiknya dilakukan di lingkungan yang bersih dan kering, dengan peralatan yang telah dikalibrasi untuk memastikan akurasi hasil. Hindari juga pengujian saat cuaca ekstrem, seperti hujan atau kelembapan yang sangat tinggi, karena dapat memengaruhi hasil secara signifikan.

Mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, pengukuran PI pada transformator UAT 30 MVA di PLTU Cirebon yang menunjukkan nilai di atas 2,0 dapat

disimpulkan bahwa isolasi transformator berada dalam kondisi baik. Hal ini mencerminkan bahan isolasi yang bersih, kering, dan tidak terdegradasi secara signifikan, sehingga mampu mendukung operasi transformator secara andal. Pengujian berkala dengan metode PI sangat penting untuk memantau kondisi isolasi dan mencegah potensi kegagalan di masa mendatang, terutama untuk transformator berkapasitas besar seperti UAT 30 MVA yang memiliki peran krusial dalam sistem pembangkit listrik.

4.5. Analisis Hasil Pengujian Tan Delta

Hasil pengukuran tan delta ($\tan \delta$) sebesar 0,323% pada primer 0,949% pada Secunder dan 0,834% pada tersier di Unit Auxiliary Transformer (UAT) 30 MVA di PLTU Cirebon menunjukkan bahwa isolasi transformator berada dalam kondisi yang baik, Tetapi perlu dilakukan investigasi lebih lanjut karena bagian secunder dan tersier melebihi 0,7% tetapi masih dibawah 1,0% sesuai dengan kriteria yang ditetapkan oleh standar IEEE C57.12.90 dan ANSI/NETA ATS. Nilai $\tan \delta$ ini menunjukkan bahwa kerugian energi pada isolasi lumayan kecil, yang merupakan indikator efisiensi tinggi dan minimnya kebocoran energi akibat sifat dielektrik bahan isolasi. Dengan nilai $\tan \delta$ yang rendah, dapat disimpulkan bahwa material isolasi transformator masih memiliki kualitas dielektrik yang baik, bebas dari kelembapan, kontaminasi, atau degradasi termal yang signifikan.

Tan δ atau dikenal sebagai sudut rugi dielektrik merupakan parameter penting dalam mengukur kualitas bahan isolasi. Nilai ini menunjukkan rasio antara daya yang hilang akibat pemanasan resistif pada isolasi dan daya yang disimpan sebagai energi medan listrik. Semakin kecil nilai $\tan \delta$, semakin rendah kerugian energi yang terjadi, yang berarti transformator dapat beroperasi secara lebih efisien. Hasil $\tan \delta$ yang masih dibawah 1,0% yang menunjukan berada dalam batas aman yang direkomendasikan oleh standar internasional, yang umumnya menetapkan bahwa nilai $\tan \delta$ untuk isolasi dalam kondisi baik harus di bawah 1,0%.

Selain efisiensi, nilai $\tan \delta$ yang rendah memberikan indikasi keandalan jangka panjang dari sistem isolasi. Hal ini menunjukkan bahwa isolasi pada UAT 30 MVA di PLTU Cirebon mampu mempertahankan karakteristik dielektriknya tanpa mengalami degradasi yang signifikan. Kondisi ini sangat penting untuk mendukung kestabilan operasional transformator dalam sistem pembangkit listrik, terutama pada lingkungan seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang memiliki beban kerja tinggi dan membutuhkan transformator yang andal.

Pengujian $\tan \delta$ juga memberikan keuntungan dalam mendeteksi potensi masalah isolasi pada tahap awal. Jika nilai $\tan \delta$ mulai meningkat dari waktu ke waktu, hal ini dapat menjadi tanda awal adanya kelembapan, kontaminasi, atau perubahan struktur material isolasi akibat penuaan. Oleh karena itu, pengukuran $\tan \delta$ secara rutin menjadi langkah yang sangat penting dalam program pemeliharaan prediktif transformator, untuk memastikan bahwa sistem isolasi tetap berada dalam kondisi optimal dan mencegah kerusakan yang dapat menyebabkan gangguan operasional.

Secara keseluruhan, nilai $\tan \delta$ sebesar 0,323% pada primer 0,949% pada Sekunder dan 0,834% pada tersier ini menunjukkan bahwa UAT 30 MVA di PLTU Cirebon memiliki efisiensi operasi yang baik, keandalan isolasi yang tinggi, dan potensi umur pakai yang panjang, walaupun pada sisi sekunder dan tersier perlu di investigasi lebih lanjut tetapi UAT masih diperbolehkan untuk beroperasi. transformator tersebut tetap dapat mendukung kelangsungan operasional pembangkit listrik secara stabil tanpa risiko signifikan terkait masalah isolasi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Hasil pengukuran Indeks Polarisasi (PI) pada UAT 30 MVA di PLTU Cirebon menunjukkan nilai yang melebihi 2,0, sesuai dengan standar IEEE 43-2000. Nilai ini menunjukkan bahwa bahan isolasi bersih, kering, dan tidak terpengaruh oleh kelembapan atau kontaminasi, isolasi berada dalam kondisi baik dan andal.
2. Hasil pengukuran tan delta ($\tan \delta$) sebesar 0,323% pada primer 0,949% pada Secunder dan 0,834% pada tersier menunjukkan bahwa isolasi pada Unit Auxiliary Transformer (UAT) 60 MVA di PLTU Cirebon dalam kondisi baik pada bagian primer sesuai dengan standar IEEE C57.12.90 dan ANSI/NETA ATS. Tetapi untuk bagian secunder tertier dalam kondisi kurang baik dan perlu investigasi lebih lanjut tetapi UAT masih tetap bisa digunakan.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa transformator masih dapat diandalkan untuk mendukung operasional pembangkit listrik tanpa adanya masalah signifikan pada sistem isolasi. Kondisi isolasi yang baik ini mendukung efisiensi energi transformator, mengurangi risiko kerusakan akibat kebocoran arus, dan memastikan kestabilan operasional jangka panjang.

5.2 Saran

1. Lakukan pengukuran PI dan $\tan \delta$ secara berkala sebagai bagian dari program pemeliharaan prediktif. Hal ini penting untuk memantau perubahan nilai yang dapat menjadi indikasi awal adanya kelembapan, degradasi isolasi, atau kerusakan lainnya. Dengan pemantauan rutin, langkah pencegahan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius.
2. Pastikan lingkungan operasional transformator dijaga agar bebas dari kelembapan tinggi, kontaminasi debu, dan polusi kimia. Implementasi sistem

pengendalian suhu dan kelembapan pada ruang transformator juga dapat membantu memperpanjang umur pakai isolasi.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] “PT Cirebon Electric Power (CEP).”
- [2] “B.P. Pemeliharaan, ‘Buku pedoman pemeliharaan transformator tenaga,’” 2014.
- [3] IEEE, “IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery IEEE Power and Energy Society,” *The institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*, vol. 43, pp. 9–14, 2000.
- [4] *C57.12.90-1999 Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers*. IEEE, 1999.
- [5] ade panji Nugraha, “Isolation Resistance Feasibility Test Analysis Based On Polarization Index And Delta Tangent In,” 2023.
- [6] M. F. Robbani, D. Nugroho, and G. Gunawan, “Penentuan kelayakan tahanan isolasi pada transformator 60 MVA di gardu induk 150 KV tegal dengan menggunakan indeks polarisasi, tangen delta, dan breakdown Voltage,” *Elektrika*, vol. 12, no. 2, pp. 60–66, 2020.
- [7] R. F. Rifqyawan, “Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Trafo 30 Mva Di Gi 150/20 Kv Pt Apf Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi Dan Tangen Delta,” 2022, *Universitas Islam Sultan Agung*.
- [8] J. T. Elektro, F. Teknik, and U. Tidar, “Uji Kelayakan Belitan Unit Auxiliary Transformer (UAT) Pltu Rembang,” 2021.
- [9] Nugroho R, “Analisis Kegagalan Auto Transfer Antara UAT (Unit Auxiliary Transformer) Dan SST (Station Service Transformer) Dikawasan Gtg Indonesia Power Semarang,” pp. 40–46, 2021.
- [10] *IEC 60156 International Standard Norme Internationale Insulating liquids-Determination of the breakdown voltage at power frequency-Test method Isolants liquides-Détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle-Méthode d’essai*. 2018. [Online]. Available: www.iec.ch
- [11] Ir.Basuki Prayitno, *Panduan Pemeliharaan trafo Tenaga*. 2003.

- [12] D. Sebagai and S. Satu, “Analisis Kualitas Tahanan Isolasi Pada Transformator Dengan Preventive Maintenance Di Gardu Induk Garuda Sakti Tugas Akhir.”

