

**ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA
BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA, DAN
BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150 KV KEBASEN TEGAL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana S1 Pada Prodi
Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung



Disusun Oleh :

FIKRI FADHILLAH MUHAMMAD

30602200152

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

2025

FINAL PROJECT

***FEASIBILITY ANALYSIS OF 60 MVA POWER TRANSFORMER ISOLATION
BASED ON POLARIZATION INDEX, TAN DELTA, AND BREAKDOWN
VOLTAGE AT THE 150 KV KEBASEN TEGAL SUBSTATION***

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



Arranged by :

FIKRI FADHILLAH MUHAMMAD

30602200152

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025**

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA, DAN BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150 KV KEBASEN TEGAL” ini disusun oleh :

Nama : Fikri Fadhillah Muhammad
NIM : 30602200152
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada :

Hari : Minggu
Tanggal : 8 Juni 2025

Pembimbing

Tanda Tangan

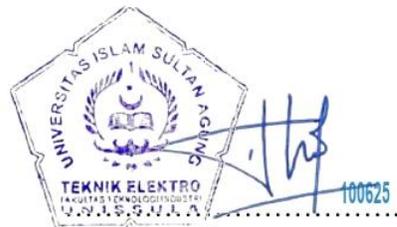
Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.
NIDN : 0614117701

090625

Mengetahui,

Kepala Program Studi Teknik Elektro

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



LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA, DAN BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150 KV KEBASEN TEGAL” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada :

Hari : Senin
Tanggal : 2 Juni 2025

Tim Penguji

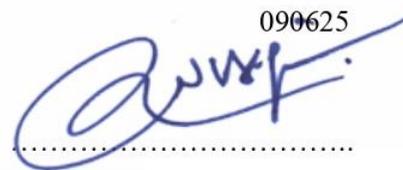
Tanda Tangan

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

Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT., IPM.
NIDN : 0628086501
Penguji 1

Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.
NIDN : 0614117701
Penguji 2

090625



SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Fikri Fadhillah Muhammad

NIM : 30602200152

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **"ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA, DAN BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150 KV KEBASEN TEGAL"** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 9 Juni 2025

Yang menyatakan



Fikri Fadhillah Muhammad

PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fikri Fadhillah Muhammad

NIM : 30602200152

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini menyerahkan karya ilmiah berupa ~~Tugas Akhir/Skripsi/Tesis/Disertasi*~~ dengan judul :

ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA, DAN BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150 KV
KEBASEN TEGAL

dan menyetujuinya menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dalam pangkalan data, dan dipublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan 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 pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 9 Juni 2025

Yang menyatakan,



(Fikri Fadhillah Muhammad)

*Coret yang tidak perlu

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah SWT. atas rahmat dan hidayah-Nya yang memberi saya kesempatan untuk menuntut ilmu dan menyelesaikan pendidikan dalam keadaan sehat wal'afiat. Shalawat serta Salam kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW. semoga syafaatnya mengiringi setiap langkah kaki kita semua, Aamiin Yaa Robbaalalamin. Penelitian ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata Satu (S1) di Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penyusunannya, banyak pihak yang berperan membantu baik secara moral maupun material. Oleh karena itu saya menyampaikan ucapan banyak terimakasih kepada:

1. Allah SWT. atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya bisa menyelesaikan penelitian ini.
2. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Dr. Ir. Novi Mariyana, ST., MT., IPU., ASEAN, Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Bapak Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing saya yang membimbing, mengarahkan, mengajarkan, serta memberikan motivasi dengan bijak dan penuh kesabaran hingga penyusunan penelitian selesai.
6. Seluruh Dosen jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu dan wawasan yang diajarkan selama masa perkuliahan, serta seluruh Staff Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang selalu siap membantu dalam berbagai urusan administratif dan teknis selama masa perkuliahan.
7. Bapak, Ibu, serta Saudara-saudara saya tercinta atas dukungan kepada saya berupa materi, kasih sayang, dan doa yang telah diberikan.

8. Teman-teman alumni Politeknik Elektronika Negeri Surabaya yang melanjutkan pendidikan di Universitas Islam Sultan Agung Semarang khususnya Adinda Rahma Satya Meunasah, Ziauddin Haq Vafian Zafiro, M. Agus Rahmad Hidayat, M. Aufa Baharuddin Syah, dan Ahmad Aziz Hartawan yang telah membantu banyak mulai dari mengajarkan, mengarahkan, serta tempat berdiskusi dan konsultasi sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.
9. Semua pihak di luar yang tertulis dan telah memberikan bantuan hingga selesainya penelitian ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh penulis.

Semarang, 3 Juni 2025

Yang menyatakan,



Fikri Fadhillah Muhammad



ABSTRAK

Penggunaan transformator daya secara terus menerus dapat menyebabkan kualitas isolasi transformator menurun. Kualitas isolasi transformator yang menurun dapat menyebabkan kerusakan pada transformator yang akan berdampak pada keandalan listrik. Salah satu cara yang dilakukan untuk mendeteksi tanda-tanda kerusakan yang terjadi pada isolasi transformator adalah dengan melakukan pengujian tahanan isolasi pada transformator.

Penelitian ini mengambil lokasi pada objek transformator daya unit 2 pada Gardu Induk 150 kV Kebasen Tegal dengan menggunakan metode pengujian indeks polarisasi, tangen delta, dan *breakdown voltage* (BDV). Setelah data pengujian didapatkan, maka dilakukan perhitungan dan analisa lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat untuk ditentukan apakah berdasar hasil uji yang didapatkan transformator masih dalam keadaan baik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai indeks polarisasi transformator dinyatakan dalam kondisi baik sesuai dengan standar IEEE 43-2000 dengan nilai $>1,25$; namun terjadi pemburukan pada sisi Sekunder–Ground dengan nilai IP 1,14. Untuk hasil uji tangen delta pada winding dan bushing didapatkan bahwa nilai tangen delta rata-rata dalam keadaan yang baik sesuai standar ANSI C57.12.90 yaitu dibawah 0,5%; namun terjadi penurunan nilai tangen delta pada winding hubungan C_{LG} dengan nilai 0,69%. Untuk hasil uji *Breakdown Voltage* (BDV) pada minyak *Maintank* dan OLTC menunjukkan kondisi minyak isolasi transformator berada pada kondisi yang baik sesuai standar IEC 60156 dengan nilai diatas 50 kV.

Kata Kunci : *Transformator Daya, Tahanan Isolasi, Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Breakdown Voltage*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL (BAHASA INDONESIA).....	i
HALAMAN JUDUL (BAHASA INGGRIS)	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
SURAT PERNYATAAN.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian.....	4
1.5. Manfaat	5
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Landasan Teori.....	9
2.2.1 Gardu Induk	9
2.2.2 Transformator.....	11
2.2.3 Transformator Daya	13
2.2.4 Pemeliharaan Transformator	19
2.2.5 Tahanan Isolasi.....	21

2.2.6	Pengujian Indeks Polarisasi pada Transformator Daya.....	22
2.2.7	Pengujian Tangen Delta pada Transformator Daya.....	23
2.2.8	Pengujian <i>Breakdown Voltage</i> (BDV) pada Transformator Daya....	31
BAB III METODE PENELITIAN		33
3.1.	Model Penelitian	33
3.2.	Tahapan Penelitian	34
3.3.	Langkah Penelitian.....	36
3.3.1.	Data Transformator Daya.....	36
3.3.2.	Pengujian Indeks Polarisasi (IP)	38
3.3.3.	Pengujian Tangen Delta	40
3.3.4.	Pengujian Breakdown Voltage	41
BAB IV DATA DAN ANALISA.....		43
4.1	Hasil Pengujian Indeks Polarisasi	43
4.2	Hasil Pengujian Tangen Delta	47
4.3	Hasil Pengujian <i>Breakdown Voltage</i> (BDV)	53
BAB V PENUTUP		60
5.1	Kesimpulan	60
5.2	Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA		62



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Switchyard Gardu Induk.....	10
Gambar 2.2 Transformator Daya Unit 2 GI Kebasen.....	13
Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian phasor arus pengujian tangen delta.....	24
Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen isolasi trafo.....	27
Gambar 2.5 Skema rangkaian pengujian tan delta auto trafo.....	28
Gambar 2.6 Strukur bushing (C1 adalah isolasi antara tap electrode dengan conductor, C2 adalah isolasi antara tap electrode dengan ground).....	29
Gambar 2.7 Diagram pengujian tangent delta C1 pada bushing.....	29
Gambar 2.8 Diagram pengujian isolasi delta C2 pada bushing.....	30
Gambar 2.9 Diagram pengujian tangent delta hot collar pada bushing.....	30
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian.....	34
Gambar 3.2 Nameplate Transformator Daya Unit 2 60 MVA.....	37
Gambar 4.1 Pengujian Indeks Polarisasi.....	44
Gambar 4.2 Grafik Hasil Pengujian Indeks Polarisasi.....	45
Gambar 4.3 Pengujian Tangen Delta.....	48
Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengujian Tangen Delta Winding.....	50
Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengujian Tangen Delta Bushing.....	53
Gambar 4.6 Pengujian Breakdown Voltage.....	54
Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengujian Breakdown Voltage (BDV) Maintank.....	56
Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengujian Breakdown Voltage (BDV) OLTC.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar Pengujian Indeks Polarisasi menggunakan IEEE 43-2000	23
Tabel 2.2 Standar Pengujian Tangen Delta Menggunakan ANSI C 57.12.90	26
Tabel 2.3 Standar Pengujian BDV Menggunakan IEC 60156	32
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Indeks Polarisasi.....	45
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tangen Delta Winding.....	49
Tabel 4.3 Tabel Hasil Pengujian Tangen Delta Bushing	52
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Breakdown Voltage (BDV) pada Maintank	55
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Breakdown Voltage (BDV) pada OLTC.....	57



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Di era modern yang terus maju dengan pesatnya perkembangan teknologi, listrik telah menjadi kebutuhan dasar bagi kehidupan masyarakat. Hampir semua aspek kegiatan sehari-hari memerlukan pasokan energi listrik. Ketersediaan listrik kini menjadi kebutuhan utama, baik di kota-kota besar maupun daerah-daerah terpencil. Sebagai perusahaan yang bergerak di bidang penyaluran listrik, PT. PLN (Persero) bertanggung jawab untuk memastikan pasokan listrik yang stabil hingga ke pelosok negeri. Salah satu upaya untuk menjaga kelancaran pasokan listrik adalah dengan melakukan perawatan rutin pada komponen-komponen penyaluran energi listrik, termasuk transformator tenaga di Gardu Induk.

Transformator daya merupakan peralatan utama dalam sistem tenaga listrik, karena peralatan ini berhubungan langsung dengan sistem transmisi dan distribusi listrik. Transformator daya berfungsi untuk mentransformasikan baik dari tegangan listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau dari tegangan rendah ke tegangan yang lebih tinggi, sesuai dengan kebutuhan sistem yang selalu senantiasa berubah-ubah sesuai penggunaan energi listrik pada konsumen. Oleh karena itu, agar sistem kelistrikan tetap berfungsi dengan optimal, transformator tenaga harus selalu dalam kondisi prima sehingga dapat beroperasi secara efisien dan andal sesuai dengan masa pemakaiannya.

Karena begitu pentingnya dan begitu krusialnya peranan transformator dalam transmisi tenaga listrik, transformator hampir setiap saat bekerja terus-menerus tanpa henti. Penggunaan transformator yang secara terus menerus ini dapat menyebabkan kualitas isolasi transformator menurun, penurunan kualitas isolasi ini tentu saja akan dapat menyebabkan gangguan pada transformator berupa kegagalan operasi dan kerusakan pada transformator. Gangguan pada transformator ini dapat berakibat fatal seperti terputusnya penyaluran daya listrik ke konsumen. Maka dari itu, pemeliharaan pada transformator perlu dilakukan secara rutin, sehingga kita dapat mencegah kegagalan dan kerusakan yang terjadi pada isolasi transformator. Salah satu cara untuk

mengetahui transformator dalam keadaan baik atau tidak adalah dengan dilakukan pengujian pada transformator.

Transformator Daya Unit 2 di GI 150 kV Kebasen berkapasitas 60 MVA telah beroperasi sekitar 7 tahun sejak tanggal 13 Desember 2018, dengan beban puncak rata-rata 80% setiap harinya. Walaupun masih terbilang baru, transformator bisa saja mengalami penurunan kualitas tahanan isolasi, terlebih lagi bila pembebanan yang dilakukan pada transformator daya cukup tinggi setiap harinya. Oleh karena itu, pengujian tahanan isolasi secara berkala menjadi penting guna memperoleh data terkini mengenai kondisi transformator. Isolasi pada transformator berperan sebagai pemisah antara komponen yang bertegangan dan tidak bertegangan, sekaligus mengisolasi antar-fasa yang memiliki tegangan listrik.

Mutu pada isolasi trafo tenaga ditentukan dari hasil pengukuran suatu tahanan isolasi. Pengetesan tahanan isolasi bisa dilakukan dengan menggunakan beberapa metode seperti Indeks Polarisasi (IP), Tangen Delta, *Dissolve Gas Analysis* (DGA), *Ratio Test*, Rdc, HV test, maupun *Breakdown Voltage* (BDV). Nilai pada pengujian tahanan isolasi dapat dipengaruhi banyak faktor, seperti suhu, kelembapan, kotoran, atau jalur bocor pada bagian-bagian trafo. Semua pengujian ini merupakan langkah PLN untuk mencegah terjadinya gangguan pada transformator melalui pemberlakuan pemeliharaan terjadwal, atau dikenal sebagai *preventive maintenance*, adalah perawatan rutin yang dilaksanakan berdasarkan interval waktu tertentu sesuai standar operasional. Tujuannya adalah untuk mencegah terjadinya kerusakan atau kondisi tidak normal pada peralatan. Untuk transformator daya, jadwal pemeliharaan preventif ini dilakukan setiap dua tahun sekali.

Pada penelitian ini dipilih metode pengetesan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV) dikarenakan ketiga metode ini lebih lengkap serta hasilnya lebih akurat dan dapat melengkapi satu sama lain dibandingkan cara lainnya. Untuk pengukuran Indeks Polarisasi bertujuan supaya mengetahui dan memastikan peralatan masih layak atau tidak dalam pengoperasiannya dengan melihat hasil ukur faktor rugi-rugi di bagian elektrik dan hasil ukur permukaan parsial dengan mengacu pada standar IEEE 43-200. Pada pengukuran nilai Tangen Delta melihat kondisi isolasi

antara belitan dengan ground dan isolasi antara dua belitan dengan mengukur arus bocor kapasitif pada transformator berdasarkan standar ANSI C 57.12.90. Sedangkan pada pengukuran *Breakdown Voltage* (BDV) melihat kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan sesuai dengan standar IEC 60156. Hasil pengukuran dari ketiga metode ini dikatakan cukup untuk menentukan kelayakan tahanan isolasi trafo tenaga karena telah meliputi tiga komponen utama trafo, yaitu peralatan luar trafo, isolasi baik antar belitan atau antar belitan dengan ground, dan minyak trafo.

Mengacu pada pembahasan sebelumnya mengenai latar belakang dan berbagai kemungkinan gangguan yang dapat terjadi pada transformator, maka diangkatlah penelitian dengan judul “Analisis Kelayakan Isolasi Transformator Daya 60 MVA Berdasarkan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* Pada Gardu Induk 150 kV Kebasen Tegal”. Pada penelitian ini nantinya akan dilakukan pengkajian, analisis, dan perbandingan hasil pengujian terhadap standar yang berlaku untuk mengevaluasi performa isolasi pada trafo. Hasil evaluasi ini kemudian akan menjadi dasar penilaian kualitas isolasi dan menentukan kelayakan operasional transformator daya dengan mengacu pada berbagai metode pengujian yang telah dijelaskan sebelumnya.

1.2. Rumusan Masalah

Merujuk pada latar belakang penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya, berikut merupakan rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini:

1. Bagaimana hasil pengujian tahanan isolasi pada transformator daya 60 MVA berdasarkan pengujian indeks polarisasi, tangen delta, *Breakdown Voltage* (BDV) di Gardu Induk 150 KV Kebasen.
2. Bagaimana perbandingan kelayakan kondisi isolasi antara hasil pengujian tahanan isolasi berdasarkan metode indeks polarisasi, tangen delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV) di Gardu Induk 150 KV Kebasen dengan standarisasi pengujian.
3. Bagaimana menentukan kondisi transformator daya 60 MVA di Gardu Induk 150 KV Kebasen yang layak dan baik berdasarkan perbandingan hasil uji

indeks polaritas, tangen delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV) di Gardu Induk 150 KV Kebasen.

1.3. Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, dalam penelitian ini dibutuhkan batasan masalah agar pembahasannya tidak terlalu luas. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tempat penelitian yang dipakai adalah Gardu Induk 150 kV Kebasen yang berlokasi di Jalan Raya II Tegal-Slawi Desa Kebasen, Kecamatan Talang, Kabupaten Tegal, Jawa Tengah.
2. Penelitian ini hanya membahas mengenai pengujian tahanan isolasi yaitu pengujian Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV) pada Transformator Unit 2 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Kebasen.
3. Penelitian dilakukan perhitungan sesuai data yang ada dengan rumus pada metode Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV).
4. Data yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada data hasil pemeliharaan 2 tahunan terakhir pada Transformator Unit 2 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Kebasen.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menilai performa tahanan isolasi transformator daya 60 MVA melalui analisis hasil uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV).
2. Mengevaluasi dan mengkomparasikan hasil pengukuran tahanan isolasi terhadap standar acuan pada ketiga metode pengujian, yaitu Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV).
3. Menentukan kondisi kelayakan pada Transformator Unit 2 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Kebasen berdasarkan kesesuaian hasil pengujian Indeks

Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV) terhadap kriteria kelayakan.

4. Sebagai rekomendasi untuk dilakukannya pemeliharaan lebih lanjut berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan pada Transformator Unit 2 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Kebasen bila hasil masih terbilang buruk.

1.5. Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui kondisi terkini Transformator Daya berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi pada Transformator Unit 2 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Kebasen.
2. Dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan keadaan trafo tenaga apakah masih dalam keadaan yang baik dan siap untuk dioperasikan atau perlu adanya pemeliharaan.
3. Mengevaluasi hasil perbandingan antara data hasil pengujian tahanan isolasi dengan data hasil perhitungan teori.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam proposal penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini akan menjelaskan mengenai latar belakang permasalahan, rumusan masalah yang akan diangkat, batasan masalah topik yang dibahas, manfaat dan tujuan penelitian, serta sistematika penulisan skripsi.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Pada bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka dan dasar teori yang menunjang pembahasan dalam skripsi ini sehingga memiliki landasan teori ilmiah yang komprehensif.

3. BAB III METODE PENELITIAN

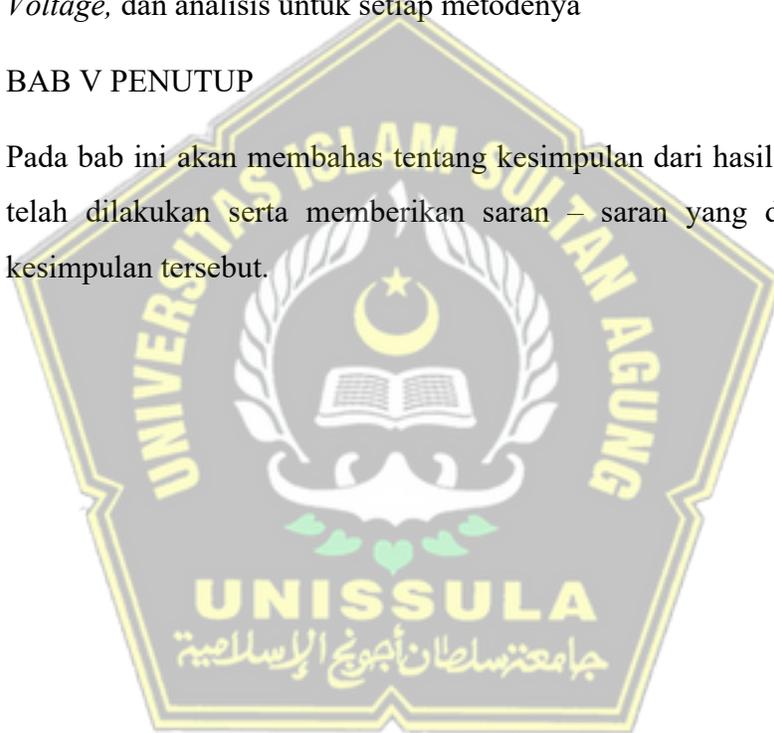
Pada bab ini akan menjelaskan mengenai model penelitian, tahapan penelitian, dan langkah-langkah untuk melakukan penelitian ini

4. BAB IV DATA DAN ANALISA

Pada bab ini akan berisi tentang hasil pengujian tahanan isolasi yaitu nilai Indeks Polarisasi, nilai Tangen Delta, nilai *Breakdown Voltage*, perhitungan Indeks Polarisasi, perhitungan Tangen Delta, perhitungan *Breakdown Voltage*, dan analisis untuk setiap metodenya

5. BAB V PENUTUP

Pada bab ini akan membahas tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta memberikan saran – saran yang didasarkan pada kesimpulan tersebut.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebelum melakukan penelitian dibutuhkan adanya studi literatur yang bertujuan untuk menemukan rujukan dari sumber-sumber yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan, rujukan ini didapatkan dari buku, jurnal, paper maupun berita yang berhubungan dengan penelitian ini.

Penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan terkait kondisi isolasi pada transformator. Misalnya, dalam penelitian pertama mengenai “Perhitungan hasil uji Tangen Delta sebagai parameter kelayakan Transformator pada Gardu Induk Rungkut 150 kV”, tujuan penelitian ini untuk mengevaluasi kondisi isolasi transformator menggunakan metode Tangen Delta. Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa nilai tangen delta mengalami peningkatan dibanding pemeliharaan yang sebelumnya dilakukan. Hal ini dikarenakan transformator bekerja secara terus menerus dan juga faktor usia dari transformator tersebut. Meskipun nilai dari faktor disipasi atau tangen delta mengalami peningkatan, transformator masih dinyatakan layak untuk beroperasi. Hal ini dikarenakan nilai dari faktor disipasi atau tangen delta masih memenuhi standar $< 1\%$, yang hal ini masih sesuai dengan standar SK DIR 0520 nilai tangen delta maksimal 1% (Maulana *et al.*, 2025).

Penelitian kedua berjudul “Analisa Perbandingan Kelayakan Tahanan Isolasi Transformator Daya Menggunakan Pengujian Indeks Polaritas, Tangen Delta, BDV (Breakdown Voltage), dan Rasio Tegangan di Gardu Induk 150 kV Ulee Kareng”. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kelayakan isolasi transformator dengan menggunakan metode pengujian indeks polarisasi, tangen delta, BDV (Breakdown Voltage), dan Rasio Tegangan. Hasil evaluasi kondisi transformator di Gardu Induk Ulee Kareng menunjukkan bahwa secara keseluruhan peralatan masih dalam kondisi layak operasi. Nilai indeks polarisasi berada di atas $1,5\%$ sesuai standar IEEE Std 62, sementara pengukuran tangen delta menunjukkan kondisi normal meskipun terdapat sedikit penurunan pada bushing C sebesar $0,7\%$ dan mode C_{HT} sebesar $-0,6\%$. Hasil

uji tegangan tembus (BDV) OLTC memenuhi persyaratan IEC 60156 dengan nilai di atas 50 kV, dan pengukuran rasio tegangan belitan pada berbagai tap changer menunjukkan variasi di bawah batas maksimal 0,5% sesuai standar IEC 60076-01. Berdasarkan parameter-parameter pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa transformator masih memenuhi kriteria kelayakan operasional (Ababil, 2023).

Penelitian ketiga adalah terkait “Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Berbasis Indeks Polarisasi dan Tangen Delta pada Trafo GI 150/20 kV PT. APF”. Pada penelitian ini menjelaskan Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Trafo dengan model yang ditentukan sebagai sebuah Transformator pada perusahaan PT. Asia Pasific Fibers, Tbk. Parameter yang ditentukan yaitu sebuah nilai Tahanan Isolasi yang didapatkan melalui pengukuran metode yang digunakan yaitu menggunakan indeks polarisasi dan tangen delta, jenis metode yang dilakukan sebuah metode pengujian untuk mengetahui kondisi isolasi dari trafo. Dari penelitian yang dilakukan, hasil menunjukkan bahwa indeks polarisasi pada data pengukuran trafo 30-40 MVA: 1,772-1,098-1,091 dan hasil perhitungan: 1,760-1,200-1,100. Hasil menunjukkan bahwa tangen delta pada data pengukuran trafo 30-40 MVA: 0,5 %-4,3 %-1,2 % dan hasil perhitungan: 0,3 %-2,0 %-0,8 %. Hasil pengujian dan pengukuran dibandingkan dengan standar nilai yang sesuai untuk indeks polarisasi 1,25-2 dan tangen delta nilainya $\leq 0,5$ %, hal ini berdasarkan standar IEEE 43-2000 dan ANSI C 57.12.90 trafo 40 MVA sudah sesuai sedangkan trafo 30-35 MVA tidak sesuai sehingga diperlukan langkah-langkah perbaikan dan pemeliharaan lebih lanjut (Nugraha, 2023).

Penelitian keempat berjudul "Analisis Kondisi Isolasi pada Station Service Transformer (SST)" ini difokuskan untuk menilai performa isolasi SST Unit 1 di PLTU Paiton, khususnya sebelum dan setelah proses repacking gasket seal dilaksanakan. Hasil evaluasi menunjukkan adanya perbaikan kinerja sistem yang signifikan, dimana teramati peningkatan nilai indeks polarisasi secara nyata pasca intervensi repacking dilakukan. Semua hasil pengujian, yaitu Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV) memenuhi standar setelah pengemasan ulang, menunjukkan kinerja yang lebih baik dari sebelumnya. Khususnya untuk pengujian dengan metode Indeks Polarisasi dan Tangen Delta meningkat secara substansial,

sesuai dengan standar IEEE C57.152 2013, dan metode *Breakdown Voltage* (BDV) memenuhi standar IEC 60156 95. Temuan ini menunjukkan bahwa pemeliharaan yang tepat waktu, seperti seperti penggantian segel paking, sangat penting untuk menjaga kualitas isolasi dan kinerja transformator secara keseluruhan. Inspeksi rutin dan kepatuhan terhadap standar pengujian dapat mencegah kegagalan operasional dan memperpanjang masa pakai peralatan listrik yang penting (Sutjipto, K and Dzulfiqar, 2024).

2.2 Landasan Teori

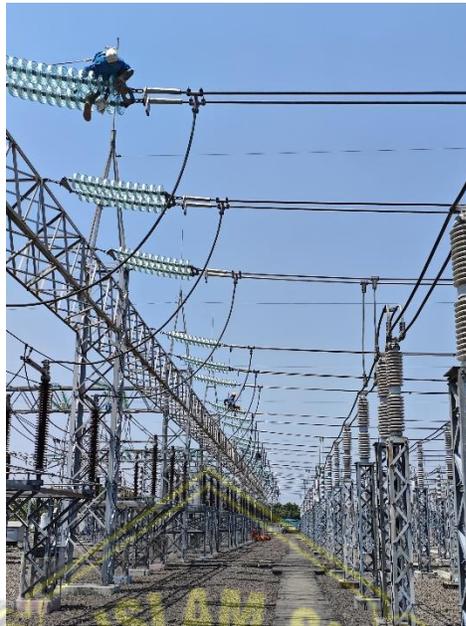
2.2.1 Gardu Induk

Gardu induk adalah sebuah bagian penting dari sistem sistem tenaga listrik yang tidak dapat terpisahkan dari saluran transmisi dan distribusi listrik, dimana terdapat jaringan transmisi dan jaringan distribusi yang secara bersamaan dihubungkan menggunakan rel-rel daya atau trafo-trafo tenaga (Ababil, 2023).

Gardu Induk merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai pusat interkoneksi dan pengendali distribusi daya. Secara teknis, gardu induk mengintegrasikan berbagai peralatan listrik dalam satu lokasi untuk menghubungkan jaringan transmisi dan distribusi. Fungsinya meliputi penerimaan dan transmisi energi listrik, konversi level tegangan melalui transformator *step-up* maupun *step-down*, serta pengaturan aliran daya melalui operasi *switching*.

Fungsi pokok Gardu Induk antara lain adalah sebagai berikut:

- a. Pusat interkoneksi sistem tenaga listrik
- b. Pengaturan aliran daya melalui mekanisme switching dari satu sistem transmisi ke sistem transmisi lainnya, yang kemudian disalurkan kepada konsumen.
- c. Konversi level tegangan (*step-up/step-down*) sesuai kebutuhan sistem.
- d. Sebagai pelindung operasi sistem tenaga listrik.



Gambar 2.1. Switchyard Gardu Induk

Komponen – Komponen pada Gardu Induk :

Pada umumnya komponen-komponen pada gardu induk adalah sebagai berikut

- a. Transformator tenaga yaitu peralatan yang berfungsi untuk mengubah level tegangan dengan frekuensi yang sama sesuai kebutuhan sistem.
- b. Peralatan tegangan tinggi (sisi primer dan sisi sekunder) yaitu:
 - 1) Lightning Arrester
 - 2) Pemutus Tenaga (PMT)
 - 3) Saklar Pemisah (PMS)
 - 4) Trafo Arus (CT)
 - 5) Trafo Tegangan (PT)
 - 6) Rel atau Busbar
- c. Peralatan kontrol berfungsi untuk mengontrol gardu induk dari dalam gedung kontrol yaitu terdiri dari: panel kontrol, panel proteksi, RTU (Remote Terminal Unit), dan HMI (Human-Machine Interface), SCADA.
- d. Peralatan telekomunikasi untuk berkomunikasi dengan pengatur beban atau GI lain seperti telepon, PLC, dan radio.

- e. Sistem ACDC sebagai penyuplai kebutuhan arus dan tegangan AC maupun DC untuk peralatan-peralatan di Gardu Induk. Hal ini seperti : Baterai, Inverter, dan Rectifier.
- f. Peralatan yang berfungsi untuk memperbaiki tegangan sistem penyaluran tenaga listrik seperti: reaktor, kapasitor.

2.2.2 Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang berfungsi untuk menyalurkan dan mengubah tenaga listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya melalui suatu gandingan magnet tanpa mengubah frekuensinya (Ababil, 2023).

Transformator pada dasarnya terdiri dari tiga komponen utama, yaitu inti magnetik berbahan besi berlapis dan dua buah kumparan yang terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder. Prinsip kerja transformator didasarkan pada hubungan antara jumlah lilitan kumparan dengan tegangan, di mana rasio tegangan antara sisi primer dan sekunder ditentukan oleh perbandingan jumlah lilitan kedua kumparan tersebut. Hubungan ini bersifat berbanding lurus, artinya semakin banyak jumlah lilitan pada suatu kumparan, semakin tinggi pula tegangan yang dihasilkan (Situmeang, Mulyanto and Halilintar, 2022). Namun untuk hubungan dengan arus yang dihasilkan ialah berbanding terbalik. Perhatikan persamaan berikut :

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

Dimana :

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

Transformator beroperasi dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik melalui dua kumparan utama, yaitu kumparan primer dan sekunder, yang dililitkan pada inti besi lunak dengan jumlah lilitan yang berbeda. Ketika tegangan AC dialirkan ke kumparan primer, arus bolak-balik yang mengalir akan menciptakan medan magnet pada inti besi. Medan magnet ini kemudian menginduksi kumparan sekunder yang terhubung secara magnetis, sehingga menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL) pada sisi sekunder. Proses inilah yang memungkinkan transfer energi listrik dari sisi primer ke sekunder dengan tingkat tegangan yang berbeda, tergantung pada rasio jumlah lilitan antara kedua kumparan tersebut.

Pada sistem tenaga listrik, pengelompokan transformator dibagi menjadi 3 macam.

a. Transformator Daya

Transformator Daya atau bisa disebut Transformator Tenaga merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah ataupun sebaliknya. Dalam penggunaannya, transformator daya merupakan komponen paling penting dari sistem transmisi dan distribusi sehingga transformator daya perlu untuk dijaga dalam kondisi baik agar dapat bekerja secara maksimal.

b. Transformator Tegangan

Transformator tegangan merupakan salah satu jenis transformator yang dirancang khusus untuk menurunkan tegangan listrik dari level tinggi ke level yang lebih rendah secara aman dan terkendali. Peralatan ini biasanya diaplikasikan dalam sistem pengukuran dan proteksi jaringan listrik, dimana peralatan ini berfungsi untuk menyediakan level tegangan yang sesuai bagi peralatan ukur dan sistem proteksi.

c. 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 (Nugraha, 2023).

2.2.3 Transformator Daya

Transformator ini merupakan jenis trafo yang sering digunakan di Gardu Induk karena memiliki daya tampung yang sangat besar. Fungsinya untuk mengaliri daya listrik dari tegangan yang rendah ke tinggi (sistem transmisi) atau dari tegangan tinggi ke tegangan yang rendah (sistem distribusi).



Gambar 2.2 Transformator Daya Unit 2 GI Kebasen

1. Sistem Transmisi

Transformator (trafo) adalah perangkat listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan listrik dari satu tingkat ke tingkat yang lain dalam sistem transmisi tenaga listrik. Fungsi utamanya adalah mentransmisikan daya listrik dengan efisiensi yang tinggi melalui jarak yang panjang dengan minimal kerugian daya.

Transformator memungkinkan penggunaan tegangan tinggi (HV) dalam tahap transmisi energi listrik. Tegangan yang lebih tinggi menghasilkan arus yang lebih kecil (sesuai dengan hukum Ohm), didapatkan arus yang tinggi jika pada sistem transmisi tidak berikan trafo untuk menaikkan tegangan hal tersebut

bisa dibuktikan melalui perhitungan arus sebagai berikut: ($P = V \times I \times \cos \theta \times \sqrt{3}$), sehingga didapatkan nilai rugi daya yang besar nilainya dengan dipengaruhi nilai arus yang tinggi serta nilai resistansi kawat penghantar. Nilai rugi-rugi daya dapat di ketahui melalui perhitungan dengan rumus (Rugi Daya = $3I^2 \times R$), jadi perlu dilakukan peninggakan tegangan agar didapatkan arus yang kecil serta mempengaruhi nilai rugi daya yang hilang saat proses pengiriman daya dengan jarak yang jauh.

2. Sistem Distribusi

Transformator dalam sistem distribusi adalah perangkat listrik yang mengubah tegangan listrik dari tingkat yang satu ke tingkat yang lain untuk mengoptimalkan efisiensi dan keandalan transfer daya. Pada titik-titik tertentu dalam jaringan distribusi, tegangan perlu diubah agar sesuai dengan kebutuhan konsumen.

Beberapa fungsi trafo dalam sistem distribusi:

- Penyesuaian Tegangan: Transformator digunakan untuk menyesuaikan tegangan listrik agar sesuai dengan kebutuhan konsumen. Tegangan yang lebih tinggi pada tahap transmisi dikurangi ke tingkat yang lebih rendah untuk distribusi lokal dan konsumsi.
- Distribusi Daya: Transformator step-down di sub-stasiun distribusi mengurangi tegangan dari tingkat transmisi ke tingkat distribusi lokal, yang sesuai dengan kebutuhan konsumen di area tersebut.
- Penurunan Arus: Transformator memungkinkan pengurangan arus listrik saat tegangan diturunkan. Ini mengurangi kerugian daya akibat resistansi kawat pada jarak pendek dari sub-stasiun ke konsumen.
- Isolasi dan Pemisahan: Transformator berfungsi sebagai isolasi elektrik antara sistem distribusi dan jaringan transmisi, serta antara berbagai konsumen. Ini melindungi peralatan dan konsumen dari risiko kejutan listrik dan gangguan listrik.

- Peningkatan kualitas daya : transformator dapat membantu dalam menjaga kualitas daya listrik, seperti tegangan yang stabil dan faktor daya yang baik (Nugraha, 2023).

Bagian – Bagian Transformator

Secara umum, terdapat tiga bagian penting penyusun transformator:

a. Bagian Utama

1. Inti Besi

Inti besi berperan sebagai jalur fluks magnetik yang dihasilkan oleh arus bolak-balik pada kumparan primer, kemudian menginduksi kumparan sekunder. Untuk meminimalkan *eddy current* (arus pusar) yang menyebabkan rugi-rugi besi, inti transformator dibuat dari lapisan-lempengan besi tipis (PT. PLN (Persero), 2014).

2. Kumparan Trafo

Kumparan transformator terdiri dari lilitan kawat tembaga yang diisolasi dengan bahan isolasi untuk mencegah kontak listrik baik dengan inti besi maupun antar kumparan. Pada transformator berkapasitas besar, kumparan tersebut direndam dalam minyak trafo yang berfungsi ganda sebagai media pendingin untuk menyerap panas yang timbul selama operasi dan sebagai isolator tambahan untuk meningkatkan performa listrik.

3. Bushing

Bushing berfungsi sebagai sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar (Almanda and Ardiansyah, 2022). Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan badan tangki utama trafo.

Secara garis besar bushing dibagi menjadi empat bagian utama yaitu:

a. Sistem Isolasi

Terdiri dari 2 jenis :

- i. Bushing kondenser: Digunakan untuk tegangan di atas 72,5 kV dengan lapisan kapasitansi seri (C1 antara konduktor-tap, C2 antara tap-ground) sebagai pembagi tegangan.
- ii. Bushing non-kondenser: Untuk tegangan $\leq 72,5$ kV menggunakan bahan isolasi padat seperti porselen/keramik

b. Konduktor

Terdiri dari 3 jenis :

- i. Hollow konduktor dengan inti penguat logam
 - ii. Konduktor pejal
 - iii. Flexible lead
- c. Klem koneksi yang merupakan sarana pengikat antara klem penghubung antara stud bushing dengan konduktor eksternal
- d. Aksesoris meliputi indikator minyak, gasket seal, dan tap pengujian

4. Minyak Transformator

Minyak transformator memiliki peran ganda yang krusial dalam trafo yaitu sebagai media isolasi elektrik yang mencegah terjadinya percikan api antara kumparan saat transformator bekerja pada tegangan tinggi. Yang kedua berperan sebagai sistem pendingin dengan menyerap panas yang dihasilkan selama operasi berbeban, kemudian melepaskan panas tersebut ke lingkungan. Selain itu, minyak transformator juga memberikan perlindungan tambahan dengan mencegah kontaminasi zat-zat luar yang dapat merusak komponen internal transformator.

5. Tangki dan konservator

Tangki konservator berperan sebagai reservoir yang menampung minyak cadangan serta mengakomodasi perubahan volume minyak akibat pemuaian termal selama operasi berbeban. Sebagai bagian dari sistem proteksi, antara tangki utama dan konservator dipasang Buchholz relay yang berfungsi mendeteksi dan menyerap gas hasil dekomposisi minyak akibat fault internal. Untuk menjaga kualitas minyak, maka ujung masuk

saluran udara dilengkapi dengan media penyerap uap air dan udara atau disebut silica gel (PT. PLN (Persero), 2014).

b. Peralatan Bantu

1. Pendingin

Sistem pendingin berfungsi untuk mengendalikan suhu trafo saat beroperasi. Sistem ini bekerja untuk menstabilkan temperatur yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu kualitas jaringan listrik, rugi-rugi energi selama operasi, serta kondisi suhu lingkungan sekitar. Media pendingin utama yang berada di dalam trafo ialah minyak isolasi yang bekerja melalui mekanisme sirkulasi, di mana panas yang dihasilkan oleh belitan transformator akan diserap oleh minyak dan dialirkan melalui jalur sirkulasi yang telah ditentukan. Proses pelepasan panas terjadi pada sirip-sirip radiator, yang diperkuat oleh kerja kipas pendingin dan pompa sirkulasi untuk meningkatkan efisiensi proses pendinginan secara keseluruhan. Dengan sistem ini, transformator dapat mempertahankan suhu operasi yang optimal selama bekerja.

2. Tap Changer

Tap changer merupakan alat pengubah perbandingan transformasi yang digunakan untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang diinginkan dari jaringan tegangan primer yang berubah-ubah. Tap changer yang umum ditemui di Gardu Induk ialah On Load Tap Charger (OLTC) untuk menyesuaikan kebutuhan level tegangan sistem.

3. NGR (*Netral Ground Resistant*)

NGR (*Netral Ground Resistant*) merupakan metode pentanahan yang dipasang seri dengan netral sekunder pada trafo sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR ini adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah. Perlu diketahui bahwa NGR ini kadang ada dan kadang tidak ada di Gardu

Induk, menyesuaikan kondisi perencanaan awal *commissioning* trafo daya terkait.

4. Indikator

Untuk mengawasi selama transformator berkerja, maka perlu adanya indikator pada transformator yaitu diantaranya:

- a. Indikator suhu minyak
- b. Indikator permukaan minyak
- c. Indikator suhu winding
- d. Indikator kedudukan tap

5. Alat Pernapasan Trafo

Alat pernapasan transformator merupakan komponen yang berfungsi melindungi minyak isolasi dari kontaminasi udara luar. Kelembaban udara eksternal dapat menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, sehingga diperlukan sistem penyaring yang efektif. Alat ini terdiri dari tabung berisi bahan hygroskopis yang mampu menyerap kelembaban.

Mekanisme kerja alat pernapasan ini mengikuti prinsip termodinamika:

- i. Saat suhu minyak meningkat (peningkatan beban), minyak akan memuai dan mendorong udara keluar melalui tabung penyaring
- ii. Ketika suhu minyak menurun (beban berkurang), minyak menyusut dan udara luar akan disaring sebelum masuk ke tangki

Perubahan beban operasional transformator menyebabkan fluktuasi suhu minyak yang berkelanjutan, sehingga alat pernapasan terus bekerja secara dinamis untuk menjaga kualitas minyak isolasi. Sistem ini memastikan udara yang masuk ke tangki transformator selalu dalam keadaan kering dan bebas kontaminan.

c. Peralatan Proteksi Trafo

1. Rele Bucholz sebagai sistem proteksi utama, rele bucholz berfungsi mendeteksi adanya gangguan internal yang disebabkan dua faktor utama yaitu perubahan tekanan minyak isolasi dan munculnya gelembung gas akibat pergerakan mekanis di dalam tangki transformator pada transformator, seperti *gas accumulation*, *insulation liquid loss*, *insulation liquid flow surge* (PT. PLN (Persero), 2016).
2. Rele Jansen merupakan sistem proteksi khusus yang dirancang untuk memantau kondisi On-Load Tap Changer (OLTC). Rele ini bekerja dengan mendeteksi ketidaknormalan operasi melalui perubahan tekanan minyak dan akumulasi gas di kompartemen OLTC.
3. Rele Sudden Pressure berfungsi sebagai sistem pengaman tekanan berlebih, rele sudden pressure didesain sebagai titik pelepas tekanan (*pressure relief device*) saat terjadi gangguan internal. Dengan membuang tekanan berlebih melalui saluran khusus, rele ini mencegah kerusakan struktural pada maintank transformator..
4. Rele Thermal berfungsi mendeteksi suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada trafo, suhu operasi yang tinggi akan menyebabkan kerusakan isolasi kertas pada trafo. Rele ini terdiri dari sensor suhu berupa thermocouple, pipa kapiler, dan meter petunjuk (PT. PLN (Persero), 2014).

2.2.4 Pemeliharaan Transformator

Pemeliharaan transformator merupakan serangkaian tindakan sistematis yang bertujuan untuk memahami karakteristik, memantau parameter operasional, serta mengevaluasi kondisi dan kinerja peralatan. Secara konsep, kegiatan ini mencakup berbagai prosedur teknis yang dirancang untuk memastikan peralatan tegangan tinggi tetap berfungsi optimal sekaligus mencegah potensi gangguan yang dapat

menyebabkan kerusakan. Untuk menjaga kelistrikan tetap andal, pemeliharaan transformator dilakukan melalui tiga pendekatan utama yang berfokus pada upaya mempertahankan kondisi operasi normal, memulihkan fungsi peralatan, dan mencapai tingkat keandalan sistem yang tinggi. Dengan demikian, pemeliharaan transformator tidak hanya bersifat kuratif tetapi juga preventif untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik.

a. *In service inpection*

In service inpection ini dilakukan saat transformator beroperasi untuk mendeteksi dini potensi gangguan tanpa perlu pemadaman. Tujuannya adalah mengidentifikasi ketidaknormalan internal secara cepat sambil mempertahankan pasokan listrik (PT. PLN (Persero), 2014).

b. *In service measurement*

In service measurement merupakan aktivitas pengukuran yang dilakukan saat transformator yang sedang bekerja guna mendapatkan data kondisi peralatan secara rinci. Metode ini memungkinkan pemantauan detail tanpa mengganggu operasi sistem.

c. *Shutdown Testing/Measurement*

Shutdown Testing/Measurement adalah serangkaian proses pengujian yang dilakukan dengan saat transformator dalam keadaan tidak beroperasi. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan.

Adapun yang termasuk pengujian dalam proses pemeliharaan *Shutdown Testing/Measurement* yang dibahas pada penelitian ini yaitu:

1. Pengukuran tahanan isolasi
 - a. Uji indeks polarisasi trafo
2. Pengukuran tangen delta
 - a. Pengujian tangen delta pada isolasi trafo
 - b. Pengujian tangen delta pada bushing
3. Pengujian Minyak Trafo dengan Metode BDV (Breakdown Voltage)

2.2.5 Tahanan Isolasi

Untuk menentukan apakah suatu peralatan aman untuk terkena tegangan atau tidak, digunakanlah tahanan isolasi, pada peralatan yang menghubungkan komponen yang menerima tegangan ke bodi yang diketanahkan, lalu resistansi isolasi diukur. Tahanan isolasi adalah tahanan yang terdapat diantara dua kawat saluran yang diisolasi satu sama lain atau tahanan antara satu kawat saluran dengan tanah (PT. PLN (Persero), 2014).

Pengukuran tahanan isolasi merupakan prosedur kritis dalam mengevaluasi kualitas isolasi antara belitan dan inti besi transformator. Pengujian yang termasuk dalam kategori *shutdown testing* ini dilakukan saat transformator dalam kondisi tidak beroperasi, baik selama pemeliharaan rutin maupun investigasi gangguan, dengan tujuan memverifikasi kemampuan isolasi dalam mencegah aliran arus yang tidak diinginkan .

Dalam operasionalnya, berbagai faktor seperti kerusakan mekanis, paparan suhu tinggi, kontaminasi kotoran, uap korosif, dan kelembaban dapat menyebabkan degradasi material isolasi. Ketika isolasi terkontaminasi atau mengalami penuaan, parameter-parameter tersebut dapat menimbulkan peningkatan konduktivitas permukaan, penurunan nilai resistansi, serta potensi kegagalan isolasi yang berisiko menyebabkan gangguan operasional. Oleh karena itu, pengujian ini menjadi komponen esensial dalam program pemeliharaan untuk memastikan keandalan dan keselamatan sistem transformator secara keseluruhan.

Kebocoran arus yang menembus isolasi peralatan listrik memang tidak dapat dihindari, hal ini tidak terlepas baik disebabkan dari efek umur penggunaan trafo, maupun efek lainnya yang ditimbulkan oleh lingkungan seperti yang dijelaskan sebelumnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengukuran tahanan isolasinya agar bagian-bagian yang seharusnya tidak terhubung, baik antara bagian yang bertegangan dengan yang bertegangan, maupun bagian yang bertegangan dengan yang tidak bertegangan, tetap terpisah sehingga tidak terjadi hubung singkat. Hubungan atau

korelasi antara tahanan isolasi dengan transformator adalah menjaga agar kondisi transformator yang digunakan terus-menerus selama 24 jam tetap berada pada kondisi optimalnya. Agar kondisi trafo tetap berada pada kondisi optimal dan menjalankan fungsinya sebaik mungkin untuk mempertahankan keandalan listrik, maka perlu dilakukan serangkaian pengujian tahanan isolasi diantaranya dengan menggunakan metode pengujian indeks polarisasi, tangen delta, dan BDV (*breakdown voltage*).

2.2.6 Pengujian Indeks Polarisasi pada Transformator Daya

Pengujian indeks polarisasi merupakan teknik pengujian untuk menilai kelayakan operasional peralatan listrik sebelum dilakukan pengujian tegangan lebih. Prosedur ini dilakukan dengan mengukur resistansi isolasi antara belitan-transformator atau antara belitan dengan ground menggunakan sumber tegangan DC stabil yang diinjeksikan secara kontinu selama 10 menit. Prinsip pengujian ini didasarkan pada perbandingan nilai resistansi isolasi pada menit ke-10 terhadap menit ke-1, dimana isolasi yang bersih dan tidak terkontaminasi akan menunjukkan peningkatan resistansi yang lebih cepat. Megaohm meter dengan rentang tegangan 500-10.000 VDC menjadi alat ukur yang umum digunakan dalam pengujian ini (Suganda and Muis, 2021).

Nilai resistansi isolasi yang terukur merepresentasikan besarnya arus bocor yang melalui material isolasi atau sepanjang permukaan isolator. Beberapa faktor kritis yang mempengaruhi hasil pengukuran meliputi:

1. Kondisi lingkungan (suhu dan kelembaban)
2. Kontaminasi permukaan isolator
3. Integritas material isolasi

Meskipun arus bocor merupakan fenomena yang inherent dalam sistem isolasi, besarnya harus memenuhi batasan teknis yang ditetapkan untuk menjamin keandalan dan keselamatan operasi peralatan. Pengujian ini memberikan indikasi awal tentang kondisi penuaan dan tingkat kontaminasi sistem isolasi transformator.

Perhitungan indeks polarisasi seperti rumus di bawah ini:

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

IP = Indeks Polarisasi

R_{10} = Pengujian pada menit ke-10

R_1 = Pengujian pada menit ke-1

Tabel 2.1 Standar Pengujian Indeks Polarisasi menggunakan IEEE 43-2000

Hasil Pengujian	Keterangan	Rekomendasi
<1	Berbahaya	Ditindaklanjuti
1 – 1,1	Jelek	Ditindaklanjuti
1,1 – 1,25	Dipertanyakan	Uji kadar minyak, uji tan delta
1,25 – 2	Baik	-
>2	Sangat Baik	-

2.2.7 Pengujian Tangen Delta pada Transformator Daya

Tan delta atau sering disebut dengan *loss angle* merupakan sebuah metode diagnostik kelistrikan yang dilakukan untuk mengetahui kondisi insulasi (isolasi belitan) dengan mengukur arus bocor kapasitif. Isolator yang sangat baik, mirip dengan isolator antara elektroda kapasitor, sepenuhnya kapasitif. Jika kualitas isolasi yang bebas dari cacat atau kesalahan, maka isolasi akan mendekati sifat kapasitor yang sempurna (Robbani, Nugroho and Gunawan, 2020).

Dalam pengujian isolasi transformator, sistem dianggap sebagai kapasitor ideal dimana arus akan mendahului tegangan sebesar 90° pada kondisi isolasi sempurna. Namun, adanya kontaminasi pada material isolasi akan menurunkan resistansi isolasi, menyebabkan peningkatan komponen arus resistif. Fenomena ini mengakibatkan

pergeseran fasa antara arus dan tegangan menjadi kurang dari 90° , dimana besar penyimpangan sudut ini menjadi indikator tingkat kontaminasi isolasi.

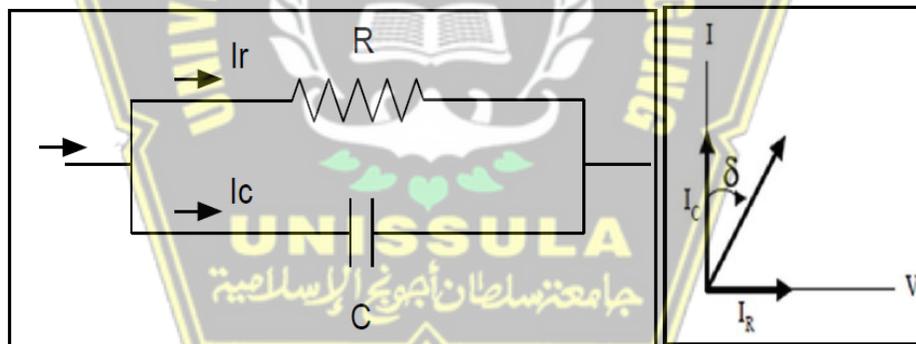
Pengujian tan delta mengukur kerugian dielektrik yang dinyatakan dalam persentase, dengan interpretasi hasil sebagai berikut:

1. Nilai persentase tan delta yang rendah menunjukkan kondisi isolasi yang baik
2. Nilai persentase tinggi mengindikasikan degradasi isolasi
3. Sudut ideal mendekati nol pada isolasi sempurna
4. Peningkatan sudut menunjukkan adanya arus resistif akibat kontaminasi

Prinsip dasar pengujian ini memanfaatkan hubungan antara sudut fasa dengan kondisi isolasi, dimana semakin besar penyimpangan dari kondisi ideal, semakin signifikan tingkat kontaminasi yang terjadi pada sistem isolasi transformator.

Faktor daya dari kapasitor adalah $\cos \phi$, ϕ disebut sebagai sudut fasa dari kapasitor, sudut loss (*loss angle*) adalah $\delta = 90^\circ - \phi$. Dalam kapasitor sempurna $\phi = 90^\circ$ sehingga $\delta = 0$ (PT. PLN (Persero), 2014).

Hubungan tangen delta dengan I_C dan I_R dapat dilihat seperti pada Gambar 2.3:



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian phasor arus pengujian tangen delta

Pada Gambar 2.3 menunjukkan diagram phasor $\tan \delta$ yang menjelaskan hubungan antara parameter isolasi transformator. Pada diagram ini, nilai tangen sudut δ ($\tan \delta$) merepresentasikan kualitas resistansi isolasi, di mana perbandingan antara komponen I_R dan I_C menjadi indikator kondisi isolasi. Dalam kondisi ideal, isolasi yang sempurna akan menghasilkan sudut δ yang mendekati nol, menandakan minimnya arus

resistif yang mengalir. Berdasarkan prinsip ini, persamaan arus kapasitif untuk tangen delta dapat dirumuskan secara sistematis sebagai berikut:

$$I_c = V \cdot \omega \cdot C \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

I_c = Arus Kapasitif (A)

V = Tegangan (V)

ω = $2\pi f$

C = Kapasitansi (F)

Dalam media isolasi, nilai resistansi akan memicu munculnya arus resistif (I_R) yang sefase dengan tegangan. Fenomena ini menyebabkan terjadinya rugi-rugi dielektrik (*dielectric losses*) pada sistem isolasi. Hubungan antara resistansi isolasi dan kerugian daya bersifat proporsional - semakin tinggi nilai resistansi media isolasi, semakin besar pula rugi daya yang terjadi. Akibatnya, kinerja isolasi secara keseluruhan akan mengalami penurunan.

$$I_R = \frac{P_{drop}}{V} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

I_R = Arus Resistif (A)

V = Tegangan (V)

P_{drop} = Drop Daya (W)

Tangen delta pada hakikatnya merupakan hasil perbandingan antara I_R dan I_c , maka tangen delta dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_c} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\tan \delta = \frac{P_{drop}}{V \cdot \omega \cdot C} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\tan \delta = \frac{P_{drop}}{V^2 \cdot \omega \cdot C} \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

$\tan \delta$ = Tangen Delta (%)

P_{drop} = Drop Daya (W)

V = Tegangan (V)

ω = $2\pi f$

C = Kapasitansi (F)

Tabel 2.2 Standar Pengujian Tangen Delta Menggunakan ANSI C 57.12.90

Hasil Uji	Kondisi
< 0,5%	Bagus
0,5% - 0,7%	Mengalami Penurunan
> 1%	Jelek

Penilaian kualitas isolasi transformator menggunakan metode tangen delta dilakukan melalui dua pendekatan pengujian utama. Pertama, pengujian tangen delta pada belitan transformator yang bertujuan untuk menganalisis kondisi dielektrik antara belitan dan inti besi. Kedua, pengujian tangen delta pada bushing yang berfokus pada evaluasi komponen penghubung eksternal. Kedua pengujian ini secara sinergis mampu mengungkap berbagai indikator penting seperti tingkat penuaan material isolasi, adanya kontaminasi, serta akumulasi kelembaban.

a. Pengujian tangen delta pada belitan trafo

Sistem isolasi transformator secara fundamental terbagi menjadi dua komponen utama: isolasi antara belitan dengan ground (body) dan isolasi antar belitan itu sendiri. Dalam praktik pengujian di lingkungan PT PLN, terdapat tiga pendekatan utama untuk mengevaluasi kondisi isolasi ini (Arinsya Prima, Anthony and Anugrah, 2023) :

1. Transformator Dua Belitan - Digunakan untuk mengevaluasi transformator konvensional dengan dua belitan primer-sekunder

2. Transformator Tiga Belitan - Diterapkan pada transformator yang dilengkapi dengan belitan ketiga (tersier)
3. Autotransformator - Khusus untuk pengujian autotransformator yang memiliki konfigurasi belitan berbeda

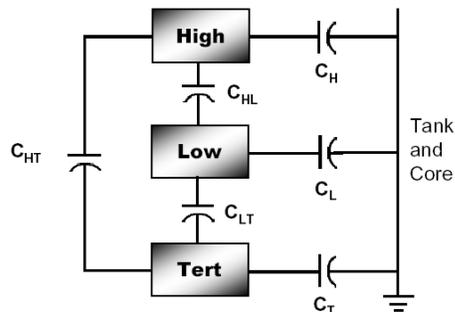
Ketiga metode ini dirancang untuk memenuhi berbagai kebutuhan pengujian sesuai dengan konfigurasi dan spesifikasi transformator yang beroperasi dalam sistem kelistrikan.

Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

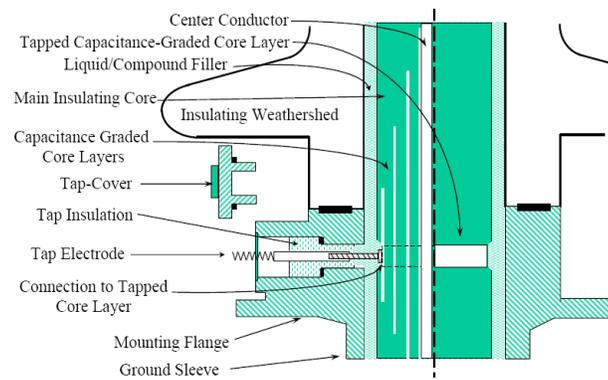
- Primer – Ground (CH)
- Sekunder – Ground (CL)
- Primer – Sekunder (CHL)

Untuk pengujian trafo tiga belitan titik pengujiannya adalah:

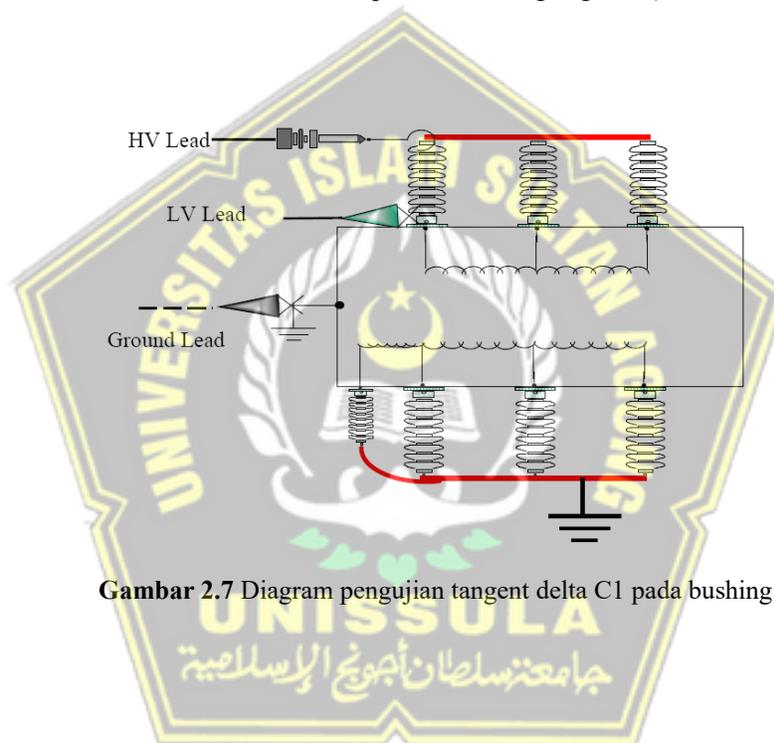
- Primer – Ground
- Sekunder – Ground
- Tertier – Ground
- Primer – Sekunder
- Sekunder – Tertier
- Primer – Tertier



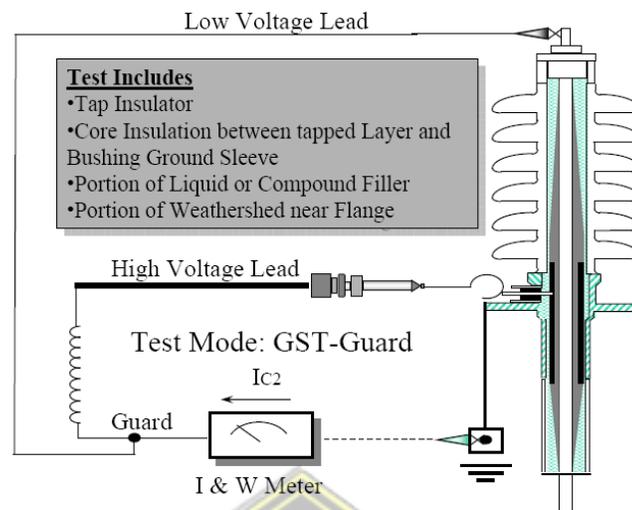
Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen isolasi trafo



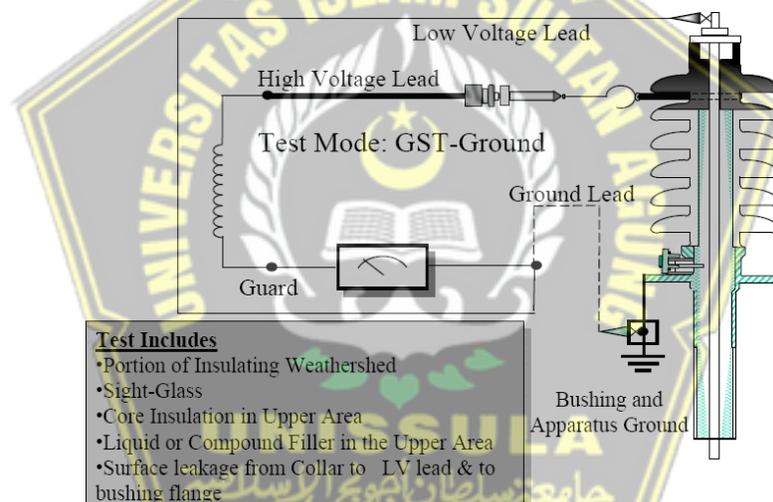
Gambar 2.6 Strukur bushing (C1 adalah isolasi antara tap electrode dengan conductor, C2 adalah isolasi antara tap electrode dengan ground)



Gambar 2.7 Diagram pengujian tangent delta C1 pada bushing



Gambar 2.8 Diagram pengujian tangen delta C2 pada bushing



Gambar 2.9 Diagram pengujian tangen delta hot collar pada bushing

Dalam pengujian tangen delta pada transformator juga terdapat beberapa metode dalam rangkaian pengukurannya yaitu UST, GST, dan GSTg

1. UST (Ungrounded Specimen Test)

Metode ini khusus mengukur kapasitansi antara belitan primer dan sekunder tanpa dihubungkan ke ground.

2. GST (Grounded Specimen Test)

Merupakan pengukuran yang mencakup seluruh kapasitansi sistem, meliputi:

- Kapasitansi belitan primer-ground
 - Kapasitansi primer-sekunder
 - Kapasitansi primer-tercier
3. USTg (Ungrounded Specimen Test with Guard)
- Metode yang mengukur kapasitansi pada belitan yang dihubungkan dengan ground dan guard. Guard pada metode ini merupakan bagian belitan yang tidak diuji seperti kapasitansi belitan primer dengan ground atau kapasitansi belitan sekunder dengan ground atau kapasitansi murni dengan ground.

Ada beberapa mode pengujian pada pengujian tangen delta transformator diantaranya meliputi:

1. UST R merupakan kapasitansi R
2. UST B merupakan kapasitansi B
3. GST merupakan kapasitansi R+B+Ground
4. GSTgR merupakan kapasitansi B+Ground
5. GSTgB merupakan kapasitansi R+Ground
6. GSTgRB merupakan kapasitansi Ground murni

2.2.8 Pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) pada Transformator Daya

Pengujian tahanan isolasi berikutnya adalah uji kualitas minyak isolasi dengan metode *Breakdown Voltage* (BDV) pada minyak transformator. Minyak transformator, sebagai bahan isolasi cair, memiliki peran penting dalam sistem kelistrikan pada peralatan tegangan tinggi. Sebagai bahan dielektrik, minyak ini digunakan untuk menahan stress tegangan level tinggi. Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk menilai kemampuan minyak isolasi dalam menahan stres tegangan listrik. Minyak yang jernih dan kering umumnya menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Oleh karena itu, pengujian ini dapat digunakan sebagai indikator keberadaan kontaminan seperti kadar air atau partikel. Nilai tegangan tembus yang rendah dapat menunjukkan adanya kontaminan, sementara nilai yang tinggi belum tentu menjamin minyak bebas dari semua jenis kontaminasi. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk

memastikan bahwa tegangan tembus minyak transformator masih dalam batas kelayakan, karena tegangan tembus merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kualitas isolasi minyak tersebut.

Pengujian tegangan tembus pada transformator bertujuan untuk menilai sejauh mana minyak isolasi mampu menahan tegangan listrik yang diberikan. Jika hasil pengujian menunjukkan nilai di atas batas standar yang telah ditetapkan, hal ini menandakan bahwa kondisi minyak isolasi masih tergolong baik. Sebaliknya, nilai tegangan tembus yang tinggi dan melebihi standar menunjukkan bahwa minyak memiliki kemampuan isolasi yang baik serta tidak mudah ditembus oleh tegangan listrik. Oleh karena itu, hasil pengujian tegangan tembus ini harus memenuhi atau melebihi nilai standar untuk memastikan kualitas dan kelayakan minyak isolasi dalam mendukung kinerja transformator (Sutjipto, K and Dzulfiqar, 2024).

Jarak elektroda tergantung pada standar yang digunakan, dalam hal ini 2,5 mm. Pengujian tegangan tembus ini mengacu pada standar pengujian IEC 60156. Adapun standar pengujian minyak transformator menggunakan metode *breakdown voltage* adalah seperti yang terlihat pada Tabel 2.3 sebagai berikut :

Tabel 2.3 Standar Pengujian BDV Menggunakan IEC 60156

Tegangan	Baik	Sedang	Buruk
500 kV	> 60 kV	50 – 60 kV	< 50 kV
150 kV	> 50 kV	40 – 50 kV	< 40 kV
70 kV	> 40 kV	30 – 40 kV	< 30 kV

Adapun perhitungan kekuatan dielektrik minyak transformator menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E_{rata-rata} = \frac{V_{b(rata-rata)}}{d} \text{ kV/mm} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

- E = Kekuatan dielektrik (kV/mm)
- Vb = Rata-rata tegangan tembus (kV)
- D = Jarak sela (mm)

BAB III METODE PENELITIAN

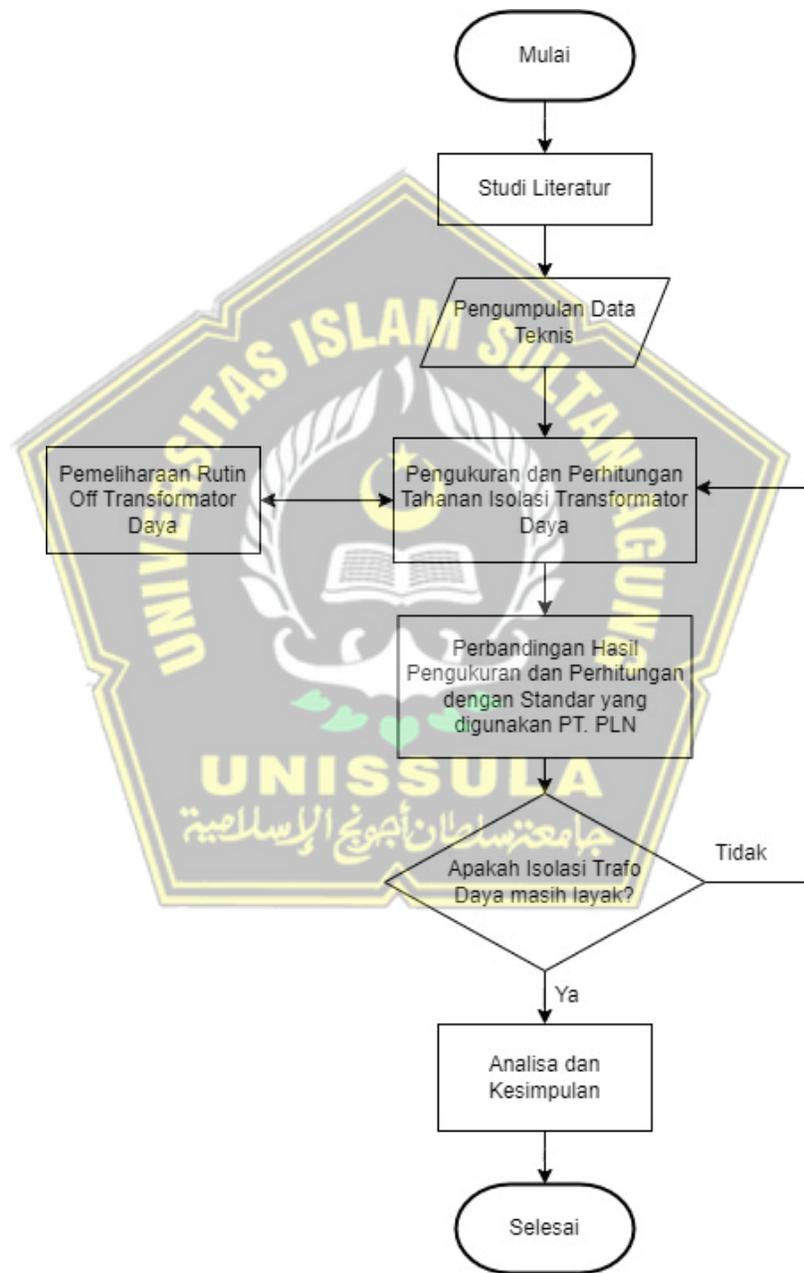
3.1. Model Penelitian

Penelitian ini mengambil lokasi pada objek transformator tenaga unit 2 pada Gardu Induk 150 kV Kebasen Tegal. Model penelitian ini melibatkan pengujian, perhitungan, dan evaluasi terkait hasil pengujian yang dilakukan menggunakan metode Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV) yang kemudian nantinya ditentukan apakah berdasarkan hasil uji yang didapatkan, transformator tenaga masih dalam keadaan baik. Tujuannya adalah untuk memastikan kondisi dan kelayakan transformator tenaga unit dua dalam menjalankan fungsinya untuk mentransformasikan tegangan menghadapi berbagai kondisi secara terus-menerus selama 24 jam.

Pengambilan data penelitian dilakukan dalam waktu sehari saat dilakukannya pemeliharaan rutin 2 tahunan transformator unit 2 GI 150 kV Kebasen pada tanggal 21 Februari 2024. Dalam melakukan pengukuran, terdapat tiga peralatan utama yang digunakan. Pertama, yaitu Mega Ohm Meter (Megger) merk Kyoritsu KEW3125A yang digunakan untuk mengukur tahanan isolasi untuk mendapatkan nilai Indeks Polarisasi dengan tegangan pengujian hingga 5000 VDC. Kedua, alat uji Tan Delta merk Megger Delta 4000 yang digunakan untuk mengukur arus bocor kapasitif pada transformator untuk mendapatkan nilai Tangen Delta. Ketiga, alat uji *Breakdown Voltage* merk Megger OTS80PB yang digunakan untuk mengukur tegangan tembus minyak transformator.

3.2. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan, diagram alir penelitian atau *flowchart* ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

Berdasarkan diagram alur penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, tahapan-tahapan dalam pelaksanaan penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Melakukan studi literatur, yaitu dengan menelusuri dan mempelajari berbagai sumber referensi seperti buku, jurnal, dan artikel ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Langkah ini dilakukan untuk memperoleh landasan teori yang kuat dan mendukung kelancaran serta ketepatan dalam pelaksanaan penelitian.
2. Mengumpulkan data teknis yang dilakukan secara langsung di lapangan melalui observasi serta wawancara dengan petugas lapangan yang memiliki keahlian di bidang pengujian tahanan isolasi, guna memperoleh informasi yang akurat dan mendalam.
3. Setelah data teknis terkumpul, dilakukan pengujian terhadap tahanan isolasi transformator daya menggunakan metode indeks polarisasi, tangen delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV). Selanjutnya, hasil dari pengujian tersebut dikumpulkan untuk dianalisis lebih lanjut dalam proses penelitian
4. Setelah data hasil pengujian telah diperoleh dengan lengkap, selanjutnya dilakukan perhitungan teori terkait metode pengujian yang tadi telah dilakukan. Pada tahap ini kita telah mendapatkan dua data yaitu hasil pengujian dan hasil perhitungan teori terkait hasil pengujian tadi. Dua data ini lalu diolah dan dianalisis dengan standar yang digunakan oleh PT PLN (Persero).
5. Dari hasil pengolahan data dan analisis tersebut, maka dapat diputuskan apakah trafo masih layak untuk beroperasi atau tidak. Apabila hasil pengujian sesuai dengan standar tersebut, maka kondisi isolasi dapat dinyatakan dalam keadaan baik. Namun, jika hasilnya tidak memenuhi standar, maka perlu dilakukan tindak lanjut untuk mengatasi permasalahan yang ada.

3.3. Langkah Penelitian

Penelitian dilakukan dengan langkah-langkah yang sistematis dan berurutan yaitu sebagai berikut : mencari informasi terkait trafo tenaga dan menentukan data tahanan isolasi trafo.

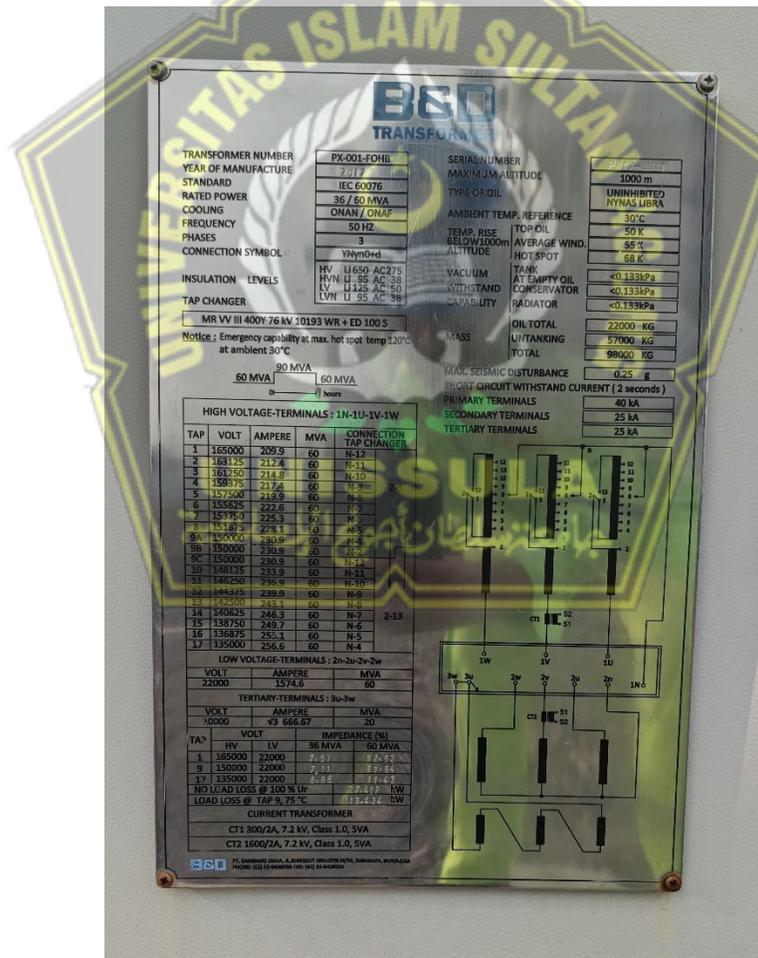
3.3.1. Data Transformator Daya

Berdasarkan observasi langsung ke lapangan terkait objek penelitian yaitu Transformator Daya 150 kV Unit 2 di GI Kebasen, maka didapatkan data nameplate sebagai berikut.

- Merk Dan Type : B&D (PX-001-FOHB)
- Impedansi : 11.84 %
- Kapasitas Trafo : 150KV/22KV , 60 MVA
- Tahun Operasi : 13 Desember 2017
- Sistem Pendinginan : ONAN / ONAF
- Suhu Winding LV :
 - Kipas ON : 66°C
 - Kipas OFF : 54° C
 - Alarm : 90° C
 - Trip : 110° C
- Suhu Winding HV
 - Kipas ON : 70° C
 - Kipas OFF : 55° C
 - Alarm : 90° C
 - Trip : 110° C
- Pentanahan & Nilai Resistansi : Solid Ground, 0.30 ohm
- Kabel Power : 4 Kabel Power dalam 1 Phasa,
690 A/Kabel,
Total 12 Kabel RST

- Beban Maksimal Trafo : 1574 A (Sekunder)
- Rele Mekanik Yang Terpasang
 1. Relai Bucholz
 2. Relai Jansen
 3. Relai Oil Temperatur Indicator
 4. Relai Winding Temperatur Indicator HV
 5. Relai Winding Temperatur Indicator LV
 6. Relai Sudden Pressure
- Anomali Yang Pernah Terjadi : Tidak ada anomali

Untuk nameplate dari Transformator Daya Unit 2 ialah sebagai berikut :



Gambar 3.2 Nameplate Transformator Daya Unit 2 60 MVA

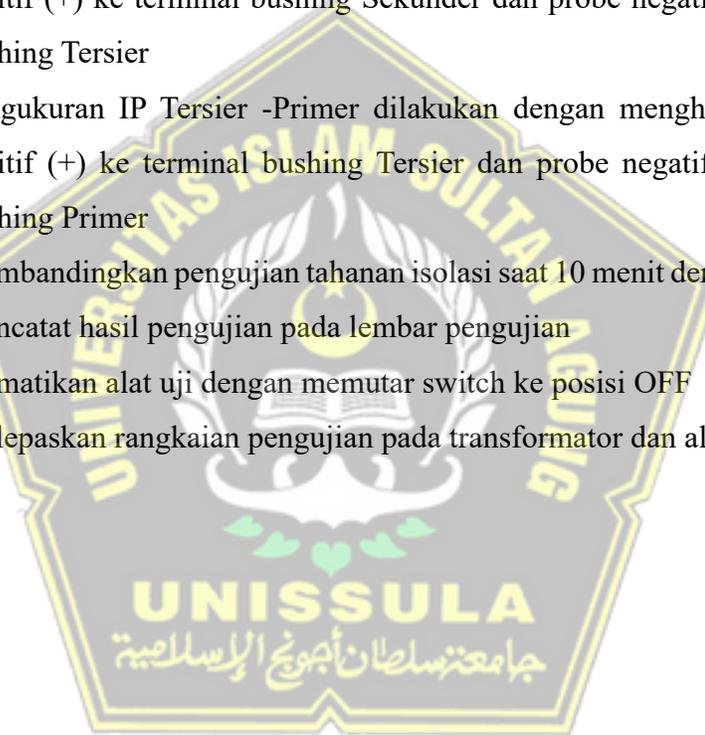
3.3.2. Pengujian Indeks Polarisasi (IP)

Merujuk penjelasan mengenai Pengujian tahanan isolasi dengan metode Pengujian indeks polarisasi (IP), juga dikenal sebagai pengujian PI (*Polarization Index*), merupakan metode pengujian yang digunakan untuk mengukur tahanan isolasi pada peralatan listrik. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana isolasi pada peralatan listrik dapat mempertahankan resistansi terhadap arus bocor dalam jangka waktu tertentu. Pengujian indeks polarisasi ini membandingkan antara resistansi isolasi pada waktu yang lebih lama yaitu 10 menit dengan resistansi isolasi pada waktu yang lebih singkat yaitu 1 menit. Nilai IP yang tinggi menunjukkan isolasi yang baik, karena resistansi isolasi tetap tinggi seiring waktu. Sebaliknya, jika nilai IP rendah, itu dapat menunjukkan adanya kerusakan isolasi pada peralatan.

Untuk langkah pengujian dengan metode Indeks Polarisasi ialah sebagai berikut :

- a. Memastikan perlengkapan alat kerja dan alat pelindung diri (APD) dipersiapkan dan digunakan dengan benar.
- b. Melepas konduktor dari bushing trafo.
- c. Menghubung-singkatkan semua bushing primer, bushing sekunder, dan bushing tersier menggunakan konduktor eksternal
- d. Merangkai rangkaian pengujian Indeks Polarisasi menggunakan alat ukur *insulation tester* merek Kyoritsu KEW3125A. Kabel merah dimasukkan ke terminal positif (+), kabel hitam ke terminal negatif (-)
- e. Cara mencari nilai Indeks Polarisasi (IP) ialah dengan cara putar “*switch*” ke tegangan uji 5000 V, lalu pastikan bahwa terminal positif (+) dan negatif (-) di tempat sesuai kita sedang menguji apa, bila sudah dipastikan aman maka tekan tombol “*test*” dan putar sehingga pengujian dapat dimulai. Ambil pengukuran pada saat 1 menit dan 10 menit, lalu bandingkan keduanya.
- f. Pengukuran IP Primer–Ground dilakukan dengan menghubungkan probe positif (+) ke terminal bushing primer dan probe negatif (-) dihubungkan ke Ground, biasanya dilakukan pada bagian body trafo yang masih bagus.

- g. Pengukuran IP Sekunder–Ground dilakukan dengan menghubungkan probe positif (+) ke terminal bushing Sekunder dan probe negatif (-) ke Ground.
- h. Pengukuran IP Tersier-Ground dilakukan dengan menghubungkan probe positif (+) ke terminal bushing Tersier dan probe negatif (-) ke Ground.
- i. Pengukuran IP Primer-Sekunder dilakukan dengan menghubungkan probe positif (+) ke terminal bushing Primer dan probe negatif (-) ke terminal bushing Sekunder
- j. Pengukuran IP Sekunder-Tersier dilakukan dengan menghubungkan probe positif (+) ke terminal bushing Sekunder dan probe negatif (-) ke terminal bushing Tersier
- k. Pengukuran IP Tersier -Primer dilakukan dengan menghubungkan probe positif (+) ke terminal bushing Tersier dan probe negatif (-) ke terminal bushing Primer
- l. Membandingkan pengujian tahanan isolasi saat 10 menit dengan saat 1 menit
- m. Mencatat hasil pengujian pada lembar pengujian
- n. Mematikan alat uji dengan memutar switch ke posisi OFF
- o. Melepaskan rangkaian pengujian pada transformator dan alat uji.



3.3.3. Pengujian Tangen Delta

Merujuk penjelasan mengenai pengujian tahanan isolasi dengan metode tangen delta pada bab sebelumnya adalah salah satu teknik pengujian yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas isolasi pada peralatan listrik. Pengujian ini membandingkan fase antara tegangan dan arus yang mengalir melalui isolasi untuk mengukur faktor daya atau faktor rugi. Pengujian tangen delta merupakan salah satu metode yang berguna untuk mengidentifikasi masalah pada isolasi peralatan listrik dan memantau kualitas isolasi seiring waktu. Hal ini membantu dalam perawatan preventif, deteksi dini kebocoran isolasi, dan pemeliharaan yang tepat untuk mencegah kerusakan lebih lanjut pada peralatan listrik.

Untuk langkah pengujian dengan metode tangen delta ialah sebagai berikut :

1. Memastikan perlengkapan alat kerja dan alat pelindung diri (APD) dipersiapkan dan digunakan dengan benar.
2. Melepaskan klem dan konduktor dari bushing
3. Menginput data-data trafo sesuai dengan nameplate trafo yang akan diuji dan standar pengujian yang akan dilaksanakan pada alat uji yaitu Megger Delta 4010
4. Memastikan ground peralatan terhubung dengan ground local
5. Mengubah posisi tap charger trafo ke tap 1
6. Menghubungkan semua bushing primer, bushing sekunder, dan tersier menggunakan konduktor eksternal
7. Merangkai alat uji tan delta sesuai bagian mana yang akan diuji
8. Menguji Tangen delta bushing primer C1 pada setiap fasa (R-S-T) dengan cara menghubungkan HV Lead ke terminal bushing, LV Lead ke center tap, dan Ground Lead ke ground trafo.
9. Selanjutnya melakukan pengujian tangen delta winding dengan cara menghubungkan HV Lead dan LV Lead secara berurutan ke
 - Primer – Ground
 - Sekunder – Ground

- Tersier – Ground
- Primer – Sekunder
- Sekunder – Tersier
- Primer - Tersier

10. Mencatat hasil pengujian pada tabel hasil pengujian

11. Melepaskan rangkaian pengujian dan dikembalikan peralatan sesuai dengan pengelompokkannya setelah pengujian selesai dilakukan

3.3.4. Pengujian Breakdown Voltage

Merujuk penjelasan mengenai pengujian tahanan isolasi dengan metode *Breakdown Voltage* (BDV) pada bab sebelumnya, BDV merupakan salah satu metode pengujian untuk menilai sejauh mana minyak isolasi mampu menahan tekanan tegangan listrik. Minyak transformator yang jernih cenderung menghasilkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Dengan demikian, pengujian ini dapat digunakan sebagai indikator keberadaan kontaminan, seperti kandungan air atau partikel. Nilai tegangan tembus yang rendah dapat menunjukkan adanya salah satu jenis kontaminasi, sementara nilai yang tinggi tidak selalu menjamin bahwa minyak benar-benar bebas dari seluruh jenis kontaminan.

Untuk langkah pengujian dengan metode *Breakdown Voltage* ialah sebagai berikut :

1. Memastikan perlengkapan alat kerja dan alat pelindung diri (APD) dipersiapkan dan digunakan dengan benar.
2. Menyiapkan selang penghubung untuk mengambil sampel minyak trafo. Pengambilan sampel minyak pada OLTC dan Maintank diambil pada bagian *drain valve* baik pada OLTC maupun Maintank transformator.
3. Membuka baut yang menutup bagian *drain valve* pada OLTC Trafo.
4. *Oil-flushing* unit dipasang pada katup (*drain valve*) OLTC untuk mencegah kontaminasi yang disebabkan oleh penumpukan minyak isolasi di bagian tap

transformator. Aliran awal dari selang harus dibuang terlebih dahulu karena biasanya masih mengandung banyak kontaminan.

5. Sebelum mengisi wadah untuk diuji, melakukan pencucian wadah dengan menggunakan minyak dan dikocok untuk memastikan wadah benar-benar terisi minyak yang minim kontaminan.
6. Wadah sampel diisi dengan minyak isolasi yang akan diambil sebagai sampel, dengan cara mengalirkan minyak melalui sisi dinding wadah untuk menghindari terjebaknya udara di dalamnya.
7. Selanjutnya, minyak isolasi diisikan ke dalam wadah hingga mencapai sekitar 95% hingga 98% dari kapasitas total wadah.
8. Menutup wadah sampel dengan tutupnya hingga rapat kemudian memasukkan wadah sampel ke alat pengujian yaitu Megger OTS80PB.
9. Setelah nilai BDV didapatkan, sampel minyak hasil pengujian dibuang pada tempat yang sudah disediakan dan selang konektor pada *drain valve* OLTC dilepas
10. Selanjutnya ialah melakukan pengukuran BDV pada Maintank dengan cara memasang *oil-flushing* unit pada *drain valve* Maintank. Melakukan pencucian terlebih dahulu dengan minyak yang baru berasal dari *drain valve* Maintank
11. Mengisi wadah dengan minyak insulasi Maintank sampai 95% s/d 98% kapasitas wadah
12. Menutup wadah sampel dengan tutupnya hingga rapat kemudian memasukkan wadah sampel ke alat pengujian yaitu Megger OTS80PB.
13. Melepaskan *drain valve* pada katup Maintank
14. Setelah proses pengambilan sampel selesai, seluruh peralatan dikembalikan ke tempat semula sesuai dengan jenis dan kategorinya.

BAB IV DATA DAN ANALISA

Pada bab data dan analisa ini akan membahas tentang data pengukuran tahanan isolasi pada Transformator Daya 60 MVA berdasarkan metode pengujian yaitu metode Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* (BDV). Data-data ini selanjutnya akan dihitung menggunakan masing-masing rumus dari ketiga metode itu sendiri. Nilai dari data hasil pengujian serta data perhitungan akan dibandingkan dengan standar yang digunakan, pada metode Indeks Polarisasi menggunakan standar IEEE 43-2000, pada metode Tangen Delta menggunakan standar ANCI C57.12.90, sedangkan pada metode *Breakdown Voltage* (BDV) menggunakan IEC 60156. Dari data hasil pengujian serta data perhitungan uji kelayakan tahanan isolasi menggunakan metode-metode tersebut nantinya maka tahanan isolasi dapat dikatakan layak untuk dioperasikan bila sesuai dengan standar yang digunakan.

4.1 Hasil Pengujian Indeks Polarisasi

Metode pertama dalam menentukan kondisi tahanan isolasi transformator yaitu menggunakan metode Indeks Polarisasi. Parameter yang diukur adalah arus bocor yang melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Metode ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai tahanan isolasi pada pengujian 10 menit dengan hasil pengujian pada 1 menit pertama. Pengujian metode indeks polarisasi ini dilakukan menggunakan alat uji insulation tester dengan merk Kyoritsu Model KEW3125A dengan tegangan uji 5000 VDC.

Nilai pengujian Indeks Polarisasi didapatkan dengan membagi hasil tahanan isolasi pada saat pengujian telah berlangsung 10 menit dengan saat menit pertama. Foto pada saat pelaksanaan pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pengujian Indeks Polarisasi

Dengan mengambil data hasil pengukuran tahanan isolasi dan menghitung nilai Indeks Polarisasi menggunakan rumus pada persamaan 2.2, maka contoh perhitungan nilai Indeks Polarisasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1}$$

1. Indeks Polarisasi pada Primer – Ground

$$IP = \frac{37000}{21000} = 1,761$$

2. Indeks Polarisasi pada Sekunder – Ground

$$IP = \frac{15900}{14000} = 1,135$$

3. Indeks Polarisasi pada Tersier – Ground

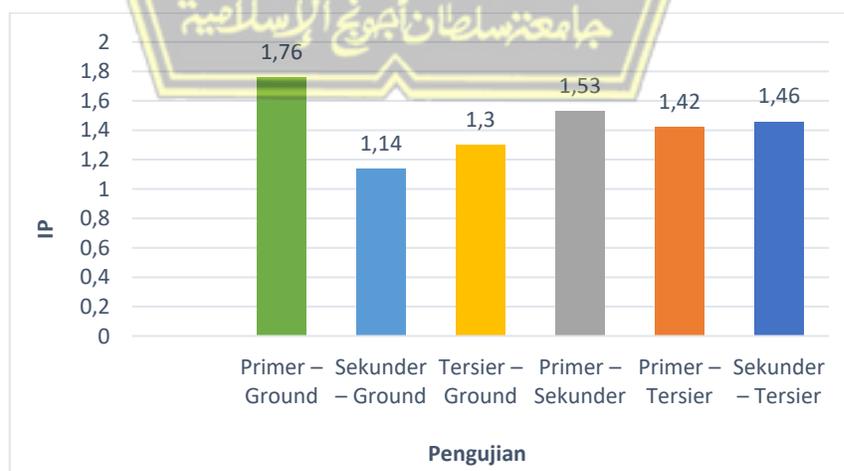
$$IP = \frac{19400}{14900} = 1,302$$

Berdasarkan dari pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Indeks Polarisasi

No.	Pengujian	Hasil Pengujian (M ohm)			Ket
		1 Menit	10 Menit	IP	
1	Primer – Ground	21000	37000	1.76	Baik
2	Sekunder – Ground	14000	15900	1.14	Dipertanyakan
3	Tersier – Ground	14900	19400	1.3	Baik
4	Primer – Sekunder	16300	25000	1.53	Baik
5	Primer – Tersier	26000	37000	1.42	Baik
6	Sekunder – Tersier	14200	20700	1.46	Baik

Setelah mendapatkan data pengukuran serta perhitungan metode Indeks Polarisasi pada Transformator Daya 60 MVA, maka dapat disimpulkan bahwa untuk Transformator Daya Unit 2 GI Kebasen rata-rata masih dalam kondisi baik, kecuali untuk tahanan isolasi pada Sekunder – Ground yang dalam kondisi dipertanyakan dan perlu dilakukan pengujian lebih lanjut, seperti uji kadar minyak dan uji tange delta. Hasil dari pengujian dengan metode indeks polarisasi dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik Hasil Pengujian Indeks Polarisasi

Pengujian dengan metode indeks polarisasi dilakukan berkelanjutan selama 10 menit, semakin lama pengukuran waktu yang dilakukan maka semakin besar nilai resistansi. Tahanan isolasi memiliki kemampuan untuk mengisi kapasitansi tinggi pada isolasi transformator, dan nilai resistansi akan mengalami peningkatan lebih cepat apabila kondisi isolasi dalam keadaan bersih dan kering.

Dari hasil pengujian dan perhitungan Indeks Polarisasi (IP) pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa rata-rata keadaan tahanan isolasi pada bagian yang diuji adalah baik dengan hasil IP melebihi 1,25 semua yang hal ini berarti memenuhi standar yang digunakan. Namun terdapat pengecualian pada bagian Sekunder – Ground yang masih dalam keadaan ‘dipertanyakan’ sesuai standar IEEE 43-2000 dengan nilai IP 1,14. Hal ini berarti pada sisi Sekunder – Ground, kualitas tahanan isolasinya kurang baik.

Untuk mengetahui kemungkinan penyebab nilai IP rendah, maka kita bisa menggunakan metode analisis *Root Cause Analysis* (RCA) dengan teknik ‘5 Whys’ yaitu metode analisis untuk mendapatkan akar permasalahan dengan menanyakan mengapa berulang kali pada suatu permasalahan. Dalam hal ini, maka penerapan 5 Whys ialah sebagai berikut :

1. Why 1 : Mengapa nilai pengukuran indeks polarisasi rendah? (Karena nilai tahanan isolasi rendah)
2. Why 2 : Mengapa nilai tahanan isolasi rendah? (Karena ada arus bocor yang mengalir pada isolasi)
3. Why 3 : Mengapa ada arus bocor yang mengalir pada isolasi? (Karena bahan isolasi tidak melakukan fungsinya untuk mengisolasi dengan baik)
4. Why 4 : Mengapa bahan isolasi tidak melakukan fungsinya untuk mengisolasi dengan baik? (Karena isolasi terkontaminasi kotoran, lembab, atau terjadi kerusakan)
5. Why 5 : Mengapa isolasi terkontaminasi kotoran, lembab, atau terjadi kerusakan? (Karena kurangnya pemeliharaan pada transformator)

Berdasarkan analisis *5 whys* ini, dapat disimpulkan bahwa *root cause* dari nilai IP yang rendah yaitu kurangnya pemeliharaan. Maka saran perlakuan untuk mengatasi permasalahan ini ialah lebih rutinnya dilakukan pemeliharaan untuk mengecek, membersihkan, dan melakukan perbaikan pada isolasi sisi Sekunder-Ground, serta dilakukan pengujian lebih lanjut menggunakan metode tangen delta dan *dissolved gas analysis* (DGA) pada bagian ini untuk mempersempit kemungkinan penyebab dari tahanan isolasi yang kurang baik ini.

Merujuk pada hasil pengujian dan analisa diatas maka dapat disimpulkan bahwa Transformator Unit 2 GI Kebasen secara garis besar dikategorikan dalam kondisi baik dan layak dioperasikan karena memenuhi syarat standar IEEE 43-2000. Namun untuk sisi Sekunder – Ground yang masih berada dibawah standar dan dalam kondisi ‘dipertanyakan’ dengan nilai 1,14, sebaiknya dilakukan pengecekan, pembersihan, dan perbaikan pada bagian tersebut serta dilakukan pengujian tangen delta untuk melihat apakah terjadi kerusakan pada tahanan isolasi yang berada didalam trafo sebelum dioperasikan. Dalam kondisi ini sebenarnya transformator masih dapat dioperasikan, akan tetapi perlu dilakukan pengawasan dan pemantauan berkala pada isolasinya.

4.2 Hasil Pengujian Tangen Delta

Metode kedua dalam menentukan kondisi tahanan isolasi transformator yaitu menggunakan metode pengujian tangen delta. Metode tangen delta ini merupakan pengujian yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas isolasi pada peralatan listrik. Pengujian ini membandingkan fase antara tegangan dan arus yang mengalir melalui isolasi untuk mengukur faktor daya atau faktor rugi.

Dalam pengujian ini, parameter yang diukur adalah besarnya arus bocor (*current leakage*) yang mengalir melalui isolasi. Transformator dianggap memiliki sifat seperti kapasitor murni, di mana pada kondisi kapasitif ideal, arus akan mendahului tegangan sebesar 90° ketika dialiri arus atau diberi tegangan sinusoidal. Namun, apabila terjadi kontaminasi pada isolasi transformator, nilai tahanan isolasi akan menurun, sehingga

arus resistif yang mengalir melalui isolasi meningkat. Akibatnya, sudut antara arus dan tegangan akan berkurang dari 90° , yang menunjukkan tingkat pencemaran atau kontaminasi pada isolasi tersebut. Besarnya nilai tangen delta dapat digunakan untuk mendeteksi kebocoran arus yang disebabkan oleh kerusakan isolasi, kelembaban, atau kontaminasi pada isolasi trafo.



Gambar 4.3 Pengujian Tangen Delta

Pengujian ini dilakukan pada dua bagian yaitu pada bushing dan pada belitan (*winding*). Nilai tangen delta diukur menggunakan alat ukur Megger Delta 4000.

1. Pengujian Tangen Delta pada Winding

Pada pengujian ini menggunakan berbagai variasi mode test seperti pada belitan primer dengan hubungan $CHG+CHL$ menggunakan mode test GSTg-B (*Grounded Speciment Test with guard – Blue*), hubungan CHG menggunakan mode test GSTg-RB (*Grounded Speciment Test with guard – Red Blue*), hubungan CHL menggunakan mode test UST-R (*Ungrounded Speciment Test – Red*). Metode ini juga berlaku pada belitan sekunder dan tersier menggunakan mode test pada hubungan yang sama.

Berdasarkan pelaksanaan pengujian, diperoleh data hasil pengukuran tahanan isolasi dengan metode Tangen Delta pada bagian Winding, yang secara lengkap disajikan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Tangen Delta Winding

Test	Kapasitansi (pF)	Tegangan (kV)	Daya Losses (mW)	Arus (mA)	Tangen Delta (%)	Keterangan
Primer						
C _{HG} +C _{HL}	12.183,80	10	0,5695	38,211	0,15	Bagus
C _{HG}	4.033,16	10	0,2369	12,647	0,19	Bagus
C _{HL}	8.172,23	10	0,3291	25,666	0,13	Bagus
Sekunder						
C _{LG} +C _{LT}	18.338,84	10	1,1115	57,539	0,19	Bagus
C _{LG}	1.432,21	10	0,3069	4,486	0,69	Penurunan
C _{LT}	16,941	10	0,7781	53,151	0,15	Bagus
Tersier						
C _{TG} +C _{HT}	17.585,73	5	0,2396	27,509	0,17	Bagus
C _{TG}	17.507,13	5	0,2399	27,505	0,17	Bagus
C _{TL}	81,35	5	0,0011	0,128	0,19	Bagus

Nilai pengujian Tangen Delta didapatkan dengan memasukkan hasil pengukuran pada Tabel 4.2 ke dalam rumus pada persamaan 2.7. Contoh perhitungan nilai Tangen Delta pada belitan primer dengan hubungan C_{HG}+C_{HL} dapat dilihat sebagai berikut:

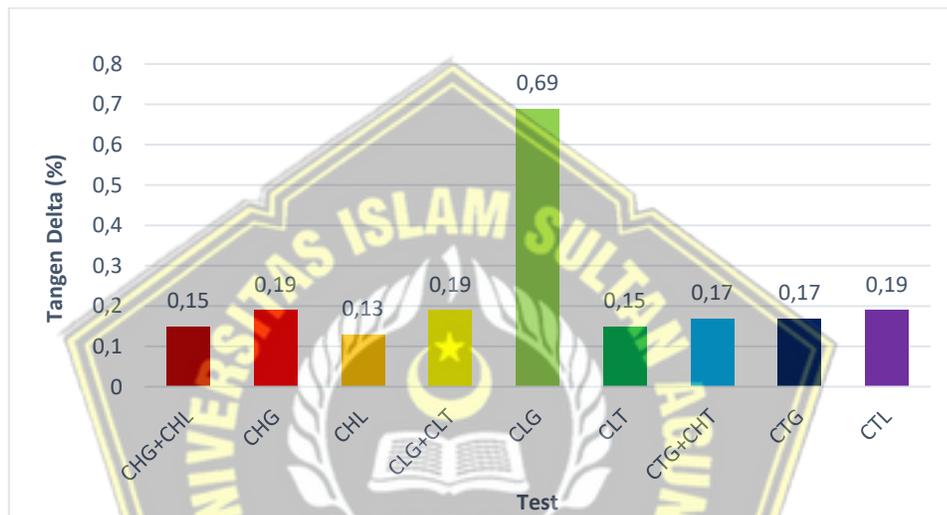
$$\tan \delta = \frac{P_{drop}}{V^2 \cdot \omega \cdot C} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,5695}{(10^4)^2 \cdot 2.3,14.50.12183,8.10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,5695}{382,57132} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,1488 \%$$

Setelah mendapatkan data pengukuran serta perhitungan dari pengujian dengan metode Tangen Delta Winding pada Transformator Daya 60 MVA, maka dapat disimpulkan bahwa untuk Transformator Daya Unit 2 GI Kebasen rata-rata masih dalam kondisi baik, kecuali untuk pengukuran tangen delta pada CLG atau pada Sekunder – Ground yang dalam kondisi mengalami penurunan pada isolasi di dalam trafo. Hasil dari pengujian dengan metode Tangen Delta Winding dapat dilihat pada grafik Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengujian Tangen Delta Winding

Berdasarkan Gambar 4.4, hasil pengujian Tangen Delta Winding untuk Transformator Daya 2 60 MVA di GI Kebasen secara umum masih memenuhi standar ANSI C.57.12.90 dengan nilai di bawah 0,5%. Namun, teridentifikasi penurunan pada belitan sekunder dengan konfigurasi CLG yang menunjukkan nilai Tangen Delta sebesar 0,69%. Nilai ini telah melebihi batas toleransi standar dan termasuk dalam kategori penurunan isolasi menurut standar ANSI C57.12.90 (0,5-0,7%).

Untuk mengetahui kemungkinan penyebab nilai tangen delta yang tinggi, maka kita gunakan kembali metode analisis *Root Cause Analysis* (RCA) dengan teknik '5 *Whys*'. Dalam hal ini, maka penerapan 5 *Whys* ialah sebagai berikut :

1. Why 1 : Mengapa nilai pengukuran tangen delta belitan tinggi? (Karena rugi-rugi dielektrik pada bahan isolasi meningkat)
2. Why 2 : Mengapa rugi-rugi dielektrik pada bahan isolasi meningkat? (Karena ada arus bocor yang mengalir pada bahan isolasi)
3. Why 3 : Mengapa ada arus bocor yang mengalir pada isolasi? (Karena terjadi penurunan kekuatan tahanan isolasi)
4. Why 4 : Mengapa terjadi penurunan kekuatan tahanan isolasi? (Karena terjadi degradasi thermal atau kimia dan kontaminasi pada bahan isolasi didalam trafo)
5. Why 5 : Mengapa terjadi degradasi thermal atau kimia dan kontaminasi pada bahan isolasi di trafo? (Karena penggunaan trafo yang secara terus menerus dan minimnya pemeliharaan pada transformator)

Berdasarkan analisis *5 whys* ini, dapat disimpulkan bahwa *root cause* dari nilai tangen delta belitan yang tinggi yaitu karena penggunaan trafo secara terus-menerus dan minimnya pemeliharaan. Maka saran perlakuan untuk mengatasi permasalahan ini ialah menerapkan jadwal pengujian tangen delta secara rutin sehingga bila terjadi penurunan kualitas isolasi lebih lanjut pada hubungan C_{LG} atau terdeteksi kerusakan pada bahan isolasi, dapat diketahui lebih awal untuk menjaga kualitas keandalan operasional trafo.

2. Pengujian Tangen Delta pada Bushing

Pada pengujian tangen delta bushing dilakukan dengan mode test UST-R (*Ungrounded Speciment Test – Red*) pada semua fasanya. Berdasarkan dari pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil pengujian tahanan isolasi dengan metode Tangen Delta pada Bushing dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Tabel Hasil Pengujian Tangen Delta Bushing

Test	Kapasitansi (pF)	Tegangan (kV)	Daya Losses (mW)	Arus (mA)	Tangen Delta (%)	Keterangan
Fasa R	335,85	10	0,0258	1,053	0,25	Bagus
Fasa S	335,23	10	0,0242	1,052	0,23	Bagus
Fasa T	334,97	10	0,0237	1,052	0,23	Bagus

Nilai pengujian Tangen Delta didapatkan dengan memasukkan hasil pengukuran pada Tabel 4.3 ke dalam rumus pada persamaan 2.7. Contoh perhitungan nilai Tangen Delta pada bushing Fasa R dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\tan \delta = \frac{P_{drop}}{V^2 \cdot \omega \cdot C} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,0258}{(10^4)^2 \cdot 2.3,14.50.335,85.10^{-12}} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,0258}{10,54569} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,2446 \%$$

Setelah mendapatkan data pengukuran serta perhitungan dari pengujian dengan metode Tangen Delta Bushing pada Transformator Daya 60 MVA, maka dapat disimpulkan bahwa untuk Transformator Daya Unit 2 GI Kebasen masih dalam kondisi baik dan layak, siap untuk dioperasikan. Hasil dari pengujian dengan metode Tangen Delta Bushing dapat dilihat pada grafik Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengujian Tangen Delta Bushing

Jika melihat Gambar 4.5 hasil pengujian Tangen Delta Bushing pada Transformator Daya 2 60 MVA di Gardu Induk Kebasen masih dalam kondisi bagus menurut standar ANSI C.57.12.90 yaitu dibawah 0,5% untuk semua fasanya. Hal ini berarti bahwa kualitas isolasi pada bushing trafo dalam keadaan baik dan siap untuk dioperasikan. Langkah selanjutnya yang perlu menjadi perhatian ialah bagaimana cara kita untuk tetap mempertahankan kondisi tahanan isolasi agar tetap berada pada kondisi baik dan optimal agar keandalan listrik tetap terjaga.

4.3 Hasil Pengujian *Breakdown Voltage* (BDV)

Metode ketiga dalam pengujian tahanan isolasi ialah melalui pengujian tegangan tembus minyak, baik pada *Maintank* maupun *On Load Tap Changer* (OLTC). Parameter utama yang diukur adalah nilai tegangan tembus minyak isolasi, di mana minyak dalam kondisi jernih dan kering secara ideal akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi.



Gambar 4.6 Pengujian Breakdown Voltage

Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan sebanyak enam kali percobaan untuk memperoleh nilai kekuatan dielektrik yang akurat. Tujuan utama pengujian ini adalah menilai kemampuan minyak sebagai media isolasi antara belitan atau belitan dengan ground dan mengukur ketahanan minyak terhadap stress tegangan listrik. Prosedur ini memberikan gambaran kualitas minyak isolasi yang krusial untuk memastikan keandalan sistem isolasi transformator secara keseluruhan.

1. Pengujian *Breakdown Voltage* pada *Maintank*

Pada pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) pada *Maintank* dilakukan dengan cara mengambil sampel minyak dari *drain valve Maintank* pada wadah pengukuran, lalu dimasukkan ke alat uji untuk diuji selama 6 kali sampai diketahui pada tegangan berapa minyak mampu menahan tegangan tembus. Berdasarkan dari pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil pengujian tahanan isolasi dengan metode *Breakdown Voltage* pada *Maintank* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Breakdown Voltage (BDV) pada Maintank

No	Pengujian	Hasil Uji (kV)
1	Test 1	83,2
2	Test 2	69,2
3	Test 3	75,2
4	Test 4	81,1
5	Test 5	79,3
6	Test 6	74,6
Rata-rata		77,1

Nilai pengujian *Breakdown Voltage* pada *Maintank* didapatkan dengan memasukkan hasil pengukuran pada Tabel 4.4 ke dalam rumus pada persamaan 2.8. Contoh perhitungan nilai *Breakdown Voltage* pada *Maintank* dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$V_{b(\text{rata-rata})} = \frac{83,2 + 69,2 + 75,2 + 81,1 + 79,3 + 74,6}{6}$$

$$V_{b(\text{rata-rata})} = \frac{462,6}{6}$$

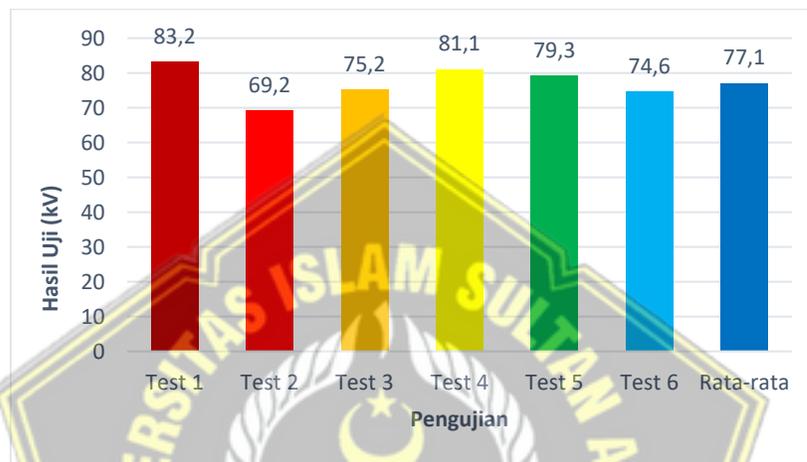
$$V_{b(\text{rata-rata})} = 77,1 \text{ kV}$$

Maka, rata-rata kekuatan dielektrik dari tegangan tembus adalah:

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{V_{b(\text{rata-rata})}}{d} = \frac{77,1}{2,5}$$

$$E_{\text{rata-rata}} = 30,84 \text{ kV/mm}$$

Setelah mendapatkan data pengukuran serta perhitungan dari pengujian dengan metode *Breakdown Voltage* pada *Maintank* Transformator Daya 60 MVA, maka dapat disimpulkan bahwa untuk Transformator Daya Unit 2 GI Kebasen masih dalam kondisi baik dan layak, siap untuk dioperasikan. Hasil dari pengujian dengan metode *Breakdown Voltage* pada *Maintank* dapat dilihat pada grafik Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) *Maintank*

Merujuk pada hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) *Maintank* pada Gambar 4.7 dan Tabel 4.4, hasil pengujian tegangan tembus pada *Maintank* Transformator Daya 2 60 MVA di Gardu Induk Kebasen masih dalam kondisi baik menurut standar IEC 60156 yaitu diatas 50 kV. Nilai hasil pengujian BDV pada *Maintank* ini berkisar diantara 69,2 kV hingga 83,2 kV dengan nilai rata-rata pengujian BDV di 77,1 kV. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa minyak isolasi transformator pada *Maintank* mampu menahan tegangan tembus listrik dengan baik, kondisi minyak isolasi dalam keadaan baik dan dikatakan siap untuk menjaga kinerja dan keandalan transformator. Walaupun begitu, kedepannya kondisi minyak transformator ini tetap perlu diperhatikan untuk memastikan bahwa kondisi minyak *Maintank* trafo ini tetap dalam kondisi baik, sehingga tetap mampu mengisolasi bagian dalam trafo dengan optimal dan memantau apabila terjadi penurunan pada kualitas minyak trafo.

2. Pengujian *Breakdown Voltage* pada OLTC

Pada pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) pada OLTC dilakukan dengan cara mengambil sampel minyak dari *drain valve* OLTC pada wadah pengukuran, lalu dimasukkan ke alat uji untuk diuji selama 6 kali sampai diketahui pada tegangan berapa minyak mampu menahan tegangan tembus. Berdasarkan dari pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil pengujian tahanan isolasi dengan metode *Breakdown Voltage* pada OLTC dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) pada OLTC

No	Pengujian	Hasil Uji (kV)
1	Test 1	59,2
2	Test 2	50,7
3	Test 3	52,8
4	Test 4	54,3
5	Test 5	56,1
6	Test 6	51,5
Rata-rata		54,1

Nilai pengujian *Breakdown Voltage* pada OLTC didapatkan dengan memasukkan hasil pengukuran pada Tabel 4.5 ke dalam rumus pada persamaan 2.8. Contoh perhitungan nilai Tangen Delta pada bushing Fasa R dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$V_{b(\text{rata-rata})} = \frac{59,2 + 50,7 + 52,8 + 54,3 + 56,1 + 51,5}{6}$$

$$V_{b(\text{rata-rata})} = \frac{462,6}{6}$$

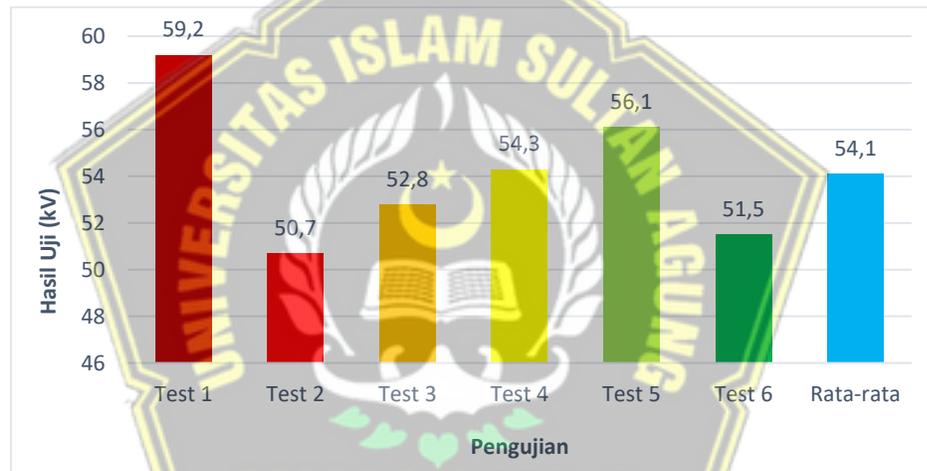
$$V_{b(\text{rata-rata})} = 54,1 \text{ kV}$$

Maka, rata-rata kekuatan dielektrik dari tegangan tembus adalah:

$$E_{rata-rata} = \frac{V_{b(rata-rata)}}{d} = \frac{54,1}{2,5}$$

$$E_{rata-rata} = 21,64 \text{ kV/mm}$$

Setelah mendapatkan data pengukuran serta perhitungan dari pengujian dengan metode *Breakdown Voltage* pada OLTC Transformator Daya 60 MVA, maka dapat disimpulkan bahwa untuk Transformator Daya Unit 2 GI Kebasen masih dalam kondisi baik dan layak, siap untuk dioperasikan. Hasil dari pengujian dengan metode *Breakdown Voltage* pada OLTC dapat dilihat pada grafik Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengujian Breakdown Voltage (BDV) OLTC

Merujuk pada hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) OLTC pada Gambar 4.8 dan Tabel 4.5, hasil pengujian BDV atau tegangan tembus pada OLTC Transformator Daya 2 60 MVA di Gardu Induk Kebasen masih dalam kondisi bagus menurut standar IEC 60156 yaitu hasil pengukuran diatas 50 kV. Nilai hasil pengujian BDV pada OLTC ini berkisar diantara 50,7 kV hingga 59,2 kV dengan nilai rata-rata pengujian BDV di 54,1 kV. Bila kita bandingkan dengan nilai BDV pada maintank, maka nilai BDV pada minyak OLTC akan lebih kecil daripada maintank. Hal ini dikarenakan OLTC yang senantiasa bergerak untuk

menyesuaikan tegangan trafo yang dibutuhkan oleh sistem, sehingga membuat kekuatan insulasi pada minyak OLTC lama-kelamaan berkurang.

Terlepas dari itu, hasil pengujian mengindikasikan bahwa minyak isolasi transformator masih memiliki kemampuan memadai dalam menahan tegangan listrik, walaupun terdapat beberapa catatan penting. Pada pengujian ke-2 dan ke-5, nilai tegangan tembus masing-masing mencapai 50,7 kV dan 51,5 kV, yang berada di ambang batas minimum untuk kategori kinerja optimal. Namun secara keseluruhan, dengan nilai rata-rata BDV yaitu 54,1 kV, hasil ini mengindikasikan bahwa minyak isolasi trafo pada OLTC masih dalam keadaan yang memadai untuk mempertahankan performa dan keandalan operasional transformator.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil pengujian karakteristik isolasi transformator daya melalui tiga metode yaitu Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan Tegangan Tembus (BDV) yang dilaksanakan di Gardu Induk 150 kV Kebasen, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengujian Indeks Polarisasi (IP) pada Trafo Unit 2 diperoleh hasil tahanan isolasi secara garis besar masih dalam kondisi baik sesuai dengan standar IEEE 43-2000 dengan nilai $>1,25$. Namun pada sisi Sekunder – Ground berada pada kondisi ‘dipertanyakan’ dengan nilai IP 1,14. Dalam kondisi ini sebenarnya transformator masih dapat operasikan, akan tetapi perlu dilakukan pengawasan dan pemantauan berkala pada isolasinya.
2. Berdasarkan hasil pengujian Tangen Delta pada Winding dan Bushing Trafo Unit 2 didapatkan bahwa nilai tangen delta rata-rata dalam keadaan yang baik sesuai standar ANSI C57.12.90 yaitu dibawah 0,5%. Namun pada Tangen Delta Winding hubungan CLG berada pada kondisi mengalami penurunan dengan tangen delta yaitu 0,69% sehingga perlu adanya tindak lanjut agar tidak terjadi pemburukan yang lebih besar pada transformator.
3. Berdasarkan hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) pada minyak *Maintank* dan OLTC menunjukkan kondisi minyak isolasi Trafo Unit 2 berada pada kondisi yang baik dengan nilai lebih dari 50 kV sesuai standar IEC 60156.
4. Secara keseluruhan, Transformator Daya Unit 2 berkapasitas 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Kebasen dinyatakan layak untuk dioperasikan karena memenuhi standar dan kriteria kelayakan operasi.

5.2 Saran

Selama pengerjaan tugas akhir ini tentunya tidak lepas dari berbagai macam kekurangan dan kelemahan, sehingga dapat dikembangkan serta disempurnakan agar menjadi lebih baik. Berikut saran penulis untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan yang ada pada tugas akhir ini:

1. Direkomendasikan untuk dilakukan pengecekan, pembersihan, dan perbaikan pada bagian-bagian trafo daya, terutama pada bagian yang memiliki nilai pengujian dibawah kondisi bagus sesuai standar yang digunakan untuk mencegah terjadinya lagi penurunan kualitas pada tahanan isolasi dan menjaga trafo daya pada kondisi paling optimalnya.
2. Perlu dikembangkan dengan cara melakukan beberapa metode lain dalam pengujian tahanan isolasi agar dapat membandingkan sebuah nilai yang diperoleh dan lebih memastikan sebuah transformator dalam keadaan normal atau abnormal.
3. Perlu penyempurnaan metodologi, termasuk prosedur pengujian, teknik perhitungan, dan analisis data lebih mendalam guna meningkatkan kualitas penelitian pengujian karakteristik isolasi ini, sekaligus memastikan penyajian hasil yang lebih komprehensif dan mudah dipahami.
4. Perlu ada riwayat data pemeliharaan rutin transformator daya sebelumnya yang dimasukkan dalam penelitian sebagai perbandingan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Ababil, K. (2023) *Analisa Perbandingan Kelayakan Tahanan Isolasi Transformator Daya Menggunakan Pengujian Indeks Polaritas, Tangen Delta, BDV (Breakdown Voltage), dan Rasio Tegangan di Gardu Induk 150 kV Ulee Kareng*. Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry Banda Aceh.
- Almanda, D. and Ardiansyah, A. (2022) ‘Analisis Pengujian Tangen Delta Pada Bushing Trafo 150/20 Kv 60 Mva Di Gardu Induk Karet Lama’, *RESISTOR (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, 5(2), p. 97. Available at: <https://doi.org/10.24853/resistor.5.2.97-102>.
- Arinsya Prima, G., Anthony, Z. and Anugrah, A. (2023) ‘Gilang Arinsya Prima: Analisa Tahanan Isolasi Pada ... Analisa Tahanan Isolasi Pada Transformator Daya 150/30 KV Gardu Induk Padang Luar PT PLN (Persero) Bukittinggi’, *Indonesian Journal of Engineering and Technology (INAJET)*, 6(1), pp. 2623–2464. Available at: <https://journal.unesa.ac.id/index.php/inajet>.
- Maulana, W.F. *et al.* (2025) ‘Perhitungan hasil uji Tangen Delta sebagai parameter kelayakan Transformator pada Gardu Induk Rungkut 150 kV’, *Jurnal Teknik Elektro*, XIV(I), pp. 8–15.
- Nugraha, A.P. (2023) ‘Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Berbasis Indeks Polarisasi Dan Tangen Delta Pada Trafo GI 150/20 kV PT. APF’. Available at: [http://repository.unissula.ac.id/31644/%0Ahttp://repository.unissula.ac.id/31644/1/Teknik Elektro_30601900045_fullpdf.pdf](http://repository.unissula.ac.id/31644/%0Ahttp://repository.unissula.ac.id/31644/1/Teknik%20Elektro_30601900045_fullpdf.pdf).
- PT. PLN (Persero) (2014) ‘Buku Pedoman Trafo Tenaga’, *Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Tenaga*, pp. 1–142.
- PT. PLN (Persero) (2016) *SPEKIFIKASI TRANSFORMATOR TENAGA Bagian 5: Transformator 500/168/71,5 kV*.
- Robbani, M.F., Nugroho, D. and Gunawan, G. (2020) ‘Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage’,

Elektrika, 12(2), p. 60. Available at:
<https://doi.org/10.26623/elektrika.v12i2.2721>.

Situmeang, U., Mulyanto, B. and Halilintar, M.P. (2022) ‘Analisis Kondisi Tahanan Isolasi Transformator Daya 125 Mva Menggunakan Indeks Polarisasi Tangen Delta Dan Breakdown Voltage Di Pltu Tenayan Raya 2 X 110 Mw’, *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, 6(2), pp. 206–211. Available at:
<https://doi.org/10.36277/jteuniba.v6i2.137>.

Suganda, S. and Muis, A. (2021) ‘Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator Daya’, *Sinusoida*, 23(2), pp. 1–10. Available at:
<https://doi.org/10.37277/s.v23i2.1114>.

Sutjipto, R., K, H.M. and Dzulfiqar, K.E. (2024) ‘Analisis Kondisi Isolasi Pada Station Service Transformer (SST)’, *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 11(2), pp. 86–91. Available at: <https://doi.org/10.33795/elposys.v11i2.5186>.

