EVALUASI KONDISI ISOLASI TRANSFORMATOR MELALUI PENGUJIAN TAN DELTA TRAFO 2 150/20kV 20MVA GI SEBERANG BARITO

TUGAS AKHIR

Laporan ini disusun untuk memperoleh gelar S1
Pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Sultan Agung

Disusun Oleh:

NURJANAH DWI ASTUTI
NIM: 30602200218

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025

EVALUATION OF TRANSFORMER INSULATION CONDITION USING DISSIPATION FACTOR TEST TRAFO 2 150/20kV 20MVA SEBERANG BARITO *STATION*

FINAL PROJECT

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

Disusun Oleh:

NURJANAH DWI ASTUTI

NIM: 30602200218

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

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul "**EVALUASI KONDISI ISOLASI TRANSFORMATOR MELALUI PENGUJIAN TAN DELTA TRAFO 2 150/20kV 20MVA GI SEBERANG BARITO**" ini disusun oleh:

Nama	: NURJANAH DWI ASTUTI
NIM	: 30602200218
Program Studi	: Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari	: Jumat
Tanggal	: 21 Februari 2025

Pembimbing II

Ir. Agus Adhi Nugroho, M.T.
NIDN : 0628086501

Mengetahui,
Ka. Program Studi Teknik Elektro

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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "**EVALUASI KONDISI ISOLASI TRANSFORMATOR MELALUI PENGUJIAN TAN DELTA TRAFO 2 150/20KV 20MVA GI SEBERANG BARITO**" ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 30 Januari 2025

Tim Penguji	Tanda Tangan
Dr. Eka Nurvanto Budisusila, ST., MT. **NIDN : 0619107301** **Ketua**	.....
Ir. Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D. **NIDN : 0628097501** **Penguji I**	.....
Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT., IPM. **NIDN : 0628086501** **Penguji II**	.....

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama	: Nurjanah Dwi Astuti
NIM	: 30602200218
Jurusan	: Teknik Elektro
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **"EVALUASI KONDISI ISOLASI TRANSFORMATOR MELALUI PENGUJIAN TAN DELTA TRAFO 2 150/20kV 20MVA GI SEBERANG BARITO"** 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.

Banjarmasin, 30 Januari 2025

Yang Menyatakan

Nurjanah Dwi Astuti

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, segala puji syukur hanya milik Allah SWT. Kepada-Nya kita memohon pertolongan, pengampunan, dan perlindungan dari kejahatan diri kita serta keburukan perbuatan kita. Semoga rahmat, shalawat, dan salam senantiasa tercurah kepada junjungan kita, suri teladan umat, Nabi Muhammad SAW.

Tugas akhir ini saya persembahkan dengan penuh cinta dan rindu kepada kedua orang tua tercinta, Alm. Bapak Wakiyo dan Ibu Sumarni. Pada Agustus 2024, Bapak berpulang meninggalkan kami untuk selamanya. Kepergiannya meninggalkan luka mendalam di hati saya, bahkan sempat membuat saya kehilangan semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Namun, Bapak dan Ibu adalah sosok yang telah membesarkan saya dengan kasih sayang, memberikan dukungan tiada henti, dan menjadi sumber motivasi terbesar dalam hidup saya, termasuk dalam perjalanan menyelesaikan studi ini. Karya ini adalah wujud bakti saya kepada mereka.

MOTTO

Allah adalah sebaik-baik tempat untuk berharap dan setiap takdir yang ditetapkan Allah itu yang terbaik untuk setiap hambaNya.

Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar (QS. Ar Rum: 60)

Dari Abu Hurairah, Rasulullah -shallallahu ‘alaihi wa sallam- bersabda: Bersemangatlah atas hal-hal yang bermanfaat bagimu. Minta tolonglah kepada Allah, dan janganlah engkau lemah. (HR. Muslim)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan kemudahan yang telah diberikan sehingga laporan tugas akhir berjudul "Evaluasi Kondisi Isolasi Transformator Melalui Pengujian Tan Delta Trafo 2 150/20kV 20MVA GI Seberang Barito" dapat diselesaikan. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung.

Proses penyusunan laporan ini telah menjadi bagian dari upaya penulis untuk menjalankan amanah pendidikan dengan sebaik mungkin. Setiap langkah yang diambil merupakan wujud dari pembelajaran yang diperoleh selama bertahun-tahun di bangku kuliah. Penulis berharap laporan ini dapat diterima sebagai bukti kerja keras dan ketekunan.

Namun, penulis sadar bahwa kesempurnaan bukanlah hal yang mudah dicapai. Laporan ini mungkin masih memiliki kekurangan, baik dalam hal teknis maupun non-teknis. Dengan kerendahan hati, penulis menerima segala bentuk saran dan kritik untuk menjadikan karya ini lebih baik.

Penulis berharap laporan ini dapat bermanfaat dan menambah ilmu pengetahuan bagi pembaca pada umumnya dan khususnya bagi penulis.

Banjarmasin, 30 Januari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI IV
SURAT PERNYATAAN V
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH VI
HALAMAN PERSEMBAHAN VII
MOTTO VIII
KATA PENGANTAR IX
DAFTAR ISI X
DAFTAR GAMBAR XII
DAFTAR TABEL XIV
ABSTRAK XV
ABSTRACT XVI
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Maksud dan Tujuan 5
1.4 Batasan Masalah 5
1.5 Sistematika Penulisan 5
BAB II DASAR TEORI 7
2.1. Tinjauan Pustaka 7
2.2. Transformator Tenaga 11
2.3. Karakteristik Transformator 12
2.3.1. Konstruksi Belitan Trafo Tenaga 150/20 kV 20 MVA 13
2.3.2. Karakteristik Dielektrik (Isolasi) 14
2.4. *Capacitance* (Kapasitansi) 15
2.5. Hubungan antara Arus, Kapasitansi, dan Faktor Disipasi 18
2.6. *Dissipation Factor Test* (Pengujian Tan Delta) 19
2.7. Standar Tan Delta 21
2.8. Alat Uji OMICRON CPC 100 26
2.9. Alat Uji OMICRON CPC TD1 29
2.10. *Software* Primary Test Manager 30
BAB III METODE PELAKSANAAN 31
3.1 Model Penelitian 31
3.1.1 Lokasi Penelitian 32
3.2 Prosedur Penelitian 33
3.2.1 Perencanaan atau Persiapan 34
3.2.2 Studi Literatur 34

3.2.3 Pengumpulan Data 34
3.2.4 Analisis Data 35
3.3 *Flowchart* Penelitian dan Pengujian 36
3.4 Metode Pengujian 39
3.5 Alat dan Bahan Penelitian 41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 43
4.1 Analisa Data Hasil Pengujian Tan Delta 45
4.2 Analisis Perbandingan Nilai *Losses* Daya 54
BAB V PENUTUP 56
5.1. Kesimpulan 56
5.2. Saran 56
DAFTAR PUSTAKA 58

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
UNISSULA
جامعة سلطان أجونج الإسلامية

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Dengan *Jumper* 10
Gambar 2. 2 Tanpa *Jumper* 10
Gambar 2. 3 Transformator-2 150/20kV 20MVA 11
Gambar 2. 4 Isolasi pada kumparan dan inti trafo 12
Gambar 2. 5 Rangkaian Trafo 2 belitan .....**Error! Bookmark not defined.**
Gambar 2. 6 Contoh rangkaian Star-netral dan Delta ..... **Error! Bookmark not defined.**
Gambar 2. 7 (a) Kapasitor udara pelat paralel dan (b) Kapasitor pelat paralel dengan bahan dielektrik 16
Gambar 2. 8 Representasi listrik isolasi: (a) sempurna dan (b) praktis 17
Gambar 2. 9 Hubungan vector tegangan, resistif, dan arus kapasitif (*It,* arus kapasitif; *Icap,* arus kapasitif; *Ir,* arus resistif; θ*,* sudut PF; dan δ*,* sudut disipasi)..... 18
Gambar 2. 10 Korelasi antara DF dan PF 21
Gambar 2. 12 Rangkaian Ekivalen Isolasi 25
Gambar 2. 13 Titik Pengujian yang disarankan 26
Gambar 2. 14 Alat Uji OMICRON CPC 100 27
Gambar 2. 15 Tampak menu alat uji CPC 100 28
Gambar 2. 16 Alat Uji CP TD1..... 29
Gambar 2. 17 Rangkaian Pengujian Tan Delta dengan CP TD1 30

Gambar 3. 1 Gardu Induk Seberang Barito..... 32
Gambar 3. 2 *Single line diagram* gardu induk 33
Gambar 3. 3 *Flowchart* Penelitian dan Pengujian (1)..... 36
Gambar 3. 4 *Flowchart* Penelitian dan Pengujian (2)..... 37
Gambar 3. 5 Hubungan mode uji tan delta dengan trafo dua belitan..... 39
Gambar 3. 6 Mode Pengujian..... 40

Gambar 4. 1 Proses Pengujian Tan Delta..... 45
Gambar 4. 2 Tampilan pada Alat Uji OMICRON CPC 100..... 46
Gambar 4. 3 Pemasangan koneksi kabel uji pada trafo 48
Gambar 4. 4 Grafik *Dissipation Factor* (tanδ)..... 49
Gambar 4. 5 Besar fasor sudut delta CHL Trafo-2 Tahun 2021..... 53
Gambar 4. 6 Grafik kenaikan *losses* daya pada Trafo 2 tahun 2021 dan 2023..... 55

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Pengukuran yang perlu dilakukan dalam uji faktor daya (tan delta) isolasi trafo 22
Tabel 2. 2 Standar nilai maksimum tan delta 26
Tabel 2. 3 Standar nilai maksimum kapasitansi 26
Tabel 2. 4 Spesifikasi Omicron CPC 100 27
Tabel 2. 5 Aksesoris CP TD1 29
Tabel 3. 1 Data teknis transformator 32
Tabel 3. 2 Perbandingan Mode Pengujian 40
Tabel 3. 3 Peralatan dan APD 41
Tabel 3. 4 Aksesoris kabel dan klem 41
Tabel 4. 1 Hasil Uji Tan Delta Tahun 2021 46
Tabel 4. 2 Hasil Uji Tan Delta Tahun 2023 47
Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Tangen Delta tahun 2021 dan Tahun 2023 48
Tabel 4. 4 Data nilai Losses Daya Trafo 2 tahun 2021 dan 2023 54

ABSTRAK

Transformator tenaga merupakan peralatan penting dalam sistem kelistrikan yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan energi listrik. Kondisi isolasi transformator sangat mempengaruhi keandalannya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil pengujian Tan δ (Tangen Delta) pada Trafo 2 Gardu Induk 150 kV Seberang Barito guna mengevaluasi kondisi isolasi transformator dan tingkat kerusakan yang terjadi. Data yang digunakan mencakup hasil pengujian Tan δ dari tahun 2021 dan 2023 menggunakan alat Omicron CPC 100 CP TD1. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai Tan δ transformator masih berada di bawah standar yang ditetapkan untuk trafo beroperasi (< 1%) yaitu untuk nilai maksimal pada titik pengukuran sebesar 0.7713 %, sehingga isolasi dinyatakan dalam kondisi baik dan layak beroperasi. Selain itu, hubungan antara nilai Tan δ dengan losses daya menunjukkan bahwa semakin besar nilai Tan δ, semakin tinggi rugi-rugi daya transformator, yang dapat mengindikasikan adanya penurunan kualitas material isolasi. Hasil pengukuran nilai Tan δ menunjukkan konsistensi dengan perhitungan manual, sehingga hasil pengujian dapat dinyatakan akurat. Berdasarkan hasil analisa, disarankan untuk meningkatkan intensitas pemantauan dan pemeliharaan rutin guna mencegah penurunan kualitas isolasi yang lebih parah. Dengan upaya pemeliharaan yang optimal, transformator diharapkan dapat terus beroperasi secara andal dan aman.

Kata Kunci: Tan δ, Isolasi transformator, Arus resistif, Rugi-rugi daya

ABSTRACT

Power transformers are crucial equipment in electrical systems that function to transmit and distribute electrical energy. The condition of transformer insulation significantly affects its reliability. This study aims to analyze the results of Tan δ (Tangent Delta) testing on Transformer 2 at the 150 kV Seberang Barito Substation to evaluate the transformer insulation condition and the level of degradation. The data used include the results of Tan δ testing from 2021 and 2023 using the Omicron CPC 100 CP TD1 device. The analysis shows that the Tan δ value of the transformer remains below the operational standard limit (< 1%), with the maximum measurement point value recorded at 0.7713%, indicating that the insulation is in good condition and suitable for operation. Additionally, the correlation between Tan δ values and power losses indicates that higher Tan δ values lead to greater power losses, which may reflect a decline in the quality of the insulation material. The measured Tan δ values are consistent with manual calculations, affirming the accuracy of the test results. Based on the analysis, it is recommended to enhance the intensity of monitoring and routine maintenance to prevent further degradation of the insulation quality. With proper maintenance efforts, the transformer is expected to continue operating reliably and safely.

Keywords: Tan δ, Transformer insulation, Resistive current, Power losses

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi listrik yang cukup dan stabil dapat meningkatkan produktivitas dalam sektor industri dan bisnis. Dengan pasokan listrik yang memadai, perusahaan dapat menjalankan mesin dan peralatan mereka dengan efisien, meningkatkan produksi, dan mengurangi waktu henti produksi. Ini berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi karena lebih banyak barang dan jasa diproduksi. Listrik digunakan untuk penerangan,pemanas, pendingin udara, dan peralatan rumah tangga lainnya. Dengan meningkatnya akses masyarakat terhadap listrik, mereka dapat meningkatkan kualitas hidup mereka, yang pada gilirannya dapat mendorong pertumbuhan ekonomi karena masyarakat yang lebih sehat dan produktif (Sapthu, 2023). Gardu induk merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa peralatan listrik yang disusun dengan pola tertentu sesuai dengan pertimbangan teknis, ekonomis serta keindahan. Salah satu fungsi dari gardu induk sendiri adalah untuk mentransformasikan tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan yang lain(Pamungkas, 2020). Dalam menyalurkan daya, gardu induk terdapat komponen listrik yang berupa transformator daya yang berfungsi untuk mentranformasikan daya listrik, dengan merubah besarnya tegangan dengan frekuensi tetap. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari sistem transmisi, oleh karena itu perlu dijaga keandalannya melalui pengelolaan pembebanan agar umur operasional transformator tetap beroperasi secara optimal.

Pembebanan sangat berpengaruh terhadap efisiensi transformator yang apabila beban transformator semakin besar, maka untuk rugi-rugi pada transformator juga semakin besar, sehingga dapat berpengaruh pada menurun nya efisiensi transformator tersebut. Semakin besar rugi transformator yang dihasilkan maka, untuk hasil efisiensi yang dihasilkan akan semakin mengecil, hal ini dikarenakan

besarnya rugi-rugi transformator disebabkan oleh perubahan beban yang terpasang(Monica Putri et al., 2020). Transformator-2 Gardu Induk Seberang Barito merupakan salah satu bagian penting dari jaringan transmisi listrik di Kota Banjarmasin. Kondisi beban pada Transformator-2 Gardu Induk Seberang Barito dari tahun 2021 sampai dengan tahun 2023 mengalami kenaikan pembebanan. Semakin besar pembebanan pada transformator maka semakin besar pula temperatur pada transformator sehingga mengakibatkan nilai penuaan thermal relatif pada transformator semakin besar. Hal tersebut mempengaruhi sisa umur pada transformator di mana pada peristiwa semakin tinggi pembebanan dan suhu membuat umur tranformator menjadi semakin berkurang(Mahendra, 2022). Perlunya menjaga keandalan tranformator salah satunya adalah dengan menjaga kualitas isolasi transformator. Metode untuk menjaga kualitas isolasi ini salah satunya adalah dengan melakukan pemeliharaan pada isolasi yaitu diantaranya dilakukan pengujian tahanan isolasi, pengujian tan delta, pengujian tegangan tembus minyak, pengujian DGA (Dissolved Gas Analysis) dan indeks polaritas. Beberapa penelitian menyatakan bahwa pengujian tan delta dianggap sebagai salah satu metode yang efektif untuk mendeteksi kualitas isolasi pada transformator, terutama karena kemampuannya untuk mengukur kerugian dielektrik dan mendeteksi degradasi isolasi akibat faktor seperti penuaan, kontaminasi, atau kelembapan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Febrijanto & Hidayat, 2022) yang menyatakan bahwa Pengujian tan delta ini berguna untuk mengetahui kualitas isolasi pada transformator arus. Bahan isolasi yang terkontaminasi dapat menyebabkan sudut arus yang mendahului tegangan akan bergeser kurang dari 90º. Hal ini dapat juga diakibatkan oleh kelembaban yang terlalu tinggi pada transformator. Selisih pergeseran sudut dari 90º menunjukkan tingkat kontaminasi pada material isolasi. Nilai tan delta yang besar menandakan penurunan kualitas insulasi pada sebuah transformator. Penelitian lain dilakukan oleh (Ababil, 2023) yang menyatakan pada hasil penelitiannya bahwa penurunan kualitas isolasi bisa terjadi karena adanya kontaminasi yang terjadi pada hasil

pengujian tangen delta, oleh karena itu menyebabkan arus bocor pada isolasi transformator, maka perlu adanya tindak lanjut agar tidak terjadi pemburukan yang lebih besar pada transformator. Namun dari segi langkah pengujian dan parameter pengujian serta subjek atau titik pengujian, tangen delta merupakan pengujian yang sangat efektif dalam mendeteksi penurunan kualitas tahanan isolasi pada transformator. Dikarenakan metode ini dilakukan dengan dua parameter dan dua subjek penelitian sehingga pengujian ini dilakukan lebih mendalam pada bagian transformator jika dibandingkan dengan pengujian-pengujian lainnya, sehingga keakuratan kondisi tahanan isolasi bisa dilihat pada hasil pengujian tangen delta.

Penelitian yang lain oleh (Robbani et al., 2020) dalam penelitiannya menyatakan bahwa kualitas pada isolasi menjadi buruk setelah digunakan dalam jangka waktu yang cukup lama. Memburuknya kualitas isolasi bisa ditentukan dari nilai tangen delta yang besar dan nilai tahanan isolasi yang semakin kecil. Penelitian oleh (Ondrialdi et al., 2020), menyatakan bahwa pemburukan atau kegagalan isolasi dapat menyebabkan kegagalan operasi atau bahkan kerusakan transformator. Salah satu metode untuk mengetahui kondisi isolasi adalah dengan melakukan pengujian *power factor* dan *dissipation factor* isolasi. Menurut (Almanda & Ardiansyah, 2022) dalam penelitiannya yang berjudul "Analisis Pengujian Tangen Delta pada Bushing Trafo 150/20 KV 60 MVA di Gardu Induk Karet Lama" mengungkapkan bahwa pemburukan kondisi bushing dapat dilihat melalui hasil pengujian tangen delta yang lebih dari 1%, hal itu disebabkan oleh usia operasi dan kondisi isolasi itu sendiri karena seiring dengan bertambahnya usia operasi trafo, kondisi isolasi mengalami penurunan.

Penelitian lain oleh (K.A.Kulkarni, 2020) menyimpulkan bahwa pentingnya pengukuran faktor disipasi (tan delta) sebagai alat diagnostik untuk mencegah kerusakan transformator yang dapat menyebabkan kerugian besar. Penelitian yang serupa juga dipaparkan oleh (Morsalin et al., 2019) bahwa pengukuran tan δ adalah metode diagnostik yang penting, baik dari aspek eksperimental maupun fisik, pengukuran *dissipation factor* mencakup berbagai frekuensi untuk memberikan

gambaran menyeluruh tentang kondisi dielektrik, menjadikannya alat yang potensial untuk asesmen isolasi.

Menurut (Florkowski et al., 2024) dalam penelitiannya, pengujian tan delta merupakan metode efektif untuk mengetahui kondisi isolasi transformator karena pengukuran faktor disipasi pada peralatan listrik bertegangan menengah dan tinggi menjadi indikator utama diagnostik dan prognostik, khususnya dalam mengevaluasi pengaruh harmonisa tegangan terhadap kehilangan dielektrik serta risiko kerusakan isolasi dalam jangka panjang.

Mengingat peran penting transformator ini, evaluasi kondisi isolasi melalui pengujian Tan Delta menjadi sangat relevan dan diperlukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi isolasi transformator melalui pengujian Tan Delta pada Trafo 2 di Gardu Induk Seberang Barito. Dengan adanya evaluasi ini, diharapkan dapat meningkatkan keandalan transformator dan mencegah terjadinya gangguan yang dapat berdampak pada suplai listrik di wilayah tersebut. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengetahuan praktis mengenai metode pengujian dan pemeliharaan transformator, yang dapat diaplikasikan pada fasilitas serupa di tempat lain. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bermanfaat bagi PT PLN (Persero) tetapi juga bagi industri tenaga listrik secara umum.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, rumusan masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mode pengujian tan delta yang digunakan untuk mengetahui kualitas isolasi Trafo 2 150/20kV 20MVA Gardu Induk Seberang Barito?
2. Bagaimana hasil evaluasi nilai tan delta pada Trafo 2 150/20kV 20MVA Gardu Induk Seberang Barito?

1.3 Maksud dan Tujuan

Adapun maksud dan tujuan dilakukan penelitian ini mengacu pada rumusan masalah yang telah dijabarkan sebagai berikut :

1. Menganalisa mode pengujian yang digunakan dalam pengujian Tan Delta pada transformator Trafo 2 150/20kV 20MVA di Gardu Induk Seberang Barito.
2. Mengidentifikasi hasil evaluasi pengujian Tan Delta pada transformator Trafo 2 150/20kV 20MVA berdasarkan standar yang berlaku.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah ini disusun untuk membatasi lingkup permasalahan dari topik yang dimuat agar tidak terjadi perluasan dalam pembahasan. Oleh karena itu pembahasan pada laporan tugas akhir ini dibatasi dengan:

1. Fokus penelitian ini hanya terbatas pada Trafo-2 dengan spesifikasi 150/20kV dan kapasitas 20MVA di Gardu Induk Seberang Barito.
2. Pengujian yang dilakukan hanya menggunakan metode Tan Delta untuk mengevaluasi kondisi isolasi transformator.
3. Data yang dianalisis adalah data hasil pengujian Tan Delta yang dilakukan pada dua periode pemeliharaan yaitu tahun 2021 dan 2023.
4. Rekomendasi pemeliharaan yang diberikan berdasarkan hasil pengujian Tan Delta, tanpa melakukan pengujian atau analisis tambahan lainnya.
5. Penelitian ini tidak mencakup evaluasi aspek-aspek lain dari transformator, seperti kondisi mekanis atau termal.

1.5 Sistematika Penulisan

Pada bagian ini dijelaskan susunan penulisan setiap bab dan sistematika penulisan yang dilakukan. Secara garis besar sistematika penyusunan laporan kerja praktik ini terdiri dari 5 bab diantaranya sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta manfaat dari penelitian. Pada bab ini juga akan dijelaskan gambaran umum tentang pentingnya transformator dalam sistem kelistrikan, serta urgensi pengujian Tan Delta untuk memastikan keandalan transformator.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Membahas mengenai pengertian Tan Delta, transformator daya secara umum, sejarah Tan Delta, Pengujian Tan Delta, alat uji CPC 100 TD1, serta studi terdahulu yang terkait dengan kondisi isolasi transformator dan faktor-faktor yang mempengaruhinya.

BAB III: METODE PELAKSANAAN

Pada bab ini diuraikan mengenai metode yang digunakan dalam penelitian, mencakup perencanaan dan persiapan, pengumpulan data, dan metode analisis data. Selain itu, alat uji yang digunakan, seperti Omicron CPC 100, serta prosedur pengujian Tan Delta juga akan dijelaskan secara teknis di bab ini.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan menjelaskan tentang data teknis transformator, data hasil pengujian akan dianalisis untuk mengevaluasi kondisi isolasi transformator, dan akan dilakukan pembahasan terhadap hasil tersebut dengan hasil perhitungan manual menggunakan parameter dari standar IEC 60137.

BAB V: PENUTUP

Pada bab ini akan memaparkan kesimpulan hasil analisa pengujian Tan Delta pada Transformator 20MVA dan saran yang membangun terkait laporan yang telah disusun.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian sebelumnya mengenai evaluasi kondisi isolasi transformator melalui pengujian Tan Delta pada Trafo-2 150/20kV 20MVA di GI Seberang Barito telah dilakukan oleh berbagai peneliti, antara lain:

1. Evaluasi Kualitas Isolasi Bushing pada Transformator Daya di Gardu Induk Karet Lama

Transformator daya merupakan komponen penting dalam sistem distribusi listrik, di mana bushing berperan sebagai penghubung antara belitan transformator dengan jaringan eksternal. Kualitas isolasi bushing sangat menentukan keandalan operasional transformator. Penurunan kualitas isolasi bushing dapat menyebabkan gangguan operasional, yang berpotensi menimbulkan kerusakan serius pada transformator itu sendiri. Pengujian kondisi bushing dilakukan dengan metode tangen delta, yang digunakan untuk mengukur kondisi isolasi pada bagian C1, yaitu isolasi antara konduktor dengan center tap. Hasil pengujian ini sangat penting untuk menentukan apakah bushing masih layak digunakan atau memerlukan penggantian.

Dalam kasus di Gardu Induk Karet Lama, nilai tangen delta yang diukur pada bushing transformator fase S mencapai 1,32%, yang melebihi batas standar yang ditetapkan oleh SKDIR520 PT PLN (IEC 60137 – DF tan δ), yaitu 1%. Hasil ini menunjukkan bahwa bushing berada dalam kondisi yang buruk dan tidak layak untuk terus dioperasikan. Sebagai langkah tindak lanjut, dilakukan penggantian bushing, dan setelah penggantian, nilai tangen delta turun menjadi 0,29%, menunjukkan bahwa bushing baru dalam kondisi baik dan siap dioperasikan kembali. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan dan pemeliharaan rutin

terhadap bushing untuk mencegah kerusakan yang lebih serius pada transformator dan menjaga keandalan sistem distribusi listrik (Almanda & Ardiansyah, 2022).

2. Analisis Kualitas Isolasi Transformator dengan Pengukuran Tangen Delta

Kualitas isolasi pada transformator listrik merupakan faktor krusial yang menentukan umur dan keandalan operasional perangkat tersebut. Pengukuran tangen delta digunakan sebagai indikator utama untuk menilai kondisi isolasi transformator. Dalam penelitian ini, pendekatan kuantitatif diterapkan untuk menganalisis perubahan nilai tangen delta pada transformator selama tiga fase pemeliharaan dari tahun 2021 hingga 2023. Data menunjukkan bahwa nilai tangen delta mengalami peningkatan dari 0,13%-0,12% pada tahun 2021 menjadi 0,20%-0,15% pada tahun 2023. Meskipun terjadi peningkatan, nilai tangen delta masih berada di bawah batas standar 1%, yang berarti transformator masih dalam kondisi layak untuk dioperasikan.

Peningkatan nilai tangen delta ini menunjukkan adanya penurunan kualitas isolasi, meskipun masih dalam batas yang dapat diterima. Hal ini menggarisbawahi pentingnya pemantauan intensif dan perawatan yang lebih hati-hati untuk mencegah penurunan lebih lanjut dalam kualitas isolasi yang dapat mempengaruhi kinerja transformator di masa mendatang. Dengan mempertahankan prosedur pemeliharaan yang tepat, diharapkan nilai tangen delta dapat dikendalikan sehingga transformator tetap beroperasi dengan optimal dan memiliki umur panjang. Penelitian ini juga memberikan panduan bagi operator dalam mengelola transformator listrik dengan lebih baik, terutama dalam hal evaluasi dan pengambilan keputusan terkait pemeliharaan (Maulana et al., 2023).

3. Pengujian Tan Delta pada Transformator Arus di Gardu Induk Tasikmalaya

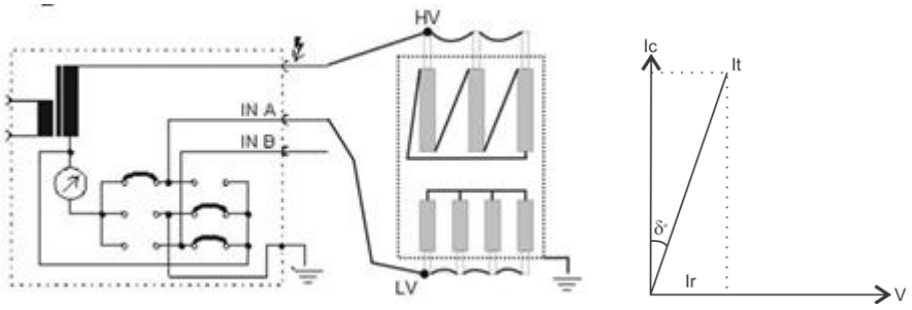
Transformator arus merupakan komponen penting dalam sistem proteksi gardu induk, di mana alat ini berfungsi untuk mengubah arus tinggi menjadi arus yang lebih kecil untuk keperluan pengukuran dan pemicuan sistem pengamanan. Kualitas isolasi pada transformator arus sangat mempengaruhi akurasi pengukuran

dan keandalan sistem proteksi. Untuk memastikan bahwa transformator arus beroperasi dengan baik, dilakukan pengujian tan delta menggunakan metode GST-Ground. Penelitian ini dilakukan di Gardu Induk Tasikmalaya dengan menggunakan alat Magger Delta 4110 untuk mengukur nilai tan delta pada transformator arus fase R, S, dan T.

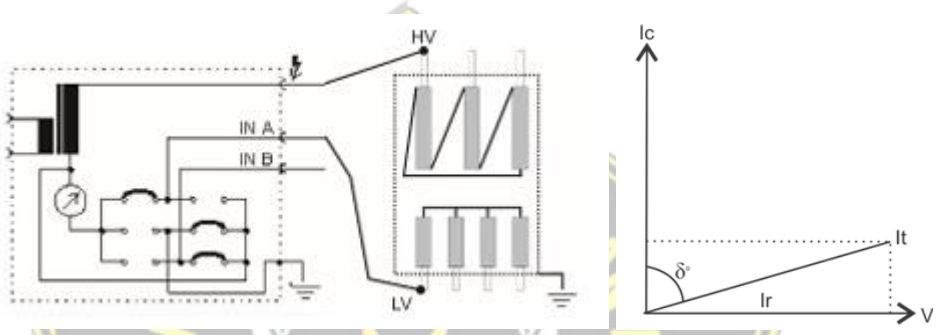
Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tan delta untuk fase R, S, dan T masing-masing adalah 0,42%, 0,47%, dan 0,45%, sementara perhitungan mandiri menunjukkan nilai sebesar 0,29%, 0,28%, dan 0,31%. Kedua hasil ini konsisten menunjukkan bahwa transformator arus masih berada dalam kondisi baik, karena nilai tan delta berada di bawah standar 1%. Meskipun ada perbedaan kecil antara hasil pengujian dan perhitungan mandiri, transformator arus tetap dianggap layak untuk dioperasikan. Temuan ini menegaskan pentingnya pengujian rutin untuk menjaga kualitas isolasi dan memastikan bahwa transformator arus tetap berfungsi dengan baik, guna menjaga keandalan sistem proteksi di gardu induk (Febrijanto & Hidayat, 2022).

4. Analisis Perbandingan Pengukuran Dissipation Factor pada Transformator dengan Variasi Penggunaan Jumper

Pengukuran *Dissipation Factor* (Tan δ) adalah salah satu metode yang digunakan untuk menilai kondisi isolasi transformator. Metode ini penting untuk memastikan bahwa isolasi tetap dalam kondisi baik sehingga transformator dapat beroperasi dengan aman dan efisien. Namun, dalam praktiknya, terdapat variasi dalam prosedur pengukuran yang dapat mempengaruhi hasil akhir. Penelitian ini membandingkan dua prosedur pengukuran Tan δ, yaitu dengan dan tanpa penggunaan jumper, untuk mengevaluasi dampaknya terhadap akurasi data yang diperoleh. Pengukuran dengan jumper dimaksudkan untuk pemerataan aliran arus, sementara pengukuran tanpa jumper berasumsi bahwa belitan sudah terhubung secara internal.



Gambar 2. 1 Dengan *Jumper*



Gambar 2. 2 Tanpa *Jumper*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan jumper menghasilkan nilai *dissipation factor* sebesar 0,5%, yang mencerminkan kondisi isolasi yang baik dan valid. Sebaliknya, pengukuran tanpa jumper menghasilkan nilai yang jauh lebih tinggi, yaitu 30%, yang disebabkan oleh tambahan *dielectric losses* dan sifat resistif arus dalam rangkaian tanpa jumper. Nilai yang tinggi ini menandakan bahwa pengukuran tanpa jumper cenderung menghasilkan data yang tidak valid dan dapat menyesatkan dalam penilaian kondisi isolasi. Oleh karena itu, penelitian ini menegaskan pentingnya mengikuti prosedur pengukuran yang tepat untuk mendapatkan hasil yang akurat dan andal dalam evaluasi kondisi isolasi transformator, guna mencegah kegagalan operasional yang tidak diinginkan (Abidin, 2019).

2.2. Transformator Tenaga

Gambar 2. 3 Transformator-2 150/20kV 20MVA

Sumber : Gardu Induk Seberang Barito

Transfomator adalah perangkat listrik statis yang terdiri dari belitan, atau dua atau lebih belitan kopel, dengan atau tanpa inti magnet, untuk memasang kopel timbal balik antara sirkuit listrik. Transformator banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mentransfer daya dengan induksi elektromagnetik antara sirkuit pada frekuensi yang sama, biasanya dengan nilai tegangan dan arus yang berubah (IEEE *Power and Energy Society*, 2013).

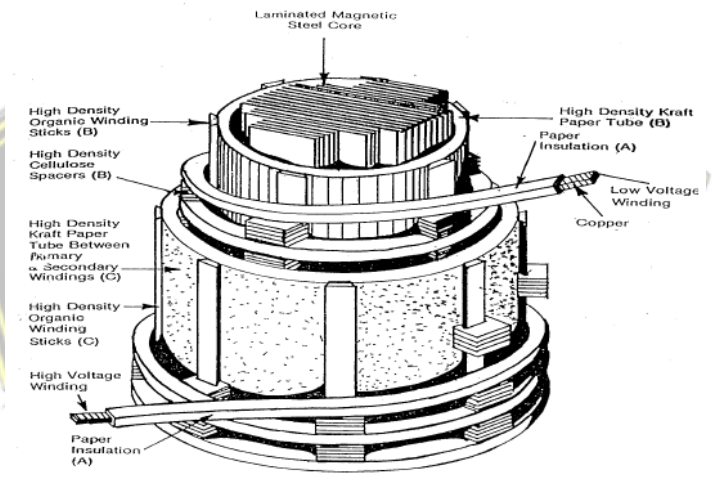
ANSI/IEEE mendefinisikan transformator sebagai perangkat listrik statis, tidak melibatkan bagian yang bergerak terus menerus, digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mentransfer daya antar sirkuit melalui penggunaan induksi elektromagnetik (Harlow, 2004).

Pada transformator menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum lorentz dan hukum faraday. Medan magnet dapat dibangkitkan oleh perubahan nilai arus atau medan listrik. Perubahan medan magnet/fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi. Komponen utama transformator tenaga terdiri dari beberapa bagian diantaranya inti besi, kumparan atau belitan, bushing, minyak

transformator, tangki konservator, *tap changer*, pendingin, dan peralatan bantu transformator lainnya.

2.3. Karakteristik Transformator

Transformator tenaga terdiri dari komponen dua komponen penyusun, yakni material magnetik, yang terdiri dari belitan (*winding*) dan inti (*core*), dan material dielektrik, yang menyusun sistem isolasi transformator, diantaranya yaitu isolasi cair (minyak transformator dan *silicon*) dan isolasi padat (kertas *kraft*, *pressboard*, kayu, dan produk selulosa lainnya) (Pramana et al., 2012).



Gambar 2. 4 Isolasi pada kumparan dan inti trafo

Sumber : (Pramana et al., 2012)

Variasi jarak konduktor dengan konduktor mempengaruhi nilai kapasitansi dari transformator. Perubahan geometris atau pergeseran letak posisi (deformasi) disebabkan oleh adanya pergeseran kumparan yang juga dapat mempengaruhi nilai kapasitansi. Sehingga dapat dilakukan deteksi awal mengenai adanya perubahan kondisi mekanis pada transformator dari perbedaan nilai parameter RLC (Fathoni & Irianto, 2017). Transformator merupakan sebuah alat sederhana yang terbuat dari dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan adalah sebuah gulungan kawat berisolator untuk dialiri arus listrik atau suatu

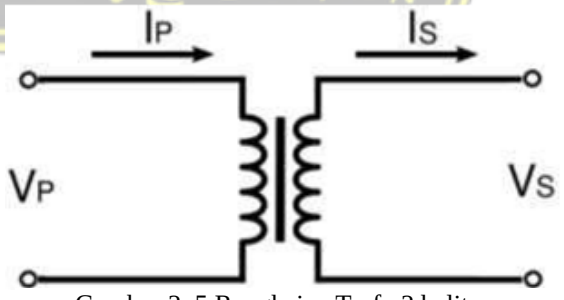
gulungan kawat di atas suatu inti. Kumparan yang langsung dihubungkan dengan sumber tegangan dinamakan kumparan primer. Dengan kata lain, kumparan primer adalah kumparan yang menyalurkan daya masukan, sedangkan kumparan sebelahnya yang dihungkan oleh inti besi dinamakan kumparan sekunder.

2.3.1. Konstruksi Belitan Trafo Tenaga 150/20 kV 20 MVA

Jumlah lilitan yang dimiliki kumparan sangat mempengaruhi tegangan yang akan dihasilkan, misalkan sebuah trafo yang terdiri dari 250 lilitan primer dan 500 lilitan sekunder, tegangan masukan sebesar 12 volt. Dalam hal ini, faktor daya (P) dalam transformator (Saminan, 2018). Sehingga hubungan antara jumlah lilitan dan lilitan sekunder, kuat arus primer dan sekunder serta tegangan primer dan sekunder dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \qquad (2.0)$$

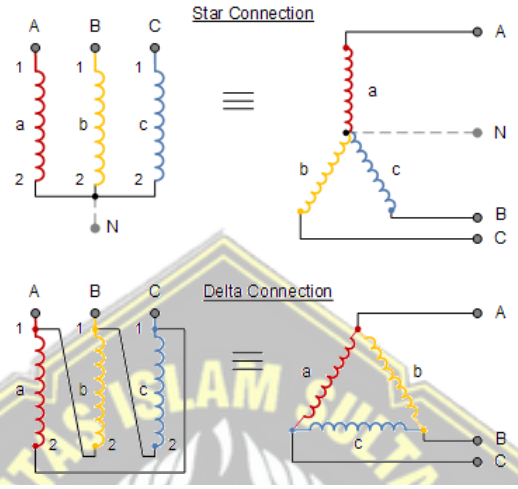
Keterangan:
Vp : Tegangan primer (tegangan masukan) dengan satuan volt (V)
Vs : Tegangan sekunder (tegangan keluaran) dengan satuan volt (V)
Np : Jumlah lilitan primer
Ns : Jumlah lilitan sekunder
Ip : Kuat arus primer (kuat arus masukan) dengan satuan ampere (A)
Is : Kuat arus sekunder (kuat arus keluaran) dengan satuan ampere (A)



Gambar 2. 5 Rangkaian Trafo 2 belitan

Trafo adalah mesin listrik statis yang mengkonversi besaran arus dan besaran tegangan dengan prinsip induksi. Umumnya trafo di PLN didesain memiliki dua belitan, yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Dua jenis

belitan ini digunakan untuk mengkonversi kedua besaran tersebut. Pembagian kedua jenis belitan ini didasarkan pada belitan mana yang paling pertama mendapatkan imbas besaran listrik.



Gambar 2. 6 Contoh rangkaian Star-netral dan Delta

Belitan primer disebut sebagai belitan yang pertama sekali terkena imbas besaran listrik. Belitan sekunder disebut sebagai belitan yang terinduktansi oleh besaran listrik dari belitan primer. Pada trafo 150/20 kV 20 MVA, belitan primer berada pada sisi 150 kV dan belitan sekunder pada sisi 20 kV. Sedangkan 20 MVA menyatakan kapasitas maksimum trafo. Adapun vektor group untuk trafo 150/20 kV 20 MVA yang terdiri dua belitan adalah YNyn0. Dimana gambar berbentuk Y seperti pada gambar 2.6, biasa disebut dengan *Star*, dan yang membentuk segitiga biasa disebut delta.

2.3.2. Karakteristik Dielektrik (Isolasi)

Dielektrik (isolasi) untuk peralatan listrik digunakan untuk berbagai macam aplikasi. Hal ini dinyatakan untuk berbagai kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, bahan kimia, kontaminan lain, dan paparan cuaca. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi masa pakai insulasi adalah degradasi. Selain itu, umur bahan isolasi tergantung pada tingkat pembebanan, jenis layanan yang digunakan pada peralatan, perawatan yang diterimanya selama pemasangan dan pengoperasian, getaran mekanis, dan gaya. Sifat bahan isolasi

yang diperlukan adalah ketahanan terhadap kelembaban, kontaminasi, tegangan, dan kontaminan lainnya.

Power Factor insulasi didefinisikan sebagai rasio kehilangan daya (*watt losses*) terhadap total pengisian volt-ampere, atau kosinus sudut θ antara total vector arus (It) dan vector tegangan. *Dissipation Factor* didefinisikan sebagai rasio kehilangan daya (*watt loss*) terhadapa total pengisian ampere atau tangen sudut δ antara total arus vector dan arus kapasitif vector.

2.4. *Capacitance* (Kapasitansi)

a. *Capacitor* (Kapasitor)

Sebuah kapasitor terdiri atas dua keping konduktor bermuatan sama besar dan tak sejenis, yang ruang di antaranya diisi oleh dielektrik (penyekat), seperti kertas atau udara. Satuan Internasional dari kapasitansi adalah Farad (F). Kapasitor adalah tempat penyimpanan energi yang dapat menyimpan energi kurang dari 10 Joule. Kapasitor digunakan karena dapat dimuat dan melepas muatannya dengan sangat cepat. Beberapa aplikasi kapasitor, diantaranya adalah *Blitz* pada kamera (Issi Anissa, 2020).

b. *Capacitance* (Kapasitansi)

Kapasitansi atau kapasitas adalah ukuran jumlah muatan listrik yang disimpan (atau dipisahkan) untuk sebuah potensial listrik yang telah ditentukan. Bentuk paling umum dari piranti penyimpanan muatan adalah sebuah kapasitor dua lempeng/pelat/keping(Gill, 2016). Jika muatan di lempeng/pelat/keping adalah +Q dan –Q, dan V adalah tegangan listrik antar lempeng, maka rumus kapasitans adalah:

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (2.1)$$

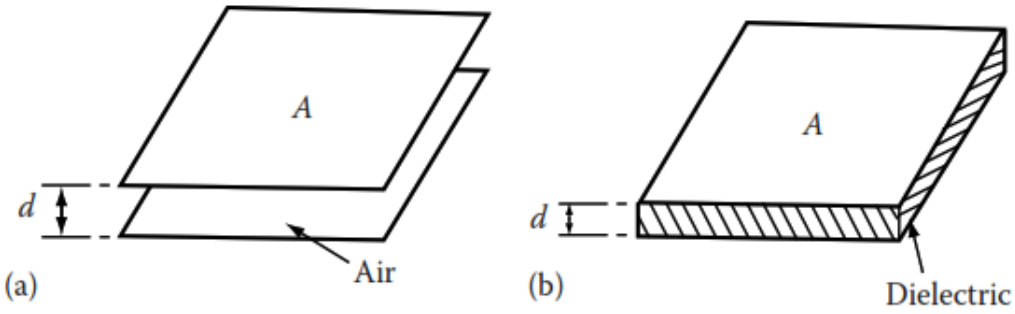
dimana:

C adalah kapasitansi dalam farad (F),

Q adalah muatan dalam coulomb (C),

V adalah tegangan dalam volt (V).

Satuan kapasitansi adalah farad (F), dinamai Michael Faraday. Farad setara dengan satu coulomb per volt. Karena ukuran farad yang besar, kapasitor biasanya memiliki kapasitansi dalam *microfarad* (μF, 10^{-6} F), *nanofarad* (nF, 10^{-9} F), dan *picofarad* (pF, 10^{-12} F). Kapasitor dalam bentuk yang paling sederhana adalah kapasitor udara elektroda paralel seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7a.



Gambar 2. 7 (a) Kapasitor udara pelat paralel dan (b) Kapasitor pelat paralel dengan bahan dielektrik

Sumber: (Gill, 2016)

Kapasitansi kapasitor tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

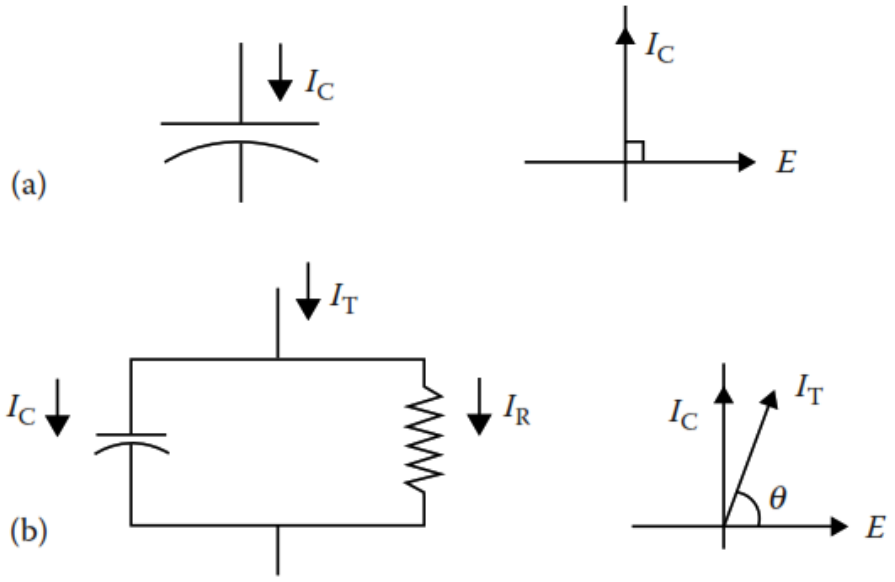
$$C = \frac{KA}{d} \qquad (2.2)$$

dimana:

K: konstanta dielektrik isolasi (udara),

A: luas permukaan elektroda (m^2),

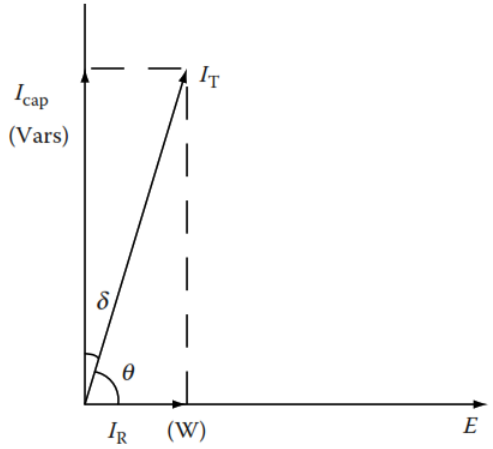
d: jarak antar elektroda (m).



Gambar 2. 8 Representasi listrik isolasi: (a) sempurna dan (b) praktis

Isolator yang sempurna dapat diwakili oleh kapasitor ideal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8a. Namun, semua isolasi peralatan listrik memiliki kerugian dan oleh karena itu isolator bukanlah kapasitor murni. Dengan Demikian, rangkaian listrik dari sebuah isolator dapat diwakili oleh kapasitor dengan resistansi kecil secara paralel, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8b (Gill, 2016).

2.5. Hubungan antara Arus, Kapasitansi, dan Faktor Disipasi



Gambar 2. 9 Hubungan vector tegangan, resistif, dan arus kapasitif (*It*, arus kapasitif; *Icap*, arus kapasitif; *Ir*, arus resistif; *θ*, sudut PF; dan *δ*, sudut disipasi)

Sumber : (Gill, 2016)

Pengujian *power factor/dissipation factor* mengukur kapasitansi isolasi, rugi-rugi dielektrik AC, dan rasio jumlah yang diukur. Ketika insulasi diberi energi dengan tegangan AC, insulasi menarik arus pengisian. Arus pengisian ini terdiri dari dua komponen yang disebut arus kapasitif dan arus resistif. Arus kapasitif mengarahkan tegangan uji yang diterapkan 90°, sedangkan arus resistif sefase dengan tegangan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9. Arus kapasitif berbanding lurus dengan konstanta dielektrik, luas area, dan tegangan serta berbanding terbalik dengan ketebalan insulasi yang diuji.

$$I^2 = \sqrt{Ir^2 + Ic^2} \qquad (2.3)$$

Ic: Arus kapasitif

I: Arus yang terukur pada bahan isolasi

Ir: Arus resistif

V: Tegangan pada bahan isolasi

Sudut θ: Sudut yang terbentuk antara arus yang terukur pada isolasi dan tegangannya

Sudut δ: (90 - θ)

Delta adalah sudut rugi – rugi yang dibentuk ketika sebuah arus yang terukur dari isolasi yang tidak ideal atau kurang dari sudut 90^o (90 - θ). Semakin tinggi nilai kapasitasnya maka semakin baik kualitas sistem insulasi tersebut. Dengan pengertian tersebut, dapat diartikan bahwa pengujian tan delta (δ) pada trafo adalah sebuah metode pengukuran yang digunakan untuk mengukur rugi – rugi daya yang mengalir pada bahan isolasi trafo. Data yang diperoleh pada saat pengujian tangen delta adalah nilai faktor disipasi dan nilai *watt loss* atau rugi-rugi daya.

Hubungan antara arus, kapasitansi, dan faktor disipasi ditampilkan dalam persamaan berikut:

$$Dissipation\ factor\ Cot\ \theta\ = Tan\ \delta\ = \frac{I_R}{I_C} \quad (2.4)$$

$$Power\ Factor = Cos\ \theta\ = Sin\ \delta\ = \frac{I_R}{I_T} \quad (2.5)$$

Tan delta dapat dinyatakan dalam bentuk:

- Absolut
- Persentase

Perbedaannya adalah persentase merupakan nilai absolut yang dikalikan 100. Hal ini karena nilai *dissipation factor* (Tan Delta) ini memiliki sudut yang sangat kecil (kurang dari 1°) sehingga untuk memudahkan pada pembacaan yang terukur pada alat uji berupa nilai dalam bentuk persen (%).

2.6. *Dissipation Factor Test* (Pengujian Tan Delta)

Pada kapasitor yang ideal tanpa rugi-rugi dielektrik, arus insulasi tepat mengarah 90° sesuai dengan tegangan yang diberikan (Omicron Electronics Corp., 2007). Untuk insulasi nyata dengan rugi-rugi dielektrik, sudut ini kurang dari 90°.

Sudut δ = 90° - θ disebut sudut rugi-rugi. Dalam diagram isolasi yang disederhanakan, Cp mewakili kapasitansi bebas rugi-rugi dan Rp rugi-rugi. Rugi-rugi juga dapat diwakili oleh diagram rangkaian ekivalen serial dengan Cs dan Rs.

Seperti pada gambar 2.11, arus total Is adalah jumlah vektor dari komponen reaktif Ic, yang mendahului (*lead*) Es sebesar 90°, dan komponen konduktif I_R yang sefase dengan Es. Sudut fase 0, dalam kasus dielektrik yang tidak sempurna, kurang dari 90° dengan jumlah yang sama dengan δ, sudut deviasi fase. Faktor disipasi didefinisikan sebagai garis singgung sudut deviasi fase sehingga,

$$Faktor\ Disipasi = Tan\ \delta = \frac{I_R}{I_C}, \tag{2.6}$$

Untuk mengetahui I_R dan I_C dengan persamaan berikut:

$$I_R = \frac{P_{drop}}{V} \tag{2.7}$$

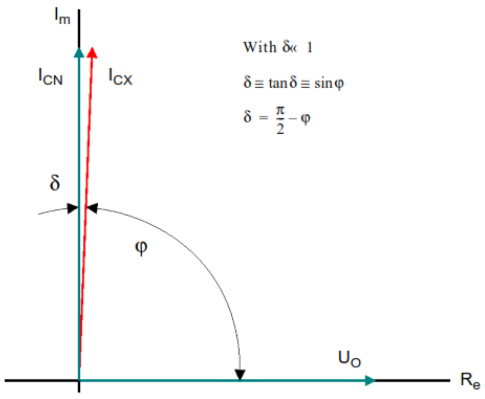
$$I_C = V \cdot \omega \cdot C \tag{2.8}$$

Persamaan 2.7 dan 2.8 disubstitusi ke persamaan 2.6 menjadi,

$$Tan\ \delta = \frac{\frac{P_{drop}}{V}}{V \cdot \omega \cdot C} = \frac{P_{drop}}{V^2 \cdot \omega \cdot C} \tag{2.9}$$

yang merupakan rasio komponen resistif arus terhadap komponen kapasitif. Untuk dielektrik dengan rugi-rugi rendah, resistivitas a-c tinggi, dan akibatnya $I_R << IC$, sehingga Tan δ kecil. Akan tetapi, resistivitas a-c dari banyak bahan sedemikian rupa sehingga disipasi daya menjadi signifikan, dan sering kali bertindak sebagai faktor pembatas dalam desain, khususnya pada frekuensi yang lebih tinggi (Hopkins, 1958).

Korelasi antara Faktor Disipasi dan Faktor Daya (PF = cos θ) dan diagram vektor ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 10 Korelasi antara DF dan PF

Grafik tersebut menunjukkan hubungan vektor antara arus total (Im), komponen kapasitif (Icx), dan komponen resistif (Icn) dalam analisis tan delta, yang merepresentasikan faktor disipasi (*Dissipation Factor,* DF) dan faktor daya (*Power Factor*, PF).

2.7. Standar Tan Delta

Standar Tan Delta yang digunakan dalam pengujian transformator merujuk pada pedoman teknis dan prosedur yang dijelaskan dalam beberapa standar internasional dan nasional berikut ini:

(1) *IEEE Std C57.12.90™-2015, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*.

Standar yang disusun oleh *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Standar ini memberikan pedoman teknis untuk pengujian transformator distribusi, daya, dan pengatur tegangan yang menggunakan cairan sebagai media isolasi dan pendingin. Dokumen Standar IEEE (standar, praktik yang direkomendasikan, dan panduan), baik penggunaan penuh maupun penggunaan uji coba, dikembangkan di dalam *Standards Coordinating Committees of the IEEE Standards Association* (IEEE-SA). IEEE (Institut)

mengembangkan standarnya melalui proses pengembangan konsensus, yang disetujui oleh (ANSI) *American National Standards Institute* (IEEE, 2015).

IEEE C57.12.90.2015 merupakan hasil revisi atau perubahan dari standar yang sebelumnya yaitu IEEE Std. C57.12.90-2010. Standar ini digunakan oleh pabrikan, penyedia listrik, dan lembaga inspeksi sebagai acuan untuk mengembangkan, menguji, dan memelihara transformator sesuai standar industri yang aman dan andal.

Tabel 2. 1 Pengukuran yang perlu dilakukan dalam uji faktor daya (tan delta) isolasi trafo

Method I **Test Without Guard Circuit***	**Method II** **Test with Guard Circuit***
Two-winding transformers** High to low and ground Low to high and ground High and low to ground	Two-winding transformers** High to low and ground High to ground, guard on low Low to high and ground Low to ground, guard on high
Three-winding transformers** High to low, tertiary, and ground Low to high, tertiary, and ground Tertiary to high, low and ground High and low to tertiary and ground High and tertiary to low and ground Low and tertiary to high and ground High, low, and tertiary to ground	Three-winding transformers** High to low and ground, guard on tertiary High to ground, guard on low and tertiary Low to tertiary and ground, guard on high Low to ground, guard on high and tertiary Tertiary to high and ground, guard on low Tertiary to ground, guard on high and low High and low to tertiary and ground High and tertiary to low and ground

Sumber : (C57.12.90-1987, 1988)

Standar IEEE C57.12.90-2015 memberikan panduan untuk pengujian faktor daya isolasi, yang mencakup prinsip pengukuran daya yang terdisipasi dalam isolasi terhadap hasil kali tegangan efektif dan arus dalam satuan voltampere saat diuji dengan tegangan sinusoidal di bawah kondisi yang ditentukan. Metode ini berlaku untuk transformator distribusi dan daya yang direndam dalam cairan isolasi.

Sebelum pengujian, spesimen harus memenuhi beberapa persyaratan, termasuk semua lilitan harus direndam dalam cairan isolasi, semua lilitan harus dihubungkan singkat, dan semua bushing harus terpasang. Suhu rata-rata lilitan

dan cairan isolasi harus berada dalam rentang 10°C hingga 40°C, dengan preferensi mendekati 20°C. Suhu cairan pada bagian atas juga harus diukur dan dicatat.

Pengukuran faktor daya isolasi dapat dilakukan menggunakan sirkuit jembatan khusus atau metode voltampere-watt, dengan akurasi pengukuran tidak lebih dari ±0,25% dari faktor daya isolasi. Pengukuran dilakukan pada atau mendekati frekuensi 60 Hz. Tegangan yang digunakan untuk pengujian tidak boleh melebihi setengah dari nilai tegangan uji frekuensi rendah yang tercantum dalam standar IEEE C57.12.00-2015 yaitu 10.000 V. Pengujian dilakukan pada belitan ke *ground* dan antar belitan sesuai dengan ketentuan di gambar 2.13.

Catatan dalam standar ini memberikan beberapa poin penting terkait pengukuran faktor daya pada transformator yang direndam dalam cairan isolasi. Catatan (1) menyebutkan bahwa meskipun arti signifikan dari faktor daya ini masih menjadi perdebatan, pengalaman menunjukkan bahwa pengukuran faktor daya berguna untuk menilai kondisi isolasi ketika dilakukan dengan bijak. Catatan (2) menekankan bahwa dalam menafsirkan hasil uji faktor daya, nilai komparatif yang diperoleh dari pengujian berkala lebih berguna untuk mengidentifikasi potensi masalah daripada memandang faktor daya sebagai nilai absolut. Catatan (3) menjelaskan bahwa pengujian faktor daya di pabrik bermanfaat sebagai perbandingan dengan pengukuran di lapangan untuk menilai kondisi isolasi. Namun, sulit untuk menetapkan nilai standar faktor daya untuk transformator cairan isolasi karena beberapa alasan:

a) Pengalaman menunjukkan bahwa ada sedikit atau tidak ada hubungan antara faktor daya dengan kemampuan transformator untuk menahan pengujian dielektrik.
b) Faktor daya dapat sangat bervariasi tergantung pada suhu, sehingga tidak ada kurva koreksi yang bisa digunakan secara universal. Oleh karena itu, hasil pengukuran faktor daya harus disertai informasi suhu cairan bagian

atas dan bawah, jika tersedia. Koreksi suhu tidak diterapkan, tetapi pembeli dapat menggunakan hasil pengukuran faktor daya untuk memantau tren.

c) Berbagai jenis cairan dan material isolasi yang digunakan dalam transformator menghasilkan variasi besar dalam nilai faktor daya isolasi.

Catatan tambahan menjelaskan bahwa istilah "*guard*" mengacu pada satu atau lebih elemen konduktor yang digunakan untuk mengalihkan arus yang tidak diinginkan dari instrumen pengukuran, dan lilitan yang terhubung permanen seperti autotransformator dianggap sebagai satu lilitan.

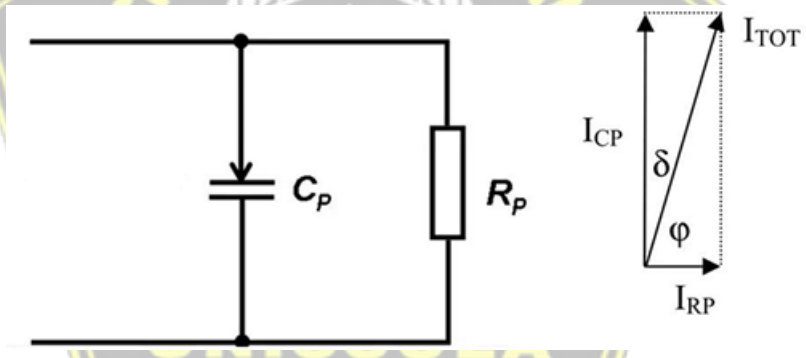
(2) CIGRE 445, *Guide for Transformer Maintenance*

Standar CIGRE 445, *Guide for Transformer Maintenance*, adalah panduan dari organisasi internasional CIGRE yang menyediakan pendekatan komprehensif untuk pemeliharaan transformator daya agar tetap andal dan aman selama operasi. Panduan ini merinci langkah-langkah pemeliharaan, mulai dari prosedur rutin hingga inspeksi berkala yang bertujuan mencegah kegagalan tak terduga serta menjaga kinerja optimal transformator. Pemeliharaan dalam CIGRE 445 dibagi menjadi beberapa kategori utama: pemeliharaan rutin yang dilakukan secara berkala, pemeliharaan korektif untuk menindaklanjuti deteksi anomali, dan pemeliharaan prediktif berbasis data yang bertujuan mencegah masalah potensial(CIGRE, 2011).

Menurut standar CIGRE 445 dijelaskan bahwa kapasitansi dan faktor disipasi (atau faktor daya) digunakan untuk mendeteksi kegagalan isolasi pada transformator, seperti perubahan geometri antara lilitan akibat arus tinggi atau kerusakan mekanis, kerusakan pada bushing kondensor, serta kontaminasi oleh partikel, air, atau cairan isolasi. Faktor ini dapat membantu mendeteksi cacat seperti kegagalan isolasi, pelepasan parsial, atau kerusakan mekanis pada sambungan bushing. Pengujian ini sering dilakukan untuk memantau kelembapan, khususnya pada bushing bertegangan tinggi.

Metode pengujian dilakukan menggunakan sumber AC tegangan tinggi (HV) sinusoidal, biasanya dengan frekuensi variabel. Objek uji disambungkan secara paralel dengan kapasitor referensi yang memiliki kerugian rendah. Arus yang mengalir melalui objek uji dan kapasitor referensi diukur, serta perbedaan waktu antara nol arus digunakan untuk menentukan sudut rugi daya (δ). Nilai DF (tanδ) dan PF (cosϕ) dihitung untuk mengetahui kondisi material isolasi, dengan rentang tipikal untuk bahan isolasi kurang dari 10%.

Di Eropa, istilah *Dissipation Factor* (DF) lebih umum digunakan, sedangkan di Amerika Utara lebih sering menggunakan istilah *Power Factor* (PF). Keduanya secara numerik setara untuk nilai-nilai kecil seperti pada pengujian isolasi. Rangkaian ekivalen yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut, dan persamaan pada 2.10.



Gambar 2. 11 Rangkaian Ekivalen Isolasi

$$DF : Tan\partial = \frac{I_{RP}}{I_{CP}} = \frac{1}{R_p \cdot \omega \cdot C_p} \quad (2.10)$$

(3) SK Dir. PLN 0520/02/2014

Nilai maksimum tangen delta yang diijinkan untuk belitan trafo dan bushing berturut-turut diperlihatkan pada tabel 2.1 dan 2.2. Di atas nilai tersebut maka trafo dinyatakan bermasalah (PT. PLN (Persero), 2014).

Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

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

Gambar 2. 12 Titik Pengujian yang disarankan

Tabel 2. 2 Standar nilai maksimum tan delta

Item	Batasan	Rekomendasi
Trafo baru	Max 0,5 %	
Trafo operasi	Max 1 %	Periksa kadar air pada minyak isolasi dan kertas isolasi

Tabel 2. 3 Standar nilai maksimum kapasitansi

Referensi	Batasan	Rekomendasi
CIGRÉ TB 445	+ 10 %	Penggantian bushing
IEEE C57.19.01	- 1 %	Penggantian bushing

2.8. Alat Uji OMICRON CPC 100

OMICRON CPC 100 adalah perangkat uji primer multifungsi yang dapat digunakan untuk menguji berbagai komponen listrik, seperti Transformator arus, Transformator tegangan, Sistem pentanahan, Saluran, Kabel, Pemutus arus, Peralatan isolasi.

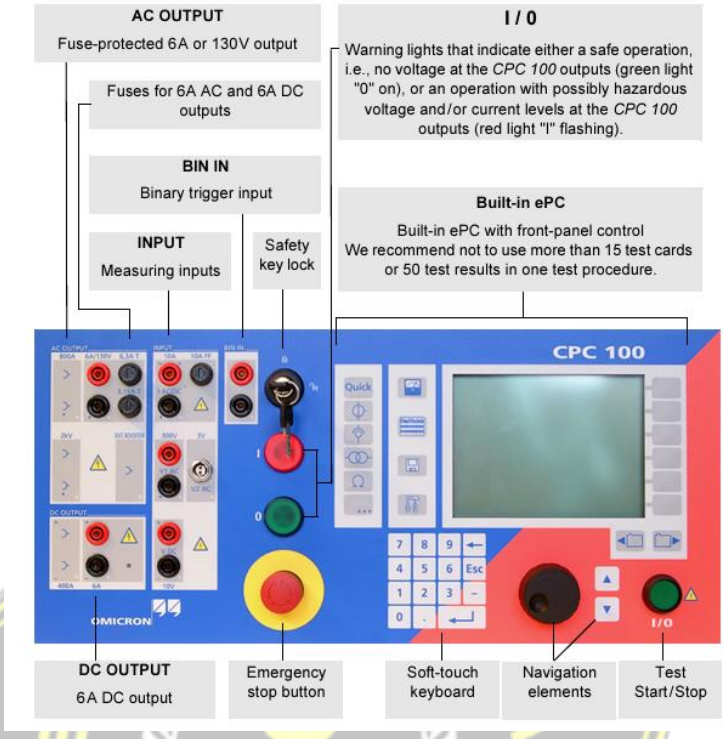
Gambar 2. 13 Alat Uji OMICRON CPC 100

Spesifikasi CPC 100 dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. 4 Spesifikasi Omicron CPC 100

Output Current AC/DC	800 A (AC) dan 400 A (DC)
Frequency Range	48–62 Hz
Input magnitude	10% of input range full scale
Output magnitude	5% of output range full scale
Phase tolerance	0.5°
Input impedance	> 100 kΩ
Response time	1 ms
Power consumption	< 3500 VA
Temperatur operasi	-10 °C to +55 °C (+14 °F to +131 °F)

Tampilan alat uji CPC100 dan fungsinya seperti terlihat pada gambar 2.14 berikut.



Gambar 2. 14 Tampak menu alat uji CPC 100

Aksesoris CPC100 diantaranya sebagai berikut:

1. Current Clamp C-Probe 1
2. Cables
3. Clamps
4. Plugs
5. *Measure cable* dan *Generator cable*
6. *Ground cable*
7. *software*

2.9. Alat Uji OMICRON CPC TD1

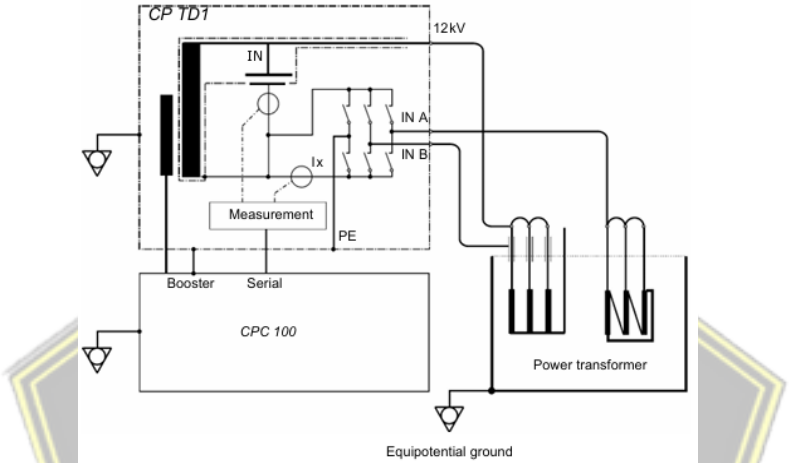
Gambar 2. 15 Alat Uji CP TD1

Omicron CP TD1 adalah alat pengujian canggih yang dirancang untuk mengukur tan δ (tangens delta), faktor daya, dan kapasitansi pada sistem isolasi transformator, kapasitor, serta peralatan listrik lainnya. Alat ini digunakan untuk mengevaluasi kondisi isolasi dan mendeteksi masalah seperti kelembapan, kontaminasi, atau degradasi isolasi. CP TD1 sering digunakan bersama dengan perangkat OMICRON CPC 100, menciptakan sistem pengujian terpadu yang mendukung pengujian tegangan tinggi dengan hasil akurat. Dengan kemampuan pengukuran yang fleksibel, alat ini dapat menguji pada berbagai tegangan hingga 12 kV dan frekuensi mulai dari 15 Hz hingga 400 Hz.

Tabel 2. 5 Aksesoris CP TD1

Accessories
1 High-voltage cable, triaxial, 20 m with cable drum
2 Low-voltage cables, coaxial, 20 m on one cable drum
2 Cables (1 × red, 1 × blue) for connecting low-voltage cable drum with *CP TD1*
2 Different high-voltage clamps
2 Low-voltage clamps (1 × red, 1 × blue)
2 Different interface cables (0.5 m/3 m) for configurations with/without trolly
2 Booster cables (0.5 m/3 m)
1 Grounding cable
1 Transport case

Gambar 2.16 menunjukkan rangkaian pengujian tan delta yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi isolasi pada transformator. Pengujian ini melibatkan perangkat utama seperti *booster* tegangan (CPC 100), kapasitor referensi (CP TD1), dan alat pengukur arus bocor. Tegangan uji sebesar 12 kV diberikan ke transformator melalui kapasitor referensi, yang membantu membandingkan nilai



Gambar 2. 16 Rangkaian Pengujian Tan Delta dengan CP TD1

arus untuk menghitung kerugian daya dalam isolasi. Arus yang mengalir melalui isolasi diukur, dan bagian arus yang menunjukkan kerugian (arus resistif) digunakan untuk menghitung nilai tan delta (tanδ). Nilai tan delta ini menunjukkan seberapa baik isolasi transformator bekerja—semakin besar nilainya, semakin buruk kondisinya. Sistem ini juga dilengkapi dengan pentanahan untuk menjaga keamanan selama pengujian dan mengurangi gangguan dari luar.

2.10. *Software* Primary Test Manager

Primary Test Manager adalah *software* yang digunakan untuk mengoleksi dan melaporkan formulir pemeliharaan dan ativitas inspeksi pada peralatan listrik. *Software* tersebut memiliki banyak *interface* untuk pengujian otomatis dari berbagai alat pengujian merk OMICRON termasuk Omicron CPC 100 dan CP TD1. *Software* Primary Test Manager dapat melakukan kontrol terhadap pengujian alat – alat Omicron.

BAB III METODE PELAKSANAAN

3.1 Model Penelitian

Model penelitian yang digunakan adalah deskriptif dengan pendekatan kuantitatif. Metode deskriptif ini digunakan untuk menggambarkan kondisi isolasi transformator secara sistematis berdasarkan data hasil pengujian tan delta. Pendekatan ini melibatkan pengumpulan data teknis dari pengujian lapangan untuk mengevaluasi fenomena yang diamati tanpa melakukan eksperimen tambahan. Penelitian kuantitatif merupakan penelitian yang didasarkan pada pengumpulan dan analisis data berbentuk angka (numerik) untuk menjelaskan, memprediksi, dan mengevaluasi fenomena tertentu. Dalam konteks penelitian ini, pendekatan kuantitatif digunakan untuk menghitung parameter-parameter teknis seperti *Watt losses* (*P*), nilai tan delta (*tanδ*), dan kapasitansi (*Cp*), serta membandingkannya dengan standar teknis internasional seperti CIGRE 445. Metode ini menekankan pada analisis data-data numerikal yang diperoleh dari pengujian untuk menentukan hubungan antara variabel-variabel teknis, seperti tegangan pengujian (*Vmeas*), arus bocor (*Imeas*), dan hasil tan delta. Dengan pendekatan kuantitatif, penelitian ini memberikan hasil yang objektif dan akurat dalam mengevaluasi kondisi isolasi transformator.

3.1.1 Lokasi Penelitian

Gambar 3. 1 Gardu Induk Seberang Barito

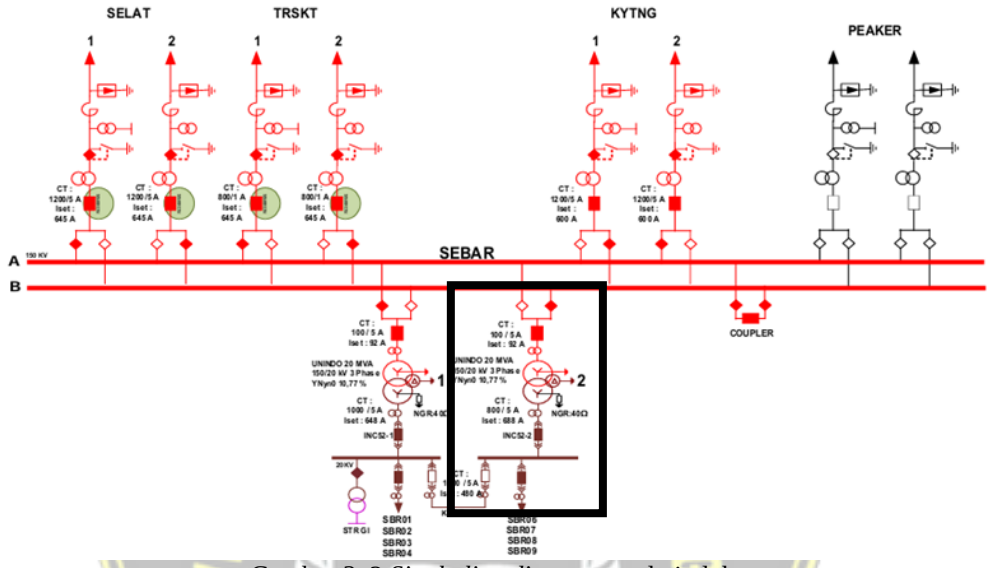
Penelitian dilakukan di Transformator 2 150/20kV 20MVA Gardu Induk Seberang Barito yang terletak di desa Jelapat I, Kec. Tamban, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan yang merupakan asset dari PT. PLN (Persero) UPT Banjarbaru ULTG Bandarmasih.

Tabel 3. 1 Data teknis transformator

Merk	: UNINDO	Manufactured	: 1990
Transformer type	: TTUB150/20000	Ambient Temp	: 40°
Frequency/Hertz	: 50	Standard	: IEC/6-1876
Installation	: Outdoor	Terminal	: A B C N
Serial Number	: A.901S8108	Connection	: Star-Star
Cooling System	: ONAN-ONAF	Tap-Changer	: On Load
Phase	: 3	Vector Group	: YNyn0

Sumber: Gardu Induk 150kV Seberang Barito

Tabel 3.1 menunjukkan data teknis dari transformator-2 150/20kV 20MVA yang dilakukan pengujian. Dengan detail lokasi sesuai *single line diagram* dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 2 *Single line diagram* gardu induk

Sumber: Gardu Induk Seberang Barito

Dari gambar 3.2 dapat diketahui bahwa Gardu Induk 150kV Seberang Barito terdiri atas dua bay trafo, tiga bay penghantar, dan satu bay coupler yang berperan penting dalam mengatur aliran energi listrik. Setiap bay memiliki fungsi spesifik yang mendukung kinerja keseluruhan gardu induk dalam mendistribusikan daya listrik dengan aman dan efisien. Pada laporan ini, pengujian difokuskan hanya pada salah satu bay, yaitu bay trafo-2, yang telah ditandai dengan kolom berwarna hitam pada gambar 3.2.

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang akan dilakukan oleh peneliti dalam mengevaluasi kondisi isolasi trafo melalui pengujian tan delta terdiri dari empat tahapan, setiap tahapan penelitian akan dilaksanakan secara berurutan. Secara rinci keempat tahapan tersebut dapat dilihat pada gambar 3.3 dan gambar 3.4.

3.2.1 Perencanaan atau Persiapan

Tahap perencanaan dan persiapan, melibatkan identifikasi objek penelitian, yaitu transformator daya yang akan diuji, serta komponen utama seperti bushing dan isolasi. Metodologi pengujian juga ditetapkan pada tahap ini, dengan fokus pada penggunaan alat uji Omicron CPC 100 dan CP TD1. Selain itu, koordinasi dengan PT. PLN (Persero) ULTG Bandarmasih dilakukan untuk memastikan akses dan ketersediaan data yang diperlukan serta untuk menjadwalkan pengujian di Gardu Induk.

3.2.2 Studi Literatur

Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai teori dan konsep terkait pengujian Tan Delta dan penerapannya pada transformator daya. Literatur ilmiah, standar internasional seperti IEC 60137, serta penelitian sebelumnya yang relevan dikaji untuk memastikan pendekatan yang tepat dalam penelitian ini. Studi literatur juga mencakup analisis kasus studi sebelumnya yang dapat memberikan wawasan tambahan dalam melakukan pengujian dan analisis data. Pengumpulan data dilakukan setelah studi literatur selesai, dengan fokus pada pengujian Tan Delta di Gardu Induk 150kV Seberang Barito menggunakan Omicron CPC 100.

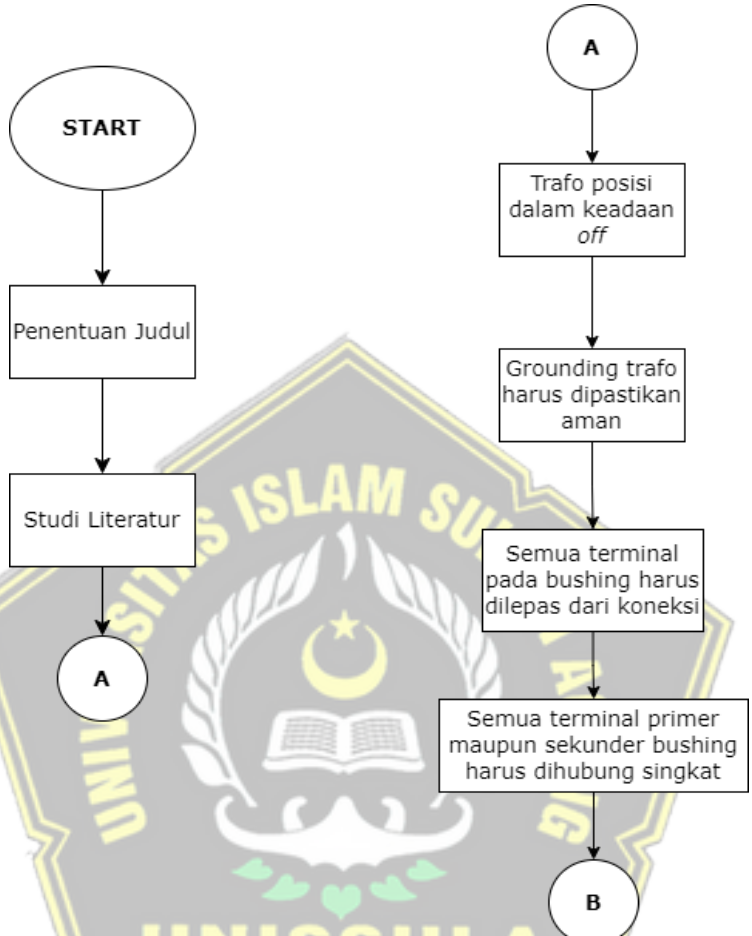
3.2.3 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan meliputi nilai faktor disipasi (Tan Delta) dan kapasitansi pada transformator daya. Hasil pengujian ini didokumentasikan secara rinci, termasuk parameter pengujian dan kondisi lingkungan saat pengujian berlangsung. Selain data primer, data sekunder seperti riwayat perawatan dan hasil pengujian sebelumnya juga dikumpulkan dari PT. PLN (Persero) ULTG Bandarmasih untuk memberikan konteks yang lebih luas dalam analisis.

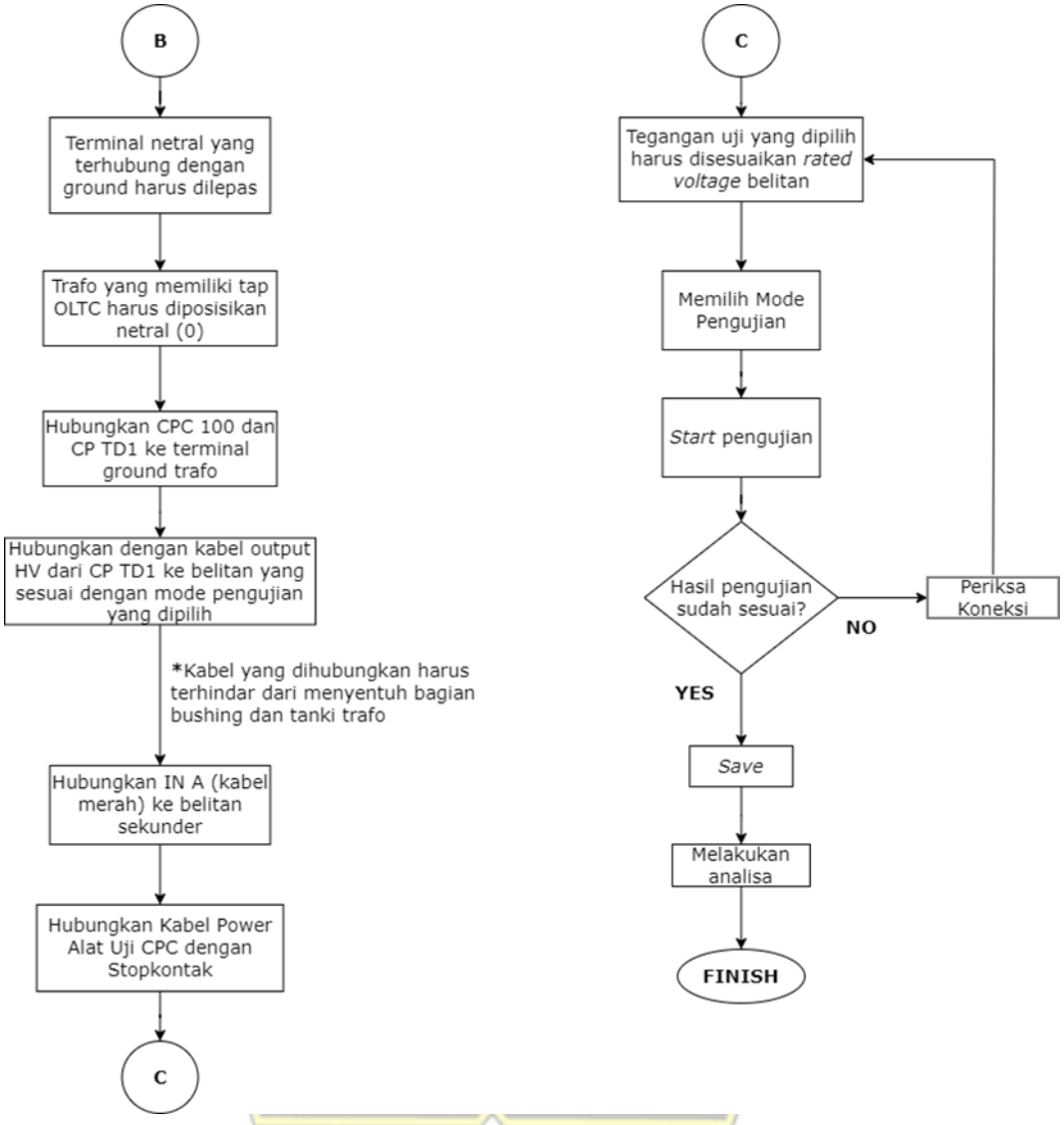
3.2.4 Analisis Data

Analisis dan evaluasi data, di mana data hasil pengujian diolah dan dianalisis untuk menilai kondisi isolasi transformator daya. Perbandingan hasil pengujian dengan standar yang berlaku dilakukan untuk menentukan apakah kondisi isolasi masih dalam batas yang diizinkan. Evaluasi lebih lanjut dilakukan untuk mengidentifikasi tren perubahan nilai Tan Delta yang dapat mengindikasikan potensi masalah isolasi di masa depan. Hasil analisis ini kemudian disusun dalam bentuk laporan yang mencakup rekomendasi terkait tindakan perawatan atau penggantian komponen yang diperlukan, dengan tujuan untuk memastikan keandalan dan keamanan operasional transformator daya di Gardu Induk 150kV Seberang Barito.

3.3 *Flowchart* Penelitian dan Pengujian



Gambar 3. 3 *Flowchart* Penelitian dan Pengujian (1)



Gambar 3. 4 *Flowchart* Penelitian dan Pengujian (2)

Flowchart yang ditampilkan menunjukkan tahapan prosedur pengujian transformator (trafo) menggunakan alat pengujian CPC 100. Prosedur ini dirancang untuk memastikan keselamatan operasional serta keakuratan data yang dihasilkan. Penjelasan detail dari setiap tahapan dijabarkan sebagai berikut:

Tahap A: Persiapan dan Pengamanan

1. Penentuan Judul: Langkah awal adalah menentukan judul pengujian dan merumuskan tujuan penelitian secara jelas.

2. Studi Literatur: Mengkaji teori dan referensi teknis yang relevan untuk memastikan prosedur pengujian yang sesuai standar.
3. Trafo dalam Keadaan *Off*: Sebelum memulai pengujian, pastikan trafo dalam kondisi tidak beroperasi (*off*) untuk menghindari risiko kecelakaan.
4. *Grounding* Trafo Dipastikan Aman: Pastikan sistem pentanahan (*grounding*) sudah aman dan berfungsi untuk mencegah bahaya listrik.
5. Pelepasan Semua Terminal Bushing: Semua terminal yang terhubung dengan bushing trafo harus dilepaskan untuk mengisolasi perangkat dari potensi gangguan.
6. Hubung Pendek Terminal Primer dan Sekunder: Hubungkan terminal bushing primer dan sekunder ke ground untuk memastikan keamanan selama pengujian.

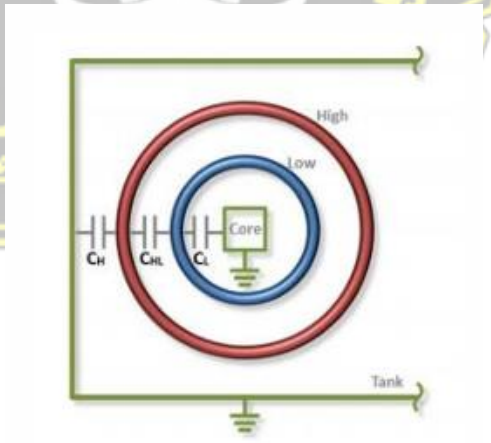
Tahap B: Pengaturan Koneksi Peralatan

1. Pelepasan Terminal Netral dari Ground: Terminal netral dilepaskan dari ground untuk mengisolasi jalur arus.
2. Trafo dengan OLTC Diposisikan Netral: Apabila trafo memiliki On-Load Tap Changer (OLTC), pastikan posisinya berada di netral (0) agar tidak mempengaruhi hasil pengujian.
3. Koneksi CPC 100 ke Ground Trafo: Hubungkan peralatan uji (CPC 100) ke terminal ground pada trafo untuk mempersiapkan pengukuran.
4. Hubungan Kabel Output HV dan CP TD1: Kabel output alat uji dihubungkan ke titik pengujian yang relevan sesuai mode pengujian yang dipilih.
5. Penempatan Aman Kabel: Pastikan kabel pengujian tidak menyentuh bagian trafo seperti bushing atau tangki untuk menghindari bahaya.
6. Hubungan Kabel Input NA ke Terminal Sekunder: Sambungkan kabel input ke terminal sekunder untuk pengujian yang melibatkan sisi sekunder.
7. Koneksi Power Alat Uji: Hubungkan sumber daya peralatan uji ke stopkontak untuk memastikan alat berfungsi dengan baik.

Tahap C: Pelaksanaan dan Analisis Pengujian

1. Penyesuaian Tegangan Uji: Sesuaikan tegangan pengujian dengan spesifikasi tegangan bushing pada trafo.
2. Pemilihan Mode Pengujian: Pilih mode pengujian yang sesuai dengan parameter yang ingin diukur (misalnya, impedansi atau resistansi).
3. Memulai Pengujian: Jalankan proses pengujian sesuai dengan prosedur yang telah ditentukan.
4. Pemeriksaan Koneksi jika Hasil Belum Memadai: Jika hasil pengujian tidak memadai, lakukan pengecekan ulang pada koneksi.
5. Menyimpan Hasil Pengujian: Setelah pengujian selesai, simpan hasilnya untuk didokumentasikan.
6. Analisis Data: Lakukan analisis terhadap hasil pengujian untuk mengevaluasi kondisi trafo, termasuk potensi kerusakan atau kebutuhan perbaikan.

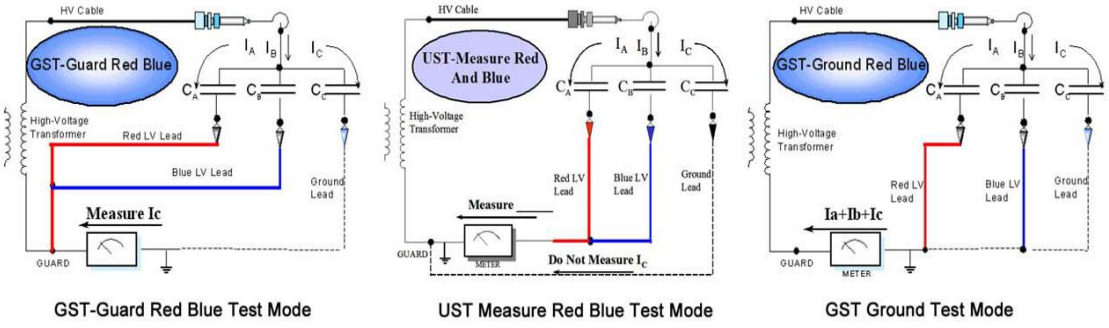
3.4 Metode Pengujian



Gambar 3. 5 Hubungan mode uji tan delta dengan trafo dua belitan

Metode penelitian yang digunakan yaitu metode pengujian tan delta sesuai dengan mode berikut:

- *Mode GST (Grounded Speciment Test)*, yakni mode pengujian tangen delta yang mana kapasitansi uji yang digunakan sebagai referensi pengukuran adalah kapasitansi obyek yang diuji terhadap ground.
- *Mode GSTg (Grounded Speciment Test Guard)*, yakni mode pengujian tangen delta yang mana kapasitansi uji yang digunakan sebagai referensi pengukuran adalah kapasitansi obyek yang diuji terhadap ground dan memblok/membatasi kapasitansi obyek lain (*guard*) yang mempengaruhi kapasitansi obyek uji.
- *Mode UST (Ungrounded Speciment Test)*, yakni mode pengujian tangen delta yang mana kapasitansi uji yang digunakan sebagai referensi pengukuran adalah kapasitansi antara dua obyek yang sama sekali tidak terhubung dengan ground.



Gambar 3. 6 Mode Pengujian

Terdapat beberapa kombinasi yang digunakan pada pengujian tan delta transformator, seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Perbandingan Mode Pengujian

	UST-A	UST-B	UST -A+B	GST	GSTg -A	GSTg -B	GSTg -A+B
Input A	X		X	X		X	
Input B		X	X	X	X		
Ground				X	X	X	X

Dari ketujuh kombinasi tersebut, yang digunakan pada pengujian tan delta transformator-2 (trafo dua belitan) adalah yang bertanda warna kuning dengan penjelasan sebagai berikut:

(a) UST-A: Hanya mengukur arus melalui Input A, tanpa melibatkan Input B atau *ground*.
(b) GST: Mengukur arus gabungan dari Input A, Input B, dan *ground*.
(c) GSTg-A+B: Mengukur arus gabungan dari Input A, Input B, dan *ground*.

UST tidak pernah mengukur arus yang mengalir melalui *ground*. Mode ini hanya fokus pada arus dari input yang tidak terhubung ke *ground*, sehingga sangat berguna untuk mengevaluasi isolasi antara komponen yang tidak terhubung ke tanah. GST, sebaliknya, selalu mengukur arus yang mengalir melalui *ground*. Mode ini mencakup semua jalur arus, termasuk yang melalui tanah, sehingga memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi isolasi sistem.

3.5 Alat dan Bahan Penelitian

Tabel 3. 3 Peralatan dan APD

No	Peralatan
1	Alat Uji Omicron CPC 100 dan CP TD1
2	Transformator Daya
3	Kabel Roll
4	Tool set
5	Kabel jumper

No	Alat Pelindung Diri
1	Wearpack
2	Safety Shoes
3	Helmet Safety
4	Body harness

Tabel 3. 4 Aksesoris kabel dan klem

Cables and Clamps Accessories
1 High-voltage cable, triaxial, 20 m with cable drum
2 Low-voltage cables, coaxial, 20 m on one cable drum
2 Cables (1 × red, 1 × blue) for connecting low-voltage cable drum with CPTD1

2 Different high-voltage clamps
2 Low-voltage clamps (1 × red, 1 × blue)
2 Different interface cables (0.5 m/3 m) for configurations with/without trolly
2 Booster cables (0.5 m/3 m)
1 Grounding cable
1 Transport case

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
UNISSULA
جامعة سلطان أجونج الإسلامية

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pedoman pemeliharaan yang digunakan pada PT. PLN (Persero) ULTG Bandarmasih mengacu pada SK DIR 0520 Tahun 2014, yang diantaranya terdapat beberapa jenis pedoman pemeliharaan:

1. *In Service inspection* atau disebut inspeksi level-1 adalah kegiatan inspeksi yang dilakukan pada saat trafo dalam kondisi bertegangan/operasi. Tujuan dilakukannya *in service inspection* adalah untuk mendeteksi secara dini ketidaknormalan yang mungkin terjadi didalam trafo tanpa melakukan pemadaman.
2. *In Service Measurement* atau disebut inspeksi level-2 adalah kegiatan pengukuran/pengujian yang dilakukan pada saat trafo sedang dalam keadaan bertegangan/ operasi (in service).
3. *Shutdown testing/ measurement* adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat trafo dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan pada transformator.
4. *Shutdown function check* adalah pekerjaan yang bertujuan menguji fungsi dari rele-rele proteksi maupun indikator yang ada pada trafo. Item - item yang harus diperiksa pada saat inspeksi dan pengujian fungsi adalah *Rele Bucholz*, *Rele Jansen*, *Rele Sudden Pressure*, *Rele thermal*, dan *Oil Level*.

Pengujian yang dilakukan pada *Shutdown measurement* ada banyak item pengujian, dan masih terbagi menjadi dua bagian yaitu pengujian dasar (periodik) dan pengujian lanjutan (sering disebut kondisional). Berdasarkan periode pemeliharan, pengujian dasar (periodik) pada transformator daya dapat dikelompokkan seperti berikut:

a. Pengukuran Tahanan Isolasi
b. Pengukuran Tangen Delta

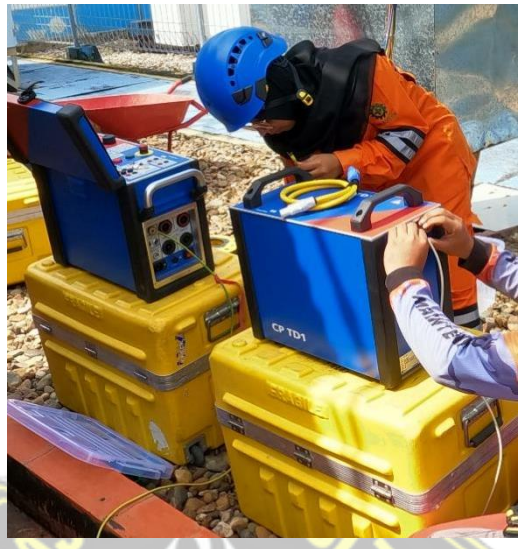
c. *Continuity Test*
d. *Dynamic Resistance*
e. Pengujian Rele Bucholz
f. Pengujian Rele Jansen
g. Pengujian *Sudden Pressure*

Berdasarkan kondisi tertentu seperti, trafo dipindah, bencana alam, hasil uji sebelumnya mendeteksi adanya perubahan/pergeseran maka pengujian pada transformator daya dikelompokkan dalam periode kondisional (tertentu) seperti berikut ini:

a. HV Test
b. Pengujian SFRA
c. Pengukuran Tahanan DC (Rdc)
d. *Ratio Test*
e. Pengukuran Kadar Air Pada Kertas
h. Pengukuran Arus Eksitasi
i. Kalibrasi Indikator Suhu
j. Motor Kipas Pendingin
k. Tahanan NGR
l. *Fire Protection*

Pengujian Tan Delta termasuk dalam kategori pemeliharaan *shutdown measurement* atau sering disebut inspeksi level 3, pengujian atau pengukuran ini dilakukan dalam kondisi transformator tidak beroperasi atau keadaan *offline*. Hal ini disebabkan karena pada saat dilakukan pengujian memerlukan pemasangan kabel *probe* di bagian atas transformator, jika keadaan transformator *online* akan sangat membahayakan para personil yang melakukan pengujian karena terdapat tegangan pada transformator tersebut.

4.1 Analisa Data Hasil Pengujian Tan Delta



Gambar 4. 1 Proses Pengujian Tan Delta

Pengujian Tan Delta menurut prosedur pemeliharaan pelaksanaannya dilakukan secara periodik, maka pengujian tersebut harus dilakukan pada saat pekerjaan pemeliharaan rutin 2 tahunan bay trafo tenaga. Adapun mode pengujian yang ditentukan oleh PT. PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Kalimantan seperti yang disajikan dalam tabel 4.1. Sehingga dasar dilakukannya pengujian Tan Delta di Bay Trafo-2 Gardu Induk 150kV Seberang Barito adalah untuk dilakukan perbandingan dengan hasil sebelumnya sehingga dapat diketahui adanya gangguan atau deformasi belitan pada transformator. Hasil Nilai Tan δ dan kapasitansi total transformator diukur dengan alat uji Omicron CPC 100 CP TD1. Data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan 2 periode pemeliharaan dua tahunan Tangen Delta yang berfungsi untuk membandingkan keadaan sebelumnya pada tahanan isolasi ini. Standar yang digunakan pada pengujian ini menggunakan SK DIR 0520 < 1%. Tabel 4.1 dan 4.2 menunjukkan hasil pengujian untuk pengujian Tan δ.

Gambar 4. 2 Tampilan pada Alat Uji OMICRON CPC 100

Data pengujian yang diperoleh menggunakan data pengujian pada tahun 2021 dan 2023. Pengujian tan delta mulai secara rutin dilaksanakan di PT. PLN (Persero) ULTG Bandarmasih pada tahun 2018-2019 sejak diterbitkan surat keputusan direktur tahun 2014.

Tabel 4. 1 Hasil Uji Tan Delta Tahun 2021

Mode Pengujian	Hasil Ukur	V test	I meas.	Cp (nF)	DF	Watt Losses
UST-A	CHL	10000 V	30.779 mA	9.8004 nF	0.3738 %	1.1503
	CLH	10000 V	30.784 mA	9.8004 nF	0.3733 %	1.1487
GSTg A+B	CHG	10000 V	11.940 mA	3.7988 nF	0.2820 %	0.3363
	CLG	10000 V	29.978 mA	9.5344 nF	0.4783 %	1.4319
GST	CHL+CHG	10000 V	42.726 mA	13.599 nF	0.3482 %	1.4868
	CLH+CLG	10000 V	60.751 mA	19.335 nF	0.4249 %	2.5796

Tabel 4. 2 Hasil Uji Tan Delta Tahun 2023

Mode Pengujian	Hasil Ukur	V test	I meas.	Cp (nF)	DF	Watt Losses
UST-A	CHL	10000 V	30.781 mA	9.8033 nF	0.4193 %	1.2907
	CLH	10000 V	30.885 mA	9.8038 nF	0.4099 %	1.2618
GSTg A+B	CHG	10000 V	12.025 mA	3.8232 nF	0.3793 %	0.4553
	CLG	10000 V	29.998 mA	9.5472 nF	0.5180 %	1.5528
GST	CHL+CHG	10000 V	42.802 mA	13.627 nF	0.4108 %	1.7577
	CLH+CLG	10000 V	59.087 mA	18.750 nF	0.7713 %	4.5410

Dari tabel 4.1 dan 4.2, untuk mendapatkan nilai *capacitance* dan *dissipation factor* (Tan δ) melalui beberapa mode pengujian sebagai berikut:

a. CHL (*Capacitance High to Low*) : Pengukuran kapasitansi belitan primer terhadap sekunder, pada pengukuran ini menggunakan mode UST-A dengan injeksi dititik primer

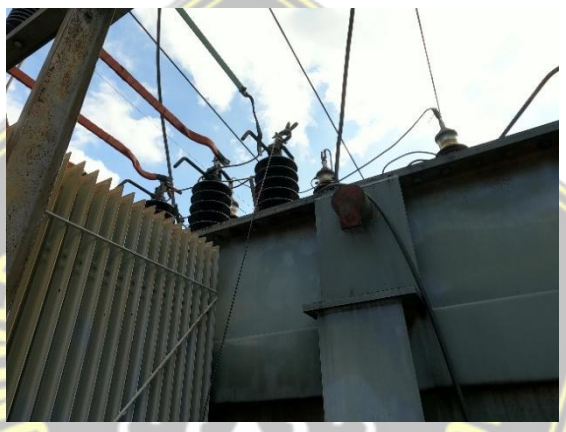
b. CHG (*Capacitance High to Ground*) : Pengukuran kapasitansi belitan primer terhadap ground, pada pengukuran ini menggunakan mode GSTg A+B dengan injeksi dititik primer

c. CHL + CHG (*Capacitance High to Low + Capacitance High to Ground*) : Pengukuran kapasitansi dari belitan primer, sekunder terhadap ground, pada pengukuran ini menggunakan mode GST dengan injeksi dititik primer

d. CLH (*Capacitance Low to High*) : Pengukuran kapasitansi belitan sekunder terhadap primer, pada pengukuran ini menggunakan mode UST-A dengan injeksi dititik sekunder

e. CLG (*Capacitance Low to Ground*) : Pengukuran kapasitansi belitan sekunder terhadap ground, pada pengukuran ini menggunakan mode GSTg A+B dengan injeksi dititik sekunder

f. CLH + CLG (*Capacitance Low to High + Capacitance Low to Ground*) : Pengukuran kapasitansi dari belitan primer, sekunder terhadap ground, pada pengukuran ini menggunakan mode GST dengan injeksi dititik sekunder



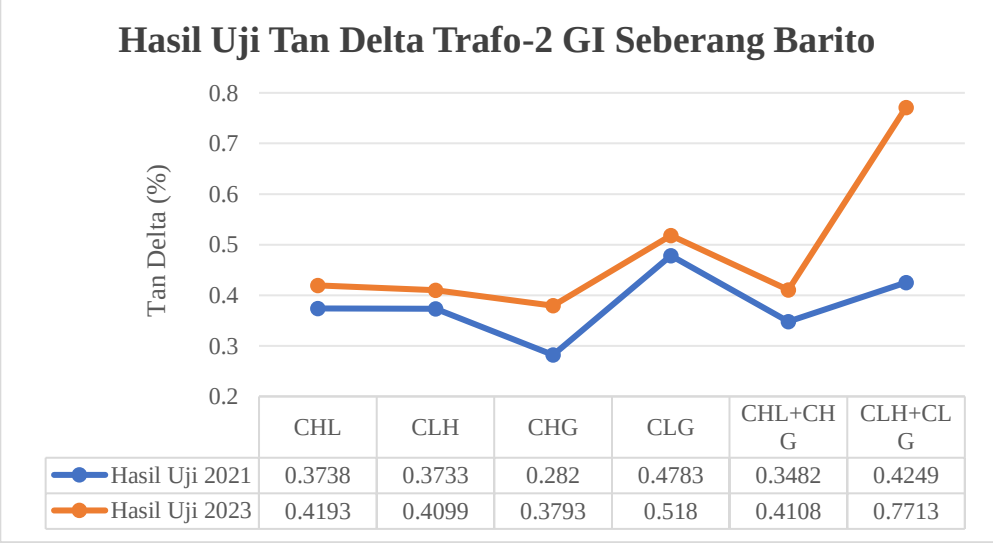
Gambar 4. 3 Pemasangan koneksi kabel uji pada trafo

Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Tangen Delta tahun 2021 dan Tahun 2023

Mode Pengujian	Titik Ukur	STANDAR	DF 2021		DF 2023		Ket
			Hasi Pengukuran	Hasil Perhitungan	Hasil Pengukuran	Hasil Perhitungan	
UST-A	CHL	SK DIR 0520-2014 <1%	0.3738 %	0.37373145	0.4193 %	0.41938577	Baik
	CLH		0.3733 %	0.37315099	0.4099 %	0.40855125	Baik
GSTg A+B	CHG		0.2820 %	0.28165941	0.3793 %	0.41938577	Baik
	CLG		0.4783 %	0.47765573	0.5180 %	0.40855125	Baik
GST	CHL+CHG		0.3482 %	0.34798694	0.4108 %	0.41066184	Baik
	CLH+CLG		0.4249 %	0.42462235	0.7713 %	0.76855046	Baik

Dari kedua hasil tersebut digunakan untuk menghitung nilai *error* dengan persamaan sebagai berikut: Mencari selisih antara hasil dari perhitungan dan

pengukuran tangen delta. Kemudian dari hasil tersebut dikuadratkan. Setelah diketahui hasilnya, maka selanjutnya menghitung *Mean Squared Error* (MSE). Dari hasil DF tahun 2021 didapatkan nilai MSE sebesar 0.00000068 dan pada tahun 2023 sebesar 0.00000099. Pada tabel 4.3 ditunjukkan hasil pengujian tan δ yang diperoleh melalui pengukuran langsung pada transformator dan perhitungan manual. Nilai error tersebut menunjukkan bahwa antara hasil pengukuran dan perhitungan memiliki selisih nilai yang sangat kecil. Sehingga dapat dikatakan dari hasil pengukuran *dissipation factor* (Tan Delta) menggunakan alat uji OMICRON CPC100 CPTD dibandingkan dengan hasil perhitungan hasilnya masih akurat. Nilai tan delta yang diperoleh dari titik enam titik ukur juga menunjukkan hasil yang masih dibawah standar yang berlaku yatiu standar SK DIR 0520 tahun 2014, nilai tan δ pada transformator yang beroperasi tidak boleh melebihi 1%. Dapat disimpulkan bahwa isolasi transformator masih dalam kondisi baik, sehingga transformator masih layak untuk dioperasikan.



Gambar 4. 4 Grafik *Dissipation Factor* (tanδ)

Berdasarkan hasil uji dan perhitungan pada tabel 4.3, serta grafik pada gambar 4.3, dapat disimpulkan bahwa kondisi kualitas belitan isolasi pada transformator 2 150 kV di Gardu Induk Seberang Barito berada dalam keadaan

baik. Nilai tangen delta dari hasil uji dan perhitungan pada tahun 2021 dan 2023 rata-rata masih dalam kategori baik, sesuai dengan klasifikasi kondisi yang diizinkan. Meskipun terdapat perubahan nilai tangen delta, perubahannya tidak signifikan tetapi sudah cukup menunjukkan peningkatan kondisi isolasi transformator.

Peningkatan nilai tangen delta pada periode pemeliharaan transformator 2 disebabkan oleh faktor kerja transformator yang terus menerus serta usia transformator. Meskipun terdapat peningkatan nilai faktor disipasi atau tangen delta, transformator tetap dinyatakan layak untuk beroperasi karena nilai tersebut masih memenuhi standar yang ditetapkan, yaitu kurang dari 1% untuk transformator beroperasi.

Untuk membuktikan nilai tan δ dari pengujian belitan primer terhadap sekunder atau CHL (*Capacitance High Low*) yang dilakukan didapatkan hasil tan delta 0,3738% serta nilai kapasitansi 9.8004nF. Dengan persamaan 2.9 kita dapat mengetahui bagaimana pengukuran tan delta dari variabel yang dibaca oleh Omicron CPC100 CP TD1, tan δ belitan primer terhadap sekunder.

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

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

$$tan\delta = \frac{1.153\ W}{10000^2 V \times 2 \times 3.14 \times 50Hz \times 9.8004 \times 10^{-9} F} \times 100\%$$

$$tan\delta = 0.3737\%$$

*Nilai *Pdrop* (daya), *V* (tegangan), *f* (frekuensi), dan *C* (kapasitansi) diperoleh dari data tabel 4.1 baris ke-2 yaitu data mode pengujian UST-A hasil ukur dari CHL.

Hasil pengujian tersebut valid dikomparasikan dengan standar SK.DIR PLN No.0520-2K/DIR/2014 untuk asesmen trafo dan standar IEEE C.57.12.90 pada *insulation power factor tests*.

Arus resistif pada sebuah kumpuran merupakan salah satu indikator untuk mengetahui kondisi dari isolasi transformator karena menjadi salah satu penyebab timbulnya losses daya pada isolasi transformator. Berikut ini adalah cara menentukan nilai *I*C dan *IR* pada isolasi transformator.

Menentukan sudut delta (δ) dari data titik ukur pada *Capacitance High Low* (CHL) Tahun 2021, sudut delta dapat dicari menggunakan fungsi trigonometri invers,

$$\boldsymbol{y = \sin^{-1}(x)}$$

$$\delta = sin^{-1}\left(\frac{P}{V \cdot I_T}\right)$$

$$\delta = sin^{-1}\left(\frac{1.1503}{10000 \cdot 30.779 \cdot 10^{-3}}\right)$$

$$\delta = sin^{-1}(0.003737)$$

$$\delta = 0.21413°$$

Selanjutnya mencari besar arus I_C dapat dihitung dengan persamaan trigonometri,

$$I_c = I_T \, Cos\delta$$

$$I_c = 30.779 \left(Cos(0.21413°)\right)$$

$$I_c = 30.778785 \, mA$$

Sehingga dari nilai Ic, dapat mencari besar arus I_R dapat dihitung dengan persamaan (2.3) berikut,

$$I^2 = \sqrt{Ir^2 + Ic^2}$$

$$Ir^2 = \sqrt{I^2 - Ic^2}$$

$$Ir^2 = \sqrt{30.779^2 - 30.778785^2}$$

$$I_r = 0.11503\ mA$$

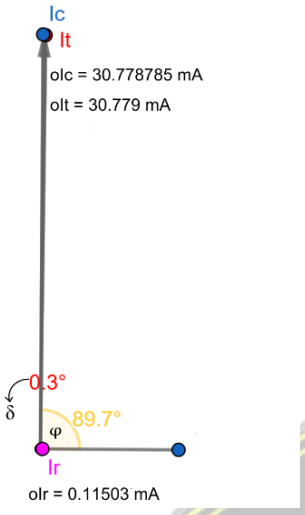
Setelah diketahui nilai arus I_C dan I_R, maka nilai tan δ dapat dicari dengan persamaan 2.6,

$$Tan\ \delta = \frac{I_R}{Ic}$$

$$Tan\ \delta = \frac{0.11503}{30.778785} \times 100\%$$

$$Tan\ \delta = 0.373731\%$$

Selain menggunakan persamaan 2.9 dalam menghitung nilai tan delta, dengan persamaan 2.6 kita juga dapat mengetahui nilai tan delta dengan membandingan nilai arus resistif dengan arus kapasitif, sehingga jika digambarkan dalam bentuk diagram fasor sebagai berikut:



Keterangan:

Ic	= Arus Kapasitif
It	= Arus Total
Ir	= Arus Resistif
	= Sudut delta
	= Sudut phi
oIr	= Besar nilai arus resistif (mA)
oIc	= Besar nilai arus resistif (mA)
oIt	= Besar nilai arus total (mA)

Gambar 4. 5 Besar fasor sudut delta CHL Trafo-2 Tahun 2021

Sudut phi diperoleh dari persamaan 2.6, menggunakan persamaan *power factor* (PF),

$$PF = \frac{I_R}{I_T}$$

$$PF = \frac{0.11503\ mA}{30.778785\ mA}$$

$$PF = Cos\varphi = 0.00373729$$

Mencari sudut φ,

$$\varphi = Cos^{-1}(0.00373729)$$

$$\varphi = 89.78586865°$$

Dari diagram fasor yang telah digambarkan, dapat dilihat nilai arus kapasitif yaitu sebesar 30.778785 mA, arus resisitif yaitu sebesar 0.11503 mA, sudut phi (φ) didapat dari perhitungan nilai cos phi yaitu sudut antara arus resistif dengan arus total yaitu sebesar 89.78586865°. Nilai sudut tan delta pada diagram fasor yaitu sebesar 0.214131351°. Nilai sudut tan delta ini menggambarkan pergeseran sudut

antara arus kapasitif dan arus resisitif yang dapat menandakan masalah pada isolasi seperti kontaminasi atau kerusakan material isolasi.

4.2 Analisis Perbandingan Nilai *Losses* Daya

Faktor disipasi (tan δ) menentukan faktor kehilangan daya (*losses* daya). Jumlah ini mewakili jumlah daya yang hilang, semakin besar nilai tan delta dari insulasi belitan, maka semakin banyak pula daya yang hilang. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas isolasi belitan tersebut semakin memburuk. Rugi-rugi dielektrik sebanding atau berbanding lurus dengan nilai tan delta sehingga jika tan bernilai makin besar, maka rugi rugi dielektrik juga semakin besar seperti pada persamaan 2.10.

Tabel 4. 4 Data nilai *Losses* Daya Trafo 2 tahun 2021 dan 2023

Titik Ukur	Losses Daya (Watt)	
	2021	2023
CHG	0.3363	0.4553
CLG	1.4319	1.5528
CHL	1.1503	1.2909
CLH	1.1487	1.2618
CHL+CHG	1.4868	1.7577
CLH+CLG	2.5796	4.541

Dari data nilai *losses* daya tersebut jika direpresentasikan ke dalam bentuk grafik sebagai berikut:

Gambar 4. 6 Grafik kenaikan *losses* daya pada Trafo 2 tahun 2021 dan 2023

Dari data tabel 4.5 dan gambar 4.6 dapat diketahui adanya kenaikan nilai losses daya dari tahun 2021 ke 2023, rata-rata untuk persentase kenaikannya sebesar 26.69%. Kenaikan nilai losses daya ini menunjukkan adanya hubungan dengan nilai tan delta yang mengalami perubahan kenaikan. Sehingga dapat dikatakan nilai losses daya berbanding lurus dengan hasil nilai tan delta pada belitan isolasi transformator. Selain nilai losses daya, nilai sudut delta (δ) juga menunjukkan adanya pergeseran dari kapasitor yang ideal.

Hal ini sejalan dengan pendapat Febrijanto dan Hidayat (2022), yang menyatakan bahwa adanya pergeseran sudut dari 90º menunjukkan adanya tingkat kontaminasi pada material isolasi. Pergeseran sudut ini menjadi indikator penurunan kualitas isolasi akibat kontaminasi atau kerusakan. Hal ini dapat mengindikasikan adanya peningkatan kontaminasi atau penurunan kualitas isolasi pada transformator dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, diperlukan perawatan dan pemeliharaan isolasi yang lebih intensif untuk menjaga kinerja transformator agar tetap optimal dan mencegah kerusakan lebih lanjut.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dari analisis kondisi isolasi Transformator melalui Pengujian Tan Delta Trafo 2 150/20kV 20MVA GI Seberang Barito didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengujian tan delta dari dua periode yaitu pada tahun 2021 dan 2023, didapatkan hasil nilai tan delta yang masih sesuai dengan batas standar yaitu kurang dari 1% untuk trafo beroperasi yaitu dititik pengukuran maksimal 0.7713 % pada tahun 2023.
2. Perubahan nilai tan delta dari tahun 2021 dan 2023 memang ada namun tidak terlalu signifikan, namun tetap menandakan adanya penurunan atau degradasi pada bahan isolasi belitan trafo.
3. Kinerja transformator tidak hanya dipengaruhi oleh pengujian tan delta, tetapi ada faktor-faktor lain yang mempengaruhi kinerja transformator.
4. Rugi-rugi daya pada isolasi belitan berbanding lurus dengan nilai tan delta, semakin besar nilai tan delta maka akan semakin besar nilai rugi-rugi daya.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diambil dari hasil pembahasan laporan tugas akhir dengan judul "Evaluasi Kondisi Isolasi Transformator melalui Pengujian Tan Delta Trafo 2 150/20kV 20MVA GI Seberang Barito" sebagai berikut:

1. Dilakukan pemeliharaan preventif secara berkala, termasuk pengujian ulang nilai Tan Delta, Tahanan Isolasi, Dynamic Resistance jika ditemukan hasil pengujian yang melebihi batas standar.
2. Meningkatkan frekuensi pemantauan kondisi transformator, terutama pada komponen isolasi, untuk mengantisipasi potensi kerusakan. Dan jika

penurunan kualitas isolasi pada transformator maka sebaiknya untuk dilakukan penggantian transformator.

3. Memastikan manajemen beban transformator agar tidak melebihi kapasitas desain, sehingga dapat mengurangi risiko degradasi isolasi.
4. Diharapkan pada pengujian berikutnya menggunakan data dengan periode yang lebih dari 2 kali sehingga dapat diketahui tren penurunannya.

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* (Vol. 13, Issue 1).

Abidin, L. (2019). Pengujian Dissipation Factor pada Transformator dengan Jumper dan tanpa Jumper Bushing. *Energi & Kelistrikan*, *11*(2), 189–196. https://doi.org/10.33322/energi.v11i2.762

Almanda, D., & 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), 97. https://doi.org/10.24853/resistor.5.2.97-102

C57.12.90-1987, I. S. (1988). test code for liquid-immersed distribution , power , and regulating transformers and guide for short-circuit testing of distribution and power transformers An American National Standard IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution , Power , an. *ANSI/IEEE C57.12.90-1987*.

CIGRE. (2011). *Guide for Transformer Maintenance*.

Fathoni, D., & Irianto, C. G. (2017). *Sweep Frequency Response Analysis Untuk Analisis Awal Gangguan Mekanis Pada Transformator Distribusi*. *14*, 41–56.

Febrijanto, H. R., & Hidayat, R. (2022). Analisis Pengujian Tan Delta Pada Transformator Arus Di Gitet Tasikmalaya Bay Penghantar Bandung Selatan-1. *Teknokom*, *6*(2), 86–95. https://doi.org/10.31943/teknokom.v6i2.143

Florkowski, M., Kuniewski, M., & Mikrut, P. (2024). Effect of voltage harmonics on dielectric losses and dissipation factor interpretation in high-voltage insulating materials. *Electric Power Systems Research*, *226*(November 2023), 1–9. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109973

Gill, P. (2016). Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. In *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. https://doi.org/10.1201/9781420017557

Harlow, J. H. (2004). Electric Power Transformer Engineering. In *FEM and Micromechatronics with ATILA Software*. CRC Press LLC. https://doi.org/10.1201/9781315219172-14

IEEE. (2015). *C57.12.90: IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*.

IEEE Power and Energy Society. (2013). IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers. In *IEEE Std C57.149-2012* (Issue March).

Issi Anissa, M. P. (2020). Modul Fisika Kelas XII LISTRIK STATIS. In *Modul Fisika Kelas XII KD 3.2*.

K.A.Kulkarni. (2020). Detection of Negative Tan Delta (Dissipation factor) in Condenser Bushing : A Review. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, *06*(06), 203–205.

Mahendra, R. A. H. (2022). ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP EFISIENSI DAN UMUR TRANSFORMATOR PADA PLTU BENGKAYANG 2 × 50 MW PT. PLN (PERSERO) UPK SINGKAWANG. *Jurnal Universitas Tanjungpura*, *10*(1), 1–52. https://doi.org/10.21608/pshj.2022.250026

Maulana, W. F., Joko, Kartini, U. T., & Endryansyah. (2023). *Perhitungan hasil uji*

Tangen Delta sebagai parameter kelayakan Transformator pada Gardu Induk Rungkut 150 kV Wahyu. 1–14. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK558907/

Monica Putri, A., Yassir, & Maimun. (2020). Studi Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Transformator 66 MVA di PLTMG Sumbagut 2 Peaker 250 MW. *Jurnal Tektro*, *4*(2), 118.

Morsalin, S., Phung, T. B., Danikas, M., & Mawad, D. (2019). Diagnostic challenges in dielectric loss assessment and interpretation: A review. *IET Science, Measurement and Technology*, *13*(6), 767–782. https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5597

Mulyanto, B., Situmeang, U., & 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), 206–211. https://doi.org/10.36277/jteuniba.v6i2.137

Ondrialdi, R., Situmeang, U., & Zulfahri. (2020). Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang. *SainETIn*, *4*(2), 72–81. https://doi.org/10.31849/sainetin.v4i2.6288

Pamungkas, I. H. A. (2020). Analisa uji isolasi pada transformator tenaga di gardu induk 150 kv klaten. *Analisa Uji Isolasi Pada Transformator Tenaga Di Gardu Induk 150 KV Klaten*, 14. http://eprints.ums.ac.id/82506/5/NASKAH PUBLIKASI.pdf

Pramana, D., Satriyadi, I. G. N. H., Made, E. I., Negara, Y., & Sc, M. (2012). *Analisis Keandalan Trafo Daya 500 Kv Pada Sistem Transmisi Pt . Pln P3B Jawa – Bali Berdasar Sweep Frequency Response Analysis (Sfra) Dengan Metode Stokastik*. 1–7. http://digilib.its.ac.id/ITS-Article-

3400012000421/17988

PT. PLN (Persero). (2014). Buku Pedoman Trafo Tenaga. *Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Tenaga*, 1–142.

Robbani, M. F., Nugroho, D., & 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), 60. https://doi.org/10.26623/elektrika.v12i2.2721

Saminan, S. (2018). Pembelajaran Konsep Listrik dan Magnet. In *Pembelajaran Konsep Listrik dan Magnet* (Issue April 2017).

Sapthu, A. (2023). Listrik Dan Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan Ekonomi Di Provinsi Maluku. *Jurnal Cita Ekonomika*, *17*(2), 199–207. https://doi.org/10.51125/citaekonomika.v17i2.11315

LAMPIRAN