

Analisis Perbandingan Isolasi Trafo (60 MVA) GI Arun Menggunakan Metode Indeks Dan Tangen Delta

Fikri Raihan¹⁾, Selamat Meliala^{2*)}, Salahuddin³⁾, Muchlis Abd Muthalib⁴⁾, Habib Muharry Yusdartono⁵⁾, Teuku Multazam⁶⁾

¹⁾Universitas Malikussaleh

Jl. Kampus Unimal Bukit Indah, Blang Pulo, Muara Satu

*Corresponding author E-mail: selamat.meliala@unimal.ac.id

ABSTRACT

This study aims to evaluate the insulation condition of a 60 MVA power transformer located at the Arun Substation (GI) in Lhokseumawe using two testing methods: the Polarization Index (PI) and the Tangent Delta ($\tan \delta$). The analyzed data were obtained from PLN's annual testing results and referred to standards IEEE Std 62 and ANSI C57.12.90. The PI method compares insulation resistance values at the first and tenth minutes to detect degradation due to moisture or contamination. Meanwhile, the Tangent Delta method measures dielectric power losses caused by leakage current as an indicator of insulation quality. The test results show that the PI values for the primary, secondary, and tertiary windings are above the minimum threshold of 1.4 Megaohms, indicating that the insulation condition remains good. However, the Tangent Delta values for the primary winding with ICHT configuration increased from -0.5797% in 2022 to -0.7569% in 2024, approaching the tolerance limit. This indicates a decline in insulation quality that was not detected by the PI method. Therefore, the Tangent Delta method is considered more sensitive in detecting early-stage insulation deterioration and is recommended as the priority method for preventive testing at the Arun Substation.

Keywords: Power transformer, insulation resistance, polarization index, tangent delta, insulation diagnostic method.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi isolasi trafo daya 60 MVA di Gardu Induk (GI) Arun Lhokseumawe menggunakan dua metode, yaitu Indeks Polarisasi (PI) dan Tangen Delta ($\tan \delta$). Data yang dianalisis berasal dari hasil pengujian tahunan PLN dan mengacu pada standar IEEE Std 62 dan ANSI C57.12.90. Metode PI membandingkan nilai tahanan isolasi pada menit pertama dan menit kesepuluh untuk mendeteksi degradasi akibat kelembapan atau kontaminasi. Sementara itu, metode Tangen Delta mengukur rugi daya dielektrik akibat arus bocor sebagai indikator kualitas isolasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai PI pada belitan primer, sekunder, dan tersier berada di atas ambang batas 1,4 Megaohm, menandakan kondisi isolasi masih baik. Namun, nilai Tangen Delta pada belitan primer konfigurasi ICHT mengalami peningkatan dari -0,5797% pada 2022 menjadi -0,7569% pada 2024, mendekati batas toleransi. Hal ini menunjukkan adanya penurunan kualitas isolasi yang tidak terdeteksi oleh metode PI. Dengan demikian, metode Tangen Delta dinilai lebih sensitif dalam mendeteksi kerusakan awal sistem isolasi dan direkomendasikan sebagai metode prioritas dalam pengujian preventif di GI Arun.

Kata Kunci: Trafo daya, tahanan isolasi, indeks polaritas, tangen delta, metode diagnostik isolasi.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan dasar dalam kehidupan manusia. Seiring meningkatnya kebutuhan harian, permintaan energi listrik di Aceh pun terus bertambah. Untuk menjaga pasokan daya tetap stabil, diperlukan pemeliharaan peralatan penyaluran listrik, seperti trafo daya di Gardu Induk (GI) Arun [1]. Trafo tenaga berperan penting dalam sistem tenaga listrik, yakni untuk mengubah tegangan dari tinggi ke rendah atau sebaliknya, dengan frekuensi tetap. Peran trafo sangat vital dalam proses transmisi dan distribusi listrik,

sehingga kelangsungan operasinya perlu dijaga guna memastikan kestabilan sistem tenaga secara keseluruhan. Agar trafo berfungsi optimal dan berkelanjutan, kondisi fisik serta komponen internalnya terutama sistem isolasi harus tetap terjaga [2].

Sistem isolasi ini berfungsi memisahkan bagian-bagian bertegangan dalam trafo. Seiring waktu, kualitas isolasi dapat menurun akibat tegangan berlebih, kelembapan, suhu tinggi, atau kerusakan mekanis. Penurunan ini dapat menyebabkan gangguan pada tahanan isolasi dan merusak komponen trafo,

hingga berujung pada terhentinya pasokan listrik ke konsumen [3]. Kualitas sistem isolasi trafo dinilai dari hasil pengukuran tahanan isolasi, faktor rugi daya, dan permukaan parsial untuk menentukan nilai Indeks Polarisasi (PI).

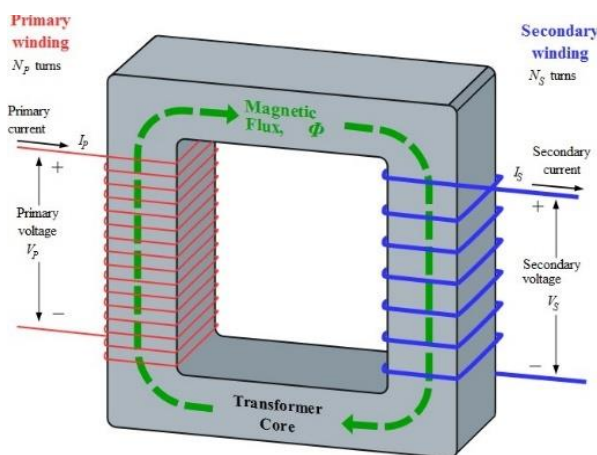
Pengujian dapat dilakukan dengan beberapa metode, seperti PI, Tangen Delta, *Dissolved Gas Analysis* (DGA), dan *Break Down Voltage* (BDV). Nilai tahanan isolasi ini dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, arus bocor, serta kotoran pada *bushing* atau isolasi [4], [5]. Dalam penelitian ini dipilih metode PI dan Tangen Delta karena dinilai memberikan hasil yang lebih informatif dan akurat dibandingkan metode lainnya lalu dianalisis menggunakan Matlab. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi nilai tahanan isolasi pada dua unit trafo berkapasitas 60 MVA di GI Arun, serta memberikan masukan untuk pemeliharaan trafo ke depannya.

II. DASAR TEORI

A. Transformator Daya

Trafo daya merupakan perangkat listrik yang digunakan untuk mengubah level tegangan listrik, baik dengan menaikkan (*step-up*) maupun menurunkannya (*step-down*). Prinsip kerja trafo ini didasarkan pada induksi elektromagnetik. Saat arus bolak-balik (AC) mengalir melalui kumparan primer, akan terbentuk fluks magnetik yang berubah secara terus-menerus. Fluks tersebut kemudian menginduksi gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder, sehingga menghasilkan arus listrik dengan tegangan yang berbeda, tergantung pada rasio jumlah lilitan antara kumparan primer dan sekunder [6][7].

Trafo memiliki dua kumparan yang saling terhubung secara magnetis melalui sebuah inti, namun tidak terhubung secara langsung secara listrik. Inti tersebut, yang biasanya terbuat dari besi, dikenal sebagai inti atau bantalan trafo [8][9].



Gambar 1. Elektromagnetik trafo

B. Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi merupakan salah satu parameter krusial dalam mengevaluasi kondisi kesehatan material isolasi pada transformator. Fungsi utama isolasi yang baik adalah untuk mencegah terjadinya kebocoran arus listrik antar komponen internal transformator, seperti belitan, inti, dan *casing*. Nilai tahanan isolasi yang rendah dapat mengindikasikan adanya potensi gangguan, seperti masuknya kelembapan ke dalam minyak isolasi, kontaminasi oleh partikel-partikel asing, atau degradasi material isolasi akibat proses penuaan serta paparan suhu tinggi secara berkelanjutan [10]. Tahanan

isolasi dimanfaatkan untuk menilai tingkat keselamatan peralatan listrik ketika dialiri tegangan.

Pengukuran tahanan isolasi dilakukan untuk menilai tingkat keamanan peralatan listrik saat dikenakan tegangan. Proses pengujian ini biasanya dilakukan dengan menghubungkan bagian aktif dari peralatan ke bodi atau ground, dan harus dilakukan dalam kondisi peralatan tidak beroperasi atau tidak terhubung dengan sumber listrik. Komponen listrik seperti motor, generator, kabel, saklar, dan transformator umumnya dilengkapi dengan lapisan isolasi listrik yang berfungsi melindungi konduktor (tembaga atau aluminium) agar arus tetap mengalir sesuai lintasan yang diinginkan [11]. Untuk memahami prinsip kerja pengukuran tahanan isolasi, penting untuk menguasai konsep dasar kelistrikan, salah satunya adalah Hukum Ohm, yang secara matematis dinyatakan pada persamaan berikut:

$$V = I \times R \quad (1)$$

C. Tingkat Ketahanan Isolasi (*Basic Impulse Insulation Level/BIL*)

Tingkat Ketahanan Isolasi (*Basic Impulse Insulation Level/BIL*) merupakan salah satu indikator utama dalam sistem kelistrikan yang menggambarkan sejauh mana sebuah peralatan listrik, seperti transformator, kabel, dan komponen jaringan listrik lainnya yang mampu menahan tegangan impuls tinggi yang bersifat tiba-tiba, seperti yang ditimbulkan oleh sambaran petir atau lonjakan tegangan sesaat [12]. Parameter ini sangat penting untuk menjamin keandalan dan keselamatan sistem kelistrikan secara menyeluruh.

Salah satu faktor penentu dalam sistem isolasi adalah kualitas minyak isolasi yang digunakan, khususnya pada transformator [13]. Ketahanan minyak isolasi sangat dipengaruhi oleh kondisi suhu dan kelembapan lingkungan. Peningkatan suhu minyak yang signifikan, ditambah dengan paparan oksigen dari udara bebas, dapat menyebabkan proses oksidasi pada permukaan minyak. Hal ini berakibat pada meningkatnya tingkat keasaman minyak isolasi, yang pada gilirannya dapat mempercepat degradasi sistem isolasi secara keseluruhan [14]. Secara umum, tingkat ketahanan isolasi pada trafo berkisar antara 1000 hingga 2000 megaohm. Semakin tinggi nilai ini, maka semakin baik kualitas isolasi trafo dalam menahan tegangan dan menjaga stabilitas operasionalnya.

D. Uji Indeks Polarisasi

Pengujian indeks polarisasi bertujuan untuk memastikan bahwa peralatan listrik, seperti transformator, berada dalam kondisi layak sebelum dilakukan pengujian tegangan lebih (*over voltage test*). Indeks ini, yang juga dikenal sebagai "*dielectric absorption ratio*", diperoleh melalui pengukuran tahanan isolasi selama periode waktu tertentu dengan tegangan konstan, umumnya selama 10 menit. Selama proses ini, tahanan isolasi menunjukkan kemampuannya dalam mengisi kapasitansi tinggi pada sistem isolasi, dan jika isolasi dalam keadaan bersih serta kering, nilai resistansinya akan meningkat secara signifikan.

Indeks Polarisasi (PI) digunakan untuk mengevaluasi kualitas isolasi listrik pada peralatan seperti motor dan trafo, dengan cara membandingkan nilai resistansi isolasi setelah 10 menit pengukuran dengan nilai resistansi pada menit pertama, menggunakan alat megohmmeter. Nilai PI yang

tinggi menandakan bahwa isolasi berada dalam kondisi baik, sedangkan nilai rendah bisa menjadi indikasi adanya kelembaban, kontaminasi, atau kerusakan pada material isolasi [15].

Perhitungan PI dilakukan dengan membandingkan tahanan isolasi pada menit ke-10 dengan menit ke-1, menggunakan rumus sebagai berikut:

$$IP = \frac{R_{10menit}}{R_{1menit}} \quad (2)$$

E. Uji Tangent Delta

Pengujian tangen delta ($\tan \delta$), yang juga dikenal dengan istilah "*dissipation factor test*", merupakan salah satu metode diagnostik kelistrikan yang umum digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem isolasi pada transformator. Metode ini sangat penting karena mampu mendeteksi gejala awal terjadinya degradasi atau kerusakan pada material isolasi, seperti isolasi kertas (selulosa), minyak isolasi, maupun bahan isolator padat lainnya yang digunakan dalam struktur internal transformator [16]. Metode ini mengukur deviasi karakteristik isolasi dari kapasitor ideal, di mana isolasi sempurna hanya menghasilkan arus kapasitif yang berada pada sudut 90° di depan tegangan. Jika terjadi kerusakan atau kontaminasi, akan muncul arus resistif yang menyebabkan rugi daya dielektrik. Nilai $\tan \delta$ menunjukkan rasio antara arus resistif dan kapasitif semakin besar nilainya, semakin buruk kualitas isolasi trafo [17].

Dengan membandingkan nilai arus resistif (IR) terhadap arus kapasitif (IC), dapat diketahui kondisi kualitas isolasi pada trafo [18]. Rasio dari arus resistif terhadap arus kapasitif inilah yang disebut sebagai Tangen Delta, yang secara matematis dituliskan pada persamaan berikut:

$$\tan \delta = \frac{P_{drop}}{V^2 \times \omega \times C} \times 100\% \quad (3)$$

III. METODE PENELITIAN

A. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini disusun untuk menggambarkan tahapan-tahapan secara sistematis yang akan ditempuh dalam pelaksanaan penelitian, sehingga dapat mempermudah pencapaian tujuan yang telah ditetapkan, sehingga dapat dilihat pada Gambar 2.

Proses penelitian diawali dengan studi literatur untuk mengumpulkan landasan teori dan standar pengujian yang relevan, kemudian dilanjutkan dengan studi lapangan di Gardu Induk (GI) Arun guna memperoleh data kondisi aktual trafo. Pengukuran tahanan isolasi dilakukan dengan dua metode, yaitu Indeks Polaritas (PI) dan Tangen Delta ($\tan \delta$), lalu hasilnya dianalisis dan dibandingkan dengan standar yang berlaku. Jika hasil pengujian tidak memenuhi standar, dilakukan evaluasi ulang namun jika sesuai, maka ditarik kesimpulan mengenai kelayakan isolasi trafo. Seluruh tahapan ini disusun secara sistematis dalam diagram alir untuk memastikan validitas dan ketepatan hasil analisis.

Penelitian ini memakai pendekatan kuantitatif dengan cara menghimpun data dari hasil pengukuran dan pengujian yang disajikan dalam bentuk numerik. Data dianalisis secara sistematis menggunakan rumus yang relevan untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat dari kondisi yang diteliti. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi tahanan

isolasi pada trafo daya 60 MVA menggunakan alat megaohm meter, kemudian dibandingkan dengan standar kelayakan PLN. Tujuannya adalah menentukan apakah isolasi trafo masih layak dan dapat digunakan secara andal dalam jangka panjang.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahapan ini membahas hasil analisis tahanan isolasi trafo daya 60 MVA di Gardu Induk Arun berbasis metode Indeks Polaritas (PI) dan Tangen Delta ($\tan \delta$). Data pengukuran dan perhitungan dibandingkan dengan standar IEEE Std 62 untuk PI dan ANSI C57.12.90 untuk $\tan \delta$. Hasil yang memenuhi standar menunjukkan bahwa trafo dalam kondisi baik dan layak operasi. Analisis ini juga dapat menjadi acuan bagi pihak GI Arun dalam merencanakan perawatan trafo secara berkala

A. Hasil Uji Indeks Polaritas

Pengujian awal yang digunakan dalam menilai kondisi tahanan isolasi pada transformator adalah metode Indeks Polarisasi, yang pelaksanaannya mengacu pada Instruksi Kerja (IK) dengan nomor dokumen FR-TRS-BOT-113. Dalam pengujian ini, parameter utama yang diamati adalah arus resistif terhadap belitan trafo. Proses pengukuran dilakukan selama 10 menit, kemudian hasil yang diperoleh dibandingkan dengan nilai pengukuran pada menit pertama untuk setiap belitan secara terpisah. Pengujian ini dilakukan menggunakan alat insulation tester merek Megger MIT-1025, yang memiliki kapasitas tegangan pengujian antara 500 hingga 5000 Volt DC. Evaluasi terhadap data hasil pengujian dilakukan dengan menggunakan rumus indeks polarisasi sebagaimana tertuang dalam persamaan (2). Evaluasi hasil

pengukuran dilakukan berdasarkan persamaan (2), dan analisis perhitungan indeks polarisasi dijelaskan sebagai berikut:

1. Analisis PI pada belitan Primer-(Ground-sekunder tertier) tahun 2022.

$$IP = \frac{R_{10\text{menit}}}{R_{1\text{menit}}}$$

$$IP = \frac{45,2}{28}$$

$$IP = 1,65$$

2. Analisis PI pada belitan Primer-(Ground-sekunder-tertier) tahun 2022.

$$IP = \frac{R_{10\text{menit}}}{R_{1\text{menit}}}$$

$$IP = \frac{73,3}{34,5}$$

$$IP = 2,12$$

Dari hasil perhitungan, analisis pada masing-masing bagian setelah pengukuran pada menit ke-1 dan ke-10 telah disajikan dalam Tabel 1 untuk perhitungan PI tahun 2022 dan pada Tabel 2 untuk perhitungan PI tahun 2024 seperti berikut:

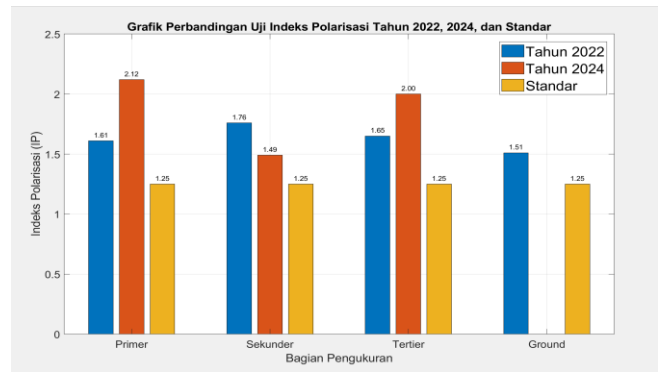
TABEL 1. HASIL UJI INDEKS POLARITAS TAHUN 2022

No	Pengujian	Hasil Uji Tahun 2022			Keterangan
		R1 menit	R10 menit	IP	
1	Primer-(Ground-Sekunder-Tertier)	28	45,2	1,61	Baik
2	Sekunder-(Ground-Primer-Tertier)	22,4	39,5	1,76	Baik
3	Tersier-(Ground-Sekunder-Primer)	26,3	43,2	1,65	Baik
4	(Tersier-Sekunder-Primer)-Ground	21,1	31,9	1,51	Baik

TABEL 2. HASIL UJI INDEKS POLARITAS TAHUN 2024

No	Pengujian	Hasil uji tahun 2024			Keterangan
		R1 menit	R10 menit	IP	
1	Primer-(Ground-Sekunder-Tertier)	34,5	73,3	2.12	Sangat Baik
2	Sekunder-(Ground-Primer-Tertier)	66,7	100	1.49	Baik
3	Tersier-(Ground-Sekunder-Primer)	40,3	80,6	2	Baik
4	(Tersier-Sekunder-Primer)-Ground	-	-	-	-

Hasil dari PI tahanan isolasi dari empat posisi pengujian pada *bushing* trafo tenaga 60 MVA di Gardu Induk Arun untuk tahun 2022 dan 2024 menunjukkan bahwa rata-rata nilai masih dalam kondisi baik, dengan rentang di atas 1,4 Megaohm. Namun, pada pengujian *ground* tahun 2024 tidak terdapat hasil pengujian karena pengujian tersebut tidak dilakukan, seperti yang dapat dilihat dari hasil analisis isolasi menggunakan metode indeks polaritas pada Gambar 3. seperti berikut ini:



Gambar 3. Grafik perbandingan hasil uji indeks polaritas tahun 2022, tahun 2024, dengan standar PLN menggunakan Matlab

Berdasarkan Gambar 3, hasil pengujian indeks polarisasi pada tahun 2022 dan 2024 menunjukkan bahwa nilai pengujian tahun 2024 secara umum lebih baik dibandingkan tahun 2022. Meskipun demikian, pada titik pengujian sekunder tahun 2024 terjadi penurunan sebesar 1,49% Megaohm. Nilai tersebut memang menurun dibandingkan standar, tetapi masih berada dalam kategori baik karena berada di atas ambang batas 1,25% Megaohm. Adapun pengujian pada titik *ground* tidak dilakukan pada tahun 2024, berbeda dengan tahun 2022 di mana pengujian pada titik ini telah dilaksanakan. Perlu dicatat bahwa pengujian indeks polarisasi terhadap tahanan isolasi difokuskan pada tiga titik utama, yaitu belitan primer, sekunder, dan tersier, sedangkan titik *ground* bersifat opsional.

Penilaian kondisi baik mengacu pada Tabel 3 yang merujuk pada standarisasi uji indeks polaritas IEEE Std 62, di mana nilai antara 1,25% hingga 2,0% Megaohm dikategorikan sebagai kondisi isolasi yang masih baik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa transformator daya 60 MVA yang diuji melalui metode indeks polarisasi berada dalam kondisi layak operasi dan sesuai dengan standar IEEE Std 62. Meskipun begitu, metode ini dianggap kurang efektif untuk mendeteksi adanya kontaminasi dalam sistem isolasi trafo.

B. Hasil Uji Tangen Delta Belitan

Dalam menilai kondisi tahanan isolasi trafo dilakukan melalui metode tangen delta, sesuai Instruksi Kerja FR-TRS-BOT-109. Pengujian ini fokus pada arus resistif terhadap arus kapasitif yang menyebabkan rugi daya dan menghasilkan nilai tangen delta. Analisis bertujuan mengevaluasi kualitas isolasi dengan menghitung koreksi faktor daya menggunakan alat Megger Delta 4010. Dalam analisis ini, beberapa mode pengujian digunakan. Pada *winding primer* dengan konfigurasi ICH+ICHL+ICHT, digunakan mode GST. Untuk ICH digunakan mode GSTg-A+B, ICHL dengan UST-A, dan ICHT dengan UST-B. Pendekatan serupa juga diterapkan pada *winding sekunder* dan tersier, disesuaikan dengan mode dan jenis konfigurasi masing-masing.

Evaluasi hasil dilakukan dengan membandingkan menggunakan persamaan (5). Adapun analisis perhitungannya, yaitu:

1. Dengan menyajikan sampel perhitungan nilai uji tangen delta tahun 2022 pada kumparan primer beserta konfigurasi ICH+ICHL+ICHT untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai kondisi isolasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{P_{drop}}{V^2 \times \omega \times C} \times 100\% \\ \tan \delta &= \frac{0,6547}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (11155,8 \times 10^{-12})} \times 100\% \\ &= \frac{0,6547}{349,5918} \times 100\% \\ &= 0,1846\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{P_{drop}}{V^2 \times \omega \times C} \times 100\% \\ \tan \delta &= \frac{0,86999}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (11168,0 \times 10^{-12})} \times 100\% \\ &= \frac{0,86999}{350,6752} \times 100\% \\ &= 0,2479\% \end{aligned}$$

2. Dengan menyajikan sampel perhitungan nilai uji tan delta tahun 2024 pada kumparan primer beserta konfigurasi ICH+ICHL+ICHT sebagai berikut:

Berdasarkan contoh perhitungan di atas, data hasil uji tan delta untuk belitan tahun 2022 dapat dilihat dalam Tabel 3, namun untuk tahun 2024 tercantum pada Tabel 4 sebagai berikut ini:

TABEL 3. HASIL UJI TANGEN DELTA BELITAN TAHUN 2022

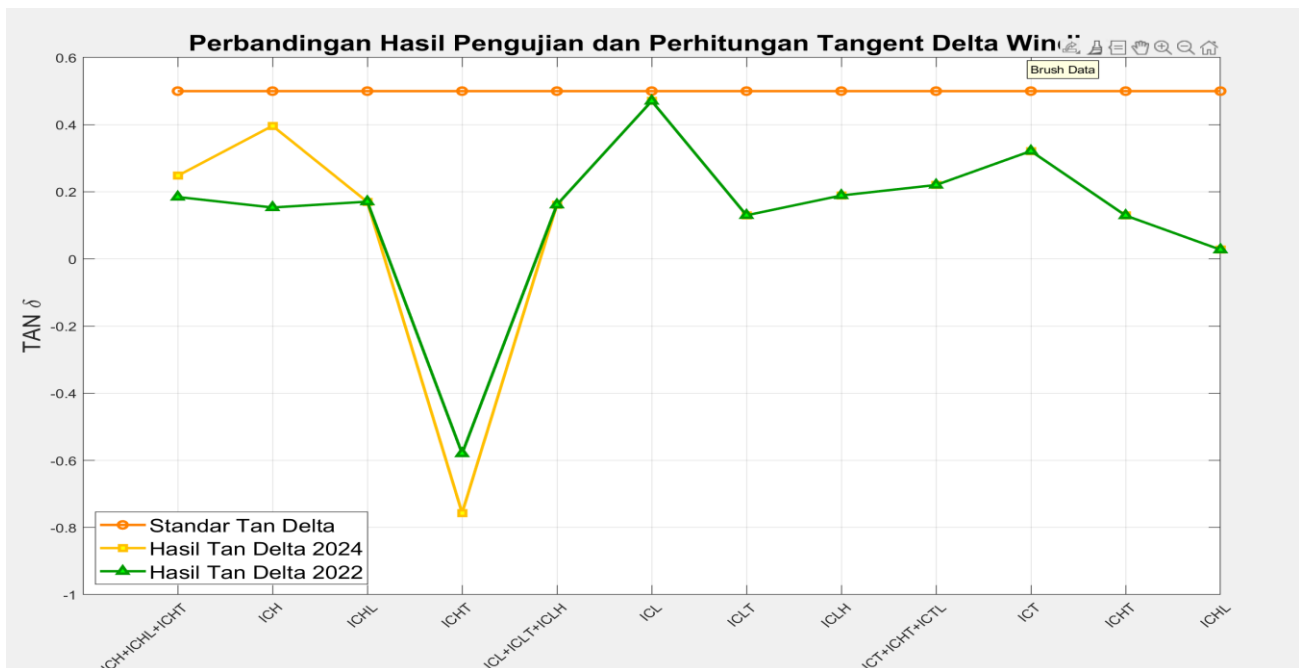
Test	Freq (HZ)	Teg. (KV)	Arus (mA)	Daya losses (W)	Tan Delta (%)	CAP (pF)	Ket.
Primer							
ICH+ICHL+ICHT	50	9,99	35,09	645,37	0,1846	11155,8	Bagus
ICH	50	10,00	12,69	193,69	0,1533	4022,3	Bagus
ICHL	50	10,00	22,18	378,70	0,1707	7063,3	Bagus
ICHT	50	10,00	0,22	-12,58	-0,5797	69,11	Penurunan
Sekunder							
ICL+ICLT+ICLH	50	10,01	68,99	1082,43	0,1569	21957,4	Bagus
ICL	50	10,00	9,63	153,82	0,1599	3062,7	Bagus
ICLT	50	10,10	41,59	546,85	0,1289	13238,8	Bagus
ICLH	50	10,10	6,20	111,58	0,1765	1972,8	Bagus
Tertier							
ICT+ICTH+ICTL	50	10,10	79,44	1647,54	0,2030	25283,3	Bagus
ICT	50	10,10	21,67	642,96	0,2910	6895,8	Bagus
ICHT	50	10,00	41,58	522,86	0,1315	13237,8	Bagus
ICHL	50	10,10	0,22	9,72	0,4281	69,5	Bagus

TABEL 4. HASIL UJI TANGEN DELTA BELITAN TAHUN 2024

Test	Freq (HZ)	Teg. (KV)	Arus (mA)	Daya losses (W)	Tan Delta (%)	CAP (pF)	Ket.
Primer							
ICH+ICHL+ICHT	50	10,00	35,09	869,99	0,2479	11168,0	Bagus
ICH	50	10,01	12,69	503,67	0,3966	4037,4	Bagus
ICHL	50	10,01	22,18	377,34	0,1698	7061,3	Bagus
ICHT	50	10,01	0,22	-16,60	-0,7569	69,7	Penurunan
Sekunder							
ICL+ICLT+ICLH	50	10,01	69,02	1116,02	0,1614	21966,3	Bagus
ICL	50	10,00	5,23	245,76	0,4705	1663,3	Bagus
ICLT	50	10,01	41,59	541,89	0,1300	13241,1	Bagus
ICLH	50	10,01	22,18	420,27	0,1891	7060,5	Bagus
Tertier							
ICT+ICTH+ICTL	50	10,00	79,42	1749,57	0,2204	25279,4	Bagus
ICT	50	10,00	37,61	1208,62	0,3215	11968,9	Bagus
ICHT	50	10,00	41,60	537,76	0,1293	13240,8	Bagus
ICHL	50	10,00	0,22	0,60	0,0276	69,2	Bagus

Hasil uji pada 12 titik tiap belitan trafo tahun 2022 dan 2024 menunjukkan bahwa kondisi isolasi masih baik dengan nilai di bawah 0,5%. Namun, pada belitan primer konfigurasi

ICHT, terjadi peningkatan nilai tangen delta di kedua tahun, yaitu tahun 2022 dan 2024, seperti yang terlihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Grafik perbandingan hasil uji tangen delta *winding* tahun 2022, tahun 2024 dengan satandar PLN menggunakan Matlab

Berdasarkan Gambar 4., hasil uji tangen delta pada belitan trafo daya 60 MVA di GI Arun tahun 2022 dan 2024 secara umum masih menunjukkan kondisi isolasi yang baik dan sesuai standar ANSI C57.12.90, dengan nilai di bawah 0,5%. Namun, pada *winding* primer konfigurasi ICHT terjadi peningkatan nilai tangen delta dari -0,5797% (2022) menjadi -0,7325% (2024), melebihi batas standar. Berdasarkan standar ANSI C57.12.90, nilai tersebut mengindikasikan penurunan kualitas isolasi, kemungkinan akibat kontaminasi yang menimbulkan arus bocor. Dari perbandingan hasil pengujian tan delta tahun 2022 lebih baik dibandingkan dengan tahun 2024. Hasil ini menunjukkan adanya degradasi performa isolasi, sehingga diperlukan tindakan lanjutan untuk mencegah kerusakan. Secara keseluruhan, metode tangen delta terbukti efektif dalam mendeteksi penurunan kualitas isolasi.

C. Hasil Uji Tangen Delta Bushing

Uji tangen delta pada *bushing* trafo dilaksanakan dengan mode Ungrounded Specimen Test-A (UST-A), metode standar untuk menilai isolasi pada komponen yang tidak terhubung langsung ke tanah. Tujuannya adalah mendeteksi dini potensi degradasi isolasi yang dapat memengaruhi kinerja trafo. Analisis hasil uji dilakukan dengan membandingkan nilai terhadap standar berdasarkan persamaan (5) untuk menentukan apakah masih dalam batas normal atau mengarah pada kerusakan. Berikut adalah analisis tangen delta:

- Berikut ini disajikan contoh perhitungan nilai tangen delta tahun 2022 pada salah satu *bushing* yang diuji, sebagai ilustrasi kuantitatif.

$$\begin{aligned} \text{Tan } \delta &= \frac{P_{drop}}{V^2 \times \omega \times C} \times 100\% \\ \text{Tan } \delta &= \frac{0,02537}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (332,8 \times 10^{-12})} \times 100\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{0,02537}{10,44992} \times 100\% \\ &= 0,2427\% \end{aligned}$$

- Berikut ini disajikan contoh perhitungan nilai tangen delta tahun 2022 pada salah satu *bushing* yang diuji, sebagai ilustrasi kuantitatif.

$$\begin{aligned} \text{Tan } \delta &= \frac{P_{drop}}{V^2 \times \omega \times C} \times 100\% \\ \text{Tan } \delta &= \frac{0,03249}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (332,2 \times 10^{-12})} \times 100\% \\ &= \frac{0,3249}{10,43108} \times 100\% \\ &= 0,3114\% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, maka data tambahan hasil perhitungan untuk *bushing* ditampilkan pada Tabel 5 untuk pengujian tahun 2022 dan Tabel 6 untuk pengujian tangen delta tahun 2024 sebagai berikut:

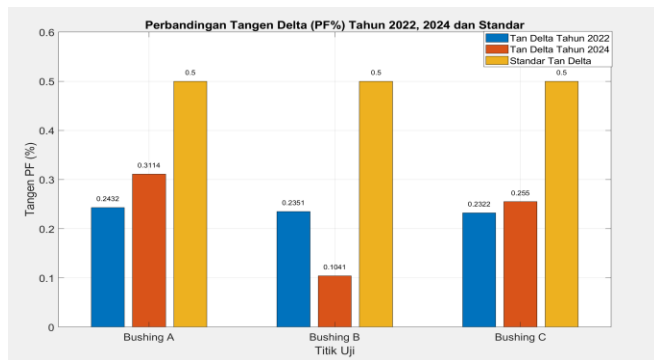
TABEL 5. HASIL UJI TANGEN DELTA *BUSHING* TAHUN 2022

Test	Teg. (KV)	Kuat Arus (mA)	Daya Losses (p)	Tengent Delta (%)	CAF (pF)	Ket.
A	10,00	1,05	25,37	0,2427	332,8	Bagus
B	10,00	1,03	24,20	0,2352	327,7	Bagus
C	10,00	1,06	25,07	0,2322	337,0	Bagus

TABEL 6. HASIL UJI TANGEN DELTA *BUSHING* TAHUN 2024

Test	Teg. (KV)	Kuat Arus (mA)	Daya Losses (p)	Tengent Delta (%)	CAF (pF)	Ket.
A	10,00	1,04	32,49	0,3114	332,2	Bagus
B	10,00	1,02	10,61	0,1041	324,4	Bagus
C	10,10	1,06	26,94	0,2550	336,4	Bagus

Hasil analisis pada tiga titik *bushing* trafo 60 MVA di GI Arun Lhokseumawe tahun 2022 dan 2024 menunjukkan kondisi isolasi yang baik, dengan nilai di bawah batas 0,5%. Hal ini menandakan ketahanan isolasi *bushing* masih stabil dan terjaga, sebagaimana terlihat pada diagram di Gambar 5. berikut ini:



Gambar 5. Grafik perbandingan hasil uji tangen delta *bushing* tahun 2022, tahun 2024 dengan satandar PLN

Berdasarkan Gambar 5, tidak terdapat peningkatan signifikan karena hasil pengujian tetap di bawah batas 0,5% sesuai standar ANSI C.57.12.90. Uji tangen delta pada *bushing* trafo 60 MVA menunjukkan kondisi layak dan baik. Perbandingan data tahun 2022 dan 2024 menunjukkan hasil tahun 2022 umumnya lebih baik, kecuali pada *bushing* B yang hasilnya lebih baik pada 2024.

V. KESIMPULAN

Menurut hasil analisis dan perbandingan uji tahanan isolasi trafo daya 60 MVA di Gardu Induk Arun Lhokseumawe menggunakan dua metode, yaitu indeks polaritas dan tangen delta, pada tahun 2022 dan 2024, diketahui bahwa kondisi isolasi masih berada dalam kategori layak operasi. Pengujian indeks polarisasi menunjukkan nilai di atas 1,4 megaohm, di mana hasil tahun 2024 lebih baik dibandingkan tahun 2022, meskipun pengujian pada titik *ground* tidak dilakukan karena bersifat opsional. Sementara itu, pengujian tangen delta menunjukkan nilai di bawah 0,5%, dengan adanya penurunan pada titik primer hubungan ICHT, yaitu dari -0,5797% pada tahun 2022 menjadi -0,7569% pada tahun 2024, yang mengindikasikan adanya kontaminasi pada isolasi. Pengujian tangen delta pada *bushing* juga memperlihatkan bahwa secara umum hasil tahun 2022 lebih baik, meskipun pada *bushing* B nilai tahun 2024 menunjukkan perbaikan akibat kontaminasi yang ditemukan pada tahun 2022. Secara umum, peningkatan nilai tangen delta pada tahun 2024 masih dapat diterima, mengingat adanya proses penuaan alami pada sistem isolasi.

Kedua metode pengujian tersebut terbukti memenuhi standar masing-masing, yaitu IEEE Std 62 untuk indeks polarisasi dan ANSI C57.12.90 untuk tangen delta. Namun, metode tangen delta dinilai lebih efektif karena melibatkan dua parameter pengujian dan mencakup dua objek uji, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih rinci terhadap kondisi isolasi. Dengan demikian, meskipun terdapat indikasi penurunan kualitas pada tahun 2024, trafo daya tetap memenuhi kriteria kelayakan untuk dioperasikan sesuai standar yang berlaku.

REFERENSI

[1] D. Rika Widianita, "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," At-Tawassuth J. Ekon. Islam, vol. VIII, no. I, pp. 1–19, 2023.

[2] M. I. D. Saputra, "Analisa Perbandingan Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Transformator III Gardu Induk Kebasen Tahun 2017, 2019, dan 2021," Solo Univ. Muhammadiyah Surakarta, 2021.

[3] G. Arinsya Prima, Z. Anthony, and A. Anugrah, "Gilang Arinsya Prima: Analisa Tahanan Isolasi Pada ... Analisa Tahanan Isolasi Pada Transformator Daya 150/30 KV Gardu Induk Padang Luar PT PLN (Persero) Bukittinggi," Indones. J. Eng. Technol., vol. 6, no. 1, pp. 2623–2464, 2023.

[4] P. B. Utami, "Evaluasi Dan Perbaikan Tahanan Isolasi Transformator 60 Mva/150/20 Kv," 2022.

[5] H. D. Ramadhan, "Analisis Pemeliharaan Prediktif Transformator Daya Di PT PLN GI Blimbing Malang Dengan Metode Markov," pp. 1–60, 2017.

[6] A. Husein and W. E. Budi, "Pengaruh Beban Puncak Terhadap Efisiensi Trafo Daya," J. Sains & Teknologi Fak., vol. XII, no. 2, pp. 34–40, 2022.

[7] B. Sujiwo, S. Meliala, and T. Multazam, "Proteksi Transformator Daya 260 MVA Menggunakan Rele Diferensial di PLTU Pangkalan Susu," vol. 5, 2025.

[8] "Transformator: Pengertian, Jenis Dan Cara Kerjanya." [Online]. Available: <https://nulis-ilmu.com/transformator/>. [Accessed: 09-Oct-2024].

[9] Almas, Syukri, and Muliadi, "Analisis Pengaruh Pembebanan Lebih pada Trafo Distribusi GH Krueng Cut Banda Aceh," Aceh J. Electr. Eng. Technol., vol. 4, no. 2, pp. 6–10, 2024.

[10] Supriyono, "Buku ajar teknik tegangan tinggi," Buku Ajar Tek. Tegangan Tinggi, no. Pengenalan Teknik Tegangan Tinggi, p. 99, 2014.

[11] R. Ondrialdi, U. Situmeang, and Zulfahri, "Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang," SainETIn J. Sains, Energi, Teknol. dan Ind., vol. 4, no. 2 SE-Articles, pp. 72–81, Jun. 2020.

[12] "Trafo (Transformator): Pengertian, Fungsi, Karakteristik, dan Jenis-Jenis - Gramedia Literasi." [Online]. Available: <https://www.gramedia.com/literasi/pengertian-trafo/>. [Accessed: 09-Oct-2024].

[13] N. Andayani et al., "Analisis Water Content Dan Breakdown Voltage Pada Isolasi Minyak Nynas Nytro Libra Dengan Variasi Zat Aditif Fenol," Jur. Tek. Elektro, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, 2020.

[14] A. Hakim, "Analisis Penurunan Kinerja Transformator Daya 20 Mva Di Gardu Induk Sungai Juaro Terhadap Tahanan Isolasi Akibat Pembebanan," Nov. 2020.

[15] M. F. Robbani, D. Nugroho, and G. Gunawan, "Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage," ElektriKA, vol. 12, no. 2, p. 60, 2020.

[16] D. Almada and A. Ardiansyah, "Analisis Pengujian Tangen Delta Pada Bushing Trafo 150/20 Kv 60 Mva Di Gardu Induk Karet Lama," Resist. (Elektronika Kendali Telekomun. Tenaga List. Komputer), vol. 5, no. 2, p. 97, Nov. 2022.

[17] PT. PLN (Persero), "Buku Pedoman Trafo Tenaga," Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Tenaga, pp. 1–142, 2014.

[18] Arief Setyowibowo (PT PLN (Persero) P3B Jawa Bali), "Pengujian Tangen Delta Trafo Dan Bushing Kasus-Khusus Tangen Delta Negatif," 2018.