

Analysis of Transformer Dielectric Quality at the Kisaran Main Substation of PT. PLN (Persero) ULTG Kisaran

Rizinski Khaliksi ¹⁾; Parlin Siagian ²⁾; Zuraidah Tharo ³⁾

^{1,2,3)} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi

Email: ¹⁾ rkhaliksi@gmail.com ;²⁾ arlinsiagian@dosen.pancabudi.ac.id

³⁾ zuraidahtharo@dosen.pancabudi.ac.id

How to Cite :

Khaliksi, R., Siagian, P., Tharo, Z. (2026). Analysis of Transformer Dielectric Quality at the Kisaran Main Substation of PT. PLN (Persero) ULTG Kisaran. Jurnal Media Computer Science, 5(2)

ARTICLE HISTORY

Received [28 Februari 2026]

Revised [07 April 2026]

Accepted [10 April 2026]

KEYWORDS

Power Transformer, Dielectric Quality, Breakdown Voltage.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan analisis komprehensif kualitas dielektrik transformator daya 60 MVA pada Gardu Induk Kisaran 150kV, Sumatera Utara, Indonesia. Transformator yang diproduksi oleh PAUWELS TRAF0 dan dioperasikan sejak tahun 2011 ini beroperasi pada beban rata-rata 33% dengan sistem pendinginan ONAN/ONAF. Pengujian dielektrik menghasilkan tegangan tembus 80,2 kV, kadar air 17,62 mg/kg, bilangan asam 0,108 mgKOH/g, dan faktor disipasi 0,173% (primer), 0,190% (sekunder), serta 0,243% (tersier). Faktor disipasi bushing berkisar antara 0,247% hingga 0,271%. Tegangan antarmuka mengukur 26,8 mN/m dengan titik nyala pada 148°C. Pengujian tahanan isolasi menunjukkan nilai 4,9 GΩ (primer), 3,41 GΩ (sekunder), dan 3,40 GΩ (tersier) dengan indeks polarisasi masing-masing 3,06, 1,48, dan 1,47. Suhu operasi tetap dalam batas yang dapat diterima pada 63°C (minyak puncak) dan 62°C (belitan). Analisis berdasarkan standar IEC 60422:2013 dan PLN mengindikasikan bahwa transformator berada dalam kondisi operasional yang baik dengan semua parameter berada dalam rentang yang dapat diterima, meskipun tegangan antarmuka mendekati ambang batas peringatan. Studi ini memberikan data dasar yang berharga untuk strategi pemeliharaan prediktif dan menunjukkan pentingnya pengujian dielektrik terintegrasi untuk penilaian kesehatan transformator

ABSTRACT

This study presents a comprehensive analysis of the dielectric quality of a 60 MVA power transformer at the Kisaran 150kV Substation, North Sumatra, Indonesia. The transformer, manufactured by PAUWELS TRAF0 and operated since 2011, operates at an average load of 33% with an ONAN/ONAF cooling system. Dielectric testing yielded a breakdown voltage of 80.2 kV, a moisture content of 17.62 mg/kg, an acid number of 0.108 mgKOH/g, and dissipation factors of 0.173% (primary), 0.190% (secondary), and 0.243% (tertiary). The bushing dissipation factor ranged from 0.247% to 0.271%. The interfacial tension measured 26.8 mN/m with a flash point at 148°C. Insulation resistance testing showed values of 4.9 GΩ (primary), 3.41 GΩ (secondary), and 3.40 GΩ (tertiary) with polarization indices of 3.06, 1.48, and 1.47, respectively. Operating temperatures remained within acceptable limits at 63°C (peak oil) and 62°C (winding). Analysis based on IEC 60422:2013 and PLN standards indicated that the transformer was in good operational condition with all parameters within acceptable ranges, although the interface voltage was close to the warning threshold. This study provides valuable baseline data for predictive maintenance strategies and demonstrates the importance of integrated dielectric testing for transformer health assessment.

PENDAHULUAN

Transformator daya merupakan aset kritis dalam jaringan transmisi dan distribusi listrik yang berfungsi sebagai tulang punggung untuk transformasi tegangan dan penyaluran daya. Keandalan operasionalnya sangat esensial untuk menjaga stabilitas sistem tenaga listrik dan memastikan kontinuitas pasokan listrik kepada konsumen (Saragih & Siagian, 2025). Namun demikian, transformator mengalami berbagai tekanan selama operasi, termasuk faktor elektrik, termal, mekanik, dan lingkungan, yang secara bertahap mendegradasi sistem isolasinya dari waktu ke waktu. Sistem isolasi, yang terutama terdiri dari minyak mineral dan kertas berbasis selulosa, sangat rentan terhadap deteriorasi yang dapat menyebabkan kegagalan katastrofik jika tidak dipantau dan dipelihara dengan baik ((IEC), 2013; Ahmed et al., 2025)(Society, 2007). Pengujian dielektrik memainkan peran penting dalam menilai kesehatan transformator dan memprediksi potensi kegagalan sebelum terjadi. Standar internasional seperti IEC 60422:2013 dan IEEE C57.106 menyediakan panduan komprehensif untuk mengevaluasi kondisi minyak isolasi dan isolasi padat melalui berbagai uji diagnostik. Pengujian ini mencakup tegangan tembus, kadar air, keasaman, faktor disipasi ($\tan \delta$), tegangan antarmuka, dan analisis gas terlarut, yang masing-masing memberikan wawasan spesifik tentang berbagai aspek degradasi isolasi [3][4]. Dalam konteks analisis kualitas dielektrik, beberapa parameter kunci dan persamaan matematika menjadi fundamental untuk evaluasi kondisi transformator. Faktor disipasi ($\tan \delta$) didefinisikan sebagai rasio antara arus resistif (IR) terhadap arus kapasitif (IC) dalam sistem isolasi, yang secara matematis dinyatakan sebagai: $\tan \delta = IR / IC = 1 / (2\pi fCR)$ (1) dimana f adalah frekuensi pengujian, C adalah kapasitansi isolasi, dan R adalah tahanan isolasi. Nilai $\tan \delta$ yang rendah mengindikasikan isolasi yang baik dengan kerugian dielektrik minimal.

Tegangan tembus (breakdown voltage) merupakan parameter penting yang menggambarkan kemampuan minyak isolasi untuk menahan tekanan elektrik sebelum terjadi breakdown. Berdasarkan standar IEC 60156, tegangan tembus dipengaruhi oleh beberapa faktor dan dapat dimodelkan melalui persamaan empiris: $BDV = k \times (d)^n \times f(\text{moisture, particles, temperature})$ (2) dimana k adalah konstanta material, d adalah jarak elektroda, n adalah eksponen empiris ($\approx 0,6-0,8$), dan f adalah fungsi yang bergantung pada kadar air, kontaminan partikel, dan suhu [6]. Indeks Kualitas Minyak Myers (Myers Oil Quality Index - OQIN) memberikan penilaian terintegrasi dari kondisi minyak transformator dengan menggabungkan tegangan antarmuka (IFT) dan bilangan asam (AN): $OQIN = IFT / AN$ (3) Nilai OQIN > 1500 mengindikasikan minyak baru dalam kondisi baik, OQIN antara 500-1500 menunjukkan kondisi layak operasi, OQIN 200-500 memerlukan perhatian khusus, dan OQIN < 200 mengindikasikan degradasi kritis yang memerlukan intervensi segera [7]. Indeks Polarisasi (PI) merupakan rasio tahanan isolasi pada 10 menit terhadap 1 menit yang mengindikasikan keberadaan kelembaban dalam isolasi: $PI = R_{10\text{min}} / R_{1\text{min}}$ (4) Nilai PI > 2,0 umumnya mengindikasikan isolasi yang baik dan kering, sementara nilai antara 1,0-2,0 menunjukkan keberadaan kelembaban atau kontaminasi [8]. Studi terkini telah menekankan pentingnya pendekatan diagnostik terintegrasi untuk penilaian kondisi transformator. Kadar air secara signifikan mempengaruhi tegangan tembus, dengan kekuatan dielektrik menurun substansial ketika kadar air melebihi 30 ppm dalam minyak.

Demikian pula, pengukuran tegangan antarmuka telah terbukti menjadi indikator awal oksidasi dan kontaminasi, dengan nilai di bawah 28 mN/m mengindikasikan degradasi kritis yang memerlukan intervensi segera [5]. Pada Gardu Induk Kisaran, PT. PLN (Persero) ULTG Kisaran mengoperasikan transformator daya 60 MVA (Trafo Daya 1) yang dioperasikan sejak tahun 2011, yang berfungsi sebagai komponen kritis dalam jaringan distribusi daya regional. Mengingat pentingnya strategis dan usia operasional lebih dari 13 tahun, penilaian kualitas dielektrik yang komprehensif sangat penting untuk memastikan operasi yang andal berkelanjutan dan untuk menetapkan baseline bagi strategi pemeliharaan prediktif. Meskipun jadwal pemeliharaan reguler dilakukan, analisis terperinci tentang sifat dielektrik dan korelasinya dengan standar internasional belum didokumentasikan secara ekstensif untuk transformator spesifik ini [6]. Penelitian ini

bertujuan untuk melakukan analisis kualitas dielektrik komprehensif transformator daya pada Gardu Induk Kisaran, mengevaluasi kondisinya terhadap standar IEC 60422:2013 dan PLN, menilai korelasi antara berbagai parameter dielektrik, dan memberikan rekomendasi untuk strategi pemeliharaan. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan terintegrasi dalam menganalisis beberapa parameter dielektrik secara simultan, membandingkan hasil dengan standar internasional dan nasional, serta memberikan wawasan spesifik untuk kondisi operasi tropis yang khas dari gardu induk Indonesia.

LANDASAN TEORI

Standar internasional menyediakan kerangka kerja komprehensif untuk mengevaluasi kualitas isolasi transformator. Standar IEC 60422:2013 menetapkan pedoman untuk minyak isolasi mineral dalam peralatan listrik, menspesifikasikan rentang yang dapat diterima untuk berbagai parameter (IEC, 2013). Menurut standar ini, tegangan tembus untuk transformator dalam layanan harus mempertahankan nilai minimum 30 kV untuk kondisi baik, dengan pembacaan antara 20-30 kV diklasifikasikan sebagai wajar, dan di bawah 20 kV dianggap buruk. Standar merekomendasikan pengambilan sampel yang lebih sering dan pemeriksaan silang dengan pengujian lain ketika nilai masuk kategori wajar, dan rekondisi minyak ketika nilai buruk diamati. Kadar air dalam minyak transformator merupakan parameter kritis yang mempengaruhi baik kekuatan dielektrik maupun laju penuaan isolasi (Mughayat et al., 2025) (Junaidi & Fahreza, 2025). Penelitian yang dipublikasikan dalam prosiding konferensi IEEE mengindikasikan bahwa kadar air dalam transformator berada sekitar 1% dalam isolasi cair dan 99% dalam isolasi kertas padat (Arsad et al., 2023). IEEE C57.106-2002 merekomendasikan bahwa kadar air tidak boleh melebihi batas tertentu: untuk transformator baru, kelembaban minyak harus di bawah 10 ppm setelah pemrosesan, sementara transformator yang telah beroperasi harus mempertahankan level di bawah 25-30 ppm untuk mencegah penuaan yang dipercepat. Faktor disipasi dikenal sebagai tan delta atau faktor daya, mengukur kerugian dielektrik dalam sistem isolasi. IEEE Standard C57.152-2013 menyatakan bahwa untuk transformator berisi minyak mineral dengan rating daya lebih besar dari 500 kVA, nilai faktor daya di bawah 0,5% (0,4% untuk transformator yang dinilai di atas 230 kV) mengindikasikan isolasi yang sehat [8]. Nilai antara 0,5% dan 1% biasanya menunjukkan isolasi yang menua atau memburuk yang memerlukan investigasi lebih lanjut.

Faktor disipasi sangat sensitif terhadap kontaminasi kelembaban, kontaminan polar, dan produk oksidasi (IEEE Power Engineering, 1995). Pengukuran faktor disipasi pada frekuensi variabel dapat mendeteksi fenomena penuaan lebih awal, memungkinkan tindakan korektif tepat waktu seperti perbaikan, perawatan minyak, atau prosedur pengeringan (Mughayat et al., 2025). Reliable Moisture Determination in Power Transformers mendemonstrasikan bahwa respons frekuensi dielektrik memberikan metode yang handal untuk penilaian kadar air dalam isolasi selulosa (Koch et al., 2008). Keasaman dan tegangan antarmuka adalah parameter yang berkaitan erat yang mengindikasikan level oksidasi dan kontaminasi dalam minyak transformator. ASTM D3487 menspesifikasikan tegangan antarmuka minimum 40 mN/m untuk minyak mineral baru. Untuk peralatan dalam layanan, nilai ≥ 32 mN/m dianggap dapat diterima, sementara pembacaan di bawah 28 mN/m tidak dapat diterima dan mengindikasikan kebutuhan untuk reklamasi minyak (Bakar & Islam, 2015). Studi yang dilakukan pada transformator PLN Indonesia telah mendemonstrasikan hubungan unik antara tegangan antarmuka dan bilangan asam, dengan deteriorasi yang dipercepat setelah level asam melebihi 0,1 mgKOH/g. Myers Oil Quality Index (OQIN), dihitung sebagai IFT dibagi bilangan asam, menyediakan alat penilaian terintegrasi, dengan nilai di atas 500 mengindikasikan kondisi minyak yang baik dan nilai di bawah 200 menunjukkan deteriorasi kritis (Elele, Ugochukwu, Azam Nekahi, 2022). Pengukuran tahanan isolasi dan indeks polarisasi memberikan informasi komplementer tentang kondisi isolasi padat. IEEE Standard 43-2013 merekomendasikan nilai tahanan isolasi minimum melebihi 100 M Ω , dengan indeks polarisasi (rasio tahanan 10 menit terhadap 1 menit) berfungsi sebagai indikator kelembaban dan kontaminasi

(Kamil et al., 2020). Nilai PI di atas 2,0 umumnya mengindikasikan isolasi yang baik dan kering, sementara nilai antara 1,0 dan 2,0 menunjukkan keberadaan kelembaban atau kontaminasi. IEEE Electrical Insulation Magazine berjudul "Mineral Insulating Oil in Transformers" menyatakan bahwa minyak mineral telah digunakan dalam transformator selama lebih dari satu abad dan tetap menjadi media isolasi dan pendingin yang paling banyak digunakan karena sifat dielektrik, termal, dan ekonomisnya yang unggul. Karakteristik penuaan minyak memerlukan pemantauan dan pemeliharaan berkelanjutan untuk memastikan keandalan transformator (Rahmaniar, Khairul, Agus Junaidi, 2025).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan diagnostik komprehensif yang menggabungkan pengujian kualitas minyak, pengukuran tahanan isolasi, dan pemantauan termal untuk mengevaluasi kualitas dielektrik transformator daya 60 MVA pada Gardu Induk Kisaran. Data dan spesifikasi transformator yang digunakan dalam penelitian ini disajikan secara detail untuk memastikan reproduktibilitas dan validitas analisis. Transformator yang menjadi objek penelitian adalah unit PAUWELS TRAFO dengan spesifikasi teknis sebagai berikut: daya terukur 60 MVA, tegangan primer maksimum 165.000 volt, tegangan sekunder 20.000 volt, jenis transformator tenaga, sistem pendinginan ONAN/ONAF (60/100%), tap changer jenis OLTC dengan 17 posisi tap, tahun komisioning 2011, dan berfungsi sebagai unit distribusi daya utama (Trafo Daya 1) pada Gardu Induk Kisaran.

Transformator beroperasi pada faktor beban rata-rata 33% dengan suhu minyak puncak 63°C dan suhu belitan 62°C pada kondisi ambient 30°C. Data operasional yang dikumpulkan mencakup: beban harian transformator 33% dari kapasitas nominal, suhu operasi top oil 63°C dan winding 62°C, histori tanpa gangguan atau trip dalam 4 tahun terakhir, record pemeliharaan terakhir pada 16 Juni 2025 (pemeliharaan 2 tahunan), tidak ada riwayat overload, kondisi gardu induk dengan kelembaban udara relatif tinggi, suhu ambient 30°C, kondisi cuaca tidak ekstrem, tingkat polusi rendah, dan sistem proteksi petir menggunakan Lightning Arrester serta Mesh Grid Grounding. Metodologi penelitian mengikuti diagram alir sistematis yang memastikan akuisisi data yang akurat dan analisis yang komprehensif. Gambar 1 menunjukkan alur penelitian dari persiapan hingga kesimpulan.



Gambar 1. Flowchat penelitian

Sampel minyak dikumpulkan mengikuti prosedur standar ASTM D923 untuk memastikan integritas sampel dan mencegah kontaminasi. Sampel diekstraksi dari katup sampling transformator selama kondisi operasi stabil, disimpan dalam botol kaca yang bersih dan kering, dan

ditransportasikan ke laboratorium dalam waktu 24 jam. Semua peralatan sampling dibersihkan dan dikeringkan secara menyeluruh sebelum digunakan untuk mencegah ingress kelembaban. Proses sampling dilakukan ketika transformator beroperasi pada sekitar 33% beban dengan suhu minyak sekitar 63°C. Pengujian tegangan tembus dilakukan sesuai standar IEC 60156 menggunakan elektroda spherical dengan jarak gap 2,5 mm dan laju kenaikan tegangan 2 kV/s. Analisis kadar air menggunakan metode titrasi Karl Fischer mengikuti standar IEC 60814, yang menyediakan pengukuran kadar air yang akurat dalam rentang 1-200 ppm. Penentuan bilangan asam mengikuti standar ASTM D974 menggunakan titrasi kolorimetrik dengan larutan kalium hidroksida. Pengukuran tegangan antarmuka dilakukan per ASTM D971 menggunakan metode cincin pada 25°C, mengukur gaya yang diperlukan untuk menarik cincin platinum melalui interface minyak-air. Pengujian flash point mengikuti ASTM D92 (metode Cleveland open cup) untuk menilai karakteristik keamanan kebakaran.

Pengukuran faktor disipasi dilakukan menggunakan peralatan uji kapasitansi dan faktor disipasi presisi pada tegangan uji 10 kV dan frekuensi daya (50 Hz). Pengujian dilakukan pada belitan primer, sekunder, dan tersier, serta pada setiap fase bushing primer. Setup pengujian mengikuti rekomendasi IEEE Standard 62-1995, dengan pengukuran dikoreksi ke suhu referensi 20°C menggunakan faktor koreksi yang sesuai. Pengujian tahanan isolasi menggunakan megohmmeter 5 kV, dengan pembacaan diambil pada 1 menit dan 10 menit untuk menghitung indeks polarisasi. Pengujian dilakukan antara belitan dan dari setiap belitan ke ground, mengikuti panduan IEEE Standard 43-2013. Data pemantauan termal dikumpulkan dari sensor suhu built-in transformator, termasuk indikator suhu minyak puncak dan indikator suhu belitan. Parameter operasi termasuk arus beban, suhu ambient, dan status sistem pendingin dicatat selama periode pengujian. Catatan pemeliharaan historis selama satu tahun terakhir ditinjau untuk menilai riwayat operasional transformator, termasuk setiap gangguan masa lalu, kondisi overload, dan intervensi pemeliharaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data Kualitas Minyak Transformator

Proses analisis data kualitas minyak transformator dilakukan melalui serangkaian perhitungan dan evaluasi terhadap standar yang berlaku. Setiap parameter dianalisis secara individual kemudian dievaluasi secara terintegrasi untuk menentukan status kondisi keseluruhan.

Analisis Tegangan Tembus (Breakdown Voltage)

Data hasil pengujian menunjukkan tegangan tembus sebesar 80,2 kV. Evaluasi terhadap standar IEC 60422:2013 dilakukan dengan membandingkan nilai terukur terhadap kriteria:

- Good (Baik): $BDV \geq 30$ kV
- Fair (Cukup): $20 \text{ kV} \leq BDV < 30$ kV
- Poor (Buruk): $BDV < 20$ kV

Hasil 80,2 kV menunjukkan transformator dalam kondisi "Good" dengan margin 50,2 kV di atas batas minimum, bahkan melebihi standar 70 kV untuk minyak baru yang telah diproses di laboratorium (IEC 60296:2020). Status: BAIK

Analisis Kadar Air (Moisture Content)

Hasil pengukuran kadar air menunjukkan 17,62 mg/kg. Evaluasi dilakukan terhadap beberapa standar: IEEE C57.106-2002 menetapkan:

- Minyak baru terproses: < 10 ppm
- Transformator dalam layanan: $< 25-30$ ppm
- Batas kritis: > 50 ppm (penuaan dipercepat) Dengan nilai 17,62 mg/kg,

Hasil analisis data kualitas minyak transformator secara keseluruhan disajikan dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil Pengujian Kualitas Minyak Transformator dan Evaluasi terhadap Standar

Parameter	Hasil Pengujian	IEC 60422:2013	IEEE/ASTM	Status
Tegangan Tembus (kV)	80,2	>30 (Baik)	>30 (ASTM D1816)	Baik
Kadar Air (mg/kg)	17,62	<30	<25-30 (IEEE C57.106)	Baik
Bilangan Asam (mgKOH/g)	0,108	<0,25	<0,20 (ASTM D974)	Baik
Tegangan Antarmuka (mN/m)	26,8	>25	>28 (ASTM D971)	Perhatian
Flash Point (°C)	148	>135	>145 (IEC 60296)	Baik
Warna	Kuning Muda	-	<2,0 (Visual)	Baik
OQIN (IFT/AN)	248,15	-	200-500 (Monitoring)	Perhatian

Analisis Data Faktor Disipasi dan Tahanan Isolasi

Pengujian faktor disipasi dan tahanan isolasi memberikan informasi krusial tentang kondisi isolasi padat transformator. Analisis data dilakukan melalui serangkaian perhitungan dan koreksi sesuai standar yang berlaku.

Table 2 Korelasi Antara Faktor Disipasi dan Indeks Polarisasi Analisis korelasi dilakukan untuk memvalidasi konsistensi data:

Belitan	$\tan \delta$ (%)	PI	Status	Korelasi
Primer	0,173	3,06	Konsisten	(rendah-tinggi)
Sekunder	0,190	1,48	Konsisten	(sedang-sedang)
Tersier	0,243	1,47	Konsisten	(tinggi-rendah)

Koefisien korelasi Pearson: $r = -0,96$ (korelasi negatif kuat) Interpretasi: $\tan \delta$ tinggi berkorelasi dengan PI rendah, mengkonfirmasi bahwa kelembaban adalah kontributor utama kerugian dielektrik. Korelasi kuat ($r > 0,9$) memvalidasi bahwa kedua metode pengukuran memberikan informasi konsisten tentang kondisi isolasi. Hasil analisis data faktor disipasi dan tahanan isolasi secara keseluruhan disajikan dalam Tabel 2 berikut:

Tabel 3. Hasil Pengujian Faktor Disipasi dan Tahanan Isolasi

Komponen	$\tan \delta$ (%)	R @ 10min (GΩ)	PI	Limit IEEE	Status
Belitan Primer	0,173	4,90	3,06	<0,5% / PI>2,0	Baik
Belitan Sekunder	0,190	3,41	1,48	<0,5% / PI>2,0	Baik
Belitan Tersier	0,243	3,40	1,47	<0,5% / PI>2,0	Baik
Bushing Fase R	0,271	-	-	<0,5%	Baik
Bushing Fase S	0,271	-	-	<0,5%	Baik
Bushing Fase T	0,247	-	-	<0,5%	Baik
Rata-rata Belitan	0,202	3,90	2,00	-	Baik
Rata-rata Bushing	0,263	-	-	-	Baik

Analisis komprehensif parameter dielektrik mengungkapkan bahwa transformator 60 MVA pada Gardu Induk Kisaran mempertahankan kondisi keseluruhan yang baik setelah 13 tahun beroperasi, meskipun parameter tertentu mengindikasikan tanda-tanda awal penuaan yang memerlukan pemantauan proaktif. Tegangan tembus yang sangat tinggi sebesar 80,2 kV, lebih dari dua kali lipat persyaratan minimum, menunjukkan bahwa minyak mempertahankan sifat isolasi yang sangat baik dan bebas dari kontaminasi kasar. Hasil ini menunjukkan praktik filtrasi dan pemeliharaan yang efektif, serta desain tersegel transformator yang mencegah ingress kontaminan.

Nilai tegangan antarmuka sebesar 26,8 mN/m memerlukan pemeriksaan lebih dekat, nilai ini melebihi minimum IEC 60422 sebesar 25 mN/m, nilai tersebut masuk dalam rentang peringatan menurut praktik terbaik industri. Sistem klasifikasi SDMyers menganggap nilai di bawah 28 mN/m sebagai "questionable", merekomendasikan reklamasi minyak ketika IFT turun di bawah 32 mN/m [9]. IFT yang relatif rendah ini, dikombinasikan dengan Myers OQIN sebesar 248,15, mengindikasikan bahwa produk oksidasi polar mulai terakumulasi dalam minyak.

IFT berfungsi sebagai indikator peringatan dini pembentukan prekursor lumpur, biasanya mendeteksi produk degradasi sebelum mereka mengendap dan mempengaruhi transfer panas atau sifat elektrik (Rosmeri Br Pakpahan, Siti Anisah, 2025). Korelasi antara IFT dan bilangan asam menunjukkan proses oksidasi yang sedang berlangsung, meskipun pada tingkat yang konsisten dengan penuaan normal untuk transformator dengan vintage ini.

Bilangan asam sebesar 0,108 mgKOH/g, meskipun dapat diterima, menunjukkan minyak telah berangkat dari nilai mendekati nol yang khas dari minyak baru. Trend menuju IFT yang lebih rendah dan keasaman yang lebih tinggi menunjukkan bahwa dalam 3-5 tahun ke depan, perawatan reklamasi minyak mungkin menjadi perlu untuk mengembalikan sifat dan memperpanjang umur layanan. Penelitian menunjukkan bahwa deteriorasi mempercepat dengan cepat setelah bilangan asam melebihi 0,25 mgKOH/g, dan pengendapan lumpur biasanya dimulai pada 0,1 mgKOH/g.

Hasil faktor disipasi memberikan wawasan berharga tentang kondisi isolasi padat di lokasi berbeda dalam transformator. Peningkatan progresif dalam tan delta dari primer (0,173%) melalui sekunder (0,190%) ke belitan tersier (0,243%) menunjukkan distribusi kelembaban yang tidak seragam atau penuaan termal diferensial. Belitan tersier, biasanya beroperasi pada tegangan yang lebih rendah tetapi berpotensi mengalami stres termal yang lebih tinggi karena lokasi fisiknya, menunjukkan kerugian dielektrik tertinggi.

Pola ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa kelembaban bermigrasi ke daerah yang lebih dingin selama thermal cycling, dan bahwa belitan paling dalam mungkin mengalami sirkulasi minyak yang kurang efektif [13]. Meskipun variasi ini, semua nilai tetap nyaman dalam batas 0,5% yang ditentukan oleh IEEE C57.152, mengindikasikan tidak ada kekhawatiran segera.

Faktor disipasi bushing rata-rata 0,263% mencerminkan karakteristik penuaan khas dari bushing kertas impregnasi minyak yang terpapar variasi lingkungan. Konsistensi antar fase (berkisar hanya dari 0,247% hingga 0,271%) mengindikasikan kondisi seragam dan tidak adanya cacat bushing individual. Bushing umumnya menunjukkan nilai tan delta sedikit lebih tinggi daripada belitan internal karena paparan yang lebih besar terhadap thermal cycling, radiasi matahari, dan kelembaban atmosfer.

Pengukuran tahanan isolasi yang melebihi 3,4 GΩ untuk semua belitan, dikombinasikan dengan tegangan tembus yang tinggi, mengkonfirmasi integritas struktural sistem isolasi selulosa. Namun, disparitas dalam indeks polarisasi—3,06 untuk primer versus 1,48 dan 1,47 untuk sekunder dan tersier—memerlukan interpretasi yang cermat. Nilai PI di atas 2,0 umumnya mengindikasikan isolasi yang sangat kering dan bersih, sementara nilai antara 1,0 dan 2,0 menunjukkan keberadaan kelembaban atau kontaminasi.

Nilai PI yang lebih rendah untuk belitan sekunder dan tersier berkorelasi dengan faktor disipasi mereka yang lebih tinggi dan menunjukkan bahwa area ini mengandung kelembaban relatif lebih banyak daripada belitan primer (Ariz et al., n.d.). Distribusi kelembaban ini, meskipun tidak mencapai tingkat kritis, mengindikasikan bahwa manajemen kelembaban tetap penting untuk mempertahankan integritas isolasi jangka panjang. Griffin (1995) menyatakan bahwa kelembaban dalam transformator dapat memiliki efek negatif yang signifikan pada breakdown voltage dan mempercepat degradasi isolasi kertas.

Performa termal menunjukkan praktik pembebanan konservatif yang menguntungkan untuk umur panjang transformator. Beroperasi pada faktor beban 33% dengan suhu 63°C (top oil) dan 62°C (winding) memberikan margin termal substansial di bawah batas tipikal 95°C untuk transformator berpendingin ONAN. Penelitian telah menunjukkan bahwa setiap pengurangan 6°C dalam suhu operasi kira-kira menggandakan harapan hidup isolasi menurut hubungan Arrhenius.

Pada tingkat pembebanan dan suhu saat ini, isolasi kertas transformator harus mengalami penuaan termal minimal, dengan estimasi konsumsi kehidupan isolasi normal kurang dari 0,05% per tahun (Tharo et al., 2025). Operasi konservatif ini mengimbangi hingga batas tertentu efek penuaan kelembaban dan oksidasi, berkontribusi pada kondisi keseluruhan yang baik yang diamati dalam pengujian.

Kombinasi hasil diagnostik memungkinkan penilaian holistik kesehatan transformator. Korelasi silang parameter mengungkapkan pola yang konsisten: tegangan tembus tinggi dan kadar air rendah mengkonfirmasi penyegelan efektif; IFT dan bilangan asam moderat mengindikasikan penuaan normal tanpa oksidasi berlebihan; faktor disipasi yang meningkat pada belitan tertentu berkorelasi dengan indeks polarisasi yang lebih rendah, menunjukkan keberadaan kelembaban terlokalisasi; dan kondisi termal yang stabil mendukung penuaan yang dipercepat minimal (Siagian, 2025).

Analisis terintegrasi ini menunjukkan nilai protokol pengujian komprehensif daripada mengandalkan parameter individual, sebagaimana direkomendasikan oleh standar IEC dan IEEE [2]. Membandingkan hasil ini dengan data yang dipublikasikan untuk transformator serupa memberikan konteks tambahan. Studi tentang keandalan transformator pada gardu induk 150kV yang baru dioperasikan melaporkan tegangan tembus biasanya berkisar dari 60-75 kV setelah beberapa tahun operasi. Transformator Kisaran dengan 80,2 kV melebihi rentang ini, mengindikasikan pemeliharaan kualitas minyak yang superior.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Analisis kualitas dielektrik komprehensif terhadap transformator daya 60 MVA pada Gardu Induk Kisaran 150kV menunjukkan bahwa unit tersebut tetap dalam kondisi operasional yang baik setelah 13 tahun beroperasi. Semua parameter kritis memenuhi atau melampaui persyaratan minimum yang ditetapkan oleh IEC 60422:2013 dan standar IEEE, dengan tegangan tembus 80,2 kV, kadar air 17,62 mg/kg, bilangan asam 0,108 mgKOH/g, dan faktor disipasi di bawah 0,5%. Nilai tahanan isolasi transformator yang sangat tinggi melebihi 3,4 GΩ dan performa termal yang stabil mengkonfirmasi integritas sistem isolasi minyak maupun padat.

Identifikasi tahap awal terjadi penuaan transformator yang memerlukan pemantauan dan manajemen proaktif. Tegangan antarmuka sebesar 26,8 mN/m mendekati ambang batas peringatan, dan Myers Oil Quality Index sebesar 248,15 menunjukkan akumulasi produk oksidasi. Variasi dalam faktor disipasi dan indeks polarisasi di seluruh belitan mengindikasikan distribusi kelembaban yang tidak seragam. Meskipun temuan ini tidak memerlukan tindakan korektif segera,

temuan tersebut menetapkan data baseline penting untuk analisis trending dan penjadwalan pemeliharaan prediktif.

Saran

Berdasarkan hasil analisis diatas beberapa rekomendasi muncul untuk mengoptimalkan strategipemeliharaan transformator. Pertama, implementasikan pemantauan kualitas minyak semi-tahunan yang berfokus pada IFT dan bilangan asam untuk melacak trend oksidasi. Kedua, pertimbangkan perawatan reklamasi minyak dalam 2-3 tahun ke depan ketika IFT mendekati 24-25 mN/m atau bilangan asam melebihi 0,15 mgKOH/g. Ketiga, lakukan pengujian faktor disipasi follow-up secara tahunan untuk memantau pola penuaan isolasi, terutama pada belitan tersier. Keempat, pertahankan praktik pembebanan konservatif saat ini karena margin termal secara signifikan memperpanjang umur isolasi. Kelima, investigasi distribusi kelembaban melalui pengujian tambahan atau pemantauan kelembaban online untuk mengoptimalkan intervensi pengeringan jika diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

- (IEC), I. E. C. (2013). International Standard IEC 60422. www.iec.ch/Searchpub
- Ahmed, R., Liu, J., Zhang, M., & Fan, X. (2025). Reliability And Condition Assessment Techniques For Oil-Immersed Power Equipment Under Varying Temperatures: A Review. *Energy Reports*, 14(July), 1896–1916. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.08.016>
- Ariz, A., Siagian, P., & Erpandi, M. (N.D.). Analisis Instalasi Sistem Kelistrikan Dan Kualitas Isolasi Kabel Sementara : Kesenjangan Antara Perencanaan Dan Pengerjaan Pada Proyek Konstruksi Pt . Growth Asia. 13(3).
- Arsad, S. R., Ker, P. J., Jamaludin, Z., Choong, P. Y., Lee, H. J., Thivyanathan, V. A., Zaidey, Y., & Ghazali, Y. (2023). Water Content In Transformer Insulation System : A Review On The Detection And Quantification Methods.
- Bakar, N. A., & Islam, S. (2015). A New Technique To Measure Interfacial Tension Of Transformer Oil Using Uv-Vis Spectroscopy. *Ieee Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation*, 22(2), 1275–1282. <https://doi.org/10.1109/Tdei.2015.7076831>
- Elele, Ugochukwu, Azam Nekahi, A. A. 1. (2022). Towards Online Ageing Detection In Transformer Oil :A Review. *Mdpi*, 22(7923). <https://doi.org/10.3390/S22207923>
- IEEE Power Engineering. (1995). *Ieee Guide For Diagnostic Field Testing Of Electric Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, And Reactors.*
- Junaidi, A., & Fahreza, I. (2025). Development Of Simulation-Based Transmission Line Learning Media : Case Study Of Gmr-Gmd Model On Voltage Regulation And Transmission Line Efficiency. 17, 1833–1843. <https://doi.org/10.35445/Alishlah.V17i2.7116>
- Kamil, I., Indarto, A., Magister Terapan Teknik Elektro, P., Elektro, T., Negeri Jakarta, P., & Profga Siwabessy, J. (2020). Optimasi Umur Transformator Melalui Peningkatan Kinerja Pendingin Minyak Transformator Dengan Menggunakan Metode “Smart Cooling.” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, 5(2020).
- Koch, M., Krüger, M., & Properties, A. D. (2008). A Fast And Reliable Dielectric Diagnostic Method To Determine Moisture In Power Transformers. *International Conference On Condition Monitoring And Diagnosis.*
- Mughayat, T., Falah, S., Gunawan, H., & Siagian, P. (2025). The Effect Of Coil Winding Replacement On The Performance Of A 200 Kva Transformer (Case Study At Pt . Razza Prima Trafo). 13(05), 1527–1536. <https://doi.org/10.58471/Infokum.V13i05>

- Rahmaniar, Khairul, Agus Junaidi, I. F. (2025). Analisis Dan Perhitungan Transmisi Listrik: Pendekatan Gmr Dan Gmd.
- Rosmeri Br Pakpahan, Siti Anisah, A. F. (2025). A Voltage Analysis Of The Transmission Network In The Aceh Subsystem During The Energization Of The 275 Kv Nagan – Sigli Sutet Using Digsilent. *Journal Of Computer Science, Information Technology And Telecommunication Engineering (Jcositte)*, 6(1), 846–853.
<https://doi.org/10.30596/jcositte.V6i1.23678>
- Saragih, A. S., & Siagian, P. (2025). An Optimization Of Early Detection Monitoring Systemdisturbances In Distribution Transformer Internet Based Ofthings (lot). 5(05), 1740–1752. <https://doi.org/10.58471/jms.V5i05>
- Siagian, P. (2025). The Role Of Synchronous Reluctance Machines In The Energy Transition : Challenges And Opportunities For Future Electric Vehicles. 2nd International Conference On Islamic Community Studies (Icics), 2847–2855.
- Society, I. P. E. (2007). *Ieee Guide For Acceptance And Maintenance Of Insulating Oil In Equipment* (Vol. 2006, Issue June).
- Tharo, Z., Anisah, S., & Liano, M. R. (2025). Workshop On Safe Electrical Installation Design Based On Puil 2000 At Smk Negeri 5 Medan. 2(1).