

Analysis of Oil-Penetrating Voltage Insulation Resistance on Transformers at PT TPPI Tuban

Analisis Tahanan Isolasi Tegangan Tembus Minyak pada Transformator Berdasarkan Pemeliharaan di PT TPPI Tuban

Nabiilah Widya Liliani Eka Saputri¹, Royb Fatkhur Rizal², Misbahul Munir³

^{1,2,3}Teknologi rekayasa pembangkit energi, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang

E-mail: ¹fina.alfu.2205317@students.um.ac.id, ²fatkhurrizal.fv@um.ac.id,

³misbahul.munir.fv@um.ac.id

Abstract – Analysis of the insulation resistance and breakdown voltage of oil in transformer 800-XFMR-002A at PT Trans-Pacific Petrochemical Indotama (TPPI) Tuban aims to assess the reliability of the insulation system to support the continuity of electricity supply in the petrochemical industry sector. Tests were conducted based on IEEE standards for polarity index as well as IEC 60156 and IEC 60814 for liquid insulating oil quality. The results show that the insulation parameters are still within safe limits as per the standards, reflecting the effectiveness of the company's preventive maintenance programmer. However, the quality of insulating oil is affected by several factors, such as equipment age, high operating temperatures, and particle and water vapor contamination. Therefore, conducting periodic tests and inspections is necessary as part of a predictive maintenance strategy to anticipate the degradation of insulation function and prevent potential system disruptions. These findings emphasize the importance of systematically managing transformer condition based on measurable and continuous diagnostic data.

Keywords — Insulation Resistance, Oil Breakthrough Voltage, Transformer.

Abstrak – Analisis terhadap tahanan isolasi dan tegangan tembus minyak pada transformator 800-XFMR-002A di PT Trans-Pacific Petrochemical Indotama (TPPI) Tuban bertujuan untuk menilai keandalan sistem isolasi guna mendukung kontinuitas pasokan listrik di sektor industri petrokimia. Pengujian dilakukan berdasarkan standar IEEE untuk indeks polaritas serta IEC 60156 dan IEC 60814 untuk kualitas minyak isolasi cair. Hasil menunjukkan bahwa parameter isolasi masih berada dalam batas aman sesuai standar, mencerminkan efektivitas program pemeliharaan preventif perusahaan. Meskipun demikian, kualitas isolasi minyak dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti usia peralatan, suhu operasi tinggi, dan kontaminasi partikel maupun uap air. Oleh karena itu, pelaksanaan pengujian dan inspeksi berkala sangat diperlukan sebagai bagian dari strategi pemeliharaan prediktif untuk mengantisipasi degradasi fungsi isolasi dan mencegah potensi gangguan sistem. Temuan ini menegaskan pentingnya pengelolaan kondisi transformator secara sistematis berbasis data diagnostik yang terukur dan berkelanjutan.

Kata Kunci — Tahanan Isolasi, Tegangan Tembus Minyak, Transformator.

1. PENDAHULUAN

Keandalan sistem tenaga listrik sangat bergantung pada kinerja komponen peralatan pendukung, terutama sistem isolasi yang berperan dalam mencegah terjadinya gangguan listrik selama pengoperasian. Secara umum, kerusakan pada peralatan listrik selama pengoperasian disebabkan oleh kegagalan sistem isolasi dalam menjalankan fungsinya sebagai media isolator. Dalam konteks ini, minyak isolasi memegang peranan yang sangat penting pada peralatan sistem tenaga listrik, khususnya pada transformator dan pemutus sirkuit (*circuit breaker*) [1-3]. Minyak isolasi memiliki kerapatan yang

lebih tinggi dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga mampu mengisi celah atau ruang isolasi secara merata [4-6]. Namun demikian, minyak isolasi rentan terhadap kontaminasi oleh partikel-partikel padat dan uap air, yang dapat menurunkan kemurnian serta kinerja isolasinya.

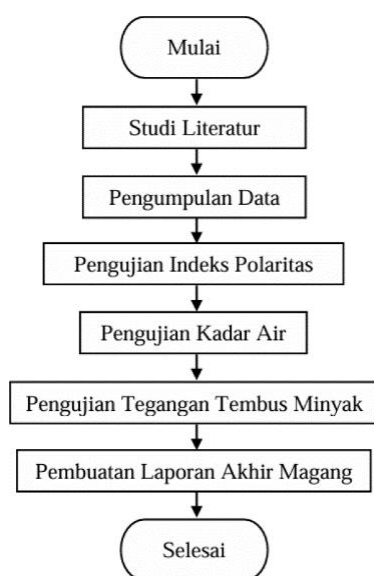
Sehubungan dengan peran penting minyak isolasi tersebut, performa dan keandalannya akan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional serta faktor lingkungan selama masa pakai peralatan. Seiring dengan bertambahnya masa operasional, kondisi isolasi pada transformator berpotensi mengalami degradasi. Penurunan kualitas isolasi ini dapat menyebabkan kegagalan fungsi operasional serta kerusakan pada transformator, yang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti tegangan lebih, kelembapan, suhu operasi yang tinggi, dan kerusakan mekanis [7]. Untuk memastikan kinerja dan kualitas isolator tetap optimal, diperlukan serangkaian uji kelayakan, antara lain *Polarization Index Test* untuk isolator padat, serta uji tegangan tembus untuk isolator cair. Khusus pada isolator cair seperti minyak transformator, waktu atau lama penyimpanan dapat mempengaruhi kualitas daya isolasinya.

Tingginya kebutuhan bahan isolasi cair berbasis minyak mineral untuk transformator telah mendorong berbagai penelitian eksperimental yang mengeksplorasi potensi minyak nabati, seperti minyak biji Ketapang, sebagai alternatif bahan isolasi cair pada sistem tenaga listrik [8]. Dalam upaya memastikan mutu dan keandalan isolator cair tersebut, pengujian terhadap minyak transformator dilaksanakan dengan mengacu pada standar internasional. Prosedur pengujian tegangan tembus minyak trafo dilakukan berdasarkan ketentuan dalam IEC 60156, sedangkan penilaian kelayakan hasil pengujian kadar air dalam minyak isolasi mengikuti acuan standar IEC 60814 yang secara khusus mengatur kriteria mutu dan batas nilai karakteristik minyak isolasi cair.

Sebagai bagian dari upaya pengembangan penelitian di bidang energi dan sistem isolasi cair berbasis minyak, berbagai institusi dan perusahaan industri strategis turut berperan dalam mendukung peningkatan kapasitas sumber daya manusia di sektor ini. Salah satunya adalah PT Trans-Pacific Petrochemical Indotama (TPPI) Tuban, perusahaan strategis yang bergerak di bidang pengilangan minyak bumi, industri kimia dan energi, serta memiliki peran signifikan dalam mendukung ketahanan energi nasional.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sistem isolasi pada Transformator 800-XFMR-002A di PT TPPI Tuban. Evaluasi dilakukan melalui pengujian tahanan isolasi menggunakan metode Indeks Polaritas (mengacu pada standar IEEE), serta analisis kualitas minyak isolasi berdasarkan standar IEC 60156 dan IEC 60814. Harapannya, hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam mendukung upaya pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) pada sistem transformator, serta menjadi acuan teknis bagi pelaku industri dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem isolasi pada peralatan kelistrikan.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan seperti terlihat pada Gambar 1. Metode pengumpulan data yang dilakukan pada penelitian ini melalui dua pendekatan, yaitu studi literatur di mana melibatkan penelusuran referensi berupa buku teknis, standar internasional (seperti IEEE, IEC 60156 dan IEC 60814), serta jurnal ilmiah nasional maupun internasional yang relevan dengan parameter tahanan isolasi dan kualitas minyak transformator. Untuk menilai kelayakan nilai Indeks Polaritas (PI) yang diperoleh, acuan standar dari IEEE digunakan sebagai pedoman interpretasi hasil pengujian, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Standar IEEE

No	Indeks Polaritas (PI)	Keterangan	Rekomendasi
1	<1	Berbahaya	Perlu investigasi
2	1-1,1	Jelek	Perlu investigasi
3	1,1 – 1,25	Dipertanyakan	Uji kadar minyak, uji tangen delta
4	1,25 – 2,0	Baik	-
5	>2	Sangat baik	-

Kemudian metode yang kedua dilakukan dengan mengakses data sekunder yang telah tersedia di perusahaan, seperti hasil pemeliharaan Transformator 800-XFMR-002A di PT Trans-Pacific Petrochemical Indotama (TPPI) Tuban. Parameter yang diukur meliputi nilai Indeks Polaritas (PI), kadar air (*moisture content*) dalam minyak isolasi, serta nilai tegangan tembus (*Breakdown Voltage*/BDV) minyak.

PI merupakan rasio antara nilai tahanan isolasi yang diukur pada menit ke-10 terhadap nilai pada menit pertama. Nilai PI digunakan untuk menilai kualitas, serta kestabilan sistem isolasi secara lebih komprehensif dalam pengujian jangka waktu yang diperpanjang. Rumus perhitungan indeks polaritas (PI) yaitu disajikan melalui Persamaan 1 sebagai berikut:

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- PI : Indeks Polaritas
- R₁₀ : Pengujian saat menit ke-10
- R₁ : Pengujian saat menit ke-1

Water Content atau kadar air transformator adalah jumlah air yang tercampur atau terlarut dalam minyak isolasi transformator. Berdasarkan standar IEC 60814, nilai maksimum kadar air (*water content*) yang diperbolehkan dalam minyak transformator umumnya adalah 30ppm (mg/kg minyak) untuk minyak transformator baru atau dalam kondisi standar operasional. Nilai ini dianggap sebagai batas aman untuk menjaga kualitas isolasi minyak dan mencegah penurunan kekuatan dielektrik yang dapat menyebabkan kegagalan trafo. Ketika nilai kadar air pada minyak isolasi melebihi batas yang ditentukan, maka perlu dilakukan treatment atau purifikasi. Purifikasi sendiri bertujuan untuk menurunkan kadar air serta uap air yang terkandung dalam minyak isolasi transformator [10]. Adapun rumus yang digunakan dalam pengujian kadar air minyak transformator sebagaimana disajikan oleh Persaman 2 yaitu:

$$Kadar\ air\ (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- m* : Massa botol timang sebelum berisi minyak trafo (gram)
- m₁* : Massa botol timang ketika berisi minyak trafo (gram)
- m₂* : Massa botol timang ketika berisi minyak trafo yang telah dipanaskan (gram)

Pengujian tegangan tembus (*Breakdown Voltage*/BDV) minyak merupakan salah satu metode pengujian yang digunakan untuk menilai kualitas dari minyak isolasi dalam transformator. Tujuan dari dilakukannya pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan sebuah tegangan [11]. Nilai tegangan tembus yang dianggap layak dapat berbeda-beda tergantung jenis

dan desain transformator yang digunakan. Oleh karena itu, saat melakukan pengujian ini sangat penting untuk mengikuti standar dan panduan yang berlaku agar hasilnya sesuai dengan kebutuhan transformator tersebut. Pada Transformator 800-XFMR-002A, untuk pengujian tegangan tembus minyaknya mengacu pada standar IEC 60156 [12].

Seluruh data hasil pengujian tersebut dianalisis secara kuantitatif menggunakan metode perbandingan terhadap standar yang berlaku, untuk menilai kondisi aktual sistem isolasi transformator. Data-data ini menjadi dasar dalam penyusunan laporan teknis sebagai bahan evaluasi keandalan peralatan listrik di lingkungan industri petrokimia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan dari penelitian ini diperoleh data-data yang berkaitan dengan tujuan dari penelitian ini yaitu pengujian tahanan isolasi yang dilakukan di PT Trans-Pacific Petrochemical Indotama (TPPI) Tuban. Data yang diambil meliputi tahanan isolasi belitan, pengujian kadar air minyak, serta pengujian tegangan tembus minyak. Setelah data terkumpul akan dianalisis untuk mengetahui apakah transformator tersebut masih layak dioperasikan.

3.1. Pengujian Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk mengevaluasi kondisi sistem isolasi, baik antar lilitan maupun antara lilitan dengan ground pada suatu peralatan listrik. Prosedur pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan tegangan searah (DC) secara konstan, kemudian memantau respon nilai tahanan isolasi secara berkelanjutan dalam periode waktu tertentu [9]. Salah satu parameter penting dalam pengujian ini adalah Indeks Polaritas (PI), Parameter ini menjadi indikator penting dalam menentukan kelayakan operasional dan kebutuhan tindakan preventive maintenance pada peralatan listrik.

Berdasarkan dari pengukuran yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil pengujian yang dapat dilihat pada tabel 1. Hasil pengujian menunjukkan nilai hambatan pada ketiga pengujian dari *Low Voltage – Ground* (LV – GROUND), *High Voltage- Ground* (HV – GROUND) dan *High Voltage- Low Voltage* (HV – LV) pada kurun waktu satu menit dan sepuluh menit. Nilai indek polarisasi antara ketiga pengukuran menunjuka nilai IP yang sangat baik dimana mempunyai nilai dibawah 2,8%. Berdasarkan persamaan 1 nilai tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

- a. HV – GROUND

$$IP = \frac{3990}{2780} = 1,44$$
- b. LV – GROUND

$$IP = \frac{2940}{1050} = 2,80$$
- c. HV – LV

$$IP = \frac{3160}{1580} = 2,00$$

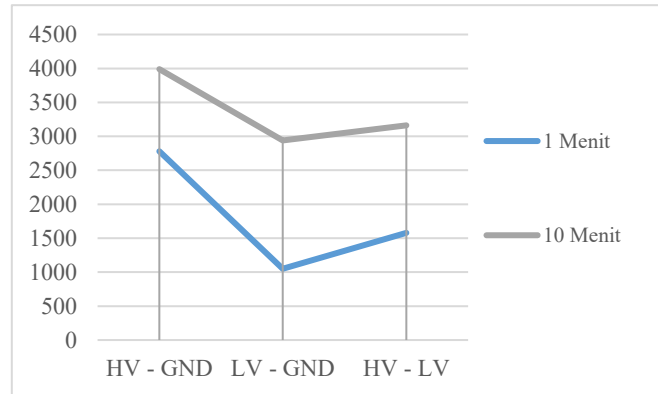
Setelah mendapatkan hasil dari perhitungan di atas, maka dapat kita sajikan data hasil pengujian Indeks Polaritas tersebut pada tabel 1.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Indeks Polaritas

No	Kegiatan	Hasil Tes		
		1 Menit (MΩ)	10 Menit (MΩ)	PI (%)
1	HV-GRD	2780	3990	1,44
2	LV - GND	1050	2940	2,80
3	HV - LV	1580	3160	2,00

Dari hasil pengujian Indeks Polaritas pada Transformator 800-XFMR-002A yang disajikan oleh Tabel 2 menunjukkan bahwa semua parameter masih berada dalam kondisi layak. Nilai PI antara HV-GRD sebesar 1,44 menunjukkan isolasi cukup baik, meskipun berada di batas bawah standar IEEE

yang merekomendasikan $PI \geq 2$. Sebaliknya, nilai PI antara LV-GRD sebesar 2,80 dan HV-LV sebesar 2,00 menunjukkan kondisi isolasi yang baik hingga sangat baik. Secara keseluruhan, nilai $PI > 1$ menandakan sistem isolasi masih berfungsi dengan baik, namun perlu pemantauan berkala terutama pada sisi HV-GRD.



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian PI

Gambar menunjukkan perbandingan nilai tahanan isolasi pada menit ke-1 dan menit ke-10 untuk tiga konfigurasi pengujian: HV-GND, LV-GND, dan HV-LV. Terlihat bahwa pada setiap konfigurasi, nilai tahanan menit ke-10 selalu lebih tinggi dibandingkan menit ke-1, yang mengindikasikan bahwa sistem isolasi masih mampu membentuk polarisasi dengan baik. Peningkatan paling signifikan terjadi pada konfigurasi LV-GND, dari sekitar 1.050 M Ω menjadi 2.940 M Ω , menghasilkan nilai PI tertinggi sebesar 2,80. Sementara itu, HV-GND dan HV-LV menunjukkan peningkatan yang lebih moderat, masing-masing dengan nilai PI sebesar 1,44 dan 2,00. Pola grafik ini mendukung kesimpulan bahwa sistem isolasi masih berfungsi dengan baik, meskipun sisi HV-GND memerlukan perhatian lebih lanjut karena nilainya mendekati batas bawah standar kelayakan.

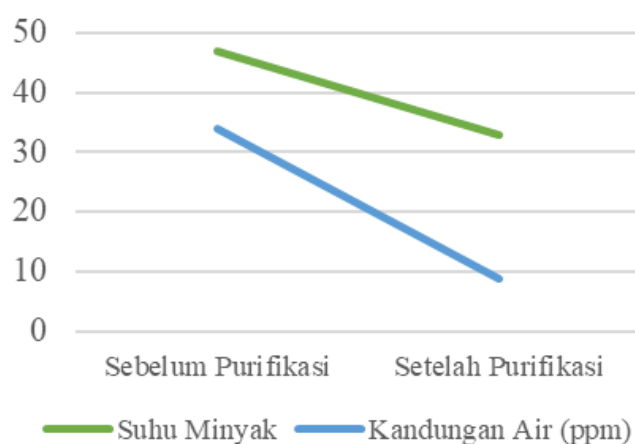
3.2. Pengujian Kadar Air

Selain pengujian nilai Indeks Polaritas, dilakukan pula pengujian kadar air dalam minyak transformator untuk menilai tingkat kejenuhan kelembapan yang dapat mempengaruhi kinerja isolasi. Adapun data hasil pengujian kadar air Transformator 800-XFMR-002A yang telah dilakukan sebelumnya disajikan melalui Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Kadar Air

No	Jenis Sampel	Suhu Minyak (C°)	Kadar Air (ppm)	IEC 60814
1	Sebelum Purifikasi	47	34	<30
2	Setelah Purifikasi	33	8,9	<30

Berdasarkan hasil pengujian kadar air pada minyak transformator sebelum proses purifikasi yang disajikan oleh Tabel 3, diperoleh nilai kadar air sebesar 34 ppm yang dimana nilai tersebut melebihi batas maksimum standar IEC 60814. Pada kondisi ini menunjukkan bahwa kadar air dalam minyak transformator cukup tinggi, sehingga dapat menurunkan kekuatan dielektrik dan meningkatkan resiko terjadinya kegagalan isolasi pada transformator. Setelah dilakukan proses purifikasi, kadar air dalam minyak transformator berubah menjadi 8,9 ppm sehingga telah memenuhi persyaratan standar internasional tersebut.



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Kadar Air

Pada Gambar 3, khususnya garis grafik berwarna biru, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan yang sangat signifikan antara kondisi kadar air sebelum dilakukan purifikasi dan setelah dilakukan purifikasi. Hasil ini membuktikan bahwa proses purifikasi efektif dalam menurunkan kandungan air berlebih pada minyak transformator, sekaligus meningkatkan kembali kualitas media isolasinya.

3.3. Pengujian Tegangan Tembus

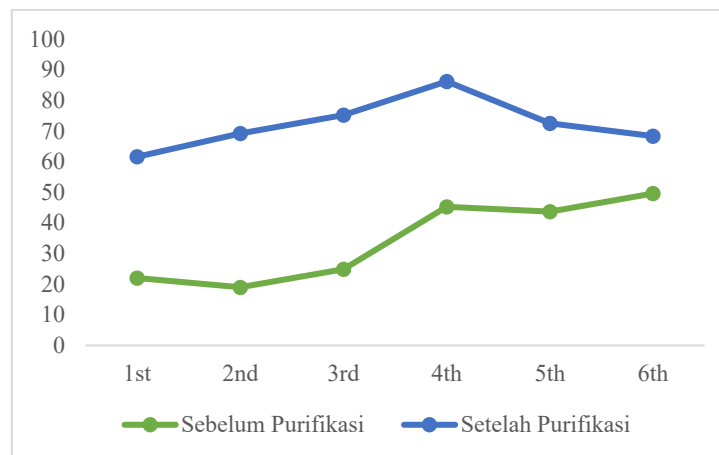
Untuk mengetahui sejauh mana kemampuan minyak transformator dalam menahan tegangan listrik tanpa mengalami kerusakan, dilakukan pengujian terhadap tegangan tembus sebelum dan setelah proses purifikasi. Hasil lengkap dari pengujian tersebut disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil Pengujian Tegangan Tembus

Urutan Pengujian	Sebelum Purifikasi (kV)	Setelah Purifikasi (kV)
1	22,0	61,6
2	19,0	69,2
3	24,9	75,0
4	45,3	86,2
5	43,7	72,5
6	49,6	68,3
Rata-Rata	34,0	72,1

Dari hasil data pengujian tegangan tembus melalui pengujian *Break Down Voltage* (BDV) seperti yang disajikan melalui Tabel 4, hasil pengujian yang dilakukan sebelum *treatment* (purifikasi) akan memiliki nilai *breakdown* atau kegagalan isolasi yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil pengujian setelah dilakukan purifikasi. Hasil pengujian yang dilakukan sebanyak 6 kali memiliki nilai rata-rata 34,0kV untuk pengujian sebelum purifikasi, dan memiliki nilai rata-rata 72,1 kV setelah dilakukan purifikasi. Dengan hasil ini, sesuai dengan batas nilai menurut standar IEC 60156, pengujian tegangan tembus masih menunjukkan kategori baik jika nilai rata-rata > 40 kV.

Gambar 4 menyajikan grafik hasil pengujian Breakdown Voltage (BDV) pada minyak transformator sebelum dan setelah dilakukan proses purifikasi, yang menggambarkan peningkatan signifikan pada kemampuan dielektrik minyak setelah perawatan.



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian BDV

Pada Gambar 4 menunjukkan perbandingan hasil pengujian tegangan tembus minyak sebelum dilakukan purifikasi dan setelah purifikasi pada Transformator 800-XFMR-002A dengan dilakukan pengujian sebanyak 6 kali berturut-turut. Dapat dilihat pada garis berwarna hijau bahwa sebelum purifikasi nilai tegangan tembus yang diperoleh pada pengujian ke-1 hingga ke-3 berada di bawah angka 40kV, yang berarti tidak memenuhi standar IEC 60156. Lalu pada garis berwarna biru di seluruh pengujiannya berada di atas angka 50kV, yang menandakan bahwa hasil pengujian tegangan tembus setelah dilakukan purifikasi memenuhi standar yang berlaku.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian pada Transformator 800-XFMR-002A di PT TPPI Tuban, diketahui bahwa nilai tahanan isolasi, kandungan air, dan tegangan tembus minyak berada di bawah standar saat kegiatan pemeliharaan berlangsung. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem isolasi memerlukan tindakan perbaikan, khususnya pada media minyak isolasinya. Setelah proses purifikasi, hasil pengujian ulang menunjukkan bahwa seluruh parameter kembali berada dalam rentang standar yang ditetapkan oleh perusahaan, sehingga sistem isolasi dinyatakan layak untuk operasi yang aman dan andal. Penurunan kualitas minyak isolasi disebabkan oleh beberapa faktor, seperti usia peralatan, suhu operasional tinggi, serta kontaminasi partikel dan uap air. Dengan demikian, pelaksanaan pengujian dan pemeliharaan rutin secara berkala sangat diperlukan sebagai bagian dari strategi preventive maintenance guna menjaga keandalan transformator dan mencegah terjadinya gangguan operasional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rosyidi, N., & P, D. (2021). Pengujian Tegangan Tembus pada Minyak Trafo. Jurnal Teknik Elektro, 29(3), 499-510.
- [2] Alghifari, A., Putra, A. P., Pratama, A. F., & Sujito. (2023). Analisis Pengujian Kualitas Tahanan Isolasi pada Transformator Tegangan 150 KV Bay Gunung Sari 2 di Gardu Induk Waru. Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro, 13(1), 20-24. ISSN: 2301-6949.
- [3] Anindyanoro, M. (2017). Analisa Tahanan Isolasi pada Transformor Tenaga di Gardu Induk Wonogiri. Universitas Muhammadiyah Surakarta.

- [4] Maharani, C., Nrratha, I. M. A., Nugroho, S. I., & Hasibuan, A. (2024). Pengujian Tegangan Tembus Minyak Trafo pada Bay Trafo 1 di GI 150 kV Tanjung. *JITET*, 12(3).
- [5] Arinsya, G. (2023). Analisa Tahanan Isolasi Pada Transformator Daya 150/30 KV Gardu Induk Padang Luar PT PLN (Persero) Bukittinggi. *Indonesian Journal of Engineering and Technology (INAJET)*, 6(1).
- [6] Widyastuti, C., Oktaria, H., & Tasdik, D. (2018). Pengaruh Kadar Air Terhadap Tegangan Tembus. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 10(2), 129-136
- [7] Siburian, J. M., & Buulolo, J. T. M. (2021). Studi Analisis Ketahanan Isolasi pada Transformator di Gardu Induk Labuhan. *Jurnal Darma Agung*, 29(3), 499-510.
- [8] Nrratha, I. M. A., Kamilatin, J., & Warindi, W. (2021). Uji Kelayakan Minyak Biji Ketapang sebagai Bahan Isolasi Cair Transformator. *Dielektrika*, 8(1), 21.
- [9] Aisteti Yani, A., Margono, & Hasto, K. (2020). Analisa Tahanan Isolasi Transformator 3 di PT.PLN (Persero) Gardu Induk 150 KV Pati. *NCIET*, 1, 141-149.
- [10] Lutfi, M., Fitrizawati, & Hartono. (2022). Analisa Kandungan Air Dan Tegangan Tembus Minyak Transformator Berdasarkan Pemeliharaan Di PT PLTU Cilacap. *Jurnal ITEKS STT Wiworotomo*
- [11] Widyastuti, C., & Wisnuaji, R. A. (2019). Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator di PT. PLN (Persero) Bogor. *Elektron: Jurnal Ilmiah*, 11(2), 75-78.
- [12] IEC. (2018). IEC 60156:2018 - Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method. International Electrotechnical Commission.