

## **Analisis Kerusakan Transformator Distribusi 250 kVA Merek UNINDO Menggunakan Pendekatan Multi-Parameter TTR, IR, dan Pemeriksaan Visual**

**Dimas Airlangga Nugraha<sup>1</sup>, Linda Faridah<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Jl. Mugasari, Kecamatan Tamansari, Kota Tasikmalaya, Jawa Barat, 46196, Indonesia.

Korespondensi: [227002064@student.unsil.ac.id](mailto:227002064@student.unsil.ac.id)

### **ARTICLE HISTORY**

*Received: 15-05-2026*

*Revised: 22-06-2026*

*Accepted: 22-06-2026*

### **Abstrak**

Transformator distribusi berperan penting dalam menjamin kontinuitas penyaluran energi listrik, sehingga diperlukan metode diagnosis yang akurat untuk mendeteksi kerusakan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi transformator distribusi 250 kVA merek UNINDO menggunakan pendekatan multi-parameter melalui pengujian *Transformer Turns Ratio* (TTR), *Insulation Resistance* (IR), dan pemeriksaan visual. Pengujian TTR dilakukan pada tujuh posisi tap, sedangkan pengujian IR menggunakan tegangan 5 kV. Hasil menunjukkan bahwa fasa A dan B masih berada dalam batas toleransi  $\pm 1\%$ , sementara fasa C tidak menunjukkan pembacaan rasio yang mengindikasikan open winding. Nilai tahanan isolasi yang sangat rendah (0,02-0,05 M $\Omega$ ) menunjukkan degradasi isolasi yang signifikan. Temuan ini diperkuat oleh pemeriksaan visual yang menunjukkan kerusakan fisik dan indikasi *overheating* pada lilitan fasa C. penelitian ini menegaskan bahwa integrasi metode TTR, IR, dan pemeriksaan visual mampu meningkatkan akurasi diagnosis kerusakan transformator serta mendukung pengambilan Keputusan pemeliharaan berbasis kondisi di lapangan.

**Kata kunci:** Transformator Distribusi, *Transformer Turns Ratio* (TTR), *Insulation Resistance* (IR), Pemeriksaan Visual.

## **Damage Analysis of a 250 kVA Distribution Transformer UNINDO Brand Using a Multi-Parameter Approach TTR, IR, and Visual Inspection**

### **Abstract**

*Distribution transformers play an important role in ensuring the continuity of electrical energy distribution, so an accurate diagnostic method is needed to detect damage. This study aims to analyze the condition of a 250 kVA UNINDO brand distribution transformer using a multi-parameter approach through Transformer Turns Ratio (TTR), Insulation Resistance (IR), and visual inspection tests. TTR testing was carried out at seven tap positions, while IR testing used a voltage of 5 kV. The results showed that phases A and B were still within the tolerance limit of  $\pm 1\%$ , while phase C did not show a ratio reading indicating open winding. Very low insulation resistance values (0.02-0.05 M $\Omega$ ) indicated significant insulation degradation. These findings were reinforced by visual inspections*

*that showed physical damage and indications of overheating in the phase C winding. This study confirmed that the integration of TTR, IR, and visual inspection methods was able to improve the accuracy of transformer damage diagnosis and support condition-based maintenance decision making in the field.*

**Key words:** *Distribution Transformer, Transformer Turns Ratio (TTR), Insulation Resistance (IR), Visual Inspection.*

## 1. Pendahuluan

Transformator distribusi merupakan peralatan vital dalam sistem tenaga listrik yang menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah sebelum disalurkan ke konsumen. Keandalan transformator distribusi sangat menentukan kontinuitas dan kualitas penyaluran energi listrik. Dalam operasinya, transformator dipengaruhi faktor-faktor seperti pembebanan berlebih, penuaan isolasi, kualitas minyak isolasi yang menurun, serta kondisi lingkungan, yang jika tidak terpantau dapat menyebabkan gangguan hingga kerusakan. Kerusakan transformator distribusi dapat menimbulkan gangguan pasokan listrik, kerugian operasional, dan biaya pemeliharaan tinggi, sehingga penilaian kondisi yang akurat menjadi sangat penting untuk kontinuitas sistem tenaga listrik.

Pembebanan berlebih merupakan faktor dominan yang mempercepat degradasi transformator, karena meningkatkan temperatur kerja dan mempercepat penuaan isolasi, sehingga menurunkan umur transformator. Estimasi umur transformator distribusi dapat dianalisis berdasarkan profil pembebanan tahunan, semakin tinggi pembebanan, semakin cepat penurunan umur peralatan [1], [2]. Kondisi ini juga terbukti berdampak signifikan terhadap performa transformator di lapangan [3].

Seiring bertambahnya usia, sistem isolasi padat dan cair mengalami degradasi akibat temperatur, kandungan air, dan produk degradasi kimia. Degradasi isolasi merupakan indikator utama kondisi dan sisa umur transformator [4], [5], sementara perubahan karakteristik minyak transformator menjadi parameter penting penilaian kondisi [6].

Metode penilaian kondisi (*condition assessment*) yang akurat sangat diperlukan, termasuk pengujian tahanan isolasi, pengujian rasio lilitan (*Turns Ratio Test/TTR*), dan pengujian kualitas minyak. Pendekatan multi-parameter, termasuk logika fuzzy, meningkatkan akurasi penilaian [7], [8]. Nilai tahanan isolasi yang rendah dapat mengindikasikan degradasi isolasi, kontaminasi, atau kelembapan [9], [10], [11], [12]. Pengujian TTR penting untuk mendeteksi ketidaksesuaian rasio lilitan [13], sedangkan pemeriksaan visual membantu mendeteksi degradasi fisik yang tidak terpantau pengujian listrik, seperti kebocoran minyak, perubahan warna isolasi, atau *overheating* [5], [7], [14]. Gangguan belitan, seperti hubung singkat antar-lilitan atau *open winding*, dapat dianalisis melalui kombinasi pengujian listrik dan analisis respon transformator [15].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan diagnosis terintegrasi berbasis pengujian lapangan langsung dengan mengombinasikan hasil pengujian TTR, IR, dan verifikasi fisik melalui pemeriksaan visual. Pendekatan ini tidak

hanya mengidentifikasi indikasi gangguan secara individual, tetapi juga mengkorelasikan hasil antar-parameter untuk meningkatkan akurasi diagnosis kerusakan internal transformator distribusi secara komprehensif.

## 2. Metode

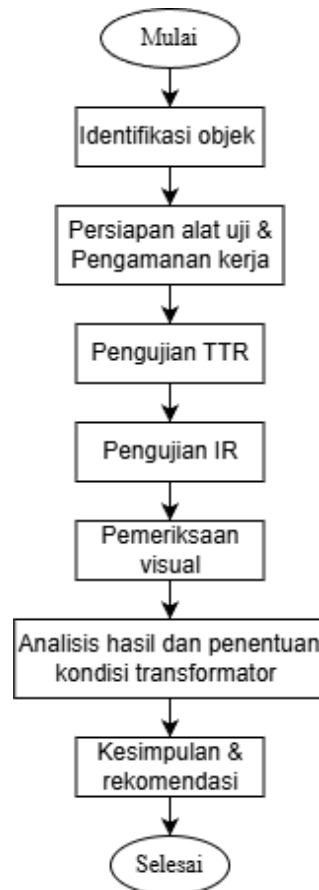
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan analisis kuantitatif untuk memperoleh data empiris mengenai kondisi aktual transformator distribusi. Seluruh pengujian dilakukan secara langsung pada transformator distribusi 250 kVA merek Unindo yang memiliki konfigurasi belitan  $\Delta$ -Y dan tegangan nominal 25 kV/400 V. Pemilihan objek penelitian ini didasarkan pada temuan lapangan yang menunjukkan adanya indikasi penurunan performa berupa penyimpangan rasio tegangan serta penurunan kualitas isolasi, sehingga diperlukan pemeriksaan diagnostik yang lebih mendalam.

Evaluasi kondisi transformator dilakukan menggunakan tiga metode utama, yaitu *Transformer Turns Ratio* (TTR), *Insulation Resistance* (IR), dan pemeriksaan visual. Pengujian TTR digunakan untuk menilai kesesuaian perbandingan lilitan antar fasa pada berbagai posisi *tap changer*, sedangkan pengujian IR dilakukan untuk mengevaluasi kualitas sistem isolasi transformator. Pemeriksaan visual berfungsi sebagai metode verifikasi fisik untuk mengonfirmasi indikasi gangguan yang diperoleh dari hasil pengujian listrik. Data kuantitatif hasil pengujian dianalisis dengan cara membandingkannya terhadap nilai standar teknis yang berlaku untuk menentukan tingkat keandalan transformator serta mengidentifikasi potensi kerusakan pada sistem lilitan maupun isolasi.

Seluruh rangkaian penelitian dilaksanakan di PT Hariff Power Services Bandung, sebuah perusahaan yang bergerak di bidang pengujian dan pemeliharaan peralatan kelistrikan. Metodologi penelitian dirancang agar menghasilkan data teknis yang akurat, dapat direplikasi, serta memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi operasional transformator distribusi.

Prosedur pengujian disusun berdasarkan acuan IEEE Std C57 [16] dan IEEE Std 43 [17] serta pedoman teknis internal PT Hariff Power Services. Tahapan penelitian dilaksanakan melalui enam langkah utama sebagai berikut (Ditunjukkan pada Gambar 1).

- 1) Identifikasi objek. Pemeriksaan awal dilakukan terhadap kondisi fisik transformator untuk memastikan tidak terdapat kerusakan mekanis maupun potensi gangguan keselamatan sebelum pengujian. Aspek yang diperiksa meliputi kondisi bushing, terminal, level minyak, sistem pendingin, serta fungsi *tap changer*. Data spesifikasi nameplate dicatat sebagai data awal untuk keperluan perbandingan hasil pengujian.
- 2) Persiapan pengujian. Sebelum pengujian dilakukan, seluruh peralatan ukur dikalibrasi untuk menjamin akurasi hasil pengukuran. Pengujian dilaksanakan pada kondisi transformator tidak bertegangan (*off-load*) dan seluruh sistem kerja di-grounding sesuai prosedur keselamatan kerja. Nilai standar pembandingan untuk parameter TTR dan IR ditetapkan berdasarkan standar IEEE dan referensi teknis perusahaan.



Gambar 1. Diagram alur penelitian.

- 3) Pengujian *Transformer Turn Ratio* (TTR). Pengujian TTR bertujuan untuk menentukan kesesuaian rasio lilitan antara sisi primer dan sekunder transformator. Alat TTR tester dihubungkan sesuai dengan konfigurasi belitan  $\Delta$ -Y, kemudian dilakukan pengukuran pada setiap posisi tap changer (tap 1 hingga tap 7). Nilai hasil pengujian dibandingkan dengan rasio nominal yang tercantum pada nameplate transformator. Berdasarkan IEEE Std C57.152, batas toleransi deviasi rasio lilitan ditetapkan sebesar  $\pm 1\%$  dari nilai nominal [16]. Penyimpangan di luar batas toleransi tersebut mengindikasikan adanya potensi gangguan pada belitan atau mekanisme tap changer.
- 4) Pengujian *Resistansi Isolasi* (IR). Pengujian tahanan isolasi dilakukan menggunakan *Insulation Resistance Tester* (Megger) dengan tegangan uji sebesar 5 kV. Pengukuran dilakukan antara terminal tegangan menengah-tegangan rendah (TM-TR), terminal tegangan menengah-badan transformator (TM-Body), serta terminal tegangan rendah-badan transformator (TR-Body). Setiap pengujian dilakukan selama satu menit sesuai dengan IEEE Std 43 [17]. Hasil pengukuran dibandingkan dengan batas minimum tahanan isolasi sebesar 1 M $\Omega$  sebagai kriteria kelayakan kondisi isolasi transformator.
- 5) Pemeriksaan visual. Pemeriksaan visual dilakukan setelah pengujian listrik sebagai tahapan verifikasi kondisi fisik transformator. Pemeriksaan difokuskan pada kondisi lilitan, material isolasi, serta minyak pendingin transformator. Indikasi kerusakan fisik seperti perubahan warna isolasi, lilitan terbakar, putus,

meleleh, atau tanda-tanda overheating digunakan sebagai bukti pendukung dalam analisis kerusakan transformator.

- 6) Analisis hasil pengujian. Data hasil pengujian TTR dan IR dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan nilai pengukuran terhadap standar acuan IEEE dan standar teknis perusahaan. Apabila ditemukan penyimpangan dari nilai standar, dilakukan analisis kualitatif lanjutan untuk mengidentifikasi penyebab gangguan berdasarkan hasil pemeriksaan visual, kondisi lingkungan operasi, serta histori pembebanan transformator.



Gambar 2. Spesifikasi nameplate transformator

### 3. Hasil dan Pembahasan

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini disusun untuk mengidentifikasi dan menganalisis kondisi transformator distribusi 250 kVA secara menyeluruh. Tahapan penelitian diawali dengan pengujian kelistrikan untuk mengevaluasi karakteristik utama transformator, kemudian dilanjutkan dengan pemeriksaan fisik sebagai verifikasi terhadap hasil pengujian. Seluruh hasil yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara komprehensif untuk menentukan kondisi aktual transformator serta mengidentifikasi jenis dan penyebab gangguan yang terjadi. Tahapan metode penelitian secara garis besar meliputi:

- 1) Pengujian Transformer Turns Ratio (TTR) dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian rasio lilitan antara sisi primer dan sekunder transformator distribusi 250 kVA pada setiap posisi *tap changer*.

Tabel 1. Nilai Standar TTR

Tegangan Primer	Nilai TTR Standar
21.000	90,82
20.500	88,497
20.000	86,542
19.500	84,405
19.000	82,232
18.500	80,272
18.000	77,915

Hasil pengujian pada masing-masing fasa ditunjukkan pada tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Pengujian TTR**

Fasa A		Fasa B		Fasa C	
Tap 1	90,8	Tap 1	90,9	Tap 1	Tidak terdeteksi
Tap 2	88,5	Tap 2	88,7	Tap 2	Tidak terdeteksi
Tap 3	86,5	Tap 3	86,5	Tap 3	Tidak terdeteksi
Tap 4	84,4	Tap 4	84,4	Tap 4	Tidak terdeteksi
Tap 5	82,2	Tap 5	82,2	Tap 5	Tidak terdeteksi
Tap 6	80,0	Tap 6	80,1	Tap 6	Tidak terdeteksi
Tap 7	77,8	Tap 7	77,9	Tap 7	Tidak terdeteksi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada sebagian besar tap, rasio lilitan masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan, yaitu  $\pm 1\%$  dari nilai nominal sesuai dengan IEEE Std C57.152 [16]. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa deviasi di bawah 1 % masih dapat diterima dan tidak menunjukkan indikasi kerusakan pada transformator distribusi [18]. Namun demikian, pada fasa C teridentifikasi adanya penyimpangan rasio yang signifikan melebihi batas toleransi tersebut.

Penyimpangan rasio lilitan pada fasa C mengindikasikan adanya gangguan pada sistem belitan atau mekanisme *tap changer*. Kondisi ini dapat dikaitkan dengan kemungkinan terjadinya *open winding* atau degradasi sambungan belitan, yang menyebabkan rasio tegangan aktual tidak lagi sesuai dengan spesifikasi nameplate. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Tenbohlen et al. yang menyatakan bahwa ketidaksesuaian rasio lilitan merupakan salah satu indikator awal terjadinya gangguan internal pada transformator daya [3]. Dengan demikian, hasil pengujian TTR memberikan indikasi kuat bahwa transformator mengalami gangguan pada salah satu fasanya yang berpotensi menurunkan kinerja dan keandalannya.

## 2) Pengujian Tahanan Isolasi (*Insulation Resistance*)

Pengujian tahanan isolasi dilakukan untuk menilai kondisi sistem isolasi transformator, baik antara terminal tegangan menengah dan tegangan rendah maupun terhadap badan transformator.

**Tabel 3. Hasil Pengujian Tahanan Isolasi**

TM-Body	TR-Body	TM-TR
0.02 M $\Omega$	0.05 M $\Omega$	0.05 M $\Omega$

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan Insulation Resistance Tester dengan tegangan uji 5 kV, diperoleh nilai tahanan isolasi yang sangat rendah, yaitu berada pada rentang 0,02-0,05 M $\Omega$ . Nilai tahanan isolasi tersebut berada jauh di bawah batas minimum 1 M $\Omega$  yang direkomendasikan oleh IEEE Std 43, sehingga menunjukkan bahwa kondisi isolasi transformator telah mengalami degradasi yang signifikan [17]. Rendahnya nilai IR ini mengindikasikan adanya kerusakan pada isolasi padat maupun cair, yang dapat disebabkan oleh penuaan material, kontaminasi minyak, kelembapan, atau efek termal akibat pembebanan berlebih. Nilai IR yang sangat rendah ini juga konsisten dengan indikasi gangguan internal yang terdeteksi melalui pengujian TTR, sehingga kecil kemungkinan bahwa hasil tersebut disebabkan oleh kesalahan pengukuran.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Islam et al. [6] dan Kaliappan dan Rengaraj [5] yang menyatakan bahwa degradasi isolasi merupakan faktor utama dalam penurunan keandalan dan umur transformator. Dengan demikian, pengujian tahanan isolasi memberikan bukti kuat bahwa transformator berada dalam kondisi tidak layak operasi dan memerlukan tindakan perbaikan atau penggantian.

### 3) Pemeriksaan Visual

Pemeriksaan visual dilakukan sebagai metode verifikasi fisik terhadap indikasi gangguan yang diperoleh dari hasil pengujian TTR dan IR.



**Gambar 3. Kondisi belitan fasa C setelah dilakukan pembongkaran**

Hasil pemeriksaan menunjukkan adanya perubahan warna isolasi lilitan, indikasi overheating lokal, serta kerusakan fisik pada bagian belitan tertentu. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa transformator telah mengalami tekanan termal yang signifikan selama masa operasinya.

Indikasi kerusakan fisik berupa perubahan warna isolasi dan tanda-tanda terbakar pada lilitan memperkuat dugaan terjadinya *open winding* pada salah satu fasa. Menurut Tenbohlen et al. [3], fenomena *localized overheating* pada belitan sering kali berkaitan dengan gangguan internal yang tidak dapat sepenuhnya terdeteksi hanya melalui pengujian listrik, sehingga pemeriksaan visual menjadi bagian penting dalam proses diagnosis transformator.

#### 4) Analisis Komprehensif Kondisi Transformator

Berdasarkan hasil pengujian TTR, pengujian tahanan isolasi, dan pemeriksaan visual, dapat disimpulkan bahwa transformator distribusi 250 kVA yang diuji mengalami kerusakan internal yang signifikan. Ketidaksesuaian rasio lilitan pada fasa C, nilai tahanan isolasi yang sangat rendah, serta temuan kerusakan fisik pada lilitan menunjukkan adanya gangguan serius pada sistem belitan dan isolasi transformator.

Integrasi ketiga metode pengujian tersebut memberikan gambaran kondisi transformator secara menyeluruh dan saling mendukung satu sama lain. Pendekatan multi-parameter ini sejalan dengan rekomendasi diagnostik transformator modern yang menekankan pentingnya kombinasi pengujian listrik dan inspeksi fisik untuk meningkatkan keandalan hasil diagnosis [3], [19]. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa metode TTR, IR, dan pemeriksaan visual merupakan kombinasi yang efektif dalam menganalisis kerusakan transformator distribusi di lapangan.

### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian *Transformer Turns Ratio* (TTR), tahanan isolasi (*Insulation Resistance/IR*), dan pemeriksaan visual terhadap transformator distribusi 250 kVA di PT Hariff Power Services Bandung, dapat disimpulkan bahwa transformator mengalami kerusakan internal yang signifikan pada salah satu fasanya. Hasil pengujian TTR menunjukkan bahwa fasa A dan fasa B masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan, sedangkan pada fasa C tidak diperoleh pembacaan rasio lilitan pada seluruh posisi *tap changer*, yang mengindikasikan adanya gangguan serius pada sistem belitan. Hasil pengujian tahanan isolasi menunjukkan nilai yang sangat rendah dan berada di bawah batas minimum yang direkomendasikan oleh standar IEEE, sehingga menandakan terjadinya degradasi isolasi yang signifikan. Temuan tersebut diperkuat oleh hasil pemeriksaan visual yang menunjukkan adanya perubahan warna isolasi dan kerusakan fisik pada lilitan fasa C. Integrasi hasil pengujian dan pemeriksaan visual menunjukkan bahwa kerusakan utama terletak pada sistem belitan dan isolasi fasa C. Secara praktis, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi pengujian *Transformer Turns Ratio* (TTR), *Insulation Resistance* (IR), dan pemeriksaan visual dapat digunakan sebagai metode diagnosis yang efektif untuk mendeteksi kerusakan transformator secara lebih akurat. Pendekatan ini dapat diterapkan dalam kegiatan pemeliharaan berbasis kondisi untuk membantu teknisi dalam pengambilan Keputusan, mengurangi Risiko kegagalan sistem, serta meningkatkan keandalan operasi transformator distribusi di lapangan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Harif Power Services atas izin dan fasilitas yang diberikan sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar. Terima kasih juga kepada dosen pembimbing dan semua pihak yang telah memberikan dukungan dan masukan selama penelitian. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

### Daftar Pustaka

- [1] K. Ridwan, “Analisa Perkiraan Umur Transformator Distribusi Berdasarkan Pembebanan Dengan Metode Tingkat Tahunan,” *J. Fokus Elektroda Energi List. Telekomun. Komputer, Elektron. dan Kendali*, vol. 2, no. 4, pp. 1–5, 2017, doi: 10.33772/jfe.v2i4.7899.
- [2] C. N. Anshar, “Studi Analisa Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 KV Akibat Pembebanan,” *J. Tek. Komputer, Agroteknologi Dan Sains*, vol. 1, no. 2, pp. 247–253, 2023, doi: 10.56248/marostek.v1i2.26.
- [3] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M. H. Samimi, and M. Siegel, “Diagnostic measurements for power transformers,” *Energies*, vol. 9, no. 5, pp. 1–25, 2016, doi: 10.3390/en9050347.
- [4] C. Ranga, A. K. Chandel, and R. Chandel, “Condition assessment of power transformers based on multi-attributes using fuzzy logic,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 8, pp. 983–990, 2017, doi: 10.1049/iet-smt.2016.0497.
- [5] G. Kaliappan and M. Rengaraj, “Aging assessment of transformer solid insulation: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 47, no. xxxx, pp. 272–277, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.301.
- [6] M. M. Islam, G. Lee, and S. N. Hettiwatte, “A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers,” *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 2, pp. 581–605, 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0532-4.
- [7] N. Mavrikakis and K. Siderakis, “Effects of Aging on Condition of In-Service Transformer Oil: The Study Case of 150 kV/20 kV Substations in Crete,” *Energies*, vol. 18, no. 18, pp. 1–19, 2025, doi: 10.3390/en18184900.
- [8] S. Suganda and A. Muis, “Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator Daya,” *Sinusoida*, vol. 23, no. 2, pp. 1–10, 2021, doi: 10.37277/s.v23i2.1114.
- [9] N. Hudayani, I. Hasanuddin, A. Hafid, and Z. Zainuddin, “Analysis of Transformer Oil Quality at PT. PLN ULTG PANAKKUKANG,” *Multidisiplin Saintek*, vol. 01, no. 03, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal.warunayama.org/kohesi>
- [10] M. M. Sanaky, “Jurnal Simetrik,” *J. Simetrik*, vol. 11, no. 1, pp. 432–439, 2021.
- [11] 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.
- [12] C. P. Maharani, I. M. A. Nrartha, S. I. Nugroho, and A. Hasibuan, “Pengujian Tegangan Tembus Minyak Trafo,” vol. 12, no. 3, pp. 248–256, 2024.
- [13] M. H. Indra, Y. S. H, and I. Priyadi, “Pengujian Tahanan Isolasi Pada Transformator Distribusi 160,” ... *J. Ilm. Bid. ...*, vol. 12, no. 2, pp. 8–15, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.unib.ac.id/jamplifier/article/view/25274%0Ahttps://ejournal.unib.ac.id/jamplifier/article/download/25274/11758>
- [14] M. Shofiyuddin and A. Wisaksono, “Testing of The Insulation Resistance and Turns Test Ratio (TTR) of The Distribution Transformers at PT PLN (Pesero) UP3 Sidoarjo,” *Procedia Eng. Life Sci.*, vol. 7, pp. 339–344, 2024, doi: 10.21070/pels.v7i0.1478.
- [15] C. Hu *et al.*, “Localization and Diagnosis of Short-Circuit Faults in Transformer Windings Injected by Damped Oscillatory Wave,” *Energies*, vol. 17, no. 24,

- 2024, doi: 10.3390/en17246259.
- [16] T. Committee, I. Power, and E. Society, *IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors IEEE Power and Energy Society*, vol. 2013. 2013.
- [17] E. Machinery and P. Engineering, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery," vol. 2000, 2006.
- [18] N. Rosyidi *et al.*, "ANALISIS PENGUKURAN TRANSFORMATOR 400 KVA MENGGUNAKAN ON LOAD TAP CHARGER," vol. XXIV, pp. 1–8, 2022.
- [19] P. Mwinisin, A. Mingotti, L. Peretto, R. Tinarelli, and M. Tefferi, "Electrical Diagnosis Techniques for Power Transformers: A Comprehensive Review of Methods, Instrumentation, and Research Challenges," *Sensors*, vol. 25, no. 7, pp. 1–38, 2025, doi: 10.3390/s25071968.