

Analysis of Power Transformer Insulation Resistance Using the Applied Voltage test Method

[Analisis Resistansi Isolasi Transformator Daya Menggunakan Metode Uji Tegangan Terapan]

Mohammad Feri¹⁾, Jamaaluddin^{2*)}, Shazana Dhiya Ayuni

¹⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

^{2*)}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

³⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: jamaaluddin@umsida.ac.id

Abstract. *This study investigates insulation resistance failures in newly manufactured power transformers at PT XYZ, focusing on applying the Applied Voltage Test as the main method to detect potential insulation failures. Unlike previous studies that focus more on transformers that have been in operation for a long time, this study identifies that insulation failure in new transformers can be caused by production factors, such as insulation paper degradation due to exposure to temperature and humidity during the manufacturing process. The research was conducted through direct observation, structured interviews with testing technicians, and a comparative analysis of two transformer units. The test results showed significant differences between the two units, where Transformer Unit 2 failed the test due to insulation paper degradation, which was confirmed through physical inspection. This study emphasizes the importance of the Applied Voltage Test in identifying insulation defects at an early stage and shows that the quality of materials and production processes greatly affect the reliability of transformers. The findings make new contributions to understanding the causes of insulation failures in new transformers, as well as provide practical recommendations for optimization of test methods and improvement of production quality, thereby minimizing the risk of insulation failures in new transformers. Furthermore, this research highlights the significance of early detection through Polarization Index testing, which can serve as an indicator of insulation degradation. These insights are crucial for improving quality control in transformer manufacturing and ensuring the reliability of power distribution systems.*

Keywords - Applied Voltage Test, Insulation Resistance, Insulation Failure, Power Transformers, Transformers Testing.

Abstrak. *Abstrak – Penelitian ini mengkaji kegagalan resistansi isolasi pada trafo daya baru yang diproduksi di PT XYZ, dengan fokus pada penerapan Uji Tegangan Terapan sebagai metode utama untuk mendeteksi potensi kegagalan isolasi. Berbeda dengan studi sebelumnya yang lebih fokus pada trafo yang telah beroperasi dalam waktu lama, studi ini mengidentifikasi bahwa kegagalan isolasi pada trafo baru dapat disebabkan oleh faktor produksi, seperti degradasi kertas isolasi akibat paparan suhu dan kelembaban selama proses pembuatan. Penelitian ini dilakukan melalui pengamatan langsung, wawancara terstruktur dengan teknisi pengujian, dan analisis perbandingan dua unit transformator. Hasil pengujian menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua unit, di mana Unit Trafo 2 gagal dalam pengujian akibat degradasi kertas isolasi, yang dikonfirmasi melalui inspeksi fisik. Studi ini menekankan pentingnya Uji Tegangan Terapan dalam mengidentifikasi cacat isolasi pada tahap awal dan menunjukkan bahwa kualitas bahan dan proses produksi sangat mempengaruhi keandalan trafo. Temuan ini memberikan kontribusi baru dalam memahami penyebab kegagalan isolasi pada trafo baru, serta memberikan rekomendasi praktis untuk optimasi metode uji dan peningkatan kualitas produksi, sehingga meminimalkan risiko kegagalan isolasi pada trafo baru. Selain itu, penelitian ini menyoroti pentingnya deteksi dini melalui pengujian Indeks Polarisasi, yang dapat berfungsi sebagai indikator degradasi isolasi. Temuan ini sangat penting untuk meningkatkan kontrol kualitas dalam produksi transformator dan menjamin keandalan sistem distribusi tenaga listrik.*

Kata Kunci - Uji Tegangan Terapan, Resistansi Isolasi, Kegagalan Isolasi, Transformator Tenaga, Pengujian Transformator.

I. PENDAHULUAN

Isolasi merupakan faktor penting bagi transformator, isolasi transformator adalah bahan dielektrik yang berfungsi untuk memisahkan dua bagian yang berada di bawah tegangan, misalnya antara kumparan primer dan sekunder dengan tangki transformator [1][2]. Ada dua jenis isolasi pada transformator, yaitu kertas isolasi dan minyak isolasi, namun

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

kegagalan resistansi isolasi ini dapat mempengaruhi kinerja transformator dan menyebabkan kerusakan yang tidak diinginkan. Fenomena kegagalan resistansi isolasi merupakan faktor kompleks yang dapat dipengaruhi oleh beberapa hal seperti suhu, kelembaban lingkungan, kualitas bahan baku yang digunakan, desain, dan proses produksi yang buruk [3].

Kualitas resistansi isolasi dapat ditentukan dengan melakukan beberapa uji, terdapat dua jenis uji untuk isolasi, yaitu uji destruktif dan uji non-destruktif [4]. Uji destruktif meliputi uji tegangan terapan dan uji impuls petir, uji-uji ini berfokus pada ketahanan isolasi terhadap tegangan tinggi yang dapat mempengaruhi kinerja transformator, sedangkan uji non-destruktif meliputi uji indeks polarisasi, delta tangent, dan juga uji tegangan breakdown yang berfokus pada kualitas kertas isolasi dan minyak isolasi [5][6][7][8][9][10].

Siburian menyoroti pentingnya karakterisasi dan pengujian transformator daya untuk memastikan kelayakan operasional, serta keandalan dan kualitas transformator sebelum didistribusikan kepada konsumen seperti PT PLN (Persero) dan perusahaan lain [11][12]. Kemudian penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Handayani tentang pengujian transformator MVA 33.42/0.575 KV memberikan wawasan tentang kegagalan yang dapat memengaruhi kinerja transformator selama penggunaan [13]. Solusi untuk masalah ini adalah perlu melakukan pengujian trafo daya termasuk resistansi isolasi sehingga kondisinya dapat diketahui dan kualitas serta keandalannya dapat dijamin sejak awal.

Data dari pengujian internal di PT XYZ selama tiga bulan terakhir pada tahun 2024 menunjukkan bahwa rata-rata trafo baru mengalami kegagalan resistansi isolasi dalam kisaran 2-3% dari total output per bulan. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun produk tersebut baru, masih ada potensi kegagalan isolasi. Dalam penelitian ini, metode uji tegangan terapan digunakan sebagai uji utama untuk mendeteksi potensi kegagalan resistansi isolasi pada transformator baru. Uji tegangan terapan adalah uji tegangan tinggi yang mensimulasikan kondisi ekstrem di lapangan untuk menguji resistansi isolasi terhadap tegangan tinggi. Uji tegangan terapan memiliki keunggulan dibandingkan metode pengujian lainnya, seperti indeks polarisasi atau uji tangent delta, karena dapat secara langsung menguji respons isolasi terhadap tegangan tinggi yang mendekati kondisi nyata di lapangan. Selain itu, metode ini dapat mendeteksi kerusakan pada bahan isolasi yang sulit dideteksi oleh uji non-destruktif [14][15]. Dengan fokus pada uji ini, penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam tentang kondisi resistansi isolasi trafo baru dan risiko kegagalan yang mungkin terjadi [16][17].

Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor utama yang mempengaruhi hasil uji tegangan yang diterapkan. Berdasarkan wawancara dengan supervisor tim pengujian di PT XYZ, diketahui bahwa hasil uji ini digunakan sebagai acuan utama dalam menentukan apakah transformator cocok untuk distribusi atau perlu diperbaiki pada tahap produksi. Oleh karena itu, optimasi hasil uji ini diharapkan dapat membantu meningkatkan kualitas transformator baru dan mengurangi risiko kegagalan di lapangan.

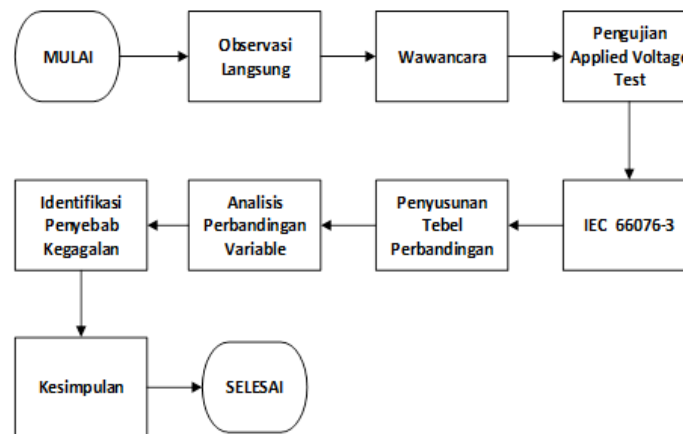
Penelitian sebelumnya dari Robbani berjudul “Penentuan Kelayakan Resistansi Isolasi pada Trafo 60 MVA di Gardu Induk Tegal 150 KV Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangent Delta, dan Tegangan Kegagalan” membahas penurunan kualitas resistansi isolasi trafo yang telah beroperasi lebih dari 10 tahun [18]. Berbeda dengan penelitian tersebut, penelitian ini berfokus pada trafo baru untuk melihat bagaimana faktor produksi mempengaruhi resistansi isolasi dan mengoptimalkan metode pengujian tegangan tinggi sebagai upaya deteksi dini [19].

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat memperoleh pandangan yang lebih spesifik mengenai pentingnya uji tegangan terapan dalam menjaga kualitas isolasi trafo baru. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas pengujian dan optimasi proses produksi di PT XYZ untuk meminimalkan risiko kegagalan resistansi isolasi pada produk yang dihasilkan.

II. METODE

Penelitian ini dilakukan di sebuah perusahaan yang bergerak dalam pembuatan transformator daya di Indonesia. Nama dan lokasi perusahaan disamarkan untuk menjaga kerahasiaan.

Penelitian ini dimulai dengan perencanaan dan pengamatan langsung terhadap proses pengujian tegangan terapan di PT XYZ. Data dikumpulkan melalui wawancara dengan supervisor tim uji serta pengujian pada dua unit transformator untuk mengevaluasi resistansi isolasi berdasarkan standar IEC 66076-3. Hasil uji dianalisis dengan membandingkan variabel kunci, seperti arus bocor dan tegangan breakdown, untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan isolasi. Data disusun dalam tabel perbandingan untuk memudahkan evaluasi. Kesimpulan studi ini merangkum efektivitas metode uji, faktor penyebab kegagalan, serta rekomendasi untuk meningkatkan keandalan transformator daya. Seperti yang ditunjukkan pada diagram alir di bawah ini.



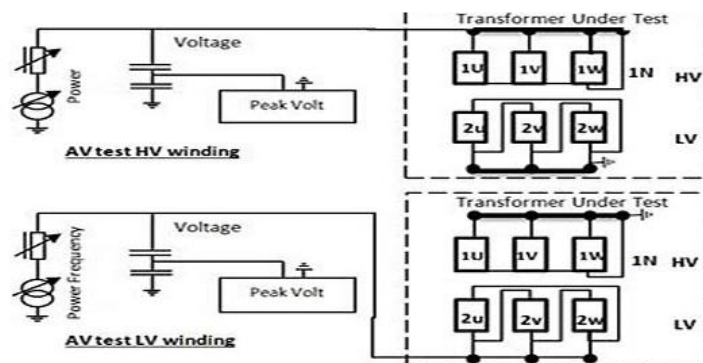
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Peneliti melakukan pengamatan langsung terhadap proses pengujian tegangan yang diterapkan di PT XYZ. Pengamatan ini dilakukan untuk memahami prosedur dan standar pengujian yang diterapkan.

Wawancara terstruktur dilakukan dengan supervisor tim pengujian dan PT XYZ. Informasi yang diperoleh mencakup prosedur standar dalam pengujian resistansi isolasi, serta tantangan atau hambatan yang dihadapi selama pengujian. Wawancara ini bertujuan untuk menggali lebih dalam faktor internal yang mungkin mempengaruhi hasil pengujian resistansi isolasi.

Pengujian Tegangan Terapan adalah metode yang digunakan untuk menguji peralatan listrik, seperti transformator, guna menilai resistansi isolasi terhadap tegangan tinggi. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa isolasi transformator dapat menahan tegangan yang melebihi tegangan operasional normal tanpa kerusakan signifikan atau arus bocor. Peralatan pengujian, termasuk generator tegangan tinggi dan meter arus bocor, telah dikalibrasi oleh PT Qualis Indonesia pada 24 September 2024 untuk memastikan akurasi. Sertifikat kalibrasi tersedia atas permintaan. Uji dilakukan pada suhu lingkungan 34°C dan kelembaban relatif 54%, yang dicatat untuk memastikan konsistensi hasil uji dan memungkinkan analisis lebih lanjut tentang dampak suhu dan kelembaban terhadap hasil uji. Tahapan uji tegangan yang diaplikasikan meliputi:

1. Aplikasi Tegangan Tinggi: Dalam uji ini, tegangan yang lebih tinggi dari tegangan operasional normal diterapkan pada sisi primer atau sekunder transformator. Langkah ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi ekstrem yang mungkin terjadi selama penggunaan.
2. Durasi Uji: Tegangan diterapkan selama 1 menit, sesuai dengan standar internasional seperti IEC 66076-3. Waktu ini dianggap cukup untuk memeriksa apakah ada tanda-tanda kegagalan atau degradasi isolasi.
3. Pemantauan Arus Bocor: Selama penerapan tegangan, arus bocor yang melewati isolasi dipantau. Jika arus bocor melebihi ambang batas yang ditetapkan, hal ini menunjukkan bahwa isolasi tidak cukup kuat untuk menahan tegangan tinggi dan trafo berpotensi tidak aman untuk digunakan.
4. Evaluasi Hasil: Jika tidak ada arus bocor atau arus bocor tetap di bawah ambang batas yang diperbolehkan, transformator lulus uji. Jika tidak, isolasi perlu diperbaiki atau diganti.



Gambar 2. Sirkuit Pengujian Tegangan Terapkan

Data uji dan karakteristik dari dua transformator (satu yang gagal dan satu yang lulus) akan disajikan dalam tabel perbandingan. Tabel ini mencakup variabel-variabel penting seperti parameter uji, hasil uji tegangan yang diterapkan, dan karakteristik lainnya.

Variabel	Uji TR 1	Uji TR 2	IEC 66076-1
Kapasitas	(...) KVA	(...) KVA	-
Tegangan Primer	(...) KV	(...) KV	-
Tegangan Sekunder	(...) KV	(...) KVA	-
Grup Vektor	(...) Ya/Tidak	(...) Ya/Tidak	-
Jenis Kertas Isolasi	(...) Kelas	(...) Kelas	-
Nilai R Isolasi	(...) Kelas	(...) Kelas	>1000 MΩ
Hasil Uji AV	(...) Ya/Tidak	(...) Ya/Tidak	-
Arus Bocor Terukur	(...) mA	(...) mA	<1A
Tegangan Tembus Terukur	(...) KV	(...)KV	50Kv/60s

Tabel 1. Perbandingan Pengujian

Data dari tabel perbandingan dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi perbedaan dalam variabel kunci antara transformator yang lulus dan yang gagal dalam uji resistansi isolasi. Analisis ini berfokus pada variabel yang secara langsung terkait dengan resistansi isolasi, seperti nilai tegangan breakdown, pengukuran resistansi isolasi, dan kualitas bahan baku yang digunakan dalam transformator.

IEC 60076-3, yang merupakan bagian dari standar Komisi Elektroteknika Internasional (IEC) untuk transformator daya, memberikan panduan mengenai tingkat isolasi, uji dielektrik, dan jarak bebas di udara. Standar ini sangat relevan karena menetapkan standar untuk resistansi isolasi dan kekuatan dielektrik, memastikan transformator dapat menahan beban operasional tanpa gagal. Ketaatan terhadap IEC 60076-3 sangat kritis untuk menjaga keandalan dan keamanan transformator, terutama dalam lingkungan yang menuntut.

Berdasarkan hasil perbandingan, faktor-faktor yang mungkin menyebabkan kegagalan resistansi isolasi pada transformator yang gagal diidentifikasi. Variabel yang menunjukkan perbedaan signifikan atau berada di bawah standar yang ditetapkan akan dianggap sebagai indikasi utama potensi penyebab kegagalan. Selain itu, transformator yang gagal akan dibongkar untuk pengamatan lebih lanjut. Fokus penyelidikan ini adalah untuk memeriksa kondisi kertas isolasi guna mengidentifikasi anomali apa pun. Langkah ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang penyebab kegagalan serta faktor struktural yang berkontribusi terhadap resistansi isolasi transformator.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian tentang pengujian resistansi isolasi trafo baru di PT XYZ menggunakan metode pengujian tegangan terapan akan dipaparkan. Selain itu, data yang diperlukan untuk mendukung penelitian ini juga disajikan sebagai bahan referensi untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi resistansi isolasi dan memahami penyebab kegagalan yang mungkin terjadi.

Trafo uji 1 dan trafo uji 2 memiliki spesifikasi yang sama, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2.

Parameter	Uji TR 1	Uji TR 2
Kapasitas	1000 Kva	1000 Kva
Tegangan Primer	20 Kv	20 Kv
Tegangan Sekunder	400 V	400 V
Kelompok Vektor	Dyn5	Dyn5
Fase	3	3
Frekuensi	50 Hz	50 Hz
Tipe	Dalam/Luar	Dalam/Luar

Tabel 2. Spesifikasi Transformator Uji

Berdasarkan tabel spesifikasi, kedua transformator memiliki kapasitas, tegangan primer, dan tegangan sekunder yang sama. Namun, jenis isolasi yang digunakan dan kondisi bahan perlu diketahui untuk menentukan kemungkinan pengaruhnya terhadap hasil pengujian. Selain spesifikasi teknis, bahan yang digunakan dalam transformator juga

memiliki peran penting dalam menentukan kinerja dan keandalannya, terutama dalam pengujian resistansi isolasi. Tabel berikut menyajikan informasi tentang bahan yang digunakan pada kedua transformator uji.

Material	Uji TR 1	Uji TR 2
Jenis Kertas Isolasi	Kelas A	Kelas B
Jenis Minyak Isolasi	Mineral	Mineral
Jenis Konduktor	Tembaga	Tembaga

Tabel 3. Material Transformator Uji

Transformator 2 menggunakan jenis kertas isolasi kelas A yang sama, minyak isolasi mineral, dan konduktor tembaga. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan hasil uji yang mungkin terjadi tidak disebabkan oleh perbedaan material, tetapi oleh faktor lain seperti kondisi fisik atau cacat potensial pada salah satu transformator. Analisis lebih lanjut akan dijelaskan dalam bagian hasil uji dan pembahasan.

Standar uji tegangan yang diterapkan merujuk pada IEC 66076-3, yang menentukan tingkat tegangan uji berdasarkan kelas isolasi kumparan. Standar ini digunakan untuk mengevaluasi ketahanan isolasi transformator terhadap tegangan tinggi guna memastikan keandalan operasional. Tabel berikut merangkum tingkat tegangan uji yang sesuai dengan kelas isolasi lilitan.

Kelas Isolasi Lilitan Berdasarkan Tegangan	Tegangan Uji yang Diterapkan
>1.1 kV	3 kV
3,6 kV	10 kV
7,2 kV	20 kV
12 kV	28 kV
17,5 kV	38 kV
24 kV	50 kV
36 kV	70 kV
53 kV	95 kV

Tabel 4. Uji Tingkat Tegangan - IEC 66076-3

Berdasarkan tabel di atas, untuk transformator dengan tegangan lilitan primer 20 kV, tingkat tegangan uji yang diaplikasikan adalah 50 kV. Standar ini menjadi acuan dalam mengevaluasi hasil uji transformator, yang disajikan pada bagian berikutnya.

Uji tegangan terapan merupakan langkah krusial dalam memastikan resistansi isolasi trafo baru. Uji ini dilakukan dengan menerapkan tegangan yang lebih tinggi dari tegangan operasional normal pada trafo untuk mensimulasikan kondisi ekstrem. Tujuan utama adalah mengidentifikasi potensi kegagalan resistansi isolasi yang mungkin terjadi. Tabel di bawah ini menyajikan hasil uji tegangan terapan untuk dua trafo uji, yang mencakup hasil untuk sisi kumparan primer dan sekunder, nilai arus bocor, dan nilai tegangan breakdown. Hasil ini akan dianalisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi perbedaan dan potensi penyebab kegagalan.

Variable	Uji TR 1	Uji TR 2	IEC 66076-3
Uji AV Primer	Lulus	Gagal	Primer & Sekunder Lulus
Uji AV Sekunder	Lulus	Lulus	Primer & Sekunder Lulus
Arus Bocor Primer	118,9 mA	>1A	>1A
Arus Bocor Sekunder	27,3 mA	29,0 Ma	>1A
BVD Primer	50 Kv	47 kV	50 kV/60s
BVD Sekunder	3 kV	3 Kv	3 Kv/60s

Tabel 5. Hasil Uji Tegangan yang Diterapkan

Hasil uji tegangan yang dilakukan pada trafo uji 1 dan trafo uji 2 menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam nilai arus bocor dan tegangan breakdown pada sisi kumparan primer. Trafo uji 1 berhasil lulus uji sesuai dengan standar IEC 66076-3 dengan nilai arus bocor yang jauh di bawah batas 1A dan nilai tegangan breakdown sebesar 50 kV. Sebaliknya, transformator uji 2 gagal pada sisi lilitan primer, dengan nilai arus bocor yang melebihi batas standar

dan nilai tegangan breakdown yang di bawah 50 kV. Kondisi ini menunjukkan potensi kerusakan pada bahan isolasi atau cacat produksi yang sebelumnya tidak terdeteksi.

Di sisi lilitan sekunder, kedua transformator berhasil lulus uji dengan nilai arus bocor dan tegangan breakdown yang memenuhi standar. Hal ini menunjukkan bahwa masalah kegagalan pada transformator uji 2 hanya terjadi di sisi lilitan primer. Dengan hasil ini, analisis yang lebih mendalam terhadap kondisi isolasi di sisi primer menjadi fokus utama untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan.

Selain uji tegangan terapan, uji pendukung dilakukan untuk memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang kondisi resistansi isolasi transformator. Uji ini meliputi nilai resistansi isolasi, uji tegangan pecah minyak, dan nilai indeks polarisasi.

Variabel	Uji TR 1	Uji TR 2	IEC 66076-3
Nilai IR	1693 mΩ	1551 mΩ	>1000 mΩ
Nilai BVD Banyak	78 kV	77 kV	>55 Kv
Nilai PI	2,14	1,15	>1.25

Tabel 6. Hasil Uji Lainnya

Uji pendukung dilakukan untuk menyediakan data tambahan yang relevan dengan hasil uji tegangan yang diterapkan. Nilai resistansi isolasi trafo uji 1 dan trafo uji 2 keduanya memenuhi standar IEC 66076-3, dengan masing-masing menunjukkan nilai di atas 1000 MΩ. Demikian pula, hasil uji tegangan breakdown minyak menunjukkan nilai yang konsisten untuk kedua transformator, yaitu 78 kV dan 77 kV, yang jauh melebihi ambang batas minimum 55 kV. Hasil ini menunjukkan bahwa kualitas minyak isolasi pada kedua transformator berada dalam kondisi optimal.

Namun, nilai indeks polarisasi menunjukkan perbedaan, di mana trafo uji 1 memiliki nilai yang lebih tinggi (2,14), nilai ini masih di atas ambang batas minimum 1,25 dibandingkan dengan trafo uji 2 (1,15) yang berada di bawah ambang batas minimum 1,25. Perbedaan ini dapat menjadi indikasi awal degradasi isolasi pada trafo uji 2. Temuan ini memberikan dasar untuk analisis lebih lanjut tentang hubungan antara nilai indeks polarisasi dan kegagalan dalam uji tegangan terapan.

Uji transformator dilakukan pada dua unit sampel dengan spesifikasi yang sama, yaitu 3 Fase 1000 KVA 20-0,4 kV Dyn5 50 Hz menggunakan metode Uji Tegangan Terapan untuk menentukan kualitas isolasi. Transformator uji pertama menunjukkan hasil arus bocor sisi primer sebesar 118,9 mA, yang masih dalam batas aman di bawah 1A. Tegangan breakdown primer mencapai 50 kV, memenuhi standar yang ditetapkan, dan nilai indeks polarisasi tercatat sebesar 2,14, melebihi standar minimum 1,25. Hasil ini menunjukkan bahwa trafo pertama memiliki sistem isolasi yang baik dan layak untuk dioperasikan.

Sebaliknya, trafo uji kedua menunjukkan hasil yang berlawanan. Arus bocor sisi primer yang diukur melebihi 1A, melebihi batas standar yang ditentukan. Tegangan pecah sisi primer hanya mencapai 47 kV, di bawah batas minimum standar 50 kV, dan nilai indeks polarisasi tercatat sebesar 1.15, yang juga di bawah batas minimum standar 1.25. Data ini menunjukkan masalah serius pada sistem isolasi sisi primer trafo kedua.

Dari hasil uji indeks polarisasi yang dilakukan selama 10 menit, data berikut diperoleh:

Transformator Uji 1: R1 (1 menit) = 1,693 GΩ, R10 (10 menit) = 3,623 GΩ

Transformator Uji 2: R1 (1 menit) = 1,551 GΩ, R10 (10 menit) = 1,784 GΩ

Nilai Polarization Index (PI) dapat dihitung dengan rumus:

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

$$\text{Tes transformer 1: } PI = \frac{3.623}{1.693} = 2.14$$

$$\text{Tes transformer 2: } P2 = \frac{1.784}{1.551} = 1.15$$

Berdasarkan standar IEC 66076-3, nilai PI minimum yang direkomendasikan adalah 1,25. Transformator 1 memenuhi standar ini dengan nilai PI = 2.14, sementara Transformator 2 gagal dengan nilai PI = 1.15. Korelasi antara nilai PI yang rendah pada transformator kedua dan kegagalan dalam uji tegangan terapan menunjukkan degradasi sistem isolasi yang signifikan.

Untuk penyelidikan lebih lanjut, transformator uji kedua dibongkar dengan fokus pada pemeriksaan lilitan primer. Aspek yang perlu diperiksa meliputi kondisi fisik kertas isolasi dan jarak aman lilitan, sambungan, dan konduktor terhadap tangki transformator atau sisi grounding untuk mengidentifikasi kegagalan.

Pembongkaran Trafo Uji 2 dilakukan untuk memastikan setiap komponen dapat diperiksa secara detail. Dokumentasi fotografis diambil untuk mencatat kondisi fisik komponen kritis, terutama kertas isolasi yang menjadi fokus utama penyelidikan ini. Foto-foto menunjukkan kondisi isolasi kertas yang sangat rusak.



Gambar 3. Kondisi Isolasi Kertas

Gambar 3 menunjukkan kondisi kritis isolasi kertas pada Transformator Uji 2, yang telah mengalami degradasi yang signifikan. Jelas bahwa isolasi kertas telah berubah menjadi warna yang lebih gelap dan terdapat tanda-tanda kerusakan fisik.

Kerusakan seperti retak dan kekeringan. Penampakan ini menunjukkan bahwa kertas isolasi telah terpapar suhu tinggi yang melebihi batas toleransinya, yang dapat mengurangi efektivitasnya sebagai penghalang dielektrik dan meningkatkan risiko kegagalan isolasi.



Gambar 4. Kondisi Kerusakan Kertas Isolasi

Gambar 4 menunjukkan kerusakan pada kertas isolasi Transformator Uji 2. Foto ini secara khusus menunjukkan bagaimana kertas isolasi mengalami pemisahan lapisan dan pembengkakan, yang ditunjukkan oleh panah hijau. Kondisi ini biasanya terjadi akibat kelembaban berlebihan dan panas tidak merata selama operasi transformator. Pembengkakan dan pemisahan lapisan ini mengurangi kontak fisik antara kertas dan lilitan, yang secara signifikan menurunkan kemampuan isolasi kertas dan meningkatkan potensi kegagalan operasional transformator.



Gambar 5. Kondisi Benturan

Gambar 5 menunjukkan dampak degradasi kertas isolasi pada Transformator Uji 2, yang mengakibatkan flashover ke tangki transformator. Noda hitam yang terlihat pada permukaan tangki adalah hasil dari flashover, di mana bahan isolasi yang terdegradasi tidak lagi mampu menahan tegangan operasional dan memicu kobaran listrik yang membakar permukaan tangki. Kondisi ini sangat kritis dan menandakan kegagalan serius dalam sistem isolasi transformator.

Berdasarkan analisis awal dan temuan fisik pada transformator uji 2, terungkap bahwa kegagalan isolasi disebabkan oleh degradasi yang signifikan pada kertas isolasi. Temuan ini didukung oleh perubahan warna, retakan, dan kekeringan pada kertas, serta kelembutan dan pemisahan lapisan yang terlihat. Kondisi ini konsisten dengan hasil uji tegangan yang menunjukkan. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi masalah, tetapi juga memberikan solusi untuk meminimalkan risiko kegagalan isolasi pada transformator baru.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa Uji Tegangan Terapan merupakan metode yang efektif untuk mendeteksi kegagalan resistansi isolasi pada transformator daya baru. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi bahwa degradasi kertas isolasi pada trafo Unit 2 kemungkinan besar disebabkan oleh paparan suhu tinggi dan kelembaban selama proses produksi. Temuan ini menekankan pentingnya kualitas bahan dan ketepatan dalam proses produksi untuk memastikan keandalan trafo. Selain itu, nilai Indeks Polarisasi (PI) yang rendah dapat menjadi indikator awal degradasi isolasi. Rekomendasi untuk meningkatkan kontrol kualitas bahan dan proses produksi diusulkan untuk meminimalkan risiko kegagalan isolasi pada trafo baru di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada PT XYZ, khususnya Bapak Mujiono, supervisor tim pengujian, yang telah memberikan akses dan bantuan selama proses penelitian. Terima kasih juga disampaikan kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Akhirnya, para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa dan pihak lain yang telah memberikan dukungan moral dan teknis dalam penyelesaian artikel ini.

REFERENSI

- [1] R. Ondrialdi, U. Situmeang, and Zulfahri, "Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang," *SainETIn*, vol. 4, no. 2, pp. 72–81, 2020, doi: 10.31849/sainetin.v4i2.6288.
- [2] J. Jamaaluddin *et al.*, "Heat Transfer Management of Solar Power Plant for Dryer," *Int. J. Eng. Appl.*, vol. 12, no. 3, pp. 195–203, 2024, doi: 10.15866/irea.v12i3.23959.
- [3] D. A. N. Kaca, D. I. Bawah, P. Polusi, D. A. N. Kaca, D. I. Bawah, and P. Polusi, "Studi Perbandingan Kinerja Isolator Polimer," vol. 23222353, 2025.
- [4] J. Jamaaluddin, S. D. Ayuni, and I. A. S. Wulandari, "Design of Automatic Transfer Switch System Solar Power Plant – PLN," *J. Electr. Technol. UMY*, vol. 7, no. 2, pp. 57–64, 2024, doi: 10.18196/jet.v7i2.14651.
- [5] J. Smajic *et al.*, "Lightning impulse modeling and simulation of dry-type and oil-immersed power- and distribution transformers," *J. Energy - Energ.*, vol. 63, no. 1–4, pp. 235–243, 2022, doi: 10.37798/2014631-4183.

- [6] J. Jamaaluddin, I. Anshory, and S. D. Ayuni, "Analysis of Overcurrent Safety in Miniature Circuit Breaker with Alternating Current," *J. Electr. Technol. UMY*, vol. 5, no. 2, pp. 68–73, 2021, doi: 10.18196/jet.v5i2.12508.
- [7] D. Aribowo, "Analisa Pengujian Tegangan Tembus Menggunakan Applied Potensial Test Pada Current Transormator Unit Ct/Vt," *Pros. Semin. Nas. Pendidik. FKIP*, vol. 2, no. 1, pp. 231–239, 2019, [Online]. Available: <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/psnp/article/view/5625>
- [8] M. Feri, J. Jamaaluddin, and S. D. Ayuni, "Analysis of Power Transformer Insulation Resistance Using the Applied Voltage test Method," *Elkha*, vol. 17, no. 1, pp. 61–67, 2025, doi: 10.26418/elkha.v17i1.90883.
- [9] P. A. Maulana and I. A. Darmawan, "Analisis Ketahanan Uji Residual Voltage Surge Arrester 24Kv-10Ka Menggunakan Lightning Impulse," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i1.3707.
- [10] Herdawati and M. Ridwan, "Jurnal Indragiri," *J. Indragiri Penelit. Multidisiplin*, vol. 2, no. 1, pp. 10–16, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.indrainstitute.id/index.php/jipm/article/view/558/241>
- [11] A. Tahanan, I. Tegangan, and T. Minyak, "Analysis of Oil-Penetrating Voltage Insulation Resistance on Transformers at PT TPPI Tuban".
- [12] A. Review, "iremos," 2023.
- [13] A. S. Hani Handayani, "Analisa Pengujian Transformator 2 Mva 33,42/0,575 Kv," *J. Ilm. Aset*, vol. 7, no. 1, pp. 24–33, 2019.
- [14] A. Safita Ningtias, I. Prihatini, and M. Qiptiyah, "Isolasi Non-Destruktif Dan Destruktif Gen Coi Pada Serangga Jenis Coleoptera Pembawa Patogen Ceratocystis," *J. Pemuliaan Tanam. Hutan*, vol. 15, no. 1, pp. 1–11, 2021, doi: 10.20886/jpth.2021.15.1.1-11.
- [15] Wiwin A Oktaviani, Taufik Barlian, and Marami Ahmad Gazani, "Pengujian Isolasi Trafo Daya 30 MVA pada GI Sungai Juaro Palembang dengan Indeks Polaritas dan Tangen Delta," *J. Rekayasa Elektro Sriwij.*, vol. 3, no. 1, pp. 199–204, 2021, doi: 10.36706/jres.v3i1.43.
- [16] "PENGEMBANGAN METODE DAN ANALISIS HEALTH INDEX TERHADAP UMUR DAN BEBAN OPERASI TAKARI ADI SANJAYA NIM : 23222398 (Program Studi Magister Teknik Elektro) INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG NIM : 23222398 (Program Studi Magister Teknik Elektro)," vol. 23222398, 2024.
- [17] A. Fitriani, J. Panjaitan, and S. A. Syahputra, "The Effect of Soil Type on Touch Voltage and Step Voltage in the Grid Grounding System," *Elkha*, vol. 16, no. 1, p. 56, 2024, doi: 10.26418/elkha.v16i1.78396.
- [18] M. F. Robbani *et al.*, "1, 2,3)," pp. 60–66.
- [19] F. Rozi, L. K. P. Pemeliharaan, T. Distribusi, and P. Infrastruktur, "PEMELIHARAAN IFRASTRUKTUR LISTRIK PADA PT . PLN (PERSERO) ULP MEDAN SUNGGAL Disusun Oleh : FAHRUL ROZI FAKULTAS TEKNIK," 2024.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.