

Analisis Rewinding Lilitan Transformator Distribusi 150 kVA di PT Hariff Power Services

Medista Dismarawati¹ Ifkar Usrah²

^{1, 2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi, Kota Tasikmalaya, Jawa Barat Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Received: November 03, 2025

Reviewed: November 05, 2025

Available online: December 31, 2025

KORESPONDEN

E-mail: 227002032@student.unsil.ac.id

ABSTRACT

Transformers are vital components in electric power systems, but often experience performance degradation due to winding damage, overloading, or decreased insulation quality. This study aims to examine the winding rewinding process as a repair method for a 100 kVA distribution transformer and evaluate the repair results through testing. The methods used include literature studies, data collection of transformer specifications, dismantling of old windings, calculation of the number of primary and secondary turns, preparation of insulation materials, and the rewinding process according to technical standards. After repair, insulation resistance testing was carried out using a megger and Transformer Turns Ratio (TTR) testing. The test results showed that the insulation resistance value was above the minimum standard ($\geq 242 \text{ M}\Omega$), indicating good insulation conditions. In addition, the deviation of the TTR ratio results in phases A, B, and C was within the tolerance limit of $\pm 0.5\%$, so that the number of turns from the rewinding was in accordance with theoretical specifications. Thus, winding rewinding was proven to be effective in restoring the reliability of distribution transformers and extending their operational life.

KEYWORD:

coil rewinding, distribution transformer, transformer repair,

ABSTRAK

Transformator merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik, namun sering mengalami penurunan kinerja akibat kerusakan lilitan, beban berlebih, atau menurunnya kualitas isolasi. Penelitian ini bertujuan mengkaji proses rewinding lilitan sebagai metode perbaikan transformator distribusi berkapasitas 100 kVA dan mengevaluasi hasil perbaikannya melalui pengujian. Metode yang digunakan meliputi studi literatur, pendataan spesifikasi transformator, pembongkaran lilitan lama, perhitungan jumlah lilitan primer dan sekunder, persiapan material isolasi, hingga proses pelilitan ulang sesuai standar teknis. Setelah perbaikan, dilakukan pengujian tahanan isolasi menggunakan megger dan pengujian *Transformer Turns Ratio* (TTR). Hasil pengujian menunjukkan nilai tahanan isolasi berada di atas standar minimal ($\geq 242 \text{ M}\Omega$), menandakan kondisi isolasi yang baik. Selain itu, deviasi rasio hasil TTR pada fasa A, B, dan C berada dalam batas toleransi $\pm 0,5\%$, sehingga jumlah lilitan hasil rewinding sesuai dengan spesifikasi teoritis. Dengan demikian, rewinding lilitan terbukti efektif memulihkan keandalan transformator distribusi dan memperpanjang umur operasionalnya.

KATA KUNCI:

perbaikan transformator, rewinding lilitan, transformator distribusi

PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi menyalurkan daya dengan menyesuaikan level tegangan sesuai kebutuhan. Namun, dalam praktiknya terdapat berbagai penyebab kegagalan transformator selama operasi, seperti gangguan listrik, kerusakan isolasi, petir, pemeliharaan yang tidak memadai, sambungan yang longgar, kelembaban, dan kelebihan beban, yang dapat menurunkan kinerja bahkan mengakibatkan kegagalan operasi [1]. Menurut Abdullaev *et al.* [2], elemen transformator yang paling sering mengalami kerusakan adalah belitan dan isolasi, yaitu sekitar 41% dari total kerusakan.

Penurunan kinerja transformator akibat kerusakan lilitan perlu ditangani dengan tepat karena berpengaruh pada keandalan sistem tenaga listrik. Penelitian mengenai proses rewinding lilitan dilakukan untuk memastikan perbaikan dapat memulihkan fungsi, memperpanjang umur pakai, serta meningkatkan efisiensi pemeliharaan. Tujuan utama penelitian ini adalah mengkaji proses rewinding lilitan pada transformator distribusi 100 kVA dan mengevaluasi hasil perbaikannya terhadap performa serta tahanan isolasi setelah perbaikan.

Prinsip kerja transformator didasarkan pada induksi elektromagnetik, di mana energi listrik ditransfer melalui lilitan primer dan sekunder. Keandalan trafo daya, yang merupakan peralatan inti yang krusial dalam sistem transmisi dan distribusi daya, menentukan kinerja dan keandalan keseluruhan sistem kelistrikan yang aman, karena kerusakan transformator daya dapat berdampak serius terhadap keselamatan jaringan listrik [3], [4]. Selain itu, transformator daya tergolong sebagai salah satu peralatan listrik dengan biaya tertinggi di antara komponen kelistrikan lainnya. Pada kondisi kritis, kegagalan transformator dapat menimbulkan kerusakan permanen serta menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan, mencapai jutaan dolar bagi perusahaan penyedia listrik maupun konsumennya. [5]. Keandalan transformator yang tinggi sangat penting karena setiap kegagalan sistem kelistrikan menimbulkan biaya besar serta gangguan pasokan energi. Proses rewinding menjadi solusi teknis untuk mengganti lilitan yang rusak dan memulihkan kembali performa transformator [6], [7]. Selain itu, kondisi isolasi juga menjadi faktor penting, karena tahanan isolasi adalah ukuran seberapa baik isolasi dalam suatu sistem mampu menghambat aliran arus listrik [8]. Dengan landasan teori tersebut, penelitian ini berfokus pada evaluasi proses rewinding sebagai metode perbaikan yang efektif bagi transformator distribusi.

Penelitian oleh Harun [6] menunjukkan bahwa rekondisi transformator distribusi dapat meningkatkan nilai tahanan isolasi dan menyeimbangkan tegangan output setelah dilakukan perbaikan. Liu *et al.* [4] mengembangkan

metode klasifikasi deformasi lilitan transformator menggunakan *Frequency Response Analysis* (FRA) berbasis *Support Vector Machine*, sedangkan Bandehzadeh *et al.* [1] mengulas penyebab, metode pemantauan, dan mitigasi deformasi lilitan pada berbagai kondisi operasi. Studi lain oleh Junaidi dan Winata [9] menjelaskan pentingnya ketelitian dalam proses penggulungan lilitan transformator agar hasilnya presisi dan tidak menyebabkan gangguan mekanis. Meski berperan penting dalam diagnosis dan pemeliharaan, penelitian sebelumnya belum membahas secara rinci proses rewinding lilitan pada transformator 100 kVA. Karena itu, penelitian ini bertujuan menyajikan kajian praktis proses rewinding serta efektivitasnya terhadap keandalan transformator setelah perbaikan.

Jurnal ini membahas proses perbaikan transformator distribusi 100 kVA, meliputi tahap pra-perbaikan dan perbaikan, khususnya pada proses rewinding lilitan. Tahap pra-perbaikan mencakup pengujian tahanan isolasi dan Transformer Turns Ratio (TTR) untuk menilai kondisi awal. Hasil pasca-perbaikan disajikan untuk menunjukkan kondisi isolasi, kestabilan tegangan keluaran, serta efektivitas proses rewinding dalam memulihkan performa transformator.

METHOD

Lokasi Penelitian



Gambar 1. PT Hariff Trafo Service

PT Hariff Power Services berlokasi di Jalan A.H. Nasution No. 8, Kelurahan Cipadung Kulon, Kecamatan Panyileukan, Kota Bandung, Jawa Barat. Perusahaan ini bergerak di bidang engineering, instalasi, serta perbaikan dan pemeliharaan sistem mekanikal dan elektrik, khususnya di sektor energi. Selain itu, PT Hariff Power Services juga menerima mahasiswa magang untuk mendapatkan pengalaman langsung dalam instalasi dan pengujian peralatan kelistrikan.

Alat dan Bahan Penelitian

Dalam proses rewinding lilitan dibutuhkan alat dan bahan untuk menunjang kelancaran pekerjaan. Alat yang digunakan diantaranya adalah:

- Mesin Penggulung Lilitan
- Gunting

Bahan yang digunakan diantaranya adalah:

- Kertas Prespan 0,1 mm
- Kertas prespan 0,5 mm

- Cotton Tape
- Kertas Nomex
- Selotip

Metode Pengujian

Uji Tahanan Isolasi

Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk mengukur seberapa besar arus bocor (*leakage current*) yang mungkin mengalir antara dua belitan maupun antara belitan dengan tanah (*ground*)[10].



Gambar 2. Alat High Voltage Insulation Tester (Megger)

Menurut penelitian sebelumnya[8], pengujian tahanan isolasi transformator dilakukan dengan mengacu pada PUIL 2000 menggunakan rumus:

$$R = \frac{1000 \times U}{Q} \times (U \times 2,5) \quad (1)$$

Keterangan:

R = Tahanan isolasi
U = Tegangan kerja
Q = Tegangan megger
2,5 = Faktor keamanan
1000 = Nilai tetap

Pengujian *megger* dilakukan pada beberapa kombinasi pengukuran, yaitu TM–Body (Tegangan Menengah/sisi primer terhadap Body/badan transformator), TR–Body (Tegangan Rendah/sisi sekunder terhadap Body/badan transformator), dan TR–TM (antara Tegangan Rendah/sisi sekunder dan Tegangan Menengah/sisi primer).

Uji Transformer Turn Rasio(TTR)

Pada tahap ini dilakukan pemeriksaan untuk mengidentifikasi fasa yang mengalami kerusakan dan perlu diperbaiki. Pemeriksaan menggunakan alat bernama *Transformer Turns Ratio (TTR)*. Menurut standar yang dikutip dalam [11], pengujian dilakukan dengan cara memberikan tegangan yang dapat diatur pada sisi *High Voltage (HV)*, kemudian mengamati besarnya tegangan yang dihasilkan pada sisi *Low Voltage (LV)*. .



Gambar 3. Alat Transformer Turns Ratio (TTR) Tester

Selain itu, hasil pengukuran TTR dibandingkan dengan nilai teoritis untuk menentukan deviasi. Deviasi

menunjukkan selisih antara nilai rasio aktual/teoritis dan rasio nominal/hasil. Menurut standar IEC 60076 [12], apabila deviasi melebihi batas toleransi standar $\pm 0,5\%$, maka dapat dipastikan terdapat anomali pada lilitan atau mekanisme tap changer.

Berikut merupakan rumus deviasi untuk menghitung selisih antara rasio hasil pengukuran dan rasio teoritis transformator[11]:

$$\text{Deviasi}(\%) = \frac{|R_{\text{hasil}} - R_{\text{teoritis}}|}{R_{\text{teoritis}}} \times 100\% \quad (2)$$

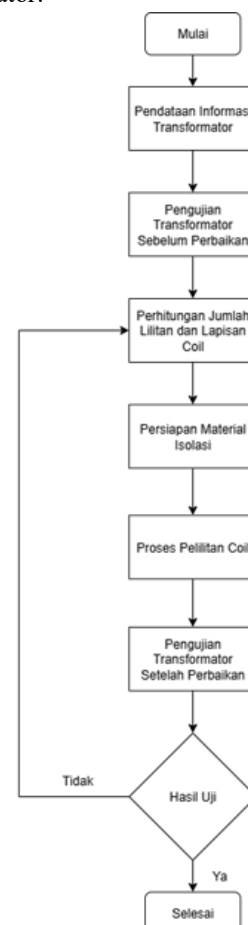
Berikut merupakan standar pengukuran Transformer Turn Ratio (TTR) lima sadapan (5 tap) di PT Hariff Trafo Services berdasarkan ketentuan IEC 60076 yang telah diadopsi sebagai acuan pengujian transformator.

Tabel 1 Standar Pengukuran Transformer Turn Ratio (TTR) 5 Sadapan di PT Hariff Power Services

Sadapan	Tegangan Tinggi	Rasio
1	22.000 V	95,290
2	21.000 V	88,770
3	20.000 V	86,650
4	19.000 V	82,220
5	18.000 V	77,990

Langkah-Langkah Rewinding Lilitan Transformator

Berikut merupakan diagram alir dari proses rewinding lilitan transformator:



Gambar 4. Diagram Alir Proses Rewinding Lilitan Transformator

Pendataan Informasi Transformator

Proses ini diawali dengan mencatat spesifikasi teknis transformator pada *name plate* transformator.

Tabel 2. Informasi Name Plate Transformator

Informasi Name Plate Transformator	
Merk Trafo: Unindo	Current HV: 2,9 A
No. Seri : 56073	Current LV: 144,3 A
Daya : 100 KVA	Type of Cooling : ONAN
Voltage HV : 20.000 V	Fasa : 3
Voltage LV : 400 V	Frequency : 50 Hz

Selanjutnya dilakukan pendataan informasi mengenai coil transformator yang akan diperbaiki. Data ini diperoleh dari hasil perhitungan jumlah lilitan antar tap pada pembongkaran coil(aftak). Aftak adalah sambungan pada bagian lilitan transformator yang digunakan untuk menyesuaikan rasio transformasi tegangan dengan cara menambah atau mengurangi jumlah lilitan aktif pada saat transformator beroperasi.

Selain itu, data diperoleh berdasarkan pengukuran diameter kawat enamel, tinggi coil dan lebar ringban pada coil lama yang akan diperbaiki. Pendataan ini bertujuan untuk memperoleh nilai acuan yang akan digunakan dalam proses perhitungan pada tahap selanjutnya.

Tabel 3. Informasi Coil Transformator

Parameter	Spesifikasi
Aftak	122 lilitan
Diameter Kawat Enamel	1,4 mm
Putaran	Kiri
Tinggi Coil	270 mm
Lebar Ringban	20 mm

Pengujian Transformator Sebelum Perbaikan

Pada tahap awal, dilakukan pengujian tahanan isolasi dan *Transformator Turn Ratio* (TTR) sebagai langkah diagnostik untuk menilai kondisi transformator. Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan bahan isolasi dalam menahan arus bocor antara lilitan maupun antara lilitan dengan badan transformator.

Nilai tahanan isolasi yang rendah mengindikasikan adanya degradasi isolasi akibat penuaan, kelembapan, atau kerusakan mekanis. Sementara itu, pengujian TTR dilakukan untuk memeriksa kesesuaian rasio antara tegangan sisi primer dan sekunder dengan nilai teoritis.

Perhitungan Jumlah Lilitan Primer dan Sekunder

Setelah pembongkaran kawat enamel lama, diperoleh nilai aktaf yang menjadi dasar perhitungan jumlah lilitan pada sisi primer dan sekunder transformator. Nilai ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan kembali konfigurasi lilitan baru sesuai spesifikasi semula.

$$X = \frac{\Delta V_{tm}}{V_{tr}} \times \sqrt{3} \quad (3)$$

Keterangan:

ΔV_{tm} = Selisih tegangan antar sadapan

V_{tr} = Tegangan keluaran transformator pada sisi Tegangan Rendah (TR)

$$N_s = \frac{Aft}{X} \quad (4)$$

Keterangan:

X = Rasio tegangan antar tap

Aft = Jumlah lilitan antar tap

N_s = Jumlah lilitan sekunder

$$N_p = \frac{V_p}{V_s} \times N_s \times \sqrt{3} \quad (5)$$

Keterangan:

V_p = Tegangan primer

V_s = Tegangan sekunder

N_p = Lilitan primer

N_s = Lilitan sekunder

Perhitungan Jumlah Lapisan Coil

Tahap selanjutnya adalah menentukan jumlah lapisan coil yang diperlukan berdasarkan dimensi fisik hasil pengukuran. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan tinggi coil, lebar ringban pada kedua sisi, serta diameter kawat enamel yang digunakan. Jumlah lapisan pelilitan kemudian ditentukan secara matematis untuk memastikan kesesuaian dengan jumlah lilitan primer yang dirancang.

$$N_y = \frac{Hc - 2wr}{(dw + 0,1)} \quad (6)$$

Keterangan:

N_y = Jumlah lilitan dalam satu lapis

Hc = Tinggi coil

w_r = Lebar ringban

Dw = Diameter kawat enamel

$$NL = \frac{N_p}{N_y} \quad (7)$$

Keterangan:

N_y = Jumlah lilitan dalam satu lapis

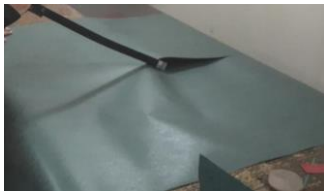
N_p = Lilitan primer

N_L = Jumlah lapisan pelilitan

Persiapan Material Isolasi

Agar lilitan coil aman dan tersusun rapi, digunakan berbagai bahan isolasi. Di antaranya:

Kertas prespan 0,1 mm digunakan di antara lapisan lilitan kawat enamel agar tidak terjadi hubungan langsung antar lapisan.



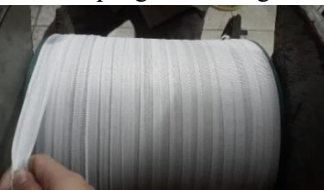
Gambar 5. Kertas Prespan Ketebalan 0,1 mm

Kertas prespan 0,5 mm digunakan sebagai ringban pada sisi kanan dan kiri coil agar lilitan tetap stabil dan tidak mudah lepas.



Gambar 6. Kertas Prespan Ketebalan 0,5 mm

Cotton tape sebagai pembungkus lilitan pada lapisan akhir coil sebagai tambahan pengikat sekaligus isolasi mekanis.



Gambar 7. Cotton Tape

Kertas nomex digunakan sebagai isolasi tambahan pada akhir lilitan kawat enamel untuk mencegah terjadinya konsleting.

Selotip digunakan sebagai perekat di lapisan lilitan kawat terakhir.

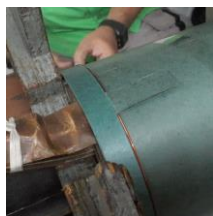
Proses Pelilitan(Rewinding)

Tahap awal dilakukan pemasangan kertas prespan dengan ketebalan 0,1 mm sebagai lapisan dasar isolasi. Umumnya digunakan dua lapisan prespan guna meningkatkan kekuatan dan keandalan isolasi.



Gambar 8. Pemasangan Kertas Prespan untuk Lapisan Awal

Dipasang kertas prespan 0,5 mm sebagai ringban di sisi kanan dan kiri coil untuk menjaga agar lilitan kawat tetap berada pada posisinya.



Gambar 9. Pemasangan Kertas Prespan untuk Ringban

Selanjutnya, ditambahkan lapisan kertas nomex pada bagian awal pelilitan kawat enamel sebagai perlindungan ekstra guna mencegah terjadinya konsleting.



Gambar 10. Pemasangan Kertas Nomex pada Kawat

Setelah penyelesaian lapisan dasar isolasi, proses pelilitan kawat enamel dilaksanakan dengan rapi dan padat tanpa menyisakan celah. Pada setiap pergantian lapisan, dipasang kombinasi kertas prespan 0,1 mm dan 0,5 mm hingga seluruh lilitan selesai, sehingga setiap lapisan memperoleh perlindungan isolasi yang optimal.



Gambar 11. Mesin Penggulung Lilitan



Gambar 12. Proses Pelilitan Kawat

Ketika lilitan mencapai sekitar sepertiga dari total lapisan, dilakukan pemasangan sadapan (tap) sesuai dengan nilai aktif yang telah dihitung sebelumnya pada Tabel 2. Jumlah lilitan pada sadapan harus sangat presisi, karena jika kurang atau lebih dapat memengaruhi kualitas dan kestabilan tegangan transformator.

Tap berfungsi untuk mengatur tegangan, tegangan keluaran dapat diatur dengan tapping baik di bagian primer maupun bagian sekunder transformator[13].



Gambar 13. Pemasangan Sadapan(Tap)

Selain itu, pada sekitar tiga perempat bagian terakhir lilitan dipasang *oil duct*, yaitu saluran khusus yang berfungsi memfasilitasi sirkulasi minyak isolasi ke dalam sela-sela lilitan kawat enamel. Pemberian pemisah bertujuan agar oli transformator dapat mengalir ke dalam kumparan sehingga membantu proses pendinginan saat transformator beroperasi[6].



Gambar 14. Pemasangan Oil Duct

Pada lapisan lilitan terakhir, ditambahkan *cotton tape* yang dililitkan pada kawat enamel. *Cotton tape* ini berfungsi sebagai pengikat dan penguat lilitan, sehingga posisi kawat lebih stabil, tidak mudah bergeser, serta meningkatkan daya tahan mekanis coil.

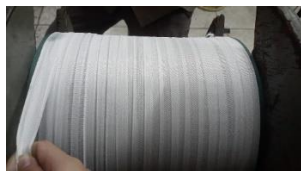


Gambar 15. Pemasangan Cotton Tape Sebagai Pengikat
Sebagai tahap akhir, kawat enamel kembali dilapisi oleh kertas nomex dan lilitan diperkuat dengan selotip agar kawat tidak mudah terlepas.



Gambar 16. Pelapisan Selotip

Kemudian ditambahkan kembali lapisan *cotton tape* pada bagian akhir lilitan sebagai isolasi tambahan, serta kertas prespan 0,5 mm di bagian terluar untuk memberikan perlindungan mekanis sekaligus menutup seluruh susunan lilitan dengan rapi.



Gambar 17. Pelapisan Akhir

Pengujian Transformator Setelah Perbaikan

Sebelum pengujian dilakukan, penyambungan pada bagian *tapping* (sisi pengaturan) harus disesuaikan dengan spesifikasi awal transformator. Pada transformator, *tapping* biasanya ditempatkan pada sisi primer[13].

Selanjutnya dilakukan uji rasio lilitan (TTR) untuk memastikan jumlah lilitan pada kumparan sudah sesuai dengan perhitungan. Pengujian ini penting agar jumlah lilitan tidak lebih dan tidak kurang, karena ketidaksesuaian jumlah lilitan akan memengaruhi rasio transformasi tegangan dan dapat menimbulkan gangguan pada kinerja transformator saat beroperasi. Apabila tidak terdapat kendala, transformator dimasukkan ke dalam oven untuk mengurangi kadar air dalam kertas isolasi maupun kawat enamel. Pada tahap

ini transformator dipanaskan selama 4-5 hari dengan suhu 65° C.



Gambar 18. Oven Transformator

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Lilitan Transformator

Berdasarkan data pada Tabel 1 serta dengan menerapkan Persamaan (3), (4), dan (5), dapat dihitung jumlah lilitan sekunder(N_s) dan lilitan primer(N_p) sebagai berikut:

$$X = \frac{500 V}{400 V} \times \sqrt{3} = 2.16$$

$$N_s = \frac{122 \text{ lilitan}}{2.16} \\ = 28 \text{ lilitan}$$

$$N_p = \frac{22.000 V}{400 V} \times 28 \text{ lilitan} \times \sqrt{3} = 2667 \text{ lilitan}$$

Berdasarkan data pada Tabel 2 serta dengan menerapkan Persamaan (6) dan (7), dapat dihitung jumlah lapisan pelilitan coil:

$$N_y = \frac{270\text{mm} - 2(20\text{mm})}{(1,4\text{mm} + 0,1\text{mm})} = 153 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya diperoleh nilai N_p , sehingga langkah perhitungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$NL = \frac{2667}{153} = 17 \text{ lapisan}$$

Hasil perhitungan ini menjadi acuan utama dalam proses rewinding pada coil yang mengalami kerusakan. Setelah nilai tersebut diperoleh, proses rewinding dapat langsung dilaksanakan sesuai spesifikasi yang telah ditentukan.

Pengujian Tahanan Isolasi(Megger)

Berdasarkan Persamaan (1), dengan spesifikasi transformator 22.000V/400V serta penggunaan tegangan uji megger sebesar 5000 V, maka standar minimal tahanan isolasi transformator adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{1000 \times 22.000}{5000} \times (22.000 \times 2,5)$$

$$R = 4400 \times (22.000 \times 2,5)$$

$$R = 242.000.000\Omega = 242 \text{ M}\Omega$$

Hasil pengujian tahanan isolasi transformator dengan tegangan uji 5000 V sebelum dilakukan proses perbaikan serta hasil perhitungan standar minimal tahanan isolasi ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 4. Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Sebelum Perbaikan

Bagian yang Diuji	Nilai Tahanan Isolasi (M Ω)	Standar Minimal (M Ω)	Keterangan
TR-Body	200	242	Buruk
TM-Body	45	242	Buruk
TR-TM	150	242	Buruk
TR-TR	0	0	Baik
TM-TM	0	0	Baik

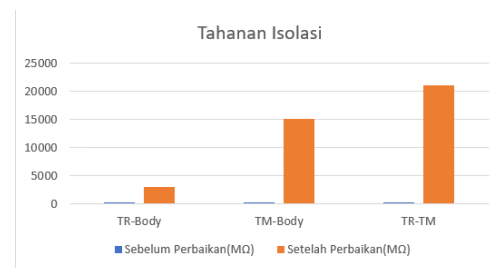
Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tahanan isolasi pada bagian TR-Body (200 M Ω), TM-Body (45 M Ω), dan TR-TM (150 M Ω) semuanya berada di bawah standar minimal 242 M Ω yang ditetapkan berdasarkan spesifikasi transformator 22 kV/400 V. Nilai tahanan isolasi yang rendah ini mengindikasikan bahwa kondisi isolasi sudah mengalami degradasi dan perlu perbaikan.

Berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi pada transformator dengan tegangan uji 5000 V, diperoleh nilai tahanan isolasi setelah perbaikan sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Setelah Perbaikan

Bagian yang Diuji	Nilai Tahanan Isolasi (M Ω)	Standar Minimal (M Ω)	Keterangan
TR-Body	3000	242	Baik
TM-Body	15000	242	Baik
TR-TM	21000	242	Baik
TR-TR	0	0	Baik
TM-TM	0	0	Baik

Hasil pengujian tahanan isolasi menunjukkan bahwa nilai TR-Body sebesar 3000 M Ω , TM-Body sebesar 15.000 M Ω , dan TR-TM sebesar 21.000 M Ω . Seluruh nilai tersebut berada di atas standar minimum 242 M Ω sesuai IEC 60076, sehingga kondisi isolasi transformator dapat dikategorikan baik. Sementara itu, pengukuran TR-TR dan TM-TM menunjukkan nilai 0 M Ω , yang sesuai dengan kondisi normal karena tidak terdapat beda potensial pada pengujian antar-fasa dalam satu belitan.



Gambar 19. Perbandingan Tahanan Isolasi Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Kurva perbandingan tahanan isolasi sebelum dan sesudah perbaikan menunjukkan peningkatan yang signifikan pada semua titik pengujian, yaitu TR-Body, TM-Body, dan TR-TM. Sebelum perbaikan, nilai tahanan isolasi berada jauh di bawah standar minimum 242 M Ω , sehingga transformator dikategorikan tidak layak operasi. Setelah dilakukan perbaikan berupa penggantian isolasi, pengeringan, dan rewinding, nilai tahanan isolasi meningkat drastis dan membuktikan bahwa kualitas isolasi kembali optimal dan transformator dinyatakan layak untuk dioperasikan kembali.

Pengujian Transformer Turn Ratio (TTR)

Pengujian *Transformer Turns Ratio* (TTR) dilakukan untuk mengetahui kesesuaian rasio lilitan aktual/ hasil pengujian dengan nilai teoritis sesuai desain transformator. Nilai deviasi dihitung untuk menentukan sejauh mana hasil pengukuran berbeda dari nilai teoritis. Rumus deviasi rasio ditunjukkan pada Persamaan (2).

Pada fasa A sebelum perbaikan, diperoleh $R_{\text{teoritis}} = 86,650$ dan $R_{\text{hasil}} = 86,9$. Maka nilai deviasi dihitung sebagai berikut:

$$\text{Deviasi}(\%) = \frac{|86,9 - 86,65|}{86,65} \times 100\% = 0,288 \%$$

Pada fasa B sebelum perbaikan, diperoleh $R_{\text{teoritis}} = 86,650$ dan $R_{\text{hasil}} = 86,75$. Maka nilai deviasi dihitung sebagai berikut:

$$\text{Deviasi}(\%) = \frac{|91,5 - 86,65|}{86,65} \times 100\% = 3,15 \%$$

Pada fasa C sebelum perbaikan, diperoleh $R_{\text{teoritis}} = 86,650$ dan $R_{\text{hasil}} = 86,9$. Maka nilai deviasi dihitung sebagai berikut:

$$\text{Deviasi}(\%) = \frac{|86,75 - 86,65|}{86,65} \times 100\% = 0,115 \%$$

Hasil pengujian rasio lilitan (TTR) sebelum perbaikan beserta perhitungan deviasi (%) pada kondisi 20 kV/400 V, khususnya pada tap 3 sebagai posisi nominal pengujian, ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 6. Hasil Pengujian Rasio Lilitan Sebelum Perbaikan

Fasa	Rasio Teoritis	Rasio Hasil	Deviasi(%)	Keterangan
A	86,650	86,9	0,288	Baik
B	86,650	91,5	3,15	Buruk
C	86,650	86,75	0,115	Baik

Setelah dilakukan proses perbaikan atau rewinding, pengujian rasio lilitan (TTR) kembali dilakukan untuk memastikan kesesuaian jumlah lilitan terhadap spesifikasi nominal. Selain itu, dilakukan perhitungan deviasi pada fasa yang sebelumnya terindikasi mengalami kerusakan. Pada fasa B setelah perbaikan, diperoleh $R_{\text{teoritis}} = 86,650$ dan $R_{\text{hasil}} = 86,6$. Maka nilai deviasi dihitung sebagai berikut:

$$\text{Deviasi}(\%) = \frac{|86,6 - 86,65|}{86,65} \times 100\% = 0,057\%$$

Hasil pengujian rasio lilitan (TTR) setelah perbaikan beserta perhitungan deviasi (%) pada kondisi 20 kV/400 V ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 8. Hasil pengujian rasio lilitan setelah perbaikan

Fasa	Rasio Teoritis	Rasio Hasil	Deviasi(%)	Keterangan
A	86,650	86,9	0,288	Baik
B	86,650	86,6	0,057	Baik
C	86,650	86,75	0,115	Baik

Hasil pengujian rasio lilitan (TTR) setelah perbaikan menunjukkan bahwa seluruh fasa (A, B, dan C) memiliki deviasi di bawah ambang toleransi $\pm 0,5\%$ sesuai IEC 60076. Nilai deviasi terbesar tercatat pada fasa A yaitu 0,288%, sedangkan deviasi terkecil pada fasa B yaitu 0,057%. Hal ini mengindikasikan bahwa perbandingan lilitan primer dan sekunder pada seluruh fasa masih sesuai dengan desain pabrik dan transformator dapat dinyatakan dalam kondisi baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai proses rewinding lilitan transformator distribusi, dapat disimpulkan bahwa proses rewinding mampu memulihkan fungsi transformator secara efektif melalui tahapan sistematis mulai dari pembongkaran hingga pelilitan ulang sesuai spesifikasi. Hasil pengujian menunjukkan nilai tahanan isolasi berada di atas standar minimal ($\geq 242 \text{ M}\Omega$) dan deviasi TTR pada tap nominal 20 kV masih dalam batas toleransi, sehingga transformator hasil perbaikan memiliki performa yang baik, keandalan meningkat, dan layak dioperasikan kembali dalam sistem distribusi tenaga listrik.

REFERENSI

- [1] M. Bandehzadeh, H. Radmanesh, dan P. Rabbanifar, "Survey on Transformer Winding Deformations, Causes, Monitoring and Mitigation," *Int. J. Multiphys.*, vol. 17, no. 4, hal. 502–519, 2024, doi: 10.52783/ijm.v18.1593.
- [2] A. A. Abdugaffar Ugli, T. Z. Zokirovich, J. T. Kamolovich, K. M. Khamidjon Ugli, N. Z. Zukhriddin Ugli, dan S. M. Ziyodulla Ugli, "A review on power transformer failures: analysis of failure types and causative factors," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 38, no. 2, hal. 713, 2025, doi: 10.11591/ijeecs.v38.i2.pp713-722.
- [3] F. Yuan, J. Guo, Z. Xiao, B. Zeng, W. Zhu, dan S. Huang, "A transformer fault diagnosis model based on chemical reaction optimization and twin support vector machine," *Energies*, vol. 12, no. 5, 2019, doi: 10.3390/en12050960.
- [4] J. Liu, Z. Zhao, C. Tang, C. Yao, C. Li, dan S. Islam, "Classifying Transformer Winding Deformation Fault Types and Degrees Using FRA Based on Support Vector Machine," *IEEE Access*, vol. 7, hal. 112494–112504, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932497.
- [5] M. Bagheri, M. Naderi, dan T. Blackburn, "Advanced transformer winding deformation diagnosis: Moving from off-line to on-line," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, hal. 1860–1870, 2012, doi: 10.1109/TDEI.2012.6396941.
- [6] N. Harun, "Rekondisi Transformator untuk Mengatasi Menurunnya Kemampuan Isolasi pada Transformator Distribusi 20 kV," *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 5, no. 1, hal. 29–33, 2016.
- [7] J. SON dan S. Suryani, "Analisis Hasil Pengujian Isolasi Transformator Daya 20 kV (Step-Up) di PT PLN (Persero) PLTD Tegineneng," *J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 1, hal. 60–68, 2025, doi: 10.23960/elc.v19n1.2771.
- [8] P. T. Powerindo dan P. Perkasa, "Tahanan Isolasi Uji Tegangan Kering Fco," vol. 9, hal. 185–194, 2024.
- [9] H. J. Yulianus, "Alat Penggulung Lilitan Transformator secara Otomatis Menggunakan Remote Control," *Tesla*, vol. 15, no. 1, hal. 85–101, 2013.
- [10] TOMY ADI SAPUTRO, "ANALISIS HASIL PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA BERDASARKAN HASIL UJI INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA, RASIO TEGANGAN, BDV(BREAK DOWN VOLTAGE)," Sukoharjo, 2018.
- [11] R. Ondrialdi, U. Situmeang, dan Zulfahri, "Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang," *SainETIn*, vol. 4, no. 2, hal. 72–81, 2020, doi: 10.31849/sainetin.v4i2.6288.

- [12] ISO 22412, *International Standard International Standard*. 2017.
- [13] I. P. S. M. L. T. Bayu T. Sianipar, “STUDI PERBANDINGAN BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI TIGA FASA PADA SAAT PENGGUNAAN TAP CHANGER (Aplikasi pada PT.MORAWA ELEKTRIK TRANSBUANA),” vol. 2, no. mi, hal. 1–19, 2010.