

# Analisis Kondisi Isolasi Pada *Station Service Transformer* (SST)

Rachmat Sutjipto<sup>\*a)</sup>, Harrij Mukti K<sup>a)</sup>, Kharisma Eka Dzulfihar<sup>a)</sup>

(Received 19 Mei 2024 || Revised 07 Juni 2024 || Accepted 07 Juni 2024)

**Abstract:** *There is an identified oil leak in SST Unit 1 at Paiton Power Plant, discovered after a fault indicator in Central Control Room. Visual inspection revealed that the gasket seal on the fastening bolts was damaged due to the seal reaching its lifetime limit. Continuous oil leaks degrade the transformer's oil, reducing its volume and impairing the transformer's cooling performance. The research aims to evaluate the insulation condition of the SST transformer before and after replacing the damaged gasket seal (repacking). This evaluation ensures the transformer's optimal performance and reliability by preventing potential failures caused by degraded insulation. The research employs a quantitative approach, using various tests to assess the insulation resistance of the transformer, including the Polarization Index (PI), Tangent Delta, and Breakdown Voltage tests. Data were collected from technical assessments and measurements conducted on-site at PT. PLN Nusantara Power (PLN NP). The comparison of data before and after repacking indicated significant improvements in the insulation condition of the SST transformer. All test results—PI, Tangent Delta, and Breakdown Voltage—met the standards post-repacking, showing better performance than before. Specifically, the Polarization Index and Tangent Delta values improved substantially, aligning with the IEEE C57.152-2013 standard, and the Breakdown Voltage met the IEC 60156-95 standard. The findings suggest that timely maintenance, such as gasket seal replacement, is crucial for maintaining the insulation quality and overall performance of transformers. Regular inspections and adherence to testing standards can prevent operational failures and extend the lifespan of critical electrical equipment.*

**Keywords:** *Transformer, insulation resistance, Polarization Index, Tangent Delta, Breakdown Voltage*

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik selalu meningkat setiap waktu, menjadi kebutuhan yang sangat penting bagi manusia, termasuk di Indonesia. Peningkatan kebutuhan listrik ini menuntut sistem ketenagalistrikan yang handal dan efisien [1], [2]. Salah satu komponen vital dalam sistem ketenagalistrikan adalah transformator, yang berfungsi untuk mengubah tegangan listrik agar sesuai dengan kebutuhan pengguna akhir [3]. Oleh karena itu, penelitian mengenai kondisi isolasi pada transformator menjadi sangat penting untuk memastikan kinerja yang optimal dan menghindari kegagalan operasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara mendalam aspek-aspek teknis yang berpengaruh terhadap performa transformator.

Salah satu masalah signifikan yang dihadapi oleh PLTU Paiton adalah kebocoran minyak pada *Station Service Transformer* (SST) Unit 1. Identifikasi ini diambil setelah adanya indikator *fault* pada ruang CCR (*Central Control Room*) dan sudah dipastikan secara inspeksi visual. Kebocoran minyak ini dapat menyebabkan penurunan volume minyak transformator, yang berdampak langsung pada performa pendinginan dan fungsi isolasi transformator. Jika tidak ditangani, hal ini dapat mengakibatkan kerusakan lebih lanjut pada transformator dan berpotensi menyebabkan pemadaman listrik. Masalah ini diperburuk oleh kenyataan bahwa *gasket seal* yang mengalami kerusakan telah mencapai batas usianya, membuat kebocoran minyak menjadi lebih sering terjadi. Oleh karena itu, diperlukan tindakan preventif dan perbaikan yang tepat untuk mengatasi masalah ini.

Penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan terkait kondisi isolasi pada transformator. Misalnya, Indra et al. melakukan pengujian kelayakan resistansi isolasi pada transformator dengan metode indeks polarisasi [4]. Tohari et al. dalam "Analisis Kondisi Transformator Daya 20kV/150kV Dengan Metode Uji Dissolved Gas Analysis (DGA) DI PT.PJB PLTU Rembang" menekankan metode analisis gas terlarut [5]. Situmeang et al. dalam "Transformator Daya 125 MVA Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan Breakdown Voltage di PLTU Tenayan Raya 2 X 110 MW" meneliti penggunaan beberapa metode pengujian [6]. Suganda dalam "Analisa Kualitas Tahanan

Isolasi Transformator Daya" membahas pentingnya kualitas tahanan isolasi [7]. Almada dalam "Analisis Pengujian Tangen Delta pada Bushing Trafo 150/20 KV 60 MVA di Gardu Induk Karet Lama" fokus pada pengujian tangen delta [8]. Kelima penelitian ini memberikan landasan yang kuat dalam memahami pentingnya pengujian kondisi isolasi transformator.

Meskipun banyak penelitian yang telah dilakukan, masih terdapat beberapa celah dalam pemahaman mengenai dampak kebocoran minyak terhadap performa keseluruhan transformator, khususnya setelah dilakukan tindakan perbaikan seperti *repacking*. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih fokus pada metode pengujian individual tanpa mengkaji secara holistik efek perbaikan terhadap keseluruhan performa transformator. Selain itu, terdapat sedikit penelitian yang mengkombinasikan metode pengujian indeks polarisasi, tangen delta, dan *breakdown voltage* secara bersamaan untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi isolasi transformator. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya untuk mengisi celah tersebut dengan pendekatan yang lebih komprehensif.

Untuk mengisi celah-celah ini, penelitian ini mengusulkan konsep baru dengan melakukan pengujian kondisi isolasi transformator sebelum dan sesudah *repacking* menggunakan metode *Polarization Index* (PI), Tangent Delta, dan *Breakdown Voltage* secara terpadu. Pengujian tahanan isolasi (indeks polarisasi dan tangen delta) berdasarkan standar IEEE C57.152-2013 dan pengujian *Breakdown Voltage* berdasarkan standart IEC 60156-95. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang kondisi isolasi transformator dan efektivitas tindakan perbaikan yang dilakukan. Selain itu, penelitian ini juga akan menganalisis perbandingan data pengujian sebelum dan sesudah *repacking* untuk mengevaluasi peningkatan performa transformator. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengelolaan dan pemeliharaan transformator di industri ketenagalistrikan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kondisi isolasi pada *Station Service Transformer* (SST) Unit 1 di PLTU Paiton sebelum dan sesudah dilakukan *repacking* pada *gasket seal*. Penting diketahui sejauh mana tindakan perbaikan tersebut dapat meningkatkan performa transformator, serta memastikan

\*Korespondensi: rachmat.sutjipto@polinema.ac.id

bahwa transformator dapat beroperasi dengan optimal dan aman. Melalui pendekatan pengujian yang komprehensif, diharapkan penelitian ini dapat memberikan rekomendasi yang berguna bagi industri ketenagalistrikan dalam upaya menjaga keandalan dan efisiensi transformator.

## 2. Metode

### 2.1 Material dan Instrumen Penelitian

Material utama yang pada penelitian ini adalah minyak transformator dengan merek Shell Diala S4 ZX-I, yang memiliki tingkat kemurnian tinggi. Minyak ini dipilih karena kualitas dan kestabilannya yang sesuai dengan standar pengujian transformator [9]. Terdapat tiga peralatan utama yang digunakan. Pertama, Megger MIT 1025 yang digunakan untuk mengukur tahanan isolasi dengan tegangan pengujian hingga 5000 VDC. Kedua, alat uji Tan Delta CPC 100 yang dikombinasikan dengan CP TD12/15, digunakan untuk mengukur arus bocor kapasitif pada transformator. Ketiga, alat uji Breakdown Voltage Megger OTS100AF yang digunakan untuk mengukur tegangan tembus minyak transformator.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain penelitian yang terstruktur dan sistematis. Penelitian ini dirancang untuk mengukur dan membandingkan kondisi isolasi transformator sebelum dan sesudah dilakukan *repacking* pada *gasket seal*. Pengujian dilakukan menggunakan Metode Polarization Index (PI), Tangent Delta, dan *Breakdown Voltage* (B).

### 2.2 Metode Indeks Polarisasi

Pengujian indeks polarisasi digunakan untuk mengukur indeks polarisasi dengan membandingkan tahanan isolasi di menit kesepuluh dengan tegangan konstan di menit pertama [10]. Alat yang umum digunakan yaitu dengan menggunakan megger dengan tegangan alat ukur 500 sampai 10.000 Vdc. Nilai indeks polarisasi diperoleh dari pembacaan berkelanjutan untuk periode waktu tertentu (10 menit) dengan sumber tegangan yang konstan untuk kemudian dibandingkan antara tahanan isolasi dari menit ke 10 dengan tahanan isolasi dari menit ke 1. Nilai tahanan isolasi akan meningkat lebih cepat dalam kondisi yang bersih dan tidak terkontaminasi. Nilai indeks polarisasi dapat ditentukan sesuai standard IEEE C57.152–2013 menggunakan Persamaan (2-1) [11]:

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (2-1)$$

Keterangan:

- IP : nilai dari Indeks Polarisasi (Polarization Index)
- R10 : nilai tahanan isolasi untuk pengujian 10 menit ( $\Omega$ )
- R1 : nilai tahanan isolasi untuk pengujian 1 menit ( $\Omega$ )

Kondisi tahanan isolasi kemudian dapat diketahui berdasarkan standar indeks polarisasi seperti ditunjukkan pada standar IEEE C57.152– 2013, seperti terlihat di Tabel 2.1 [11], [12].

TABEL 2.1 STANDAR INDEKS POLARISASI TRANSFORMATOR

Indeks Polarisasi	Kondisi Isolasi
< 1.0	Berbahaya
1.0 - 1.1	Buruk
1.1 - 2.0	Dipertanyakan (Pengujian Skala Minyak dan Tan Delta)
2.0 - 4.0	Baik
> 4.0	Sangat Baik

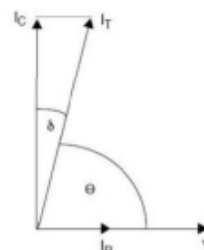
Tabel 2.1 menggambarkan standar indeks polarisasi untuk transformator berdasarkan nilai tahanan isolasi yang diukur. Tahanan isolasi yang baik akan dikaitkan dengan indeks polarisasi

yang tinggi, begitu juga sebaliknya [13], [14].

### 2.3 Metode Tangen Delta

Kualitas tahanan isolasi, hilangnya daya dielektrik, dan kelembapan berbagai jenis bahan isolasi ditunjukkan oleh pengujian tan delta pada transformator [15], [16]. Isolasi yang memiliki sifat kapasitif sempurna dianggap baik, dan transformator dianggap sebagai kapasitor murni [17]. Pada kapasitor murni akan terjadi pergeseran sudut antara tegangan dan arus fasa sebesar  $90^\circ$ . Jika minyak transformator tercemar, nilai tahanan isolasi akan turun, yang menyebabkan arus resistif yang lebih tinggi melalui isolasi [18]. Akibatnya, sudut arus mendahului tegangan akan berubah menjadi kurang dari  $90^\circ$ . Hal ini mengidentifikasi besarnya tingkat kontaminasi yang terdapat pada isolasi.

Pengujian tan delta menunjukkan bahwa kondisi tahanan isolasinya lebih baik jika nilai persentasenya lebih kecil, dan sebaliknya jika nilai persentasenya lebih besar pada tan delta maka kondisi tahanan isolasinya lebih buruk [19]. Dalam kondisi isolasi sempurna, sudut akan mendekati nol. Semakin besar sudut, semakin banyak arus resistif yang melewati isolasi, yang mengakibatkan kontaminasi pada isolasi.



GAMBAR 2.1 DIAGRAM VECTOR TANGEN DELTA

Perhitungan tangen delta menggunakan Persamaan (2-2) [20]:

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \times \omega \times C^{-12}} \times 100\% \quad (2-2)$$

Keterangan:

- $\delta$  : delta
- P : daya (Watt)
- V : tegangan (Volt)
- C : kapasitansi (F)
- $\omega$  :  $2\pi f$

Pengukuran tangen delta di transformator menggunakan alat CPC 100 yang dikombinasikan dengan CP TD12/15. Standar dari kondisi tahanan isolasi berdasarkan tangen delta menurut standar IEEE C57.152– 2013 ditunjukkan pada Tabel 2.2 [21]:

TABEL 2.2 KARAKTERISTIK DIAGNOSTIK YANG DIREKOMENDASIKAN

Parameter	Transformator Baru (< 230kV)	Transformator Lama (> 230kV)
Faktor Daya (< 230kV)	< 0.5%	< 1.0%
Faktor Daya (> 230kV)	< 0.4%	< 1.0%
Total Gas Terlarut	< 0.5%	< 0.8%
Kadar Kelembaban	< 10 ppm	< 15 ppm
Rasio Belitan	Dalam 0.5% dari nameplate	Dalam 0.5% dari nameplate

Tabel 2.2 ini menunjukkan standar karakteristik diagnostik yang direkomendasikan untuk transformator baru dan lama, mencakup faktor daya, total gas terlarut, kadar kelembaban, dan rasio belitan.

### 2.4 Metode Breakdown Voltage (BDV)

Pengujian tegangan tembus pada transformator dilakukan untuk mengukur ketahanan isolasi minyak terhadap tegangan yang diberikan. Apabila hasil pengujian di atas standar pengujian saat ini, itu menunjukkan bahwa kualitas minyak isolasi masih dalam kondisi baik. Sebaliknya, jika nilai pengujian BDV tinggi dan di atas standar, itu menunjukkan bahwa minyak isolasi tidak dapat dengan mudah ditembus oleh tegangan listrik [22]. Nilai tegangan tembus minyak yang dihasilkan dari pengujian ini harus di atas standar.

Standar kondisi isolasi minyak berdasarkan *breakdown voltage* menurut standar IEC 60156 ditunjukkan pada Tabel 2.3 [23].

TABEL 2.3 STANDAR TEGANGAN TEMBUS MINYAK

Tegangan	Kondisi Baik	Kondisi Cukup	Kondisi Buruk
500 kV	> 60 kV	50-60 kV	< 50 kV
150 kV	> 50 kV	40-50 kV	< 40 kV
70 kV	> 40 kV	30-40 kV	< 30 kV

Tabel 2.3 menggambarkan standar tegangan tembus minyak untuk berbagai tingkat tegangan transformator. Nilai tegangan tembus yang lebih tinggi menunjukkan kondisi minyak yang lebih baik, sedangkan nilai yang lebih rendah menunjukkan kondisi yang lebih buruk.

Perhitungan nilai tegangan tembus pada minyak isolasi dapat menggunakan Persamaan (2-3).

$$E = \frac{V_b}{d} \text{ kv/mm} \quad (2-3)$$

Keterangan :

- E = Kekuatan dielektrik (kV/mm)
- Vb = Rata-rata tegangan tembus (kV)
- D = Jarak sela (mm)

## 2.5 Prosedur Penelitian

Pengambilan data awal dilakukan sebelum *repacking* untuk mengetahui kondisi isolasi transformator yang sedang digunakan. Kemudian dilakukan penggantian *gasket seal* yang rusak untuk mengatasi kebocoran minyak. Setelah *repacking gasket* dilakukan pengujian ulang untuk mengetahui peningkatan kondisi isolasi. Data yang diperoleh dianalisis dengan membandingkan hasil pengukuran sebelum dan sesudah *repacking*. Hasil pengujian dinilai berdasarkan standar IEEE C57.152-2013 untuk PI dan Tang Delta, serta IEC 60156-95 untuk BDV.

## 3. Hasil Dan Pembahasan

### 3.1 Hasil Pengujian Indeks Polarisasi Sebelum Dan Sesudah *Repacking*

Tabel 3.1 menunjukkan hasil pengukuran indeks polarisasi pada transformator sebelum dilakukan *repacking* pada *gasket seal*.

TABEL 3.1 HASIL PENGUJIAN INDEKS POLARISASI SEBELUM REPACKING

Waktu (Menit)	HV - LV (GΩ)	HV - Ground (GΩ)	LV - Ground (GΩ)
1	0.64	0.392	0.194
2	0.651	0.394	0.212
3	0.651	0.448	0.227
4	0.649	0.404	0.241
5	0.642	0.417	0.253
6	0.642	0.437	0.263
7	0.636	0.435	0.277
8	0.622	0.43	0.286
9	0.619	0.432	0.294
10	0.639	0.433	0.299
PI	1.01	1.1	1.54

Berdasarkan Tabel 3.1, indeks polarisasi diukur pada menit ke-1 hingga menit ke-10 untuk tiga objek pengujian: HV-LV, HV-Ground, dan LV-Ground. Nilai indeks polarisasi dihitung dengan membandingkan tahanan isolasi pada menit ke-10 dengan tahanan isolasi pada menit ke-1 seperti berikut.

$$\text{HV-LV} : IP = \frac{10 \text{ min insulation resistance}}{1 \text{ min insulation resistance}} = \frac{0,639}{0,64} = 1,01$$

$$\text{HV-GROUND: } IP = \frac{10 \text{ min insulation resistance}}{1 \text{ min insulation resistance}} = \frac{0,433}{0,392} = 1,1$$

$$\text{LV-GROUND : } IP = \frac{10 \text{ min insulation resistance}}{1 \text{ min insulation resistance}} = \frac{0,299}{0,194} = 1,54$$

Hasil dari pengujian *Polarization Index* (PI) sebelum *repacking* tersebut kemudian dibandingkan dengan standar IEEE C57.152 – 2013 (Tabel 2.1). Dari data hasil pengujian dan perhitungan sebelum *repacking* maka didapatkan indeks polarisasi bernilai buruk pada obyek pengujian HV-GROUND dan HV-LV. Sedangkan pada obyek pengujian LV-GROUND didapatkan nilai sebesar 1,54 yang berarti bernilai baik sesuai standar IEEE C57.152 – 2013. Apabila hasil pengujian indeks polarisasi sebesar 1,1 – 1,25 atau dibawah 1,25 – 2,0 maka perlu ditindaklanjuti dengan pengujian minyak dan pengujian tangen delta.

Dari hasil pengujian juga diketahui bahwa nilai indeks polarisasi pada pengujian HV-GROUND dan HV-LV mengindikasikan isolasi belitan peralatan tersebut dalam keadaan basah, kotor atau sudah ada yang bocor. Untuk mengatasi hal tersebut maka perlu dilakukan pembersihan, pengeringan dan pembaharuan (*refurbish*) apabila ditemukan kerusakan pada isolasinya.

Sedangkan data pengujian indeks polarisasi sesudah *repacking* dapat dilihat di Tabel 3.2.

TABEL 3.2 HASIL PENGUJIAN INDEKS POLARISASI SESUDAH REPACKING

Waktu (Menit)	HV - LV (GΩ)	HV - Ground (GΩ)	LV - Ground (GΩ)
1	3.96	3.79	2.35
2	4.39	4.18	2.69
3	5.06	4.44	2.92
4	5.42	4.66	3.08
5	5.7	4.86	3.24
6	5.97	5.06	3.36
7	6.02	5.21	3.5
8	6.42	5.27	3.66
9	6.54	5.44	3.22
10	6.75	5.67	3.61
PI	1.01	1.1	1.54

Hasil dari pengujian *Polarization Index* (PI) setelah *repacking* berdasarkan Tabel 3.2 diketahui bahwa seluruh nilai PI dibandingkan dengan standar IEEE C57.152 – 2013 telah menunjukkan kondisi nilai PI dalam kondisi “baik”. Sehingga hal ini dapat diindikasikan bahwa nilai indeks polarisasi dan kondisi isolasi pada transformator SST di PLTU PT. PLN Nusantara Power (PLN NP) UP Paiton unit 1 sudah tidak terdapat masalah dan dalam kondisi “baik” serta sesuai standar yang ada pada setiap objek pengujian.

### 3.2 Hasil Pengujian Tangen Delta Sebelum Dan Sesudah *Repacking*

Tabel 3.3 menunjukkan hasil pengujian tangen delta pada transformator sebelum dilakukan *repacking*.

**TABEL 3.3 DATA HASIL PENGUJIAN TANGEN DELTA SEBELUM REPACKING**

Parameter	Test (kV)	I (mA)	Cap. (pF)	DF
CH + CHL	10 kV	28.999 mA	9336.655	0.303%
CH	10 kV	13.619 mA	4384.685	0.430%
CHL (UST)	10 kV	15.366 mA	4947.375	0.166%
CHL	10 kV	15.380 mA	4951.970	0.190%

Tabel 3.3 menunjukkan hasil pengukuran arus (I), kapasitansi (Cap.), dan faktor daya (DF) pada berbagai parameter sebelum dilakukan repacking. Pengujian dilakukan dengan tegangan 10 kV. Parameter yang diukur antara lain: CH + CHL yaitu pengukuran kapasitansi antara kumparan primer dan sekunder, CH yaitu pengukuran kapasitansi antara kumparan primer dan ground, CHL (UST) yaitu pengukuran kapasitansi antara kumparan primer dan sekunder tanpa grounding, dan CHL yaitu pengukuran kapasitansi antara kumparan sekunder dan ground.

Menggunakan data pada Tabel 3.3 dapat dihitung tangen delta menggunakan Persamaan (2-2). Misalkan perhitungan tangen delta untuk parameter CH+CHL. Variabel yang diketahui antara lain: P = 0,912 Watt; V = 10 kV; C = 9336,655; f = 50 Hz.

$$\tan \delta = \frac{0.912}{10000^2 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 9.336655 \cdot 10^{-9}} \times 100\% = 0,303\%$$

Berdasarkan Tabel 3.3 diketahui bahwa hasil pengujian tangen delta masih dalam keadaan normal sesuai dengan standar. Analisis detail nilai faktor daya pada setiap parameter yang diukur sebagai berikut.

1. Pada pengukuran CH + CHL didapatkan nilai faktor daya sebesar 0.303%, yang masih dalam batas normal sesuai dengan standar IEEE C57.152-2013.
2. Pada pengukuran CH diperoleh nilai faktor daya untuk sebesar 0.430%. Hal ini menunjukkan adanya sedikit arus bocor kapasitif.
3. Pada pengukuran CHL (UST) diperoleh nilai faktor daya sebesar 0.166%, yang menandakan bahwa kondisi isolasi masih dalam batas yang dapat diterima.
4. Pada pengukuran CHL: Nilai faktor daya untuk pengukuran CHL adalah 0.190%, yang juga menunjukkan kondisi isolasi yang masih dalam kondisi baik.

Setelah dilaksanakan *repacking*, diketahui bahwa hasil pengujian dan perhitungan tangen delta dapat dilihat pada Tabel 3.4.

**TABEL 3.4 DATA HASIL PENGUJIAN TANGEN DELTA SESUDAH REPACKING**

Parameter	Test (kV)	I (mA)	Cap. (pF)	DF
CH + CHL	10 kV	29,337 mA	9,3342 nF	0,2152 %
CH	10 kV	13,794 mA	4,3881 nF	0,2669 %
CHL (UST)	10 kV	15,538 mA	4,9462 nF	0,1703 %
CL	6 kV	29,837 mA	15,822 nF	0,2162 %

Berdasarkan hasil pengujian tangen delta pada transformator setelah dilakukan repacking, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.4, menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kualitas isolasi transformator. Nilai faktor daya (DF) untuk parameter CH + CHL adalah 0,2152%, menunjukkan penurunan signifikan dari kondisi sebelumnya dan menandakan perbaikan isolasi yang substansial. Pengukuran CH menunjukkan bahwa nilai DF turun menjadi 0,2669%, yang mengindikasikan pengurangan arus bocor kapasitif dan peningkatan kualitas isolasi. Pada pengukuran CHL (UST), nilai DF setelah repacking adalah 0,1703%, lebih baik dibandingkan dengan kondisi sebelum repacking, menunjukkan

bahwa tindakan perbaikan telah berhasil. Selain itu, nilai DF untuk pengukuran CL adalah 0,2162%, yang menunjukkan kondisi isolasi yang stabil dan baik setelah repacking. Pengukuran CLH juga menunjukkan hasil yang positif dengan nilai DF 0,1698%, mengindikasikan perbaikan yang signifikan dalam kualitas isolasi. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa tindakan repacking pada gasket seal telah berhasil memperbaiki kondisi isolasi transformator, mengurangi arus bocor kapasitif, dan meningkatkan efisiensi serta keandalan transformator.

**3.3 Hasil Pengujian Breakdown Voltage Sebelum Dan Sesudah Repacking**

Tabel 3.5 menunjukkan hasil pengujian *breakdown voltage* pada transformator sebelum dilakukan *repacking*.

**TABEL 3.5 DATA HASIL PENGUJIAN BREAKDOWN VOLTAGE SEBELUM REPACKING**

Pengujian ke-	Hasil (kV)
1	63,3
2	63,1
3	65,8
4	70,8
5	68,1
6	66,2
Rata-rata	66,2

Dari hasil pengujian *breakdown voltage* pada transformator sebelum dilakukan *repacking*, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.5, menunjukkan bahwa kondisi minyak isolasi transformator berada dalam kondisi yang dapat diterima, sesuai standar standar IEC 60156 pada Tabel 2.3. Hasil pengujian tegangan tembus (*breakdown voltage*) berkisar antara 63,1 kV hingga 70,8 kV, dengan nilai rata-rata sebesar 66,2 kV. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa minyak isolasi transformator masih mampu menahan tegangan listrik dengan baik, meskipun ada indikasi bahwa beberapa sampel berada pada batas bawah yang dapat diterima untuk performa optimal. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini mengindikasikan bahwa sebelum dilakukan repacking, kondisi minyak isolasi masih cukup baik untuk menjaga kinerja dan keandalan transformator, namun memerlukan perhatian lebih untuk memastikan tidak terjadi penurunan lebih lanjut.

Sedangkan data pengujian *breakdown voltage* sesudah *repacking* dapat dilihat di Tabel 3.6.

**TABEL 3.6 DATA HASIL PENGUJIAN BREAKDOWN VOLTAGE SESUDAH REPACKING**

Pengujian ke-	Hasil (kV)
1	90,3 kV
2	86,1 kV
3	87,0 kV
4	72,3 kV
5	88,9 kV
6	84,0 kV
Rata-rata	84,8 kV

Dari hasil pengujian *breakdown voltage* pada transformator setelah dilakukan repacking, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.6, menunjukkan peningkatan signifikan dalam kondisi minyak isolasi transformator. Hasil pengujian tegangan tembus (*breakdown voltage*) berkisar antara 72,3 kV hingga 90,3 kV, dengan nilai rata-rata sebesar 84,8 kV. Nilai-nilai ini jauh lebih tinggi

## Referensi

dibandingkan dengan hasil sebelum repacking, yang menunjukkan bahwa minyak isolasi transformator sekarang memiliki kemampuan yang lebih baik untuk menahan tegangan listrik. Peningkatan ini menunjukkan bahwa tindakan perbaikan yang dilakukan, yaitu *repacking* pada *gasket seal*, berhasil meningkatkan kualitas minyak isolasi transformator, yang pada gilirannya akan meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional transformator. Dengan tegangan tembus yang lebih tinggi, transformator sekarang lebih mampu untuk beroperasi dengan aman dan efektif, mengurangi risiko kegagalan akibat kerusakan isolasi. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan pentingnya pemeliharaan preventif dan perbaikan tepat waktu dalam menjaga performa optimal peralatan listrik kritis seperti transformator.

### 4. Penutup

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi isolasi pada SST Unit 1 di PLTU Paiton sebelum dan sesudah dilakukan *repacking* pada *gasket seal*. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, terdapat beberapa temuan penting yang berkaitan dengan tujuan penelitian dan peningkatan kinerja sistem. Hasil pengujian indeks polarisasi menunjukkan peningkatan yang signifikan setelah dilakukan *repacking*. Nilai PI pada pengujian HV-LV meningkat dari 101 menjadi 171, HV-GROUND meningkat dari 11 menjadi 15, dan LV-GROUND tetap stabil di 154. Peningkatan ini menunjukkan bahwa kondisi isolasi transformator membaik setelah dilakukan *repacking*, sesuai dengan standar IEEE C57.152-2013.

Hasil pengujian tangen delta juga menunjukkan peningkatan kualitas isolasi transformator. Nilai faktor daya (DF) untuk parameter CH + CHL menurun dari 0,303% menjadi 0,2152%, CH dari 0,430% menjadi 0,2669%, CHL (UST) dari 0,166% menjadi 0,1703%, CL dari 0,2162% menjadi 0,2162%, dan CLH dari 0,190% menjadi 0,1698%. Penurunan nilai DF ini mengindikasikan pengurangan arus bocor kapasitif dan peningkatan kualitas isolasi setelah *repacking*.

Pengujian *breakdown voltage* menunjukkan bahwa nilai tegangan tembus minyak transformator meningkat dari rata-rata 66,2 kV sebelum *repacking* menjadi 84,8 kV setelah *repacking*. Peningkatan ini menunjukkan bahwa minyak isolasi transformator sekarang memiliki kemampuan yang lebih baik untuk menahan tegangan listrik, yang meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional transformator.

Secara keseluruhan, temuan penelitian ini menunjukkan bahwa tindakan perbaikan yang dilakukan, yaitu *repacking* pada *gasket seal*, berhasil meningkatkan kondisi isolasi transformator. Peningkatan ini tidak hanya memastikan bahwa transformator dapat beroperasi dengan lebih aman dan efisien, tetapi juga mengurangi risiko kegagalan akibat kerusakan isolasi. Oleh karena itu, pemeliharaan preventif dan perbaikan tepat waktu sangat penting dalam menjaga performa optimal peralatan listrik kritis seperti transformator. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam bidang pemeliharaan transformator dan dapat menjadi acuan bagi praktisi dan peneliti dalam mengembangkan metode pemeliharaan yang lebih efektif dan efisien.

- [1] N. B. Alnavis, R. R. Wirawan, K. I. Solihah, and V. H. Nugroho, "Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia," *J. Innov. Mater. Energy, Sustain. Eng.*, vol. 1, no. 2, Jan. 2024, doi: 10.61511/JIMESE.V1I2.2024.544.
- [2] M. F. Hakim, S. Nurhadi, H. D. F. Amaral, and S. L. Hermawan, "Kapasitor Shunt Sebagai Korektor Tegangan Bus di Gardu Induk," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 30–35, Mar. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I1.915.
- [3] B. Raja, G. R. Venkatakishnan, and R. Rengaraj, "Power transformer fault diagnosis and condition monitoring using hybrid TDO-SNN technique," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 68, pp. 1370–1381, May 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.03.115.
- [4] M. H. Indra, Y. S. Handayani, I. Priyadi, Yanolanda Suzantry Handayani, and I. Priyadi, "Pengujian Tahanan Isolasi Pada Transformator Distribusi 160 kVA Di PT. PLN (PERSERO) UP3 Bengkulu," *J. Amplif. J. Ilm. Bid. Tek. Elektro Dan Komput.*, vol. 12, no. 2, pp. 8–15, Nov. 2022, doi: 10.33369/jamplifier.v12i2.25274.
- [5] M. Tohari et al., "ANALISIS KONDISI TRANSFORMATOR DAYA 20KV/150KV DENGAN METODE UJI DISSOLVED GAS ANALYSIS (DGA) DI PT.PJB PLTU REMBANG," *Pros. Konstelasi Ilm. Mhs. Unissula Klaster Eng.*, vol. 0, no. 0, Feb. 2021.
- [6] U. Situmeang, B. Mulyanto, and M. P. Halilintar, "ANALISIS KONDISI TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 125 MVA MENGGUNAKAN INDEKS POLARISASI TANGEN DELTA DAN BREAKDOWN VOLTAGE DI PLTU TENAYAN RAYA 2 X 110 MW," *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 6, no. 2, pp. 206–211, Apr. 2022, doi: 10.36277/JTEUNIBA.V6I2.137.
- [7] Suganda and A. Muis, "(2021). Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator Daya," *SINUSOIDA*, vol. 23, no. 2, pp. 1–10.
- [8] D. Almanda and A. Ardiansyah, "Analisis Pengujian Tangen Delta Pada Bushing Trafo 150/20 Kv 60 Mva Di Gardu Induk Karet Lama," *Resist. (Elektronika Kendali Telekomun. Tenaga List. Komputer)*, vol. 5, no. 2, pp. 97–102, Nov. 2022, doi: 10.24853/RESISTOR.5.2.97-102.
- [9] G. Prawetri et al., "Analisis Pengaruh Skala Warna dan UV-Vis Terhadap Tingkat Penuaan Isolasi Minyak," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, pp. 183–188, Oct. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I3.4445.
- [10] 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.
- [11] D. Amin, R. Walvekar, M. Khalid, M. Vaka, N. M. Mujawar, and T. C. S. M. Gupta, "RESISTIVITAS DAN INDEKS POLARISASI MINYAK TRANSFORMATOR BEKAS DENGAN PENAMBAHAN NANOPARTIKEL ZNO DAN AL2O3," *Pros. Semin. Nas. Tek. UISU*, vol. 6, no. 1, pp. 129–133, Jun. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946633.

- [12] A. Rahman Hidayat *et al.*, "Analysis of Power Transformer Insulation: A Case Study in 150 kV Bantul Substation," *J. Electr. Technol. UMY*, vol. 3, no. 2, pp. 50–60, Jun. 2019, doi: 10.18196/JET.3254.
- [13] G. D. Prasetyo, A. Kusmantoro, and Margono, "Analisa Tahanan Isolasi Transformator Daya Unit 2 (30 mva) Berdasarkan Uji Indeks Polarisasi Di PT. PLN Gardu Induk 150 KV Cepu," *Proceeding Sci. Eng. Natl. Semin.*, vol. 8, no. 1, pp. 164–169, 2023.
- [14] O. Muhammad, A. Rafiansyah, and A. Wisaksono, "ANALISIS UJI TAHANAN ISOLASI PADA POWER TRANSFORMATOR PT. PQR," *J. Cakrawala Ilm.*, vol. 1, no. 11, pp. 2723–2732, Jul. 2022, doi: 10.53625/JCIJURNALCAKRAWALAILMIAH.V1111.2338.
- [15] D. A. D. Vernanda and A. Makkulau, "ANALISIS PENGUJIAN TANGEN DELTA PADA TRANSFORMATOR DAYA 5 PADA GARDU INDUK SENTUL 150KV," *SNEKTI2023*, vol. 4, 2023.
- [16] Badaruddin and F. A. Firdianto, "ANALISA MINYAK TRANSFORMATOR PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DI PT X," *J. Teknol. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 76–83, 2016.
- [17] I. M. Djodding and A. Rasyid, "ANALISIS PENGUJIAN SHUTDOWN MEASUREMENT TRANSFORMATOR ARUS 150 KV PADA GARDU INDUK TELLO," *Kohesi J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 7, pp. 102–131, Feb. 2024, doi: 10.3785/KOHESI.V2I7.2339.
- [18] R. A. Prasojo, J. A. F. Iman, M. Saputra, V. N. Wijayaningrum, M. F. Hakim, and R. Duanaputri, "Development of Multi-Layer Perceptron Model for Power Transformer Fault Identification Expert System," *Proc. - IEIT 2023 2023 Int. Conf. Electr. Inf. Technol.*, pp. 305–310, 2023, doi: 10.1109/IEIT59852.2023.10335510.
- [19] F. Mustafa, S. Shaulagara, and M. Ihsan, "The through fault current effect of 150/20 kV transformer to its insulation resistance and tan delta test in PT. PLN (Persero) TJBB APP durikosambi," *Int. Conf. High Volt. Eng. Power Syst. ICHVEPS 2017 - Proceeding*, vol. 2017-January, pp. 193–197, Dec. 2017, doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225941.
- [20] S. Hs, E. P. Sinulingga, H. P. Nugroho, and A. Nasution, "Diagnosis of Transformer Isolation Using Dielectric Dissipation Factor (Tan Delta) and Insulation Resistance: A Review Study," *2021 5th Int. Conf. Electr. Telecommun. Comput. Eng. ELTICOM 2021 - Proc.*, pp. 1–4, Sep. 2021, doi: 10.1109/ELTICOM53303.2021.9590184.
- [21] J. P. Lata, D. P. Chacon-Troya, and R. D. Medina, "Improved tool for power transformer health index analysis," *Proc. 2017 IEEE 24th Int. Congr. Electron. Electr. Eng. Comput. INTERCON 2017*, Oct. 2017, doi: 10.1109/INTERCON.2017.8079656.
- [22] A. Aisteti Yani, K. Hasto Teknik Elektro, U. PGRI Semarang Jl Sidodadi TimurNo, K. Tempel, and S. Timur, "ANALISA TAHANAN ISOLASI TRANSFORMATOR 3 DI PT. PLN (Persero) GARDU INDUK 150 KV Pati," *Pros. Semin. Nas. NCIET*, vol. 1, no. 1, pp. 141–149, Dec. 2020, doi: 10.32497/NCIET.V111.72.
- [23] N. Mahmoudi, M. H. Samimi, and H. Mohseni, "Analisis Performa Transformator 2500 kVA Setelah Perbaikan Dan Purifikasi," *OKTAL J. Ilmu Komput. dan Sains*, vol. 2, no. 12, pp. 3283–3288, Dec. 2023, doi: 10.1049/IET-GTD.2019.1056.