

Jurnal Ilmiah Setrum

Volume 14, No.1, Juni 2025

p-ISSN : 2301-4652 / e-ISSN : 2503-068X

Analisa Pemeliharaan Bushing Primer Trafo Unit 3 Gardu Induk Kebasen 150 KV

Dwinta Andika^{1*}, Jenny Putri Hapsari¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Jawa Tengah.

Informasi Artikel

Naskah Diterima :

13 Februari 2025

Direvisi : 25 Mei 2025

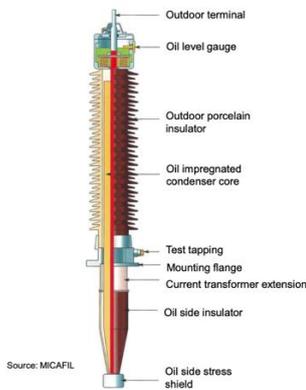
Disetujui : 28 Mei 2025

doi: 10.62870/setrum.v14i1.31307

*Korespondensi Penulis :

andikadwinta@gmail.com

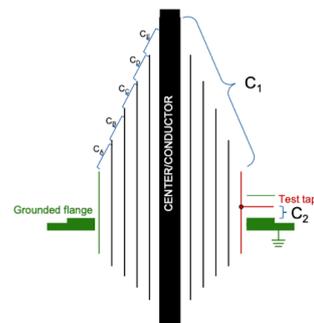
Graphical abstract



Abstract

The 150kV Transformer Unit 3 at GI Kebasen is one of four transformer units responsible for distributing electrical power to the Tegal City and Regency areas. Therefore, routine maintenance of this transformer is crucial to ensure an uninterrupted power supply in the region. Unexpected transformer failures can not only cause significant losses for the electricity provider but also disrupt customers, as the recovery process can take a considerable amount of time. According to the CIGRE A2.37 publication, failures caused by primary bushing deterioration rank as the third most common cause of transformer failures. Furthermore, transformer failures due to damaged primary bushings can lead to severe external consequences such as explosions and fires. This study aims to examine maintenance methods, analyze test results, and determine appropriate follow-up actions for the maintenance of the primary bushing in Transformer Unit 3 at GI Kebasen 150kV. Tan delta and capacitance value tests are utilized in this study as predictive measures to assess the condition of the primary bushing and prevent severe damage. The analysis is conducted using a comparative method against the standard limits set by PT. PLN (Persero), which specify a tan delta value of less than 0.7% and a capacitance variation threshold of ±10%. The results of this study indicate a deterioration in the tan delta values of the bushing, with phase S reaching 1.26% and phase T at 0.64%. Consequently, the bushings were replaced to prevent further damage and potential system failures.

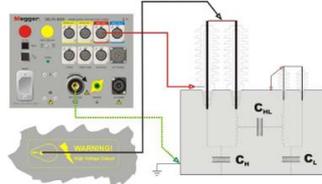
Keywords: Transformer, Bushing, Tan Delta.



Abstrak

Trafo unit 3 GI Kebasen 150kV merupakan salah satu dari 4 unit trafo yang menyalurkan tenaga Listrik di wilayah Kota dan Kabupaten Tegal. Oleh karena itu kondisi trafo ini perlu dipelihara secara rutin agar penyaluran tenaga listrik di wilayah tersebut tidak terganggu, selain merugikan Perusahaan penyedia tenaga listrik, pelanggan listrik juga dirugikan apabila terjadi kerusakan secara tidak terduga pada trafo ini karena akan membutuhkan waktu lama dalam pemulihannya. Berdasarkan publikasi cigre A2.37 bahwa kerusakan akibat bushing primer menjadi penyebab terbesar ke-3 selain itu kerusakan trafo yang diakibatkan oleh kerusakan bushing primer menyebabkan kerusakan eksternal berupa ledakan dan kebakaran. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui metode pemeliharaan, analisa terhadap hasil pengujian dan tindak lanjut dari analisa hasil pemeliharaan bushing primer trafo unit 3 GI Kebasen 150 kV. Pengujian tan delta dan nilai kapasitansi menjadi metode dalam menentukan kondisi bushing primer pada penelitian ini sebagai langkah prediktif kerusakan yang lebih besar. Analisa dilakukan dengan metode komparatif terhadap Batasan standar yang digunakan PT. PLN (Persero) yaitu <0,7% untuk nilai tan delta dan ±10% untuk perubahan nilai kapasitansi. Dalam penelitian ini didapatkan terdapat pemburukan pada nilai tan delta bushing fasa S sebesar 1,26% dan fasa T 0,64% sehingga dilakukan penggantian pada bushing untuk menghindari kerusakan yang lebih besar.

Test connections (UST)



$$DF: \tan \delta = \frac{I_{RP}}{I_{CP}} = \frac{1}{R_p \cdot \omega \cdot C_p}$$

$$PF: \cos \varphi = \frac{I_{RP}}{I_{TOT}}$$



Kata kunci: Trafo, Bushing dan Tan Delta.

© 2025 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved.

1. PENDAHULUAN

Keberlanjutan penyaluran tenaga listrik saat ini sudah menjadi fokus utama yang sangat diperhatikan oleh perusahaan penyedia tenaga listrik. Pada data terbaru menurut laporan statistik PLN 2023, rasio elektrifikasi di Indonesia telah mencapai 98,33% dengan total kwh terjual 288.435,78 GWh. Angka tersebut menunjukkan bahwa hampir 100% masyarakat sudah bergantung pada ketersediaan tenaga listrik. Gardu Induk Kebasen 150kV menjadi salah satu bagian penyaluran sistem tenaga listrik dengan jumlah trafo tenaga sebanyak 4 unit, salah satunya adalah trafo unit 3[1].

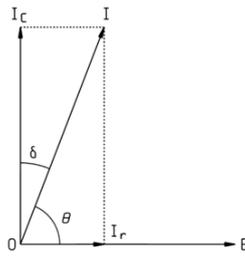
Pada Gardu Induk Kebasen 150kV digunakan trafo jenis step down yaitu trafo yang berfungsi untuk menurunkan nilai tegangan [2]. Kerusakan yang tidak terencana pada trafo 3 akan menimbulkan kerugian besar baik dari segi peralatan maupun dalam hal terputusnya penyaluran sistem tenaga listrik, dikarekan trafo bukan merupakan barang yang siap sedia dan membutuhkan persiapan panjang dalam penggantian trafo gardu induk. Merujuk pada publikasi CIGRE Work Group A2.37 yang berjudul "Transformer failure statistics" data menunjukkan bahwa 3 komponen pada trafo yang menjadi titik penyebab terbesar kerusakan trafo adalah tap changer, belitan primer dan yang ketiga adalah bushing primer [3].

Dari 3 komponen tertinggi penyebab kerusakan pada trafo, kerusakan akibat bushing trafo tenaga memiliki efek eksternal berupa ledakan dan kebakaran. Perlu adanya pemeliharaan secara rutin dan tindak lanjut yang diperlukan ketika terdapat nilai pengukuran yang menunjukkan ketidaknormalan pada komponen trafo khususnya bushing trafo tenaga. Pengukuran yang dilakukan sebagai batasan kondisi bushing trafo tenaga adalah tan delta bushing dan nilai kapasitansi bushing [3]. Berdasarkan IEEE C57.19.00 bushing didefinisikan sebagai struktur yang memberikan konduktor jalur yang terisolasi melalui penghalang yang terhubung ke tanah (seperti dinding tangki trafo) serta mendukung konduktor secara mekanis [4].

Nilai pengukuran tan delta bushing tipe OIP (Oil Impregated Papper) pada fasa S trafo unit 3 Gardu Induk Kebasen menunjukkan pemburukan nilai yang melebihi batasan berdasarkan standar yang digunakan PT. PLN (Persero) merujuk pada CIGRE TB 445 (IEC 60137) [5] yaitu masuk ke parameter buruk dengan nilai 1,26% dan bushing fasa T mengalami pemburukan hingga parameter pemburukan sedang dengan nilai tandelta 0,64% mendekati batas nilai standar <0,7%. Pemburukan nilai tan delta bushing tipe OIP dapat disebabkan oleh faktor kegagalan isolasi, kontaminasi cairan isolasi dengan partikel, asam maupun air, partial discharge pada test tap bushing dan kerusakan pada lapisan kondenser bushing. Faktor penyebab naiknya nilai tandelta pada bushing dapat diketahui dengan melakukan analisa terhadap pengujian nilai tan delta dan kapasitansi pada bushing [6].

2. METODE

Pengujian tan delta bushing dan pengujian nilai kapasitansi bushing merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui kondisi isolasi bushing trafo. Pada sistem listrik AC (*Alternating Current*) Isolasi yang ideal memiliki arus kapasitif I_c dengan sudut 90° derajat mendahului tegangan, namun pada praktiknya terdapat arus resistif I_r yang sefasa dengan tegangan, hal ini mengakibatkan muncul faktor disipasi (tan delta) yang menggambarkan kondisi sebuah isolasi sesuai dengan gambar 1. Dalam pengujiannya nilai tan delta memiliki satuan dalam persentase dimana semakin kecil nilai persentase tan delta maka kondisi isolasi semakin baik. Mengacu pada IEC 60137 nilai tandelta pada bushing tipe OIP (Oil Impregnated Paper) yang memiliki kondisi baik adalah <0,7% dan perubahan nilai kapasitansi $\leq \pm 10\%$ dari nameplate atau pengujian sebelumnya.



Gambar 1. Diagram Vektor Sistem Isolasi[7]

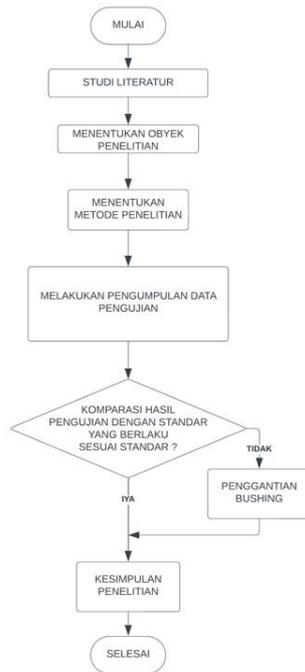
Penelitian terhadap studi kasus naiknya nilai tan delta bushing pada trafo unit 3 Gardu Induk Kebasen 150kV dengan melakukan analisa terhadap hasil pengujian pada tahun 2019, 2020, 2021 dan 2023. Alat uji yang digunakan dalam melakukan penelitian ini yaitu DELTA4000 12-kV *Insulation Diagnostic System* merk Megger dengan spesifikasi alat uji pada gambar 2.



Input Power:	100-240 V \pm 10 %, 50/60 Hz, 16 A max
Output voltage:	0 to 12 kV, continuously adjustable
Test frequency range:	45-70 Hz (12 kV) 15-405 Hz (4 kV) 1-505 Hz (250 V)
Output power:	3.6 kVA
Output Current:	>100 mA, continuous output >300 mA, up to 4 minutes

Gambar 2. Spesifikasi DELTA4000 [8]

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah melakukan studi literatur terlebih dahulu mengenai komponen penting dalam menentukan kondisi bushing trafo baik secara visual maupun dengan pengukuran dalam keadaan bertegangan dan pengukuran dalam keadaan bushing tidak bertegangan. Adapun beberapa pengujian antara lain pengujian tandelta, thermovisi, pengujian partial discharge [9], pengujian DGA dan kelembapan. Dalam melakukan pengujian DGA maka minyak yang diambil harus diganti sesuai dengan jumlah pengambilan dengan karakter sesuai dengan standar IEC 296 [10]. Dalam penelitian ini digunakan pengujian dalam keadaan tidak bertegangan yaitu pengujian nilai tan delta dan kapasitansi dengan mengumpulkan hasil pengujian tandelta bushing pada tahun 2019, 2020, 2021 dan 2023. Hasil pengujian ini kemudian dilakukan analisa terhadap nilai pengujian tan delta dan kapasitansi C1 bushing terhadap batasan standar yang digunakan PT. PLN (Persero) mengacu pada IEC 60137. Data pengujian juga disajikan dalam bentuk tabel dan diagram garis untuk mempermudah dalam proses analisa terhadap pemburukan nilai tan delta dan kapasitansi bushing yang terjadi pada trafo unit 3 GI Kebasen 150kV. setelah didapatkan nilai tan delta dan kapasitansi apabila terdapat kondisi isolasi yang sudah melebihi batas maka akan dilakukan penggantian bushing baru dengan spesifikasi yang sesuai. Dengan melakukan analisa terhadap hasil pengujian dapat diketahui faktor yang menjadi penyebab pemburukan pada bushing yaitu kegagalan isolasi, kontaminasi cairan isolasi dengan partikel, asam maupun air, partial discharge pada test tap bushing atau kerusakan pada lapisan kondenser bushing[11]. Pada bushing OIP (Oil Impregnated Paper) kenaikan nilai tan delta tanpa diikuti kenaikan nilai persentase perubahan kapasitansi menunjukkan bahwa pemburukan hanya terjadi pada minyak isolasi [12].



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Metode yang digunakan dalam menentukan kondisi isolasi bushing adalah komparatif yaitu penelitian yang membandingkan satu atau lebih variabel pada dua sampel berbeda atau pada waktu yang berbeda [13]. Komparasi yang dilakukan adalah melakukan perbandingan hasil pengujian terhadap batasan standar yang digunakan oleh PT. PLN (Persero) mengacu pada IEC 60137 pada tabel 1. Penggantian bushing dilakukan apabila nilai pengujian tidak memenuhi standar batasan dan masuk dalam parameter buruk. Kesimpulan dari penelitian ini adalah penyebab kenaikan dari nilai tandelta bushing.

Table 1. Batasan Tandelta dan Kapasitansi Bushing[6]

Parameter	Baik	Sedang	Buruk	Catatan
Tangen Delta (C1)	<0,5%	0,5-0,7%	>0,7%	Nilai dikoreksi ke suhu 20° untuk bushing tipe OIP
Perubahan Kapasitansi (C1)	<±5%	±5-10%	>±10%	

3. HASIL

Bushing pada trafo unit 3 Gardu Induk Kebasen merupakan obyek penelitian, dengan menggunakan metode yang sudah dijelaskan. Nameplate pada bushing fasa R, S dan T dimuat pada tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Nameplate bushing primer

Bushing	R	S	T
No.	Trench	Trench	Trench
No. Seri	3423	3424	3425
Tipe	COT 750-800/0013405/1	COT 750-800/0013405/1	COT 750-800/0013405/1
Tahun	2006	2006	2006
Ur	170 kV	170 kV	170 kV
Ir	800 A	800 A	800 A
BIL/SIL/AC	750 kV	750 kV	750 kV



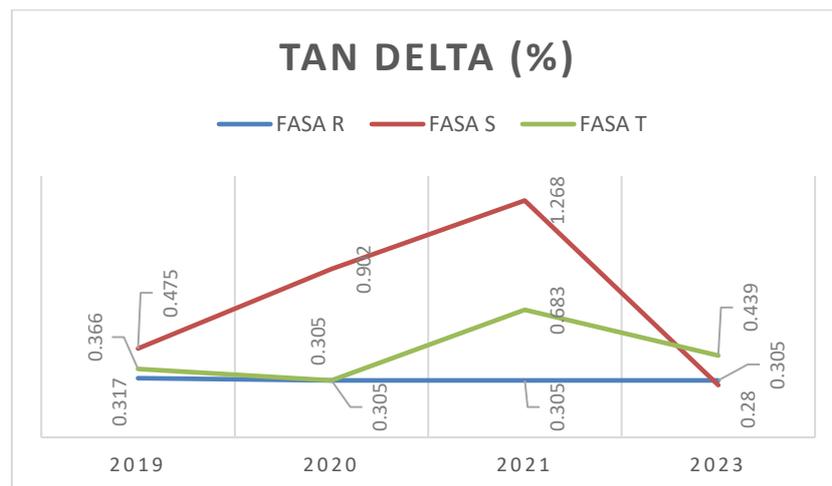
Berdasarkan nameplate bushing dan fisik di lapangan bushing ini merupakan bushing condenser dengan tipe OIP (Oil Impregnated Paper). Banyak dijumpai di lapangan bushing dengan merk yang berbeda dilengkapi dengan nilai tan delta dan kapasitansi yang termuat pada nameplate namun pada bushing merk Trench tipe COT 750-800/0013405/1 ini nilai tan delta dan kapasitansi tidak termuat dalam nameplate. Dibuat pada tahun 2006 bushing ini memiliki rating tegangan 170 kilo Volt dengan besar rating arus 800 Ampere. Pengujian tan delta pada bushing ini dilakukan pada tahun 2019, 2020 dan 2021. Data tahun 2023 merupakan bushing yang berbeda pada fasa S dan T karena telah dilakukan penggantian bushing pada tahun 2022 menindak lanjuti hasil pengujian tan delta yang mengalami pemburukan yang termuat dalam tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Hasil Pengujian Tandelta Bushing

	2019			2020			2021			2023		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T
Voltage	10 KV											
Kapasitansi (pf)	267,54	273,77	264,92	268,11	273,56	264,43	266,89	272,45	264,12	265,47	211,48	271,13
Tandelta	0,26	0,39	0,3	0,25	0,74	0,25	0,25	1,04	0,56	0,25	0,23	0,36
Fak. Koreksi 20°C		1,22			1,22			1,22			1,22	
	0,317	0,475	0,366	0,305	0,902	0,305	0,305	1,268	0,683	0,305	0,28	0,439

Pengujian nilai tan delta dan kapasitansi bushing C1 ini menggunakan tegangan uji AC sebesar 10kV dengan frekuensi 50Hz. Hasil dari pengujian nilai tan delta sangat terpengaruh oleh perbedaan suhu sehingga dilakukan konversi dengan faktor koreksi saat itu untuk dirubah ke suhu 20°C. Konversi ini dilakukan agar analisa terhadap perubahan nilai tan delta dari tahun ke tahun dapat dilakukan perbandingan dengan benar.

Dari hasil pengujian tan delta mengacu pada standar yang digunakan PT. PLN (Persero) yaitu IEC 60317 pada tabel 1 pada tahun 2019 tan delta bushing bernilai <0,5% dengan parameter baik. Pada tahun 2020 tan delta bushing fasa S mengalami kenaikan signifikan yaitu 0,902% dengan parameter buruk sedangkan fasa R dan T <0,5% dengan parameter baik. Pada tahun 2021 tan delta bushing fasa R <0,5% dengan parameter baik, fasa S mengalami peningkatan menjadi 1,268% dengan parameter buruk dan fasa T mengalami peningkatan bernilai 0,683% dengan parameter sedang mendekati 0,7%. Pada tahun 2023 hasil pengujian nilai tan delta menunjukkan nilai <5% dengan parameter baik pada semua fasa. Dari data pada tabel 3 didapatkan sebuah grafik nilai tan delta pada gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Grafik Pengujian Tan Delta Bushing

Grafik hasil pengujian tan delta menunjukkan bahwa bushing fasa R tidak mengalami kenaikan nilai tan delta dari tahun 2019 hingga 2023. Grafik fasa S menunjukkan bahwa kenaikan tan delta bushing terjadi antara tahun 2019 dengan 2020 dan pada tahun 2021 kenaikan nilai tan delta semakin

tinggi. Grafik fasa T menunjukkan pada tahun 2019 ke 2020 tidak terjadi perubahan nilai tan delta tetapi pada tahun 2021 nilai tan delta naik dan hampir menuju kondisi bushing dengan parameter buruk. Pada tahun 2023 grafik dari fasa S dan T mengalami penurunan dikarenakan tahun 2022 dilakukan penggantian pada bushing tersebut. Selain pengukuran nilai tan delta, pengujian kapasitansi juga perlu diperhatikan karena pada bushing kondenser nilai kapasitansi dipengaruhi kondisi lapisan kapasitif pada bushing. Berdasarkan standar yang digunakan dalam menentukan parameter kondisi nilai kapasitansi adalah dengan melakukan perhitungan persentase perubahan dari nilai kapasitansi awal. Pada kasus ini dikarenakan nameplate bushing tidak terdapat nilai kapasitansi maka perhitungan dilakukan menggunakan nilai kapasitansi pada pengukuran bushing tahun 2019. Berikut ini merupakan perhitungan persentase perubahan kapasitansi fasa R tahun 2020 pada persamaan (1)[14].

$$\% \text{ Perubahan Kapasitansi} = \left[\frac{C_{awal} - C_{ukur}}{C_{awal}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ Perubahan Kapasitansi} = \left[\frac{267,54 - 268,11}{267,54} \right] \times 100$$

$$\% \text{ Perubahan Kapasitansi} = 0,21 \%$$

Untuk hasil dari perhitungan persentase perubahan kapasitansi dan parameter berdasarkan standar pada tabel 1 dari bushing pada tahun 2020, 2021 dan 2023 dimuat dalam tabel 4.

Tabel 4. Persentase perubahan kapasitansi bushing C1

Tahun	Fasa	Perubahan Kapasitansi (%)	Parameter
2020	R	0,21	Baik
	S	0,07	Baik
	T	0,184	Baik
2021	R	0,24	Baik
	S	0,48	Baik
	T	0,301	Baik
2023	R	1,14	Baik
	S	-	-
	T	-	-

Hasil dari perhitungan pada tabel 4 menunjukkan bahwa nilai kapasitansi tahun 2020, 2021 dan 2023 menunjukkan nilai $<\pm 5\%$ dan masuk dalam parameter baik. Pada tahun 2023 perhitungan tidak bisa dilakukan untuk fasa S dan T dikarenakan merupakan bushing baru dan belum ada acuan nilai kapasitansi awal.

Berdasarkan pengujian tan delta bushing dimana terdapat kenaikan dan pemburukan nilai tan delta pada fasa S dan T. Namun perhitungan persentase perubahan kapasitansi menunjukkan nilai parameter baik serta visual bushing secara fisik menunjukkan tidak adanya kerusakan dapat disimpulkan bahwa kenaikan nilai tan delta pada bushing tipe OIP (Oil Impregnated Paper) fasa S dan T trafo unit 3 GI Kebasen 150kV dikarenakan adanya kontaminasi pada media isolasi minyak bushing. Untuk mengetahui lebih lanjut mengenai kontaminasi yang terjadi pada minyak isolasi mengacu pada IEC 60137 dapat dilakukan pengujian sampel minyak isolasi bushing [11]. Namun untuk mendapatkan nilai pengujian minyak bushing yang sesuai harus dilakukan pada kondisi bushing bersuhu ruang selama 48 jam [15].

4. KESIMPULAN

Hasil pengujian nilai kapasitansi bushing menunjukkan parameter baik dengan nilai persentase perbedaan kapasitansi terbesar adalah fasa R tahun 2023 bernilai 1,14% dan masih masuk parameter baik yaitu $<5\%$. Hal ini menjadi indikator bahwa tidak terjadi kerusakan pada lapisan kapasitif bushing. Hasil dari pengujian tan delta bushing menunjukkan adanya pemburukan nilai tan delta pada fasa S dan fasa T. Fasa S mencapai 1,26% sedangkan fasa T 0,676% sehingga dilakukan penggantian bushing pada fasa S dan fasa T. Nilai pemburukan tan delta fasa S dan T dengan tidak diikuti kenaikan nilai

kapasitansi pada bushing tipe OIP (Oil Impregnated Paper) dapat disebabkan pemburukan pada isolasi minyak pada bushing. Penggantian bushing yang dilakukan menjadikan nilai tan delta pada pengukuran terbaru tahun 2023 mendapatkan parameter yang baik yaitu fasa R 0,25%, fasa S 0,22% dan fasa T 0,35%. Untuk mengetahui lebih detail terhadap kontaminasi yang terjadi pada minyak bushing dapat dilakukan pengujian sampel minyak bushing.

REFERENSI

- [1] PT. PLN PERSERO, "STATISTIK PLN 2023," Jakarta, Jun. 2024. Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2024/08/Statistik-PLN-2023-29.7.24-1.pdf>
- [2] B. L. Tobing, *PERALATAN TEGANGAN TINGGI*, 2nd ed., vol. 2. Medan: Erlangga, 2002. [Online]. Available: <http://www.erlangga.co.id>
- [3] S. Tenbohlen *et al.*, "Transformer Reliability Survey," *Cigre*, vol. 642, no. A2.37, pp. 1–120, Dec. 2015, Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/642-transformer-reliability-survey.html>
- [4] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings*. New York: IEEE, 2005.
- [5] IEC, "INSULATED BUSHING FOR ALTERNATING VOLTAGES ABOVE 1000V," *IEC Publication 137*, no. 4, pp. 1–54, Dec. 1995.
- [6] PT PLN (Persero) No. 0520-2.K/DIR/2014, "BUKU PEDOMAN PEMELIHARAAN TRANSFORMATOR TENAGA," Jakarta Selatan, 2014.
- [7] Valley Forge Corporate Center, *Instruction Manual DELTA4000 12-kV Insulation Diagnostic System*, 1st ed., no. HIGH VOLTAGE EQUIPMENT. Norristown: Megger, 2010.
- [8] Megger, *Instruction Manual DELTA4000 12-kV Insulation Diagnostic System*, Rev. 1. Norristown: Megger, 2010.
- [9] F. Ramadhan, "MONITORING PARTIAL DISCHARGE PADA BUSHING TRANSFORMATOR," Depok, Jun. 2011.
- [10] INTERNATIONAL STANDARD, "IEC 60296-Mineral Insulating Oils For Electrical Equipment," Switzerland, Jun. 2020. [Online]. Available: www.iec.ch
- [11] C. Rajotte, *Guide for Transformer Maintenance A2.34*, 445th ed., vol. 445. PARIS: CIGRE, 2011.
- [12] C. Enk and F. Predl, "Transformer Seminar in Indonesia," Semarang, Feb. 2023.
- [13] Sugiyono, *Metode Penelitian Pendidikan*, 3rd ed., vol. 3. Bandung: Alfabeta, 2021. Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/709919745/metode-penelitian-pendidikan-sugiyono-2021>
- [14] WikiHow Contributors, "Menghitung Persentase Perubahan," <https://id.wikihow.com/Menghitung-Persentase-Perubahan>.
- [15] ABB, *Bushing diagnostics and conditioning*, 2750 515–142 en. Sweden: ABB, 2000.