

**ANALISA PEMELIHARAAN *BUSHING* PRIMER TRAFO UNIT 3
GARDU INDUK KEBASEN 150 KV**

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



**DISUSUN OLEH :
DWINTA ANDIKA
NIM 30602200139**

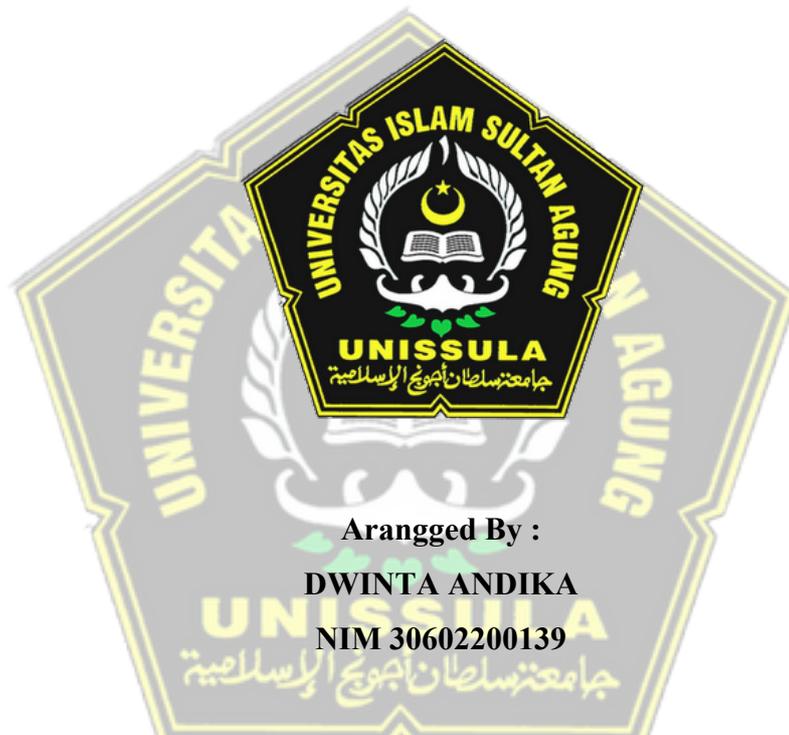
**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

FINAL PROJECT

**ANALYSIS OF PRIMARY BUSHING ON TRANSFORMER UNIT 3 AT
KEBASEN 150 KV SUBSTATION**

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (SI)
at Departement of Electrical Engineering,
Faculty of Industrial Technology, Universitas Islam Sultan Agung*



Aranged By :

DWINTA ANDIKA

NIM 30602200139

ELECTRICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG

SEMARANG

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**ANALISA PEMELIHARAAN BUSHING PRIMER TRAFU UNIT 3 GARDU INDUK KEBASEN 150 KV**” ini disusun oleh:

Nama : Dwinta Andika
NIM : 30602200139
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Senin
Tanggal : 10 Maret 2025

Pembimbing I


Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**ANALISA PEMELIHARAAN BUSHING PRIMER TRAFU UNIT 3 GARDU INDUK KEBASEN 150 KV**” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 05 Maret 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Arttini Dwi P., M.Si.

NIDN : 0620026501

Ketua



Ir. Ida Widiastuti, MT.

NIDN : 0005036501

Penguji I



Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.

NIDN : 0607018501

Penguji II



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dwinta Andika
NIM : 30602200139
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“ANALISA PEMELIHARAAN BUSHING PRIMER TRAFO UNIT 3 GARDU INDUK KEBASEN 150 KV”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 10 Maret 2025

Yang Menyatakan



Dwinta Andika

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dwinta Andika
NIM : 30602200139
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISA PEMELIHARAAN BUSHING PRIMER TRAFU UNIT 3 GARDU INDUK KEBASEN 150 KV”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, 10 Maret 2025

Yang Menyatakan


Dwinta Andika

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah, segala puji syukur bagi Allah subhanahu wa ta'ala karena atas berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya masih berkesempatan dalam menuntut ilmu dalam keadaan sehat wal'afiat, kemudian Shalawat serta Salam semoga senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah Muhammad shallallahu 'alaihi wa sallam, semoga kelak kita mendapatkan syafaatnya. Aamiin Yaa Robbaalalamin.

Penelitian ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Program Studi Strata Satu (S1) Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penyusunan penelitian ini, pastinya banyak pihak yang sudah memberikan bantuan baik moral dan material. Oleh karena itu saya menyampaikan ucapan Jazakumullah Khoiron dan terima kasih kepada:

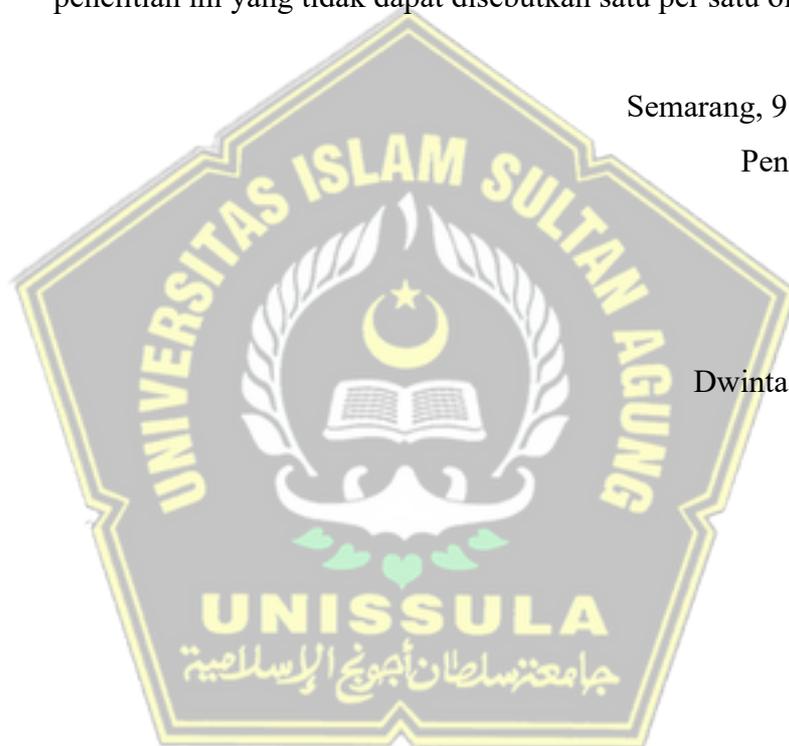
1. Bapak Prof. Dr. TAN Δ . Gunarto, SH., M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Mariyana, ST., MT., IPU., ASEAN, Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran dan kebijaksanaan telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dalam penyusunan penelitian hingga selesai.
5. Seluruh Dosen jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan arahan selama masa perkuliahan. Serta seluruh Staff Teknik Elektro yang selalu siap membantu dalam berbagai urusan administratif dan teknis selama masa perkuliahan.

6. Terima kasih istri dan anakku yang selalu mendukungku, mendoakanku dan menjadi penyemangat dalam hidupku.
7. Bapak, Ibu serta Saudara-saudara saya tercinta atas dukungan kepada saya berupa kasih sayang, keridhoan, doa, dan motivasi yang telah diberikan.
8. Teman-teman seperjuangan yang telah memberikan dukungan moral, semangat, serta saran dan kritik yang membangun. Kebersamaan dan kerja sama kalian sangat membantu dalam menjalani perkuliahan.
9. Semua pihak yang telah memberikan bantuan hingga selesainya penelitian ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh penulis.

Semarang, 9 Maret 2025

Penulis,

Dwinta Andika



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
ABSTRAK	xiv
ABSTRACT.....	xv
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Pembatasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	4
2.1 Tinjauan Pustaka	4
2.2 Landasan Teori.....	5
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	24
3.1 Lokasi Penelitian	24
3.2 Alat dan Bahan	24
3.3 Tahapan Penelitian	25
4.1 Data.....	27
4.2 Analisa.....	30

BAB V PENUTUP.....	34
5.1. Kesimpulan.....	34
5.2. Saran.....	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN.....	36



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batasan nilai maksimum tangen delta bushing [9]	20
Tabel 4.1 Nameplate bushing primer	27
Tabel 4.2 Pengujian tan δ bushing	27
Tabel 4. 3 Perhitungan tan δ bushing	29
Tabel 4. 4 Nilai pengujian kapasitansi C1	30
Tabel 4. 5 Persentase perubahan kapasitansi bushing.....	31
Tabel 4. 6 Nameplate bushing pengganti.....	32



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penyaluran tenaga Listrik [12]	5
Gambar 2. 2 Inti besi [9]	6
Gambar 2. 3 Belitan trafo tenaga [9].....	6
Gambar 2. 4 Radiator pendingin trafo [9].....	7
Gambar 2. 5 Konservator [9]	7
Gambar 2. 6 Self dehydrating breather [9].....	7
Gambar 2. 7 Isolasi kertas [9]	8
Gambar 2. 8 OLTC trafo tenaga [9].....	8
Gambar 2. 9 Neutral Grounding Resistor (NGR) [9].....	8
Gambar 2.10 Rele buchholz [9]	9
Gambar 2.11 Rele jansen [9].....	9
Gambar 2. 12 Rele PRD [9]	10
Gambar 2. 13 Rele thermal [9].....	10
Gambar 2. 14 Detektor api [9]	10
Gambar 2. 15 Kamera thermovisi [9]	11
Gambar 2. 16 Alat uji tahanan isolasi [9]	12
Gambar 2. 17 Rangkaian ekivalen isolasi trafo [9].....	13
Gambar 2. 18 Center tab bushing [9].....	13
Gambar 2. 19 Rangkaian pengujian RDC [9].....	14
Gambar 2.20 Bagian Bushing OIP (Oil Impregnated Paper) [12].....	15
Gambar 2.21 Medan listrik bushing kondenser [12].....	16
Gambar 2.22 Bushing non condenser [12].....	17
Gambar 2.23 Konstruksi alumunium foil bushing [12]	18
Gambar 2.24 Ilustrasi lapisan kapasitansi bushing [12].....	18
Gambar 2.25 Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian tangen delta [9].....	19
Gambar 2.26 Koneksi pengujian tan δ bushing [14].....	19
Gambar 2. 27 Rangkaian ekivalen isolasi [3]	20
Gambar 2. 28 Data analisa lokasi kegagalan trafo $\geq 100\text{kV}$ (675 unit) [2]	22
Gambar 2.29 Data kebakaran dan ledakan trafo (126 unit) [2].....	23
Gambar 2. 30 Efek eksternal kegagalan bushing (115 unit) [2]	23

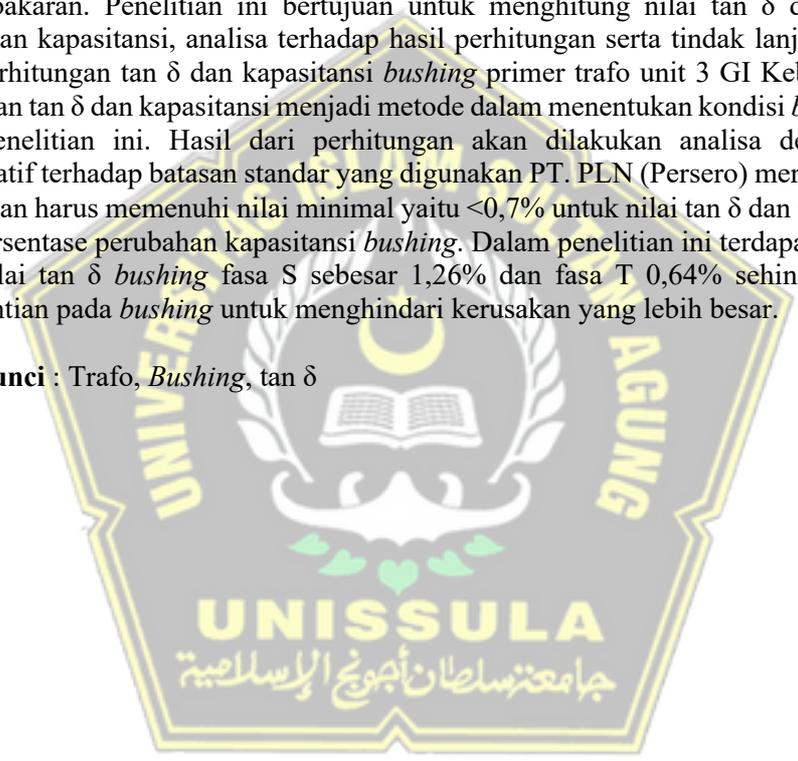
Gambar 3.1 Single line diagram GI Kebasen 150kV.....	24
Gambar 3. 2 Diagaram alur penelitian	25
Gambar 4.1 Grafik pengujian $\tan \delta$ bushing	29



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 pemadaman tidak terencana akibat kerusakan secara tidak terduga pada trafo ini karena akan membutuhkan waktu lama dalam pemulihannya. Berdasarkan publikasi teknis dari Working Grup A2.37 yang dilakukan CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) yaitu organisasi internasional yang berfokus pada studi dan pengembangan sistem tenaga listrik, termasuk transformator daya, menyebutkan bahwa kerusakan akibat *bushing* primer menjadi penyebab terbesar ke-3 setelah kerusakan akibat *winding* dan *tap changer*. Selain itu hampir 50% kerusakan trafo yang diakibatkan oleh *bushing* primer menyebabkan kerusakan eksternal berupa ledakan dan kebakaran. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung nilai $\tan \delta$ dan persentase perubahan kapasitansi, analisa terhadap hasil perhitungan serta tindak lanjut dari analisa hasil perhitungan $\tan \delta$ dan kapasitansi *bushing* primer trafo unit 3 GI Kebasen 150 kV. Pengujian $\tan \delta$ dan kapasitansi menjadi metode dalam menentukan kondisi *bushing* primer pada penelitian ini. Hasil dari perhitungan akan dilakukan analisa dengan metode komparatif terhadap batasan standar yang digunakan PT. PLN (Persero) merujuk pada IEC 60317 dan harus memenuhi nilai minimal yaitu $<0,7\%$ untuk nilai $\tan \delta$ dan $<\pm 10\%$ untuk nilai persentase perubahan kapasitansi *bushing*. Dalam penelitian ini 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.

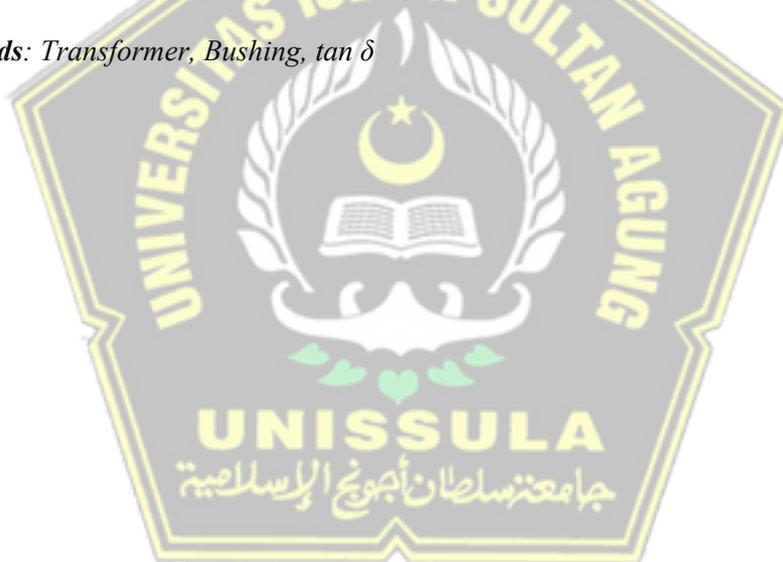
Kata kunci : Trafo, *Bushing*, $\tan \delta$



ABSTRACT

Transformer Unit 3 at GI Kebasen 150 kV is one of four transformer units responsible for distributing electrical power in the Kota and Kabupaten Tegal regions. Regular maintenance is essential to ensure uninterrupted power distribution, as unexpected transformer failures can lead to unplanned outages, causing financial losses for the electricity provider and inconvenience for consumers due to the long recovery time required. According to the Technical Publication from Working Group A2.37 of CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), failures in primary bushings are the third leading cause of transformer failures, following winding and tap changer failures. Additionally, nearly 50% of transformer failures caused by primary bushing defects result in external damage, such as explosions and fires. This study aims to calculate the $\tan \delta$ values and capacitance variation percentages, analyze the results, and determine the necessary follow-up actions based on the analysis of $\tan \delta$ and capacitance measurements of the primary bushing in Transformer Unit 3 at GI Kebasen 150 kV. The $\tan \delta$ and capacitance test is used to assess the condition of the primary bushing, with results analyzed using a comparative method against the standard limits set by PT PLN (Persero), referring to IEC 60317, which requires $\tan \delta < 0.7\%$ and capacitance variation within $\pm 10\%$. In this study, deterioration was observed in the $\tan \delta$ values of phase S (1.26%) and phase T (0.64%), leading to the decision to replace the bushings to prevent further damage.

Keywords: Transformer, Bushing, $\tan \delta$



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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. 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 teknis dari Working Grup A2.37 yang dilakukan CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) yaitu organisasi internasional yang berfokus pada studi dan pengembangan sistem tenaga listrik, termasuk transformator daya yang berjudul "*Transformer reliability survey*" 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 [2].

Dari 3 komponen tertinggi penyebab kerusakan pada trafo, hampir 50% 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* primer. Pengukuran yang dilakukan sebagai batasan kondisi *bushing* trafo tenaga adalah $\tan \delta$ *bushing* dan nilai kapasitansi *bushing* [2].

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

IEC 60137 yaitu masuk ke parameter buruk dengan nilai 1,26% dan *bushing* fasa T mengalami pemburukan hingga parameter sedang dengan nilai $\tan \delta$ 0,64% mendekati batas nilai standar minimal yaitu $<0,7\%$. 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 $\tan \delta$ pada *bushing* dapat diketahui dengan melakukan analisa terhadap perubahan nilai pengujian $\tan \delta$ dan kapasitansi pada *bushing* primer [3].

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil pengujian *bushing* primer trafo unit 3 GI Kebasen 150kV ?
2. Bagaimana perhitungan dan analisa terhadap hasil pengujian *bushing* primer trafo unit 3 GI Kebasen 150kV?
3. Bagaimana tindak lanjut terhadap nilai perhitungan pengujian *bushing* primer trafo unit 3 GI Kebasen 150kV yang tidak sesuai dengan standar?

1.3 Pembatasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pembahasan terkait penggantian *bushing* primer dilakukan pada trafo unit 3 Gardu Induk 150 kV Kebasen.
2. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah $\tan \delta$ dan kapasitansi *bushing* C1.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Hasil pengujian dari *bushing* primer trafo unit 3 Gardu Induk 150 kV Kebasen.
2. Hasil analisa terhadap perhitungan pengujian *bushing* primer trafo unit 3 Gardu Induk 150 kV Kebasen.
3. Hasil tindak lanjut dari analisa perhitungan pengujian *bushing* trafo unit 3 Gardu Induk 150kV Kebasen.

1.5 Manfaat

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman tentang hasil pengujian yang digunakan untuk menentukan kondisi *bushing* primer trafo tenaga.
2. Memberikan pemahaman tentang batasan nilai yang digunakan dalam menentukan kondisi *bushing* primer trafo tenaga.
3. Memberikan pemahaman tentang tindak lanjut yang harus dilakukan dari perhitungan dan analisa hasil pengujian *bushing* primer trafo tenaga.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penelitian yang akan dilakukan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini membahas penelitian terkait yang lebih dahulu dilakukan dan teori dasar yang melandasi penelitian ini yaitu penyaluran sistem tenaga listrik, trafo tenaga, *bushing* dan batasan nilai hasil pengujian *bushing*.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang objek penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam mendapatkan hasil penelitian dan diagram alur penelitian yang dilakukan.

BAB IV : HASIL DAN ANALISA

Bab ini membahas tentang hasil pengujian *bushing* trafo, perhitungan hasil pengujian, analisa dengan metode komparatif terhadap hasil pengujian, tindak lanjut hasil analisa dan perbandingan pengujian sebelum dan sesudah dilakukan tindak lanjut analisa pengujian.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian Tugas Akhir ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

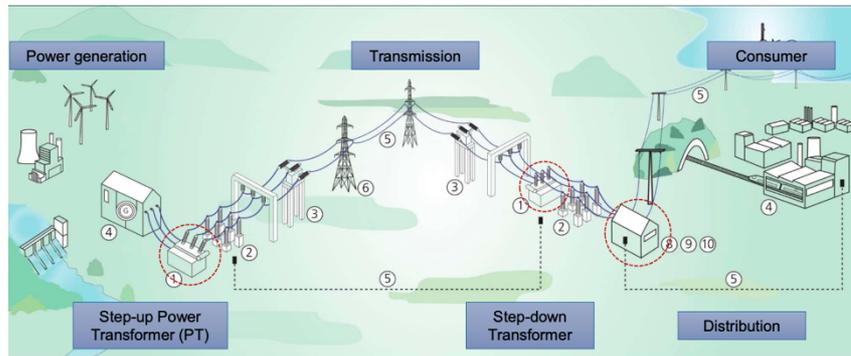
Penelitian-penelitian tentang penggantian *bushing* trafo telah dilakukan oleh peneliti terdahulu antara lain:

1. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Jundu Maulana yang berjudul “Analisa Pengujian *Bushing* Pada Transformator Tenaga Di Gardu Induk Wonogiri 150 kV”. Metode analisa yang dilakukan pada penelitian ini adalah metode komparatif terhadap batasan nilai pengujian tangen delta *bushing* yaitu $<0,5\%$. Hasil pengujian didapatkan nilai $\tan \delta$ fasa R sebesar 0,36%, fasa S sebesar 0,37% dan fasa T sebesar 0,4%. Dari hasil pengujian ini peneliti menyimpulkan bahwa *bushing* masih dalam kondisi layak digunakan berdasarkan standart ANSI [4].
2. Penelitian yang dilakukan oleh Arif Hanandya Trie Prasetya dengan judul “Analisis Hasil Pengujian *Bushing* Pada Transformator Tenaga Di Gardu Induk Sragen”. Penelitian ini dilakukan pada tahun 2019. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode komparatif antara hasil pengujian $\tan \delta$ belitan trafo dan pengujian $\tan \delta$ *bushing* primer trafo terhadap nilai batasan yaitu kondisi baik apabila nilai pengujian $\tan \delta$ dibawah 0,5%. Dari hasil pengujian dan perhitungan didapatkan nilai tangen delta belitan yaitu CH+CHL 0,19%, CH 0,2%, CHL(UST) 0,16% dan CHL 0,16%. Hasil dari pengujian tangen delta *bushing* fasa R 0,44%, fasa S 0,45% dan fasa T 0,42%. Kesimpulan peneliti terhadap hasil perhitungan pengujian $\tan \delta$ baik belitan dan *bushing* dalam keadaan yang baik berdasarkan standar ANSI [5].
3. Penelitian yang dilakukan oleh Wahyu firman maulana dengan judul “Perhitungan Hasil Uji Tangen Delta Sebagai Parameter Kelayakan Transformator Pada Gardu Induk Rungkut 150 kV”. Penelitian dilakukan dengan data pengujian *bushing* primer pada tahun 2021 dan tahun 2023. Pada tahun 2021 hasil pengujian fasa R sebesar 0,13%, fasa S sebesar 0,11% dan fasa T sebesar 0,12%. Pada tahun 2023 fasa R 0,2%, fasa S 0,22% dan fasa T 0,15% sehingga terjadi peningkatan nilai $\tan \delta$ tetapi masih dibawah batasan standar. Kesimpulan dari penelitian ini *bushing* primer masih dalam kondisi yang baik berdasarkan standar ANSI [6].

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Gardu Induk 150 kV

Gardu induk pada sistem transmisi merupakan bagian dalam sistem penyaluran tenaga listrik yang memiliki fungsi untuk menurunkan tegangan dari gardu induk pembangkit dan diteruskan ke sistem distribusi seperti gambar 2.1.



Gambar 2.1 Penyaluran tenaga Listrik [12]

Peralatan pada gardu induk 150kV yang digunakan sebagai penurun tegangan disebut dengan trafo daya. Tegangan dari pembangkitan tegangan yang dibangkitkan generator terbatas dalam belasan kilovolt, sehingga dilakukan step up tegangan pada gardu induk pembangkit. Sebaliknya, tegangan transmisi dari puluhan sampai ratusan kilovolt, sedangkan konsumen membutuhkan tegangan dari ratusan volt sampai puluhan kilovolt, sehingga diantara transmisi dengan konsumen dibutuhkan trafo daya step down [7].

Gardu induk 150kV tidak hanya disusun oleh trafo daya saja, berikut ini merupakan peralatan yang ada pada sebuah Gardu Induk 150kV [8].

1. Trafo Daya
2. Pemutus (PMT)
3. Pemisah (PMS)
4. Pelindung tegangan lebih (LA)
5. Trafo Tegangan (PT/CVT)
6. Trafo Arus (CT)
7. Kapasitor Tegangan Tinggi

2.2.2 Trafo Tenaga

Menurut IEC 60076-1, transformator tenaga (*power transformer*) adalah perangkat listrik statis yang digunakan untuk menaikkan (step-up) atau menurunkan (step-down) tegangan dalam sistem tenaga listrik, dengan tetap mempertahankan daya yang hampir sama (dengan memperhitungkan rugi-rugi dalam transformator). Bagian-bagian Trafo tenaga :

1. Inti besi

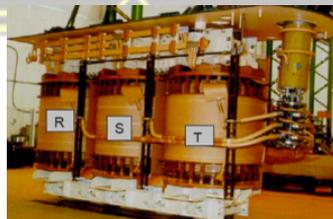
Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan-lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi *eddy current* yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, di mana arus tersebut akan mengakibatkan rugi-rugi (*losses*).



Gambar 2. 2 Inti besi [9]

2. Belitan

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, di mana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik.



Gambar 2. 3 Belitan trafo tenaga [9]

3. Bushing

Menurut IEC (International Electrotechnical Commission) pada publikasi IEC 60137 pengertian bushing adalah perangkat isolasi yang memungkinkan satu atau lebih konduktor melewati partisi (seperti dinding atau tangki) sekaligus

memberikan isolasi listrik dan dukungan mekanis untuk konduktor [10]. Bushing merupakan bagian trafo yang menjadi fokus penelitian khususnya bushing primer.

4. Sistem pendingin

Digunakan untuk menurunkan suhu ketika trafo sedang beroperasi. Sistem pendingin sangat diperlukan karena apabila suhu operasi trafo terlalu tinggi maka akan mengakibatkan kerusakan pada isolasi kertas dalam trafo.



Gambar 2. 4 Radiator pendingin trafo [9]

5. Konservator

Konservator merupakan tangki penampungan yang digunakan ketika terjadi kenaikan suhu dan minyak trafo mengalami pemuaian. Tangki ini berada pada bagian tertinggi trafo.



Gambar 2. 5 Konservator [9]

6. Sistem pernafasan

Sistem pernafasan digunakan untuk meminimalkan kandungan uap air yang masuk melalui konservator, sistem pernafasan trafo dibantu dengan menggunakan moisture removing breather. Pada self dehydrating breather terdapat pemanas otomatis untuk menghilangkan uap air pada silica gel.



Gambar 2. 6 Self dehydrating breather [9]

7. Media isolasi

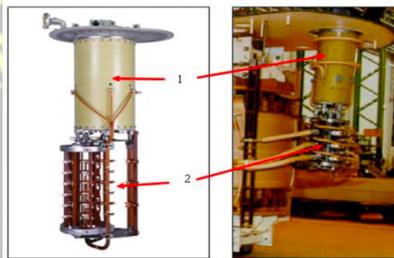
Pada trafo tenaga terdapat 2 media isolasi yaitu kertas isolasi dan minyak isolasi. Selain sebagai media isolasi minyak isolasi juga berfungsi sebagai pendingin dan pelindung dari oksidasi.



Gambar 2. 7 Isolasi kertas [9]

8. Tap changer

Tap changer berfungsi sebagai pengatur tegangan keluaran trafo dengan cara mengatur jumlah belitan pada trafo secara online.



Gambar 2. 8 OLTC trafo tenaga [9]

9. Neutral Grounding Resistor (NGR)

NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada trafo sebelum terhubung ke ground/tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah.



Gambar 2. 9 Neutral Grounding Resistor (NGR) [9]

10. Proteksi trafo

Proteksi internal trafo digunakan sebagai perlindungan pada trafo ketika trafo mengalami kerusakan yang berasal dari internal trafo agar tidak terjadi kerusakan yang lebih besar. Terdapat beberapa proteksi pada trafo tenaga antara lain :

A. Rele buchholz

Rele yang bekerja ketika terdapat gangguan internal pada maintank. Cara kerja dari rele ini adalah ketika terdapat gelembung udara yang naik melewati rele menuju koservator, yaitu apa bila pelampung pada rele berkeja hanya 1 maka alarm dan apabila 2 pelampung pada rele bekerja maka terjadi trip.



Gambar 2.10 Rele buchholz [9]

B. Rele Jansen

Rele yang bekerja ketika terdapat gangguan internal pada tangki OLTC. Rele ini bekerja berdasarkan besaran aliran minyak trafo yang mengalir dari OLTC menuju konservator ketika terjadi gangguan pada OLTC. Aliran ini menjadi pemicu rele bekerja.



Gambar 2.11 Rele jansen [9]

C. *Pressure Relief Device (PRD)*

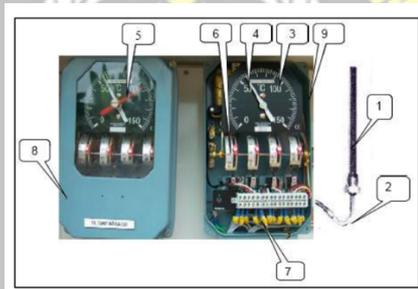
Rele yang bekerja berdasarkan tekanan dan merupakan titik terlemah dari trafo saat trafo mengalami tekanan pada trafo baik main tank maupun OLTC. Rele ini berfungsi untuk mencegah kerusakan yang lebih parah ketika trafo mengalami gangguan internal.



Gambar 2. 12 Rele PRD [9]

D. *Rele Thermal*

Rele yang digunakan untuk pelindungan ketika trafo mengalami kenaikan suhu berlebih dan melebihi batas pengaturan rele. Rele ini mendeteksi suhu minyak, belitan primer dan belitan skunder pada trafo, sehingga pada 1 trafo tenaga terdapat 3 rele thermal.



Gambar 2. 13 Rele *thermal* [9]

E. *Fire Prevention System*

Proteksi trafo yang bekerja ketika trafo mengalami kebakaran sehingga trafo akan secara mandiri menguras minyak dan mengalirkan gas nitrogen yang bersifat tidak terbakar.



Gambar 2. 14 Detektor api [9]

2.2.3 Pedoman Pemeliharaan Trafo Tenaga

Berdasarkan KEPDIR No. 0520 K/DIR/2014 Pedoman pemeliharaan trafo tenaga dibagi menjadi 3 yaitu :

1. Inspeksi level 1 (*In service inspection*)

In service inspection adalah kegiatan inspeksi yang dilakukan pada saat trafo dalam kondisi bertegangan/operasi tanpa menggunakan peralatan ukur/uji. Tujuan dilakukannya *in service inspection* adalah untuk mendeteksi secara dini ketidaknormalan yang mungkin terjadi di dalam trafo tanpa melakukan pemadaman.

2. Inspeksi level 2 (*In service measurement*)

In service measurement adalah kegiatan pengukuran/pengujian yang dilakukan pada saat trafo sedang dalam keadaan bertegangan/ operasi (*in service*). Tujuan dilakukannya *in service measurement* adalah untuk mengetahui kondisi trafo lebih dalam tanpa melakukan pemadaman.

A. Thermovisi

Thermovisi merupakan metode pemantauan suhu secara menyeluruh pada trafo untuk melihat ada tidaknya ketidaknormalan.



Gambar 2. 15 Kamera thermovisi [9]

B. Pengujian minyak isolasi

Pengambilan minyak isolasi digunakan untuk beberapa pengujian pada laboratorium yaitu:

1) Dissolved Gas Analysis (DGA)

Pengujian ini untuk melakukan pengecekan kandungan gas yang ada pada minyak trafo sebagai pendeteksi awal adanya kerusakan pada bagian trafo tenaga.

2) Karakteristik minyak

Dalam pengujian karakteristik minyak ada beberapa pengujian yaitu kadar air, tegangan tembus, kadar asam, tegangan antar muka, warna minyak, tangean delta dielektrik, Inhibitor content, sedimen, titik nyala api dan Jumlah partikel.

C. Pengujian furan

Pengujian furan merukan pengujian isolasi kertas yang ada pada trafo. pengujian furan ini hanya sebagai indikasi awal trafo mengalami pemburukan.

D. Pengujian *partial discharge*

Partial discharge (peluahan parsial) adalah peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut. PD pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan isolasi (breakdown). Pengujian ini dilakukan dengan *acoustic sensor* dan *high frequency current transformer* (HFCT).

3. Inspeksi level 3 (*Shutdown measurement*)

Shutdown testing/measurement adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat trafo dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidaknormalan. Untuk pemeliharaan rutin pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

A. Pengukuran tahanan isolasi

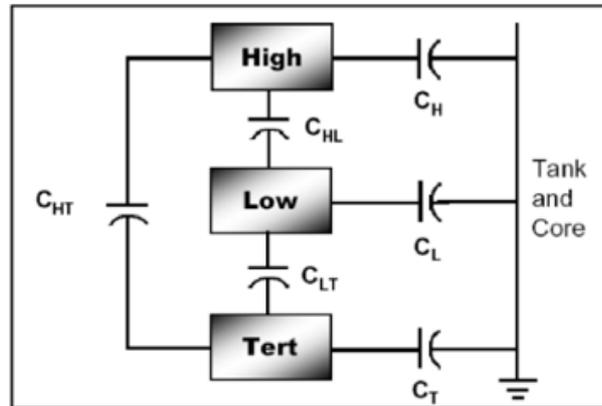
Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan *ground* atau antara dua belitan. Metoda yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dc dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan megohm.



Gambar 2. 16 Alat uji tahanan isolasi [9]

B. Pengukuran $\tan \delta$ winding

Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui kualitas isolasi pada trafo yaitu minyak dan kertas. Pengukuran dilakukan dengan melihat kualitas isolasi antar belitan dan belitan dengan ground. Tegangan uji yang digunakan sebesar 10kV.



Gambar 2. 17 Rangkaian ekivalen isolasi trafo [9]

C. Pengukuran $\tan \delta$ bushing

Sama seperti pengukuran $\tan \delta$ winding, tegangan uji yang digunakan juga sebesar 10kV dengan menggunakan fasilitas pengujian yang ada pada bushing dapat diketahui nilai $\tan \delta$ dan kapasitansi pada bushing. Pengujian ini merupakan pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dan akan dibahas lebih lanjut.

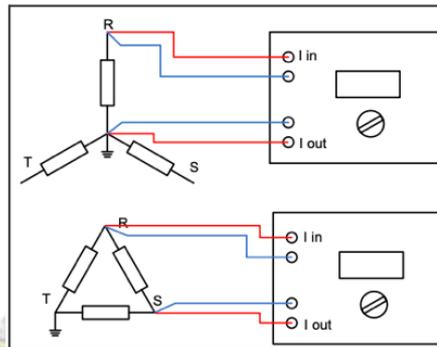


Gambar 2. 18 Center tab bushing [9]

D. Tahanan DC (Rdc)

Pengujian tahanan dc dimaksudkan untuk mengukur nilai resistif (R) dari belitan dan pengukuran ini hanya bisa dilakukan dengan memberikan arus dc (*direct current*) pada belitan. Oleh karena itu pengujian ini disebut pengujian tahanan dc. Pengujian tahanan dc dilakukan untuk mengetahui kelayakan dari koneksi-koneksi yang ada di belitan dan memperkirakan apabila ada kemungkinan

hubung singkat atau resistansi yang tinggi pada koneksi di belitan. Pada trafo tiga fasa proses pengukuran dilakukan pada masing-masing belitan pada titik fasa ke netral. Konsep pengukuran tahanan DC yang digunakan adalah *micro ohmmeter* atau jembatan *wheatstone*. *Micro ohmmeter* adalah alat untuk mengukur nilai resistif dari sebuah tahanan dengan orde $\mu\Omega$ (*micro ohm*) sampai dengan orde Ω (*ohm*).



Gambar 2. 19 Rangkaian pengujian RDC [9]

E. Dynamic resistance

Pengukuran dynamic resistance dilakukan untuk mengetahui ketidaknormalan kerja pada OLTC khususnya yang berkaitan dengan kontak diverter maupun selektor switch. Untuk rangkaian pengujian yang dilakukan sama seperti pengujian RDC.

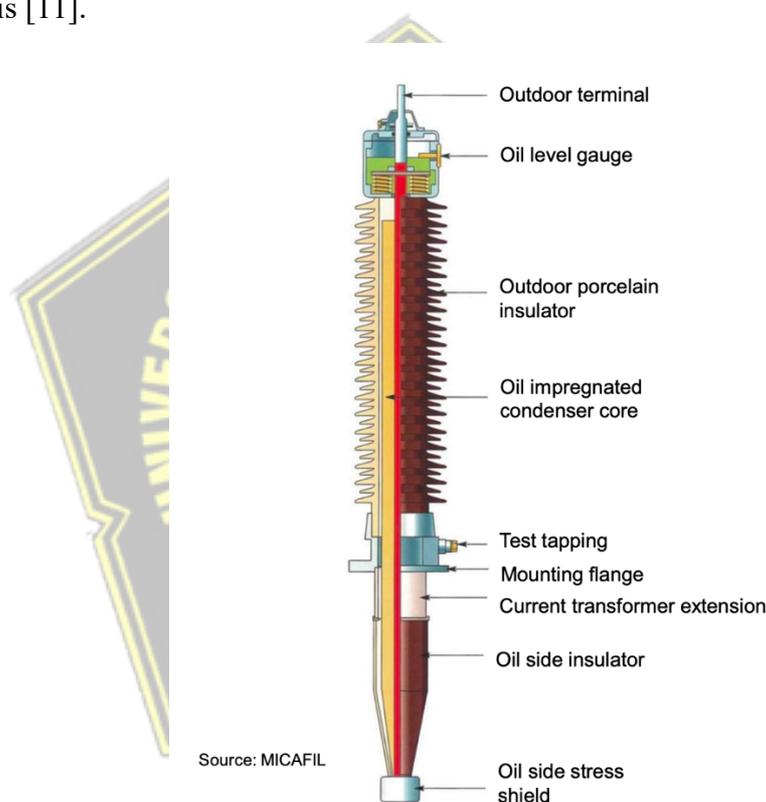
F. Pengukuran arus eksitasi

Pengujian arus eksitasi mampu mendeteksi adanya permasalahan pada belitan seperti hubung singkat atau belitan yang terbuka, sambungan atau kontak buruk, permasalahan pada inti dan sebagainya. Pengujian ini merupakan pengujian lanjutan yang bisa dilakukan menggunakan alat uji tan delta. Pada pengujian ini, tegangan diberikan pada belitan primer fasa ke netral pada trafo hubung bintang, dan fasa ke fasa pada trafo hubung delta. Belitan sekunder dalam posisi open dan jika merupakan hubung bintang maka sisi netral ditanahkan.

2.2.4 Bushing trafo

Menurut IEC (*International Electrotechnical Commission*) pada publikasi IEC 60137 pengertian *bushing* adalah perangkat isolasi yang memungkinkan satu atau lebih konduktor melewati partisi (seperti dinding atau tangki) sekaligus memberikan isolasi listrik dan dukungan mekanis untuk konduktor [10].

Menurut IEEE C57.19.00 (*General Requirements and Test Procedure for Power Transformer Bushing*) *bushing* didefinisikan sebagai struktur yang memberikan konduktor jalur yang terisolasi melalui penghalang yang terhubung ke tanah (seperti dinding tangki transformator) serta mendukung konduktor secara mekanis [11].



Gambar 2.20 Bagian *Bushing OIP (Oil Impregnated Paper)* [12]

Bagian-bagian *busing* beserta fungsinya :

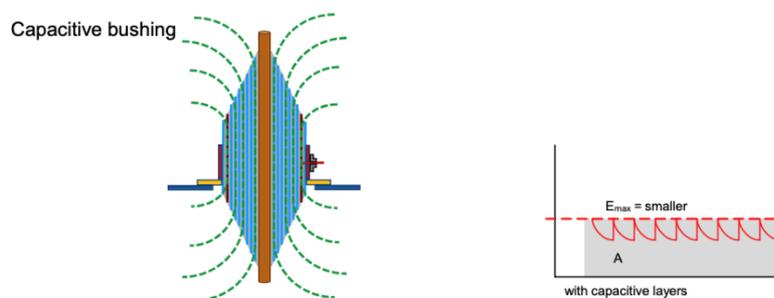
1. *Outdoor terminal* sebagai terminal utama untuk menghubungkan *bushing* ke konduktor.
2. *Oil level gauge* sebagai indikator level minyak *bushing*. Minyak digunakan sebagai isolasi dan pendingin.

3. *Outdoor porcelain insulator* sebagai pelindung bagian luar *bushing* dari kondisi lingkungan luar.
4. *Oil-impregnated paper* merupakan bagian isolasi utama *bushing* yang terdiri dari lapisan konduktor dan isolasi yang diresapi minyak. Fungsinya adalah untuk mendistribusikan tegangan secara merata disepanjang jalur *bushing* dan mencegah adanya tegangan tembus akibat medan listrik pada *bushing*.
5. *Test tapping* biasa disebut *center tap* yang berfungsi sebagai media pengujian *bushing*. Digunakan untuk mengetahui nilai kapasitansi dan $\tan \delta$.
6. *Mounting flange* untuk memasang *bushing* ke badan trafo tenaga.
7. *Current transformer extension* dimana beberapa *bushing* diberikan pemanjangan untuk tempat pengukuran arus.
8. *Oil side insulator* untuk melindungi bagian dalam *bushing*.
9. *Oil side stress shield* merupakan bagian yang terhubung ke belitan dan dilengkapi pelindung untuk menyelaraskan medan listrik.

2.2.5 Jenis-jenis *bushing*

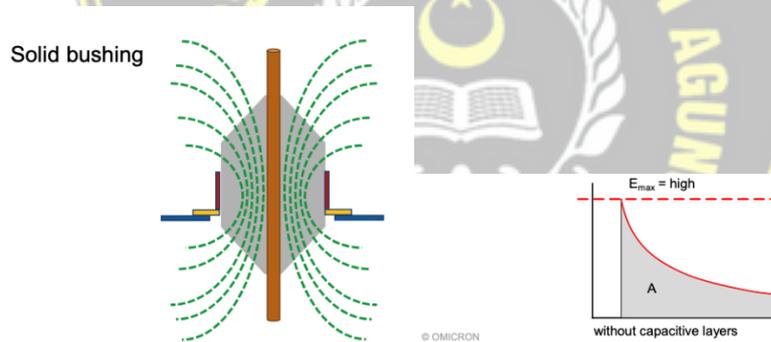
Bushing dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan ada tidaknya kapasitor untuk mengontrol medan listrik pada *bushing* :

1. *Bushing condenser (capacitive grade)* yaitu *bushing* yang dilengkapi dengan lapisan kapasitif yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan listrik secara merata sejajar dengan lapisan kapasitif seperti pada gambar 2.2. *Bushing* ini digunakan untuk tegangan diatas atau 36 kV. Untuk *bushing* dengan tegangan lebih dari 110kV dilengkapi dengan media pengujian yaitu *center tap/test tapping*.



Gambar 2.21 Medan listrik *bushing* kondenser [12]

- A. *Oil impregnated paper (OIP) Bushing* dengan isolasi utama berupa kertas yang diresapi minyak (*oil-impregnated paper*). Minyak digunakan untuk meningkatkan sifat dielektrik dan mengurangi kemungkinan kerusakan isolasi akibat kelembapan.
- B. *Resin impregnated paper (RIP) Bushing* dengan isolasi utama berupa kertas yang diresapi resin (*resin-impregnated paper*). Resin solid digunakan untuk menggantikan minyak sebagai media isolasi .
- C. *Resin bonded paper (RBP) Bushing* dengan isolasi utama berupa kertas yang diikat resin (*resin-bonded paper*). Resin digunakan untuk mengikat lapisan kertas, tetapi tidak sepenuhnya meresapi kertas seperti pada RIP.
2. *Bushing non condenser (solid bushing)* yaitu *bushing* yang dibuat dengan menggunakan bahan padat dan tidak memiliki lapisan kapasitif. Digunakan untuk teggangan dibawah 36 kV. Untuk tegangan diatas 36 kV harus digunakan *bushing* dengan lapisan kapasitif.

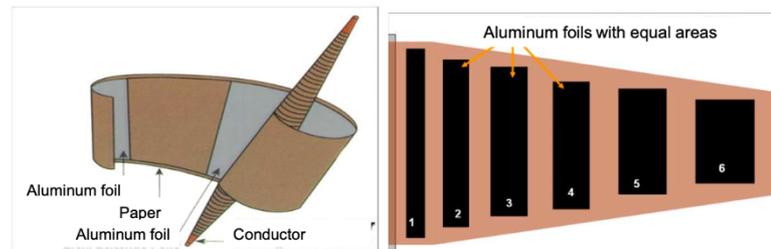


Gambar 2.22 *Bushing non condenser* [12]

- A. *Composite bushing* merupakan *bushing* dengan bahan isolasi utama berupa kombinasi material solid (biasanya resin atau *fiberglass*) dan pelapis eksternal berupa komposit (polimer tahan cuaca).
- B. *Compound filled bushing* merupakan *bushing* yang diisi dengan material isolasi cairan seperti senyawa minyak atau bahan komposit isolasi padat-cair [13].

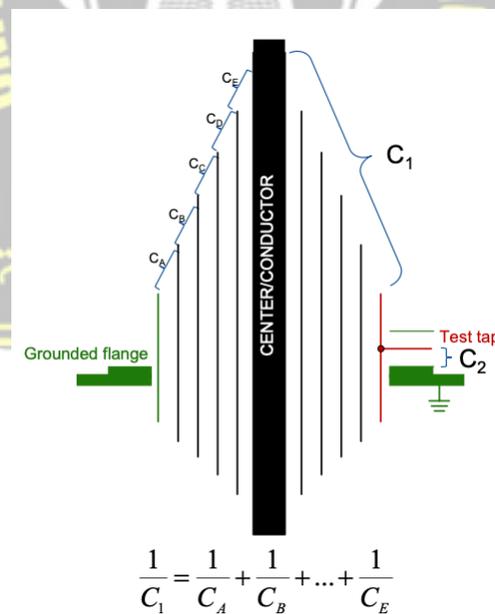
2.2.6 Konstruksi *bushing* kondenser

Bushing kondenser terdiri atas lapisan lapisan kapasitif yaitu berupa aluminium foil dengan luas penampang yang sama dan berada pada kertas isolasi *bushing* yang membungkus inti konduktor yang melewati *bushing* seperti terlihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.23 Konstruksi aluminium foil *bushing* [12]

Dikarenakan adanya tegangan yang tinggi antara konduktor dengan grounding yaitu flange pada *bushing* maka *bushing* disusun dengan menggunakan lapisan aluminium foil dan kertas seperti pada gambar 2.4. Lembaran logam tunggal dan kertas tersebut menimbulkan nilai kapasitansi yang disusun secara paralel seperti terlihat pada gambar 2.5. Persamaan pada gambar 2.5 menjadi dasar analisa apabila terdapat kerusakan pada lapisan kapasitif maka nilai kapasitansi meningkat.



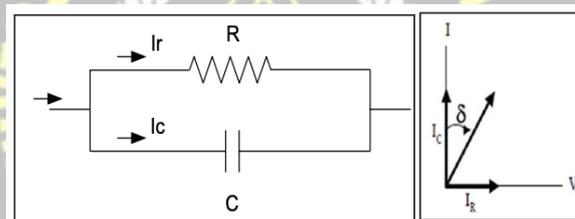
Gambar 2.24 Ilustrasi lapisan kapasitansi *bushing* [12]

Berdasarkan batasan nilai maksimum nilai persentase perubahan kapasitansi merujuk pada IEC 60137 bahwa apabila melebihi toleransi $>\pm 10\%$ maka harus

dilakukan penggantian *bushing* trafo dikarenakan masuk pada kondisi buruk berdasarkan tabel 2.1.

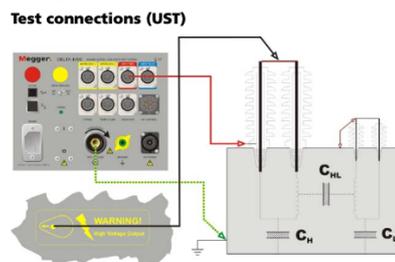
2.2.7 $\tan \delta$ dan kapasitansi *Bushing*

Isolasi yang baik akan bersifat kapasitif sempurna seperti halnya sebuah isolator yang berada diantara dua elektroda pada sebuah kapasitor. Pada kapasitor sempurna, tegangan dan arus fasa bergeser 90° dan arus yang melewati isolasi merupakan kapasitif. Jika ada kontaminasi pada isolasi, maka nilai tahanan dari isolasi berkurang dan berdampak kepada tingginya arus resistif yang melewati isolasi tersebut. Isolasi tersebut tidak lagi merupakan kapasitor sempurna. Tegangan dan arus tidak lagi bergeser 90° tapi akan bergeser kurang dari 90° . Besarnya selisih pergeseran dari 90° merepresentasikan batasan kontaminasi pada isolasi. Dibawah merupakan gambar rangkaian ekivalen dari sebuah isolasi dan diagram phasor arus kapasitansi dan arus resistif dari sebuah isolasi. Dengan mengukur nilai I_r/I_c dapat diperkirakan kualitas dari isolasi.



Gambar 2.25 Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian tangen delta [9]

Dalam pengujian ini peralatan yang digunakan adalah delta 4000 merk megger. Untuk koneksi pengujian $\tan \delta$ dilakukan pengujian C1 (pengujian $\tan \delta$ primer ke *center tab*) dan C2 (pengujian $\tan \delta$ *center tab* ke ground) sesuai dengan gambar dibawah ini yaitu dengan cara melakukan *short circuit* terhadap semua fasa pada sisi primer, semua fasa skunder dan tertier di hubungkan ke ground. Untuk metode pengujian yang digunakan adalah UST-R (*Ungrounded specimen test – Red*).



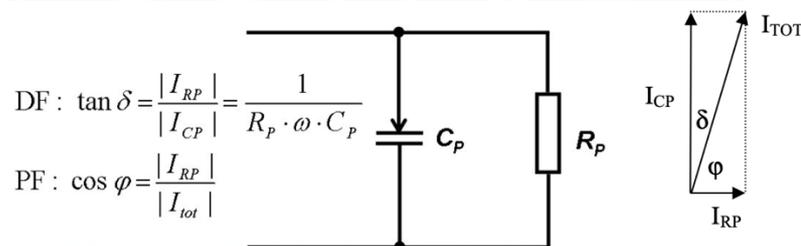
Gambar 2.26 Koneksi pengujian $\tan \delta$ *bushing* [14]

Batasan nilai hasil pengujian dan rekomendasi hasil pengujian $\tan \delta$ bushing ini sesuai dengan tabel 2.1 yang merujuk pada IEC 60137. Apabila hasil perhitungan masuk kedalam kondisi buruk maka tindak lanjut yang dilakukan adalah penggantian bushing.

Tabel 2.1 Batasan nilai maksimum tangen delta bushing [9]

No	Parameter	Baik	Sedang	Buruk	Catatan
1	Tangen Delta (C1)	<0,5%	0,5-0,7%	>0,7%	Nilai absolut dikoreksi ke suhu 20°C untuk bushing tipe OIP
2	Perubahan Kapasitansi (C1)	< ±5%	± 5-10 %	> ±10%	

Dalam melakukan analisa terhadap hasil pengujian digunakan persamaan untuk mendapatkan hasil perhitungan nilai $\tan \delta$ dengan persamaan (2.1) hingga (2.6), hasil ini digunakan sebagai interpretasi terhadap batasan pada tabel 2.1 sebagai penentu parameter dari kondisi bushing primer. Persamaan ini diperoleh dari rangkaian ekivalen dan diagram phasor pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2. 27 Rangkaian ekivalen isolasi [3]

Persamaan untuk mencari nilai $\tan \delta$ /faktor disipasi didefinisikan sebagai rasio antara arus resistif dengan arus kapasitif.

$$DF = \tan \delta = \frac{I_{RP}}{I_{CP}} \quad (2.1)$$

Dimana:

I_{RP} = Arus resistif (Berhubungan dengan daya aktif (P))

I_{CP} = Arus kapasitif (Berhubungan dengan daya reaktif (Q))

Persamaan untuk mencari Daya aktif (P) yaitu persamaan (2.2) dan untuk mencari Daya reaktif (Q) yaitu persamaan (2.3) dibawah ini.

$$P = \frac{I_{RP}}{V} \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{I_{CP}}{V} \quad (2.3)$$

Dimana :

$P = \text{Daya aktif (Watt)}$

$Q = \text{Daya reaktif (VA)}$

$V = \text{Tegangan}$

Substitusi persamaan (2.2) dan (2.3) kedalam persamaan (2.1) sehingga didapatkan persamaan (2.4) dibawah ini.

$$\tan \delta = \frac{I_{RP}}{I_{CP}} = \frac{\frac{P}{V}}{\frac{Q}{V}} = \frac{P}{Q} \quad (2.4)$$

Dalam menghitung nilai daya reaktif (Q) digunakan persamaan (2.5) dibawah ini.

$$Q = I_{CP} \cdot V = \omega \cdot C \cdot V \cdot V = 2\pi f \cdot C \cdot V^2 \quad (2.5)$$

Dimana :

$C = \text{Kapasitansi (F)}$

$f = 50 \text{ Hz}$

$\omega = \text{Frekuensi sudut}$

Dari persamaan (2.5) disubstitusi pada persamaan (2.4) sehingga nilai tan delta dengan parameter yang diketahui dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.6) dibawah ini.

$$\tan \delta = \frac{P}{Q} = \frac{P}{2\pi f \cdot C \cdot V^2} \times 100\% \quad (2.6)$$

Persamaan (2.7) merupakan hasil dari pengujian sebelum dilakukan konversi nilai ke suhu acuan 20°C. Hasil dari persamaan (2.6) dimasukkan kedalam persamaan (2.7) untuk mendapatkan nilai tan delta 20°C .

$$\tan \delta_{20^\circ\text{C}} = \tan \delta_{\text{perhitungan}} \cdot FK \quad (2.7)$$

Dimana :

$FK = \text{Faktor koreksi}$

Persamaan untuk mencari nilai persentase perbedaan kapasitansi dari pengukuran pada *bushing* dapat dilihat pada persamaan (2.8) dibawah ini [15].

$$\% \text{ Perubahan Kapasitansi} = \left[\frac{C_{awal} - C_{ukur}}{C_{awal}} \right] \times 100\% \quad (2.8)$$

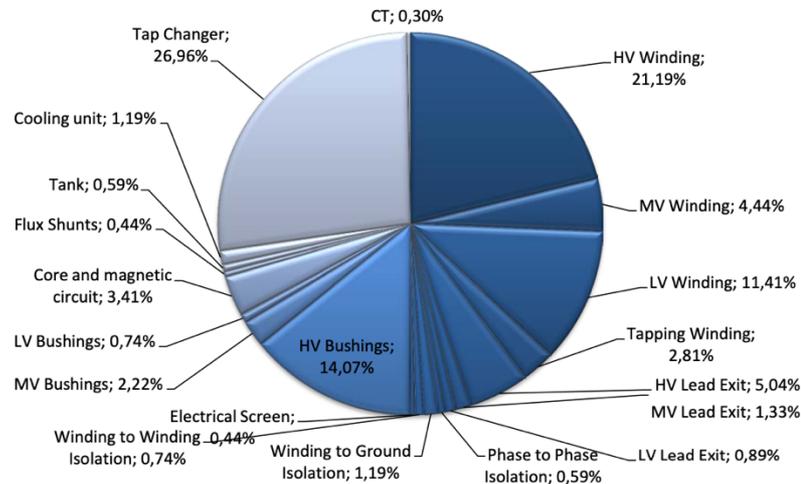
Dimana :

C_{awal} = Kapasitansi Nameplate

C_{ukur} = Kapasitansi pengujian

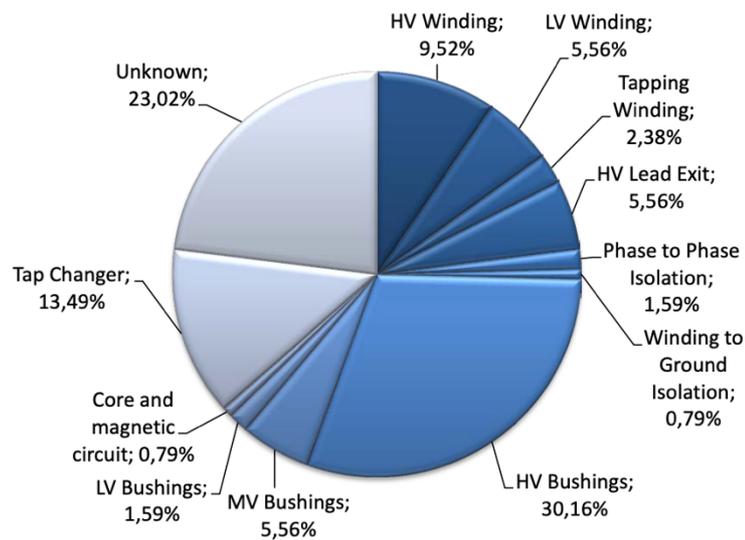
2.2.8 Transformer Reliability Survey

CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) yaitu organisasi internasional yang berfokus pada studi dan pengembangan sistem tenaga listrik, termasuk transformator daya pada bulan Desember 2015 mengeluarkan publikasi teknis yaitu *Working Grup (WG) A2.37* yang berjudul “*Transformer reliability survei*”. Pada publikasi teknis ini terdapat data survei kerusakan trafo dari berbagai benua dan berbagai kelas tegangan yang dimuat dalam gambar 2.28 berikut.



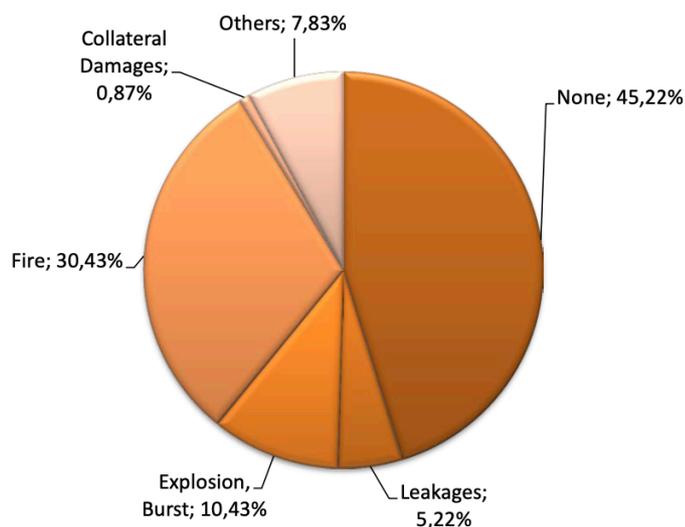
Gambar 2. 28 Data analisa lokasi kegagalan trafo $\geq 100\text{kV}$ (675 unit) [2]

Dari semua data kerusakan yang ada terdapat kerusakan trafo yang mengakibatkan efek eksternal berupa kebakaran dan ledakan. Hal ini sangat berbahaya baik bagi lingkungan sekitar maupun personil yang sedang melakukan pemeriksaan rutin. Dari data tersebut penyebab tertinggi kebakaran dan ledakan berasal dari kegagalan *bushing* primer seperti gambar 2.29 .



Gambar 2.29 Data kebakaran dan ledakan trafo (126 unit) [2]

Hampir 50% dari semua kerusakan akibat kegagalan *bushing* menyebabkan efek eksternal ledakan dan kebakaran seperti pada gambar 2.30 dibawah ini.

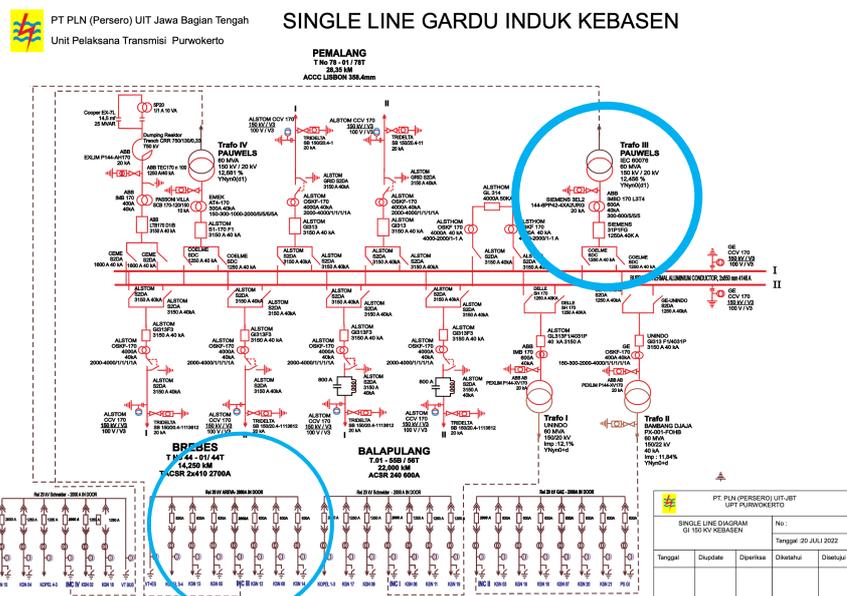


Gambar 2. 30 Efek eksternal kegagalan bushing (115 unit) [2]

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian yang diambil dari salah satu trafo pada Gardu Induk Kebasen 150 kV. Penelitian tentang hasil pengujian dan tindak lanjut pengujian *bushing* pada Trafo 3 Gardu Induk Kebasen 150 kV. Berikut ini merupakan single line diagram dari Gardu Induk Kebasen yang memiliki empat buah trafo dengan daya masing-masing 60 MVA. Trafo 3 pada gambar 3.1 ditandai dengan lingkaran biru dan memiliki 5 penyulang yaitu KSN05, KSN08, KSN12, KSN13 dan KSN 14.



Gambar 3.1 Single line diagram GI Kebasen 150kV

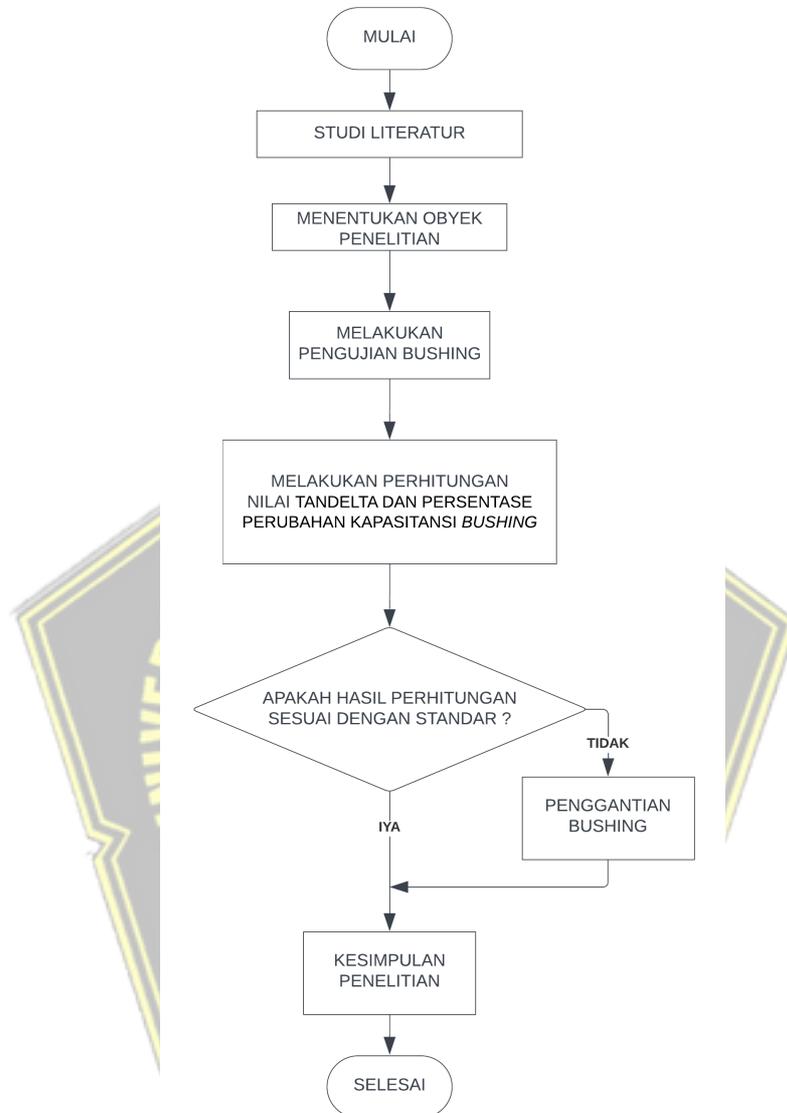
3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. *Safety line*
2. *Voltage detector*
3. Peralatan pentanahan
4. Material pembersih
5. Kabel pengujian trafo
6. *Bushing primer*
7. Delta 4000 merk Megger (Alat uji tan δ)
8. Aplikasi Power DB

3.3 Tahapan Penelitian

Berikut ini merupakan *flowchart* urutan langkah yang dilakukan dalam melakukan penelitian ini.



Gambar 3. 2 Diagram alur penelitian

1. Studi literatur yang dilakukan untuk memahami, menganalisa dan merangkum penelitian berasal dari penelitian-penelitian yang sudah pernah dilakukan, observasi lapangan dan mempelajari teori terkait pengujian *bushing* primer trafo dari jurnal, artikel, buku dan media lainnya .
2. Obyek yang diteliti adalah *bushing* primer trafo unit 3 GI Kebasen 150kV.

3. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian $\tan \delta$ dan kapasitansi *bushing* primer trafo unit 3 GI Kebasen 150 KV tahun 2019, 2020, 2021 dan 2023.
4. Perhitungan yang dilakukan adalah perhitungan nilai $\tan \delta$ dengan menggunakan persamaan (2.6) dan persamaan (2.7) dan persentase perubahan kapasitansi *bushing* dengan menggunakan persamaan (2.8).
5. Untuk menentukan kondisi *bushing* trafo dari hasil perhitungan dilakukan komparasi terhadap standar yang digunakan PT. PLN (Persero) merujuk pada IEC 60137 pada tabel 2.1.
6. Penggantian *bushing* dilakukan sebagai tindak lanjut apabila pengujian $\tan \delta$ *bushing* atau persentase perubahan kapasitansi menunjukkan nilai yang melebihi batasan berdasarkan tabel 2.1 sebagai tindakan pencegahan agar tidak terjadi kerusakan yang lebih besar terhadap trafo unit 3 GI Kebasen 150kV.
7. Kesimpulan merupakan hasil akhir dari penelitian yang dilakukan.



BAB IV DATA DAN ANALISA

4.1 Data

Data dari penelitian ini merupakan data pengukuran *bushing* primer pada tahun 2019, 2020 dan 2021. Pada tahun 2022 tidak dilakukan pengukuran *bushing* dikarenakan pemeliharaan rutin dilaksanakan 2 tahunan dan trafo unit 3 GI Kebasen dilaksanakan pada tahun ganjil. Pengukuran yang dilakukan adalah pengujian $\tan \delta$ dan kapasitansi *bushing* primer. Dari data tersebut dilakukan perhitungan $\tan \delta$ dengan persamaan (2.7) dan persentase perbedaan nilai kapasitansi dengan menggunakan persamaan (2.8).

4.1.1 Data *bushing*

Nameplate dari *bushing* primer trafo unit 3 GI Kebasen ada pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 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

4.1.2 Pengujian $\tan \delta$ *bushing*

Data hasil pengujian $\tan \delta$ *bushing* ini merupakan data pengujian yang dilakukan dari tahun 2019, 2020 dan 2021 melalui pemeliharaan rutin 2 tahunan bay trafo 3 GI Kebasen 150kV oleh tim pemeliharaan Gardu Induk ULTG Tegal dengan menggunakan alat uji Megger Delta 4000. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Pengujian $\tan \delta$ *bushing*

	2019			2020			2021		
	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
$\tan \delta$	0,26	0,39	0,3	0,25	0,74	0,25	0,25	1,04	0,56
Fak. Koreksi	1,22			1,22			1,22		
$\tan \delta$ 20°C	0,317	0,475	0,366	0,305	0,902	0,305	0,305	1,268	0,683

4.1.3 Hasil perhitungan $\tan \delta$ bushing

Untuk melakukan perhitungan $\tan \delta$ digunakan persamaan (2.7) dengan memasukkan parameter yang sudah diketahui nilainya.

1. Pengujian $\tan \delta$ tahun 2019

A. Fasa R

Diketahui :

$$P = 0,0214 \text{ Watts}$$

$$C = 267,54 \text{pF} = 267,54 \cdot 10^{-12} \text{F}$$

$$V = 10 \text{ kV}$$

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$\tan \delta = \frac{P}{2\pi f \cdot C \cdot V^2} \times 100 = \frac{0,0214}{2 \times 3,14 \times 50 \text{Hz} \times 267,54 \cdot 10^{-12} \times 10000^2} \times 100\% = 0,254\%$$

$$\tan \delta_{20^\circ\text{C}} = \tan \delta \cdot FK = 0,254 \times 1,22 = 0,31\%$$

B. Fasa S

Diketahui :

$$P = 0,034 \text{ Watts}$$

$$C = 273,77 \text{pF} = 273,77 \cdot 10^{-12} \text{F}$$

$$V = 10 \text{ kV}$$

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$\tan \delta = \frac{P}{2\pi f \cdot C \cdot V^2} \times 100 = \frac{0,034}{2 \times 3,14 \times 50 \text{Hz} \times 273,77 \cdot 10^{-12} \times 10000^2} \times 100\% = 0,39\%$$

$$\tan \delta_{20^\circ\text{C}} = \tan \delta \cdot FK = 0,39 \times 1,22 = 0,48\%$$

C. Fasa T

Diketahui :

$$P = 0,0248 \text{ Watts}$$

$$C = 264,92 \text{pF} = 264,92 \cdot 10^{-12} \text{F}$$

$$V = 10 \text{ kV}$$

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$\tan \delta = \frac{P}{2\pi f \cdot C \cdot V^2} \times 100 = \frac{0,0248}{2 \times 3,14 \times 50 \text{Hz} \times 264,92 \cdot 10^{-12} \times 10000^2} \times 100\% = 0,298\%$$

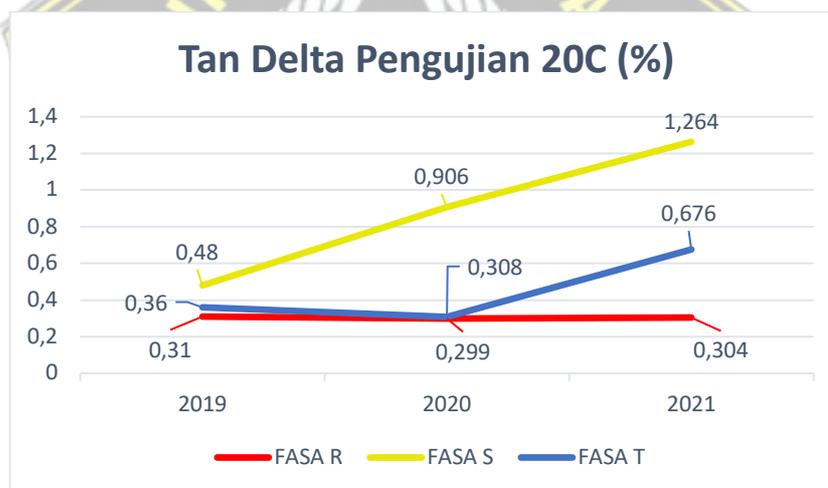
$$\tan \delta_{20^\circ\text{C}} = \tan \delta \cdot FK = 0,298 \times 1,22 = 0,36\%$$

Hasil perhitungan $\tan \delta$ bushing dari tahun 2019 hingga 2021 dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4. 3 Perhitungan $\tan \delta$ bushing

Tahun	Fasa	$\tan \delta$ (%)	Parameter
2019	R	0,31	Baik
	S	0,48	Baik
	T	0,36	Baik
2020	R	0,299	Baik
	S	0,906	Buruk
	T	0,308	Baik
2021	R	0,304	Baik
	S	1,264	Buruk
	T	0,676	Sedang

Dari data perhitungan $\tan \delta$ didapatkan grafik yang menggambarkan nilai $\tan \delta$ pada bushing mulai tahun 2019 hingga tahun 2021 yang dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah.



Gambar 4.1 Grafik pengujian $\tan \delta$ bushing

Nilai perhitungan $\tan \delta$ pada tabel 4.3 berdasarkan standar IEC 60137 pada tabel 2.1 dimana tahun 2019 $\tan \delta$ bushing fasa S menunjukkan nilai paling tinggi dibandingkan dengan fasa lainnya yaitu 0,48% dengan parameter baik pada semua fasa. Pada tahun 2020 nilai $\tan \delta$ bushing fasa S naik menjadi 0,906% dan masuk dalam parameter buruk. Tahun 2021 pengujian $\tan \delta$ bushing menunjukkan kenaikan yang signifikan pada fasa S sebesar 1,264% dengan parameter buruk dan pada fasa T 0,676 dengan parameter sedang.

4.2 Analisa

4.2.1. Nilai kapasitansi

Analisa dilakukan terhadap nilai pengujian kapasitansi dengan melakukan komparasi terhadap standar batasan yang digunakan pada PT. PLN (Persero) merujuk pada IEC 60137 tabel 2.1. Nilai pengujian kapasitansi ada pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Nilai pengujian kapasitansi C1

	2019			2020			2021		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
Kapasitansi (pf)	266,8	272,99	264,02	268,11	273,56	264,43	266,89	272,45	264,12

Nameplate pada *bushing* tidak menuliskan nilai kapasitansi yang ada pada *bushing*. Oleh karena itu analisa dilakukan dengan membandingkan perubahan nilai kapasitansi terhadap pengukuran kapasitansi pada tahun 2019 berdasarkan tabel 4.4 dengan menggunakan persamaan (2.8).

3) Pengujian tahun 2020

A. Fasa R

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

$$\% \text{Perubahan Kapasitansi} = \left[\frac{267,54 - 268,11}{267,54} \right] \times 100\% = 0,21 \%$$

B. Fasa S

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

$$\% \text{Perubahan Kapasitansi} = \left[\frac{273,77 - 273,58}{273,77} \right] \times 100\% = 0,07 \%$$

C. Fasa T

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

$$\% \text{Perubahan Kapasitansi} = \left[\frac{264,92 - 264,43}{264,92} \right] \times 100\% = 0,184 \%$$

Hasil perhitungan persentase perubahan nilai kapasitansi *bushing* pada tahun 2020 dan 2021 dapat dilihat pada tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4. 5 Persentase perubahan kapasitansi *bushing*

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

Berdasarkan tabel 4.5 perhitungan persentase perubahan nilai kapasitansi tahun 2020 dan 2021 merujuk pada standar IEC 60137 menunjukkan nilai persentase $<\pm 5\%$ sehingga masuk dalam parameter baik.

4.2.2. Penyebab kerusakan *bushing*

Data perhitungan $\tan \delta$ dan perhitungan persentase perubahan nilai kapasitansi pada *bushing* menunjukkan bahwa tidak terjadi kerusakan pada lapisan kapasitif *bushing* namun kerusakan yang mengakibatkan kenaikan nilai $\tan \delta$ pada *bushing* fasa S maupun *bushing* fasa T adalah adanya kerusakan isolasi yaitu pada isolasi minyak *bushing* yang mengalami kontaminasi. Kontaminasi ini dapat diketahui berupa partikel, asam maupun air dengan cara melakukan pengujian sampel minyak isolasi *bushing*. Merujuk pada KEPDIR No. 0520 K/DIR/2014 apabila nilai pengujian $\tan \delta$ dan/atau persentase perubahan kapasitansi telah melebihi batasan standar pada tabel 2.1 maka tindak lanjut yang dilakukan adalah melakukan penggantian *bushing* [9].

4.2.3. Tindak lanjut

Dari analisa yang sudah dilakukan dimana kenaikan nilai $\tan \delta$ terjadi karena terdapat pemburukan pada minyak isolasi *bushing*, maka dilakukan tindak lanjut dengan melakukan penggantian *bushing* pada fasa S dan fasa T. Data *bushing* pengganti fasa S dan T dapat dilihat pada tabel 4.6 di bawah ini.

Tabel 4. 6 Nameplate *bushing* pengganti

Fasa	Waktu Penggantian	Merk	Tipe	No. Seri	Ur	Arus
S	09.09.2021	Trench	COT 750-800/0012231/1	06 A 4101	170 kV	800 A
T	27.02.2022	Trench	COT 750-800	17 A 4945	170 kV	

Setelah dilakukan penggantian *bushing* fasa S dan fasa T pada tahun 2023 dilakukan pengujian nilai $\tan \delta$ dan kapasitansi pada *bushing* tersebut termasuk *bushing* fasa R. Untuk perhitungan persentase perbedaan nilai kapasitansi *bushing* tidak dapat dilakukan pada fasa S dan T dikarenakan nilai kapasitansi awal tidak ada. Berikut ini hasil perhitungan nilai $\tan \delta$ pada tahun 2023.

A. Fasa R

Diketahui :

$$P = 0,0211 \text{ Watts}$$

$$C = 264,47 \text{ pF} = 264,47 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$V = 10 \text{ kV}$$

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$\tan \delta = \frac{P}{2\pi f \cdot C \cdot V^2} \times 100 = \frac{0,0211}{2 \times 3,14 \times 50 \text{ Hz} \times 264,47 \cdot 10^{-12} \times 10000^2} \times 100\% = 0,254\%$$

$$\tan \delta_{20^\circ\text{C}} = \tan \delta \cdot FK = 0,254 \times 1,22 = 0,31\%$$

B. Fasa R

Diketahui :

$$P = 0,0151 \text{ Watts}$$

$$C = 211,48 \text{ pF} = 211,48 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$V = 10 \text{ kV}$$

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$\tan \delta = \frac{P}{2\pi f \cdot C \cdot V^2} \times 100 = \frac{0,0151}{2 \times 3,14 \times 50 \text{ Hz} \times 211,48 \cdot 10^{-12} \times 10000^2} \times 100\% = 0,227\%$$

$$\tan \delta_{20^{\circ}\text{C}} = \tan \delta \cdot FK = 0,227 \times 1,22 = 0,277\%$$

C. Fasa R

Diketahui :

$$P = 0,0305 \text{ Watts}$$

$$C = 271,13 \text{ pF} = 271,13 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

$$V = 10 \text{ kV}$$

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$\tan \delta = \frac{P}{2\pi f \cdot C \cdot V^2} \times 100 = \frac{0,0305}{2 \times 3,14 \times 50 \text{ Hz} \times 271,13 \cdot 10^{-12} \times 10000^2} \times 100\% = 0,358\%$$

$$\tan \delta_{20^{\circ}\text{C}} = \tan \delta \cdot FK = 0,358 \times 1,22 = 0,437\%$$

Dari hasil perhitungan $\tan \delta$ bushing fasa R, S dan T berdasarkan standar IEC 60137 pada tabel 2.1 masuk kedalam kategori baik dengan nilai $\tan \delta < 0,5\%$, dimana fasa R bernilai 0,31% fasa S bernilai 0,277% dan fasa T 0,437% sehingga trafo unit 3 GI Kebasen 150kV beroperasi dengan kondisi bushing primer yang normal.



BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan.

1. 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 $<\pm 5\%$. Hal ini menjadi indikator bahwa tidak terjadi kerusakan pada lapisan kapasitif *bushing*.
2. 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.
3. Penggantian *bushing* yang dilakukan pada fasa S dan T menjadikan nilai $\tan \delta$ pada pengukuran terbaru tahun 2023 mendapatkan parameter yang baik.

5.2. Saran

1. Apabila nantinya terdapat permasalahan yang serupa agar dilakukan analisa lebih dalam yaitu melakukan pengujian sampel minyak isolasi pada *bushing* tipe OIP agar penyebab kerusakan dapat diketahui lebih detail.
2. Penelitian selanjutnya dengan masalah yang sama agar menggunakan metode pengantian minyak isolasi *bushing* saja agar lebih efisien tentunya dengan prosedur yang sesuai pabrikan *bushing*.

DAFTAR PUSTAKA

- [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] 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>
- [3] C. Rajotte, *Guide for Transformer Maintenance A2.34*, 445th ed., vol. 445. PARIS: CIGRE, 2011.
- [4] M. J. Maulana, 'ANALISA PENGUJIAN BUSHING PADA TRANSFORMATOR TENAGA DI GARDU INDUK WONOGIRI 150 KV', Surakarta, May 2018. Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://eprints.ums.ac.id/64086/>
- [5] A. H. T. Prasetya, 'ANALISIS HASIL PENGUJIAN BUSHING PADA TRANSFORMATOR TENAGA DI GARDU INDUK SRAGEN', Surakarta, Jan. 2019. Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://eprints.ums.ac.id/70524/3/Naskah%20Publikasi-35.pdf>
- [6] F. Maulana. Wahyu, 'Perhitungan hasil uji Tangen Delta sebagai parameter kelayakan Transformator pada Gardu Induk Rungkut 150 kV', *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 14, no. Transformator, Insulation Resistance , Tangent Delta., pp. 8–15, 2024.
- [7] B. L. Tobing, *PERALATAN TEGANGAN TINGGI*, 2nd ed., vol. 2. Medan: Erlangga, 2002. [Online]. Available: <http://www.erlangga.co.id>
- [8] A. Arismunandar and S. Kuwahara, *BUKU PEGANGAN TEKNIK TENAGA LISTRIK*, 7th ed., vol. 3. Jakarta: PT ABADI, 2004.
- [9] PT PLN (Persero) No. 0520-2.K/DIR/2014, 'BUKU PEDOMAN PEMELIHARAAN TRANSFORMATOR TENAGA', Jakarta Selatan, 2014.
- [10] IEC, 'INSULATED BUSHING FOR ALTERNATING VOLTAGES ABOVE 1000V', *IEC Publication 137*, no. 4, pp. 1–54, Dec. 1995.
- [11] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings*. New York: IEEE, 2005.
- [12] C. Enk and F. Predl, 'Transformer Seminar in Indonesia', Semarang, Feb. 2023.
- [13] Kulkarni and Khaparde, *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*, 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.
- [14] Valley Forge Corporate Center, *Instruction Manual DELTA4000 12-kV Insulation Diagnostic System*, 1st ed., no. HIGH VOLTAGE EQUIPMENT. Norristown: Magger, 2010.
- [15] WikiHow Contributors, 'Menghitung Persentase Perubahan', <https://id.wikihow.com/Menghitung-Persentase-Perubahan>.