

Analisa Tahanan Isolasi Pada Transformator Daya 150/30 KV Gardu Induk Padang Luar PT PLN (Persero) Bukittinggi

Gilang Arinsya Prima¹, Zuriman Anthony², Anggun Anugrah³

¹²³Jurusan Teknik, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Padang, Padang, 60231, Indonesia

¹gilangjr10@gmail.com

Abstrak

Transformator adalah suatu alat untuk memindahkan daya listrik arus bolak balik dari suatu rangkaian ke rangkaian lainnya secara induksi elektromagnetik. IEC telah menetapkan umur transformator 20 tahun apabila dibebani 100% dari nilai rating daya pada suhu sekitar 20oC. Pada tugas akhir ini dilakukan studi kasus kelayakan transformator daya 2 30 MVA Gardu Induk Padang Luar yang telah berumur lebih dari 10 tahun. Kelayakan transformator ini mengacu kepada hasil pengukuran dengan parameter pengujian tahanan isolasi belitan, Indeks Polarisasi (IP), tangen delta belitan, dan tegangan tembus/Breakdown Voltage (BDV) minyak transformator dengan standar uji internasional (IEEE, IEC dan CIGRE). Hasil pengukuran yang didapatkan lalu dibandingkan dengan rumus perhitungan, selanjutnya dengan mengacu kepada standar akan diketahui apakah transformator tersebut masih layak dioperasikan atau tidak. Hasil pengujian tahanan isolasi pada transformator daya 2 30 MVA GI Padang Luar didapatkan nilai tahanan isolasi dengan rentang nilai 8,91 – 29,7 GΩ dan indeks polarisasi dengan hasil di rentang 1,77 – 2,55. Pengujian tangen delta mendapatkan hasil antara 0,1706 – 0,8708 %. Pada pengujian tegangan tembus didapatkan nilai 59,3 kV/2,5 mm untuk minyak bagian atas dan 57,6 kV/2,5 mm untuk minyak bagian bawah. Hasil pengujian yang didapatkan sama dengan perhitungan dengan menggunakan rumus perhitungan. Berdasarkan hasil pengujian dengan parameter di atas kemudian mengacu kepada standar IEEE, IEC dan CIGRE transformator daya 2 30 MVA GI Padang Luar masih layak dioperasikan walaupun telah berumur lebih dari 10 tahun.

Kata kunci: kelayakan transformator, pengujian transformator daya, standar internasional, transformator daya 2 30 MVA

Abstract

A transformer is a device for transferring alternating current electrical power from one circuit to another circuit using electromagnetic induction. IEC has set a transformer life of 20 years if it is loaded with 100% of the power rating at a temperature of around 20oC. In this final project, a case study was carried out on the feasibility of a 2 30 MVA power transformer at the Padang Luar Main Substation which is more than 10 years old. The suitability of this transformer refers to the results of measurements using winding insulation resistance test parameters, Polarization Index (IP), winding delta tangent, and Breakdown Voltage (BDV) of transformer oil using international test standards (IEEE, IEC and CIGRE). The measurement results obtained are then compared with the calculation formula, then by referring to the standards it will be known whether the transformer is still suitable for operation or not. The results of the insulation resistance test on the 2 30 MVA GI Padang Luar power transformer showed that the insulation resistance value was in the range of 8.91 – 29.7 GΩ and the polarization index was in the range of 1.77 – 2.55. Tangent delta testing produces results between 0.1706 – 0.8708%. In the breakdown voltage test, a value of 59.3 kV/2.5 mm was obtained for the top oil and 57.6 kV/2.5 mm for the bottom oil. The test results obtained are the same as calculations using the calculation formula. Based on the test results with the parameters above, it then refers to IEEE, IEC and CIGRE standards. The 2 30 MVA GI Padang Luar power transformer is still suitable for operation even though it is more than 10 years old.

Keyword: transformer feasibility, power transformer testing, international standards, 2 30 MVA power transformer

I. PENDAHULUAN

Saat ini kebutuhan listrik jadi salah satu bagian kebutuhan pokok untuk kehidupan manusia. Hampir seluruh manusia tiap harinya memerlukan tenaga listrik. Semakin lama kebutuhan listrik di Indonesia semakin bertambah serta tidak hanya untuk kebutuhan individu namun juga untuk kebutuhan universal seperti lampu penerangan jalur serta lampu lalu lintas yang semakin meningkat dengan kemajuan infrastruktur di berbagai wilayah[1]. Transformator merupakan suatu perlengkapan tenaga listrik yang berperan guna mengganti tenaga listrik dari suatu nilai tegangan ke nilai tegangan yang lain lewat aksi medan magnet. Kendala pada transformator akan menimbulkan terputusnya energi ke konsumen rumah tangga serta industri. Untuk pemeliharaan transformator daya khususnya pada tahanan isolasi, dilakukan pengujian guna mengenali kondisi tahanan isolasi tersebut. Pengukuran tahanan isolasi pada peralatan transformator mempunyai peranan penting guna mengetahui status isolasi peralatan dan keamanan pada setiap peralatan. Tahanan Isolasi merupakan keadaan dimana suatu peralatan memiliki nilai resistansi terhadap tegangan agar tidak terjadi short circuit atau kerusakan lainnya[2]. Tahanan isolasi sangat penting untuk pencegahan kerusakan pada peralatan listrik. Tahanan isolasi digunakan untuk mengetahui aman tidaknya suatu peralatan untuk diberikan tegangan[3]. Pengukuran tahanan isolasi dilakukan agar dapat mengetahui kondisi suatu transformator apakah masih kondisi yang baik atau seharusnya sudah dilakukan perbaikan. Transformator daya merupakan objek vital dalam proses penyaluran energi listrik, maka pengukuran atau pengujian parameter pada transformator sangat diperlukan agar proses penyaluran energi listrik dapat terlaksana dengan baik secara terus menerus (kontinyu).

Karena kebutuhan listrik yang semakin tinggi tersebut maka di harapkan Transformator Daya tersebut juga dapat berjalan secara optimal sehingga tidak adanya terjadi gangguan dan kerusakan agar dapat memasok listrik, Untuk memenuhi besarnya kebutuhan tenaga listrik hingga diperlukan sistem ketenaga listrikkan yang baik, guna bisa menopang kebutuhan listrik yang besar tersebut. Untuk mencegah kegagalan transformator saat beroperasi, beberapa pengujian penting lebih sering dilibatkan untuk menentukan status kondisinya, sehingga kegagalan operasi dapat dihindarkan sebelum terjadi kerusakan pada transformator.

Salah satu bagian yang penting dari transformator daya adalah sistem isolasinya. Isolasi transformator berfungsi untuk memisahkan

dua bagian yang bertegangan[4]. Seiring dengan usia pengoperasiannya kondisi isolasi transformator dapat mengalami penurunan. Penurunan isolasi dapat menyebabkan kegagalan operasi dan kerusakan pada transformator. Hal ini dapat di sebabkan oleh beberapa faktor seperti tegangan lebih, kelembaban, suhu operasi yang tinggi maupun kerusakan mekanis[5]. Sehingga dampak tersebut menyebabkan rusaknya tahanan isolasi transformator dan komponen lainnya.

PLN mempunyai banyak standar pengujian guna mengetahui proses pemburukan isolasi antara lain merupakan indeks polarisasi, tangen delta serta Break Down Voltage (BDV). Pada pengujian tangen delta terdapat sebagian mode pengujian yakni GST (Grounded Specimen Test), UST (Ungrounded Specimen Test), GSTg (Grounded Specimen Test with guard)[6]. Dalam riset ini penulis hendak melakukan analisis terhadap hasil pengujian tahanan isolasi pada transformator daya di Gardu Induk dilakukan dengan tata cara Break Down Voltage dengan menganalisa Indeks Polarisasi serta Tangen Deltanya guna mengenali keadaan isolasi transformator selama masih beroperasi.

II. TEORI

A. Transformator

Transformator daya merupakan suatu perlengkapan tenaga listrik yang berperan guna menyalurkan energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah ataupun kebalikannya[8]. Transformator bekerja bersumber pada induksi elektromagnetik diantara 2 lilitan yang ada didalamnya. Guna transformator dalam sistem tenaga listrik merupakan untuk menaikkan ataupun menurunkan tegangan sehingga energi yang dikirim dari suatu pembangkit tidak alami susut energi sebab rugi-rugi yang signifikan[9]. Sehingga pemakaian transformator dalam sistem tenaga listrik sangat dibutuhkan. Bersumber pada tegangan operasinya bisa dibedakan jadi transformator 500/ 150 kV serta 150/ 70 kV biasa disebut Interbus Transformator (IBT). Transformator 150/ 20 kV serta 70/ 20 kV disebut pula trafo distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan buat sistem pengamanan/ perlindungan, sebagai contoh transformator 150/ 70 ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/ 20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi ataupun langsung di sisi netral 20 kV nya. Transformator bisa dibagi menurut tugas/ pemanfaatan seperti transformator mesin (

pembangkit), transformator gardu induk serta transformator distribusi. Transformator bisa juga dibagi menurut kapasitas serta tegangan seperti transformator besar, sedang dan kecil.

B. Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi adalah hambatan yang ada antara dua komponen yang bertegangan atau komponen bertegangan dengan ground. Tahanan isolasi merupakan hambatan yang berada pada kondisi antara dua elemen konduktif yang dipisahkan oleh bahan isolasi[12]. Tahanan isolasi digunakan untuk mengetahui aman atau tidaknya suatu peralatan untuk diberi tegangan. Pengukuran tahanan isolasi yang dilakukan pada masing-masing peralatan menghubungkan bagian yang diberi tegangan terhadap body yang ditanahkan. Akan tetapi, perlu diingat bahwa pengukuran tahanan isolasi dilakukan pada saat peralatan tidak bertegangan (padam).

Setiap peralatan listrik, seperti motor, generator, kabel, saklar, transformator, dan lain sebagainya, ditutup dengan beberapa isolasi listrik dengan hati-hati[13]. Peralatan itu sendiri biasanya tembaga atau aluminium, yang dikenal sebagai konduktor arus listrik yang baik yang memberi kekuatan pada peralatan listrik. Isolasi harus berlawanan dengan konduktor, yang seharusnya menahan arus dan menjaga arus di jalurnya di sepanjang konduktor.

Untuk memahami tentang pengukuran tahanan isolasi, perlu mengetahui persamaan sederhana yaitu “Hukum Ohm” dimana:

$$V = I \times R$$

Keterangan :

V : Tegangan (Volt)

I : Kuat Arus (Ampere)

R : Tahanan (Ohm)

Semakin besar tegangan (voltase) yang kita miliki, maka semakin besar arus yang ada. Selain itu, semakin rendah resistansi yang ada, maka semakin besar arus yang di dapat dalam tegangan yang sama[14]. Tegangan yang lebih tinggi cenderung menyebabkan arus lebih melebihi isolasi. Jumlah arus kecil yang di dapat pada sebuah isolasi tentu saja tidak akan merusak isolasi yang baik, akan tetapi dapat menjadi masalah jika isolasi memburuk.

Tabel 1
Pengamatan Umum Nilai Tahanan Isolasi

Kondisi	Rekomendasi
Nilai Tahanan Isolasi yang tinggi dan terpelihara dengan baik	Tidak Ada Kekhawatiran
Nilai Tahanan Isolasi tinggi namun menunjukkan kecenderungan konstan terhadap nilai yang lebih rendah	Cari dan perbaiki penyebabnya dan pemeriksa tren penurunan
Nilai tahanan isolasi rendah namun terpelihara dengan baik	Bersihkan, keringkan, dan naikkan nilai tegangan sebelum digunakan kembali
Nilai tahanan isolasi tinggi, sebelumnya terpelihara dengan baik namun mengalami penurunan secara tiba tiba	Mengukur dengan frekuensi yang lebih banyak sampai penyebab nilai penurunan ditemukan dan diperbaiki

Pengecekan secara periodik wajib dilakukan dengan metode yang sama tiap waktu[15]. Maksudnya, dengan koneksi uji yang sama, dengan tegangan uji yang sama serta tidak lupa untuk mengetahui temperatur serta kelembaban pada disaat melakukan pengukuran. Berikut merupakan tabel pengamatan umum tentang bagaimana kita dapat menafsirkan nilai tahanan isolasi secara periodik, serta rekomendasi hasil pengukuran.

C. Pengukuran Nilai Tahanan Isolasi Transformator

Pengukuran tahanan isolasi belitan merupakan pengukuran yang dilakukan dari isolasi antara konduktor belitan dan inti besi pada trafo. Tahanan isolasi bertujuan supaya menghalangi aliran arus antara belitan dan inti besi[16]. Nilai yang didapat tahanan isolasi merupakan semakin besar nilai Indeks polarisasi semakin bagus nilai tahananannya ataupun kebalikannya. Indeks polarisasi merupakan pengukuran tahanan isolasi belitan. Tata cara pengukuran ini dicoba 1 kali 2 percobaan, tegangan DC steady- state bakal diberikan sehabis waktu 10 minute(R10) serta 1 minute(R1). Bila kita mengasumsikan R1 serta R10 diukur pada temperatur bakal sama buat kedua nilai tahanan yang hendak dirasiokan.

Delta Tangen merupakan metode diagnostik elektrik buat memastikan keadaan insulasi. Trafo dikira kapasitor murni[17]. Kehabisan daya pada tangen delta sebab kapasitor yang tidak sempurna. Guna mengenali keadaan tangen delta masih bagus menghitung power factor correction, semakin rendah tangen delta semakin bagus.

Apabila semakin besar tangen delta keadaan tangen delta jelek.

Nilai minimum untuk pengukuran tahanan isolasi yang dilakukan satu menit dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut ini yang mengacu kepada IEEE C57.125-1991:

$$R = \frac{CE}{\sqrt{kVA}}$$

Keterangan

- R : Tahanan Isolasi Minimum (GΩ)
C :Konstanta oil filled transformator (1,5)
E :Rating tegangan fasa netral (v)
kVA : Kapasitas pengenalan belitan yang diuji (kVA)

Pengujian kualitas minyak standar bertujuan untuk kondisi minyak trafo yang digunakan guna mengisolasi tegangan[18]. Usia transformator ditetapkan kondisi oleh sistem isolasinya, serta hasil pengujian bisa diketahui keadaan dari trafo itu sendiri.

Perhitungan Indeks Polarisasi adalah sebagai berikut :

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1}$$

Keterangan :

- IP : Indeks Polarisasi
R₁₀ : Pengujian Menit ke-10
R₁ : Pengujian Menit ke-1

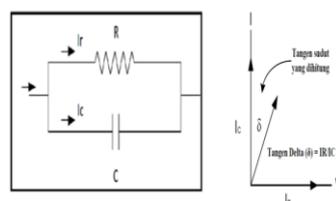
Tabel 2
Standar Indeks Polarisasi

Hasil Pengujian	Keterangan	Rekomendasi
<1	Berbahaya	Ditindak lanjuti
1 – 1,1	Jelek	Ditindak lanjuti
1,1 – 1,25	Di Pertanyakan	Uji kadar minyak, Uji Tangen delta
1,25	Baik	-
>2	Sangat Baik	-

D. Metode Tenaga Delta Transformasi

Tangen delta merupakan metoda diagnostik secara elektrik buat mengenali keadaan isolasi. Bila isolasi bebas dari cacat/ defect, maka isolasi tersebut hendak bersifat kapasitif sempurna semacam halnya suatu isolator yang terletak diantara 2 elektroda pada satu buah kapasitor[19]. Pada kapasitor sempurna, tegangan serta arus fasa beralih 90° serta arus yang melewati isolasi ialah kapasitif. Bila terdapat kontaminasi pada isolasi contohnya kelembaban dalam transformator sangat besar (moisture), maka nilai tahanan dari isolasi menurun serta berakibat kepada tingginya

arus resistif yang melewati isolasi tersebut, sehingga sudut arusnya mendahului tegangan tidak lagi 90° tetapi akan beralih kurang dari 90° . Besarnya selisih perpindahan dari 90° merepresentasikan tingkatan kontaminasi pada isolasi. Dibawah ini merupakan gambar rangkaian ekuivalen dari suatu isolasi serta diagram phasor arus kapasitansi serta arus resistif dari suatu isolasi. Dengan mengukur nilai IR/ IC bisa diperkirakan mutu dari isolasi. Pada isolasi yang sempurna, sudut bakal mendekati nol. Meningkatnya sudut mengindikasikan meningkatnya arus resistif yang melewati isolasi yang berarti kontaminasi. Semakin besar sudut semakin kurang baik keadaan isolasi[20].



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian tangen delta

Gambar di atas merupakan gambar rangkaian ekuivalen dari sebuah isolasi dan diagram phasor arus kapasitansi dan arus resistansi dari sebuah isolasi. Dengan mengukur nilai IR/IC dapat diperkirakan kualitas dari isolasi.

Sistem isolasi trafo secara garis besar terdiri dari isolasi antara belitan dengan ground dan isolasi antara dua belitan. Terdapat tiga metode pengujian untuk trafo di lingkungan PT PLN, yaitu metode trafo dua belitan metode trafo tiga belitan dan metode autotrafo.

Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

1. Primer – Ground (CH)
2. Sekunder – Ground (CL)
3. Primer – Sekunder (CHL)

Untuk pengujian trafo tiga belitan titik pengujiannya adalah:

1. Primer – Ground
2. Sekunder – Ground
3. Tersier – Ground
4. Primer – Sekunder
5. Primer – Tersier
6. Sekunder – Tersier

Berdasarkan rangkaian ekuivalen isolasi gambar 1 yang bersumber dari CIGRE 445, perhitungan tangen delta dapat dilakukan secara manual menggunakan rumus berikut ini :

$$IR = \frac{V}{R}$$

$$IC = \omega CV$$

Keterangan :

IR : arus resistif (A)

V : tegangan (V)

IC : arus kapasitif (A)

R : resistansi (Ω)

C : kapasitansi (F)

Untuk arus total I, yaitu arus yang diberikan sumber tegangan pada rangkaian adalah akar dari jumlah vektori kedua komponen arus yaitu :

$$I = \sqrt{IR^2 + IC^2}$$

Arus IR menimbulkan rugi-rugi daya (P) pada resistor R. Rugirugi ini disebut rugi-rugi dielektrik. Rugi-rugi dielektrik ini adalah perkalian antara V dengan IR atau:

$$P = V \cdot IR = VI_{\cos \varphi} = VI_{\sin \delta}$$

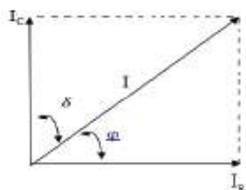
$\cos \delta = IC/I$, sehingga arus sumber dapat dituliskan sebagai berikut :

$$I = \frac{IC}{\cos \delta}$$

Substitusi dari persamaan indeks polarisasi dan tangen delta menghasilkan :

$$I = \frac{\omega CV}{\cos \delta}$$

Komponen arus berdasarkan rangkaian ekuivalen isolasi dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Komponen Arus Menurut Rangkaian ekuivalen isolasi

Untuk substitusi persamaan ke dalam persamaan menghasilkan :

$$P = \frac{\omega CV}{\cos \delta} V \sin \delta = \omega CV^2 \tan \delta = 2\pi f CV^2 \tan \delta$$

Untuk menghitung tangendelta, persamaan (2.9) dapat diganti dan dikalikan 100 % (karena hasil pengukuran tan delta dalam satuan persen) menjadi :

$$\tan \delta = \frac{P}{v^2 2\pi f c} \times 100\%$$

Keterangan :

δ = Delta

P = Losses Daya (Watt)

V = Tegangan Uji (Volt)

C = Capacitance (F)

$$\omega = 2\pi f$$

Dimana P merupakan losses daya yang disebabkan oleh arus resistif (Ir) yang timbul akibat pemburukan nilai tahanan isolasi karena corona dan karbon, juga kontaminasi dalam media isolasi transformator pada transformator daya yang akan diuji tersebut. Jadi semakin besar nilai R dalam media isolasi peralatan maka akan semakin besar losses daya yang akan timbul, semakin besar losses daya yang timbul itu mengindikasikan bahwa semakin menurunnya nilai isolasi peralatan tersebut

Tabel 3
Standar Pengujian Tangen Delta

Hasil Uji	Kondisi
$\leq 0,5 \%$	Bagus
$0,5 \% - 0,7 \%$	Mengalami Penurunan
$\geq 1,0 \%$	Jelek

E. Metode Break Down Voltage

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan[21]. Minyak yang jernih dan kering akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Air bebas dan partikel solid, apalagi gabungan antara keduanya dapat menurunkan tegangan tembus secara dramatis. Dengan kata lain pengujian ini dapat menjadi indikasi keberadaan kontaminan seperti kadar air dan partikel. Rendahnya nilai tegangan tembus dapat mengindikasikan keberadaan salah satu kontaminan tersebut, dan tingginya tegangan tembus belum tentu juga mengindikasikan bebasnya minyak dari semua jenis kontaminan.

Terdapat beberapa metode pengukuran tegangan tembus pada minyak berdasarkan standar, dimana setiap metode pengujian menggunakan bentuk dan jarak antar elektroda:

1. IEC 60156-02 Tahun 1995, dengan elektroda mushroom dengan jarak elektroda 2,5mm (yang umum digunakan di PLN)
2. ASTM D1816 - 12 (*VDE electrode*) dengan elektroda mushroom dengan jarak elektroda 1 atau 2 mm
3. ASTM D877 - 02 Tahun 2007 (*Disc-electrodes*) dengan elektroda *silindrical* dengan jarak electrode 2.54 mm



Gambar 3. Contoh Alat Uji Tegangan Tembus

Tabel 4
4 Kategori Peralatan Berdasarkan Tegangan Operasinya (IEC 60422, 2013)

Kategori	Tipe Peralatan
O	Trafo daya / reaktor dengan sistem tegangan nominal sama dengan dan di atas 400kV
A	Trafo daya / reaktor dengan sistem tegangan nominal 170kV < U < 400kV
B	Trafo daya / reaktor dengan sistem tegangan nominal di atas 72,5kV dan sampai termasuk 170kV
C	Trafo daya / reaktor untuk aplikasi MV/LV misalnya sistem tegangan nominal sampai dengan termasuk 72,5 kV

Minyak yang sudah terkontaminasi atau teroksidasi perlu dilakukan treatment untuk mengendalikan fungsinya sebagai minyak isolasi. Treatment terhadap minyak isolasi dapat berupa filter atau reklamasi. Untuk menentukan kapan minyak tersebut harus di-treatment didasarkan atas perbandingan hasil uji terhadap batasan-batasan yang termuat pada standar IEC 60422 tahun 2013. Kategori peralatan berdasarkan tegangan operasinya dapat dilihat pada tabel 4

F. Dampak Apabila Hasil Pengujian Tidak Sesuai Standar

Pengujian tahanan isolasi dilakukan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan, lanjutan dari pengujian tahanan isolasi pada transformator adalah Indeks Polarisasi (IP) yang berfungsi untuk memastikan peralatan tersebut (transformator) layak dioperasikan atau bahkan untuk dilakukan over voltage test. Pengujian tahanan isolasi juga dapat dilakukan dengan metode tangen delta.

Pengujian tangen delta transformator dilakukan pada dua titik (tangen delta belitan trafo dan tangen delta bushing). Pemburuan atau kegagalan isolasi dapat menyebabkan kegagalan operasi bahkan kerusakan pada transformator.

Tabel 5
Justifikasi kondisi pada pengujian kualitas minyak (IEC 60422 tahun 2013)

Jenis Pengujian	Kategori	Batasan Rekomendasi			Tindakan Rekomendasi
		Baik	Sedang	Buruk	
Break Down Voltage	O, A	>60	50-60	<50	Baik : Lanjutkan pengambilan sample sesuai waktu normal Sedang : Lakukan Pengambilan sample lebih sering dan periksa parameter yang seperti kandungan air dan partikel, DDF/resistivitas dan keasaman Buruk : Rekondisi minyak (rekondisi mengacu pada IEC 60422 11.2) atau jika lebih ekonomis karena pengujian yang lain mengindikasikan ageing parah, ganti minyak atau reklamasi (reklamasi mengacu pada IEC 60422 11.3) dengan mengombinasikan dengan diikuti prosedur pengeringan
	B	>50	40-50	<40	
	C	>40	30-40	<30	

Apabila didapati tahanan isolasi suatu transformator jelek atau tidak memenuhi standar, diantaranya dapat menyebabkan transformator trip (berhenti bekerja karena anomali) karena suhu transformator meningkat, dapat pula menyebabkan kegagalan isolasi yang menyebabkan terjadinya tegangan tembus pada bushing transformator, juga dapat menyebabkan kegagalan isolasi pada belitan transformator yang menyebabkan belitan mengalami kenaikan suhu, hal ini juga dapat menjadi salah satu pemicu transformator trip. Maka dari pada itu diperlukan pengukuran parameter tahanan isolasi untuk mengetahui kelayakan transformator daya dalam beroperasi sesuai dengan fungsinya.

Jika rasio transformator dalam keadaan baik, maka penurunan tegangan akan sesuai dengan yang diinginkan. Namun jika tidak, maka tegangan keluaran dari transformator tidak akan sesuai dan biasanya lebih rendah dari spesifikasi pada nameplate transformator yang menyebabkan gangguan pada peralatan-peralatan yang listriknya disuplai oleh transformator tersebut. Oleh karena itu pada pengujian transformator daya dilakukan

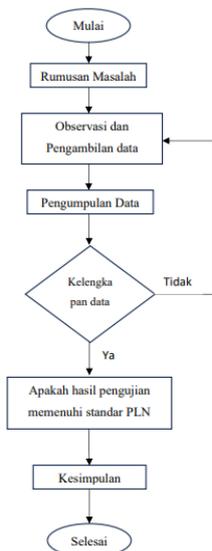
pengujian rasio untuk memastikan transformator dalam kondisi baik dan layak digunakan.

III. METODE

Metode ini menggunakan transformator daya 2 30 MVA Gardu Induk Padang Luar yang telah berumur lebih dari 10 tahun. Kelayakan transformator ini mengacu kepada hasil pengukuran dengan parameter pengujian tahanan isolasi belitan, Indeks Polarisasi (IP), tangen delta belitan, dan tegangan tembus/Breakdown Voltage (BDV) minyak transformator dengan standar uji internasional (IEEE, IEC dan CIGRE). Gambar 4 menjelaskan tahapan dalam pelaksanaan penelitian ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran tahanan isolasi bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan sedangkan pengukuran indeks polarisasi bertujuan untuk memastikan peralatan tersebut (transformator daya) layak dioperasikan atau bahkan untuk dilakukan over voltage test. Pengujian tahanan isolasi dan indeks polarisasi yang dilakukan menggunakan alat uji insulation tester dengan merk Kyoritsu Model 3125.



Gambar 4. Flowchart Penelitian

Rangkaian percobaan pengukuran yang dilakukan ialah rangkaian yang digunakan di UPT Padang ULTG Bukittinggi sesuai dengan instruksi kerja di PT PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera (P3BS) dengan nomor dokumen IK-TRS-BOT-181.

Berdasarkan dari pengukuran yang telah dilakukan maka didapatkan hasil pengukuran yang dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6
Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi Dan Indeks Polarisasi

No	Pengujian Tahanan Isolasi Terminal	1 Menit (GΩ)	10 Menit (GΩ)	Indeks Polarisasi (IP)
1	Primer - Sekunder	20,5	41,3	2,01
2	Primer – Tersier	22	45,1	2,05
3	Primer – Ground	8,91	17,2	1,93
4	Sekunder - Tersier	29,7	52,7	1,77
5	Sekunder – Ground	13,2	33,3	2,52
6	Tersier - Ground	13	33,2	2,55

Tabel 7
Hasil Pengukuran Tangen Delta

No	Mode Pengukuran	Tangen Delta (%)	Frekuensi	Cap (pF)	Looses Daya (Watt)	Keterangan
Belitan Primer						
1	GST (CHG + CHL + CHT)	0,2128	50 Hz	8342,3	0,55818	BAIK
2	GSTg A + B (CHG)	0,2611	50 Hz	3681,1	0,30258	BAIK
3	UST A (CHL)	0,1706	50 Hz	4541,8	0,24361	BAIK
4	UST B (CHT)	0,2537	50 Hz	119,3	0,00951	BAIK
Belitan Sekunder						
5	GST (CLG + CLT + CLH)	0,2786	50 Hz	18899,7	1,65586	BAIK
6	GSTg A + B (CLG)	0,8708	50 Hz	891,0	0,24468	BAIK
7	UST B (CLT)	0,2752	50 Hz	13465,4	1,16517	BAIK
8	UST A (CLH)	0,1731	50 Hz	4543,0	0,24720	BAIK
Tersier						
9	GST (CTG + CTH + CTL)	0,2468	50 Hz	21464,7	0,41609	BAIK
10	GSTg A + B (CTG)	0,2009	50 Hz	7879,8	0,12439	BAIK
11	UST B (CTH)	0,2569	50 Hz	119,4	0,00241	BAIK
12	UST A (CTL)	0,2741	50 Hz	13465,1	0,28989	BAIK

Pengukuran tangen delta bertujuan untuk mengetahui kondisi tahanan isolasi suatu peralatan yang memiliki nilai kapasitansi. Pengujian tangen delta yang dilakukan menggunakan alat uji Omicron CPC-100 + CP TD1. Rangkaian percobaan yang dilakukan ialah rangkaian yang digunakan di UPT Padang ULTG Bukittinggi sesuai dengan instruksi kerja di PT PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera (P3BS) dengan nomor dokumen IK-TRS-BOT-148.

Berdasarkan dari pengukuran yang telah dilakukan maka didapatkan hasil pengukuran yang dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 8
Hasil Pengukuran Tegangan Tembus Minyak

No Tes	Nilai Tegangan Tembus (kV/2,5 mm)	
	Minyak Bagian Atas	Minyak Bagian Bawah
1	59,6	61,5
2	59	63,6
3	60,2	64
4	56	58,9
5	62	46,1
6	58,8	51,7
Rata Rata	59,3	57,6

Pengujian tegangan tembus minyak transformator dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan. Langkah-langkah percobaan telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Berdasarkan pengukuran yang telah dilakukan maka di dapatkan hasil pengukuran yang dapat dilihat pada tabel 8.

Berdasarkan persamaan dapat ditentukan nilai indeks polarisasi tiap terminal dengan persamaan indeks polarisasi sebagai berikut :

IP Primer - Sekunder

$$IP = R_{10}/R_1 = 2,01$$

IP Primer - Tersier

$$IP = 45,1/22 = 2,05$$

IP Primer - Ground

$$IP = 17,2/8,91 = 1,93$$

IP Sekunder - Tersier

$$IP = 52,7/29,7 = 1,77$$

IP Sekunder - Ground

$$IP = 33,3/13,2 = 2,52$$

IP Tersier - Ground

$$IP = 33,2/13 = 2,55$$

Berdasarkan pengukuran, nilai tangen delta dapat di hitung dengan menggunakan persamaan Tangen delta :

1. CHG + CHL + CHT

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,55818 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 8342,3 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2130\%$$

2. CHG

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,30258 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 3681,1 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2617\%$$

3. CHL

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,24361 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 4541,8 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,1708\%$$

4. CHT

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,00951 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 119,3 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2537\%$$

5. CLG + CLT + CLH

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 1,65586 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 18899,7 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2790\%$$

6. CLG

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,24468 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 891,0 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,8745\%$$

7. CLT

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 1,16517 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 13465,4 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2755\%$$

8. CLH

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,2472 \text{ Watt}$$

$$V = 10 \text{ KV} = 10.000 \text{ V}$$

$$C = 4543,0 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,1735\%$$

9. CTG + CTH + CTL

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,41609 \text{ Watt}$$

$$V = 5 \text{ KV} = 5.000 \text{ V}$$

$$C = 21464,7 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2469\%$$

10. CTG

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,12439 \text{ Watt}$$

$$V = 5 \text{ KV} = 5.000 \text{ V}$$

$$C = 7879,8 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2010\%$$

11. CTH

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,00241 \text{ Watt}$$

$$V = 5 \text{ KV} = 5.000 \text{ V}$$

$$C = 119,4 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2571\%$$

12. CTL

Dari hasil Pengukuran di hasilkan besaran sebagai berikut :

$$P = 0,28989 \text{ Watt}$$

$$V = 5 \text{ KV} = 5.000 \text{ V}$$

$$C = 13465,1 \text{ pF}$$

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

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100\% = 0,2742\%$$

Perhitungan yang dapat dilakukan pada pengujian ini adalah perhitungan rata-rata dari nilai pengujian pertama sampai keenam tegangan tembus minyak transformator. Pengujian tegangan tembus yang dilakukan yaitu pada minyak bagian atas dan minyak bagian bawah transformator. Berikut ini adalah perhitungan rata-rata dari pengujian yang dilakukan.

Rata-rata nilai pengujian tegangan tembus minyak bagian atas transformator

$$= \frac{\text{Pengujian 1} + \text{Pengujian 2} + \text{Pengujian 3} + \text{Pengujian 4} + \text{Pengujian 5} + \text{Pengujian 6}}{\text{Banyak Pengujian}}$$

$$= \frac{59,6 + 59 + 60,2 + 56 + 62 + 58,8}{6}$$

$$= 59,26 \text{ kV} / 2,5 \text{ mm}$$

Rata-rata nilai pengujian tegangan tembus minyak bagian bawah transformator

$$= \frac{\text{Pengujian 1} + \text{Pengujian 2} + \text{Pengujian 3} + \text{Pengujian 4} + \text{Pengujian 5} + \text{Pengujian 6}}{\text{Banyak Pengujian}}$$

$$= (61,5 + 63,6 + 64 + 58,9 + 46,1 + 51,7) / 6$$

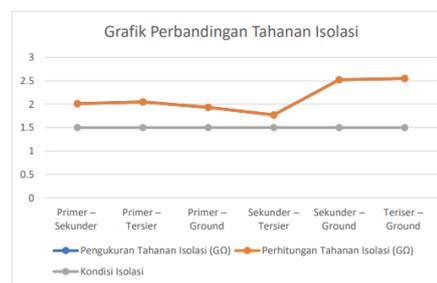
$$= 57,63 \text{ kV} / 2,5 \text{ mm}$$

Pada bagian ini akan dilakukannya perbandingan terhadap pengukuran tahanan isolasi dengan membandingkan hasil pengukuran dengan perhitungan dan standar yang digunakan oleh PLN.

Tabel 9
Perbandingan Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi

No	Pengujian Indeks Polaritas Terminal	Pengukuran Tahanan Isolasi (GΩ)	Perhitungan Tahanan Isolasi (GΩ)	Referensi dari IEEE C57.125-1991	Referensi dari CIGRE 445
1	Primer – Sekunder	2,01	2,01	1,25 – 2,0 : Aman	> 1 GΩ
2	Primer – Tersier	2,05	2,05	>2,0 : Baik	> 1 GΩ
3	Primer – Ground	1,93	1,93		> 1 GΩ
4	Sekunder – Tersier	1,77	1,77		> 1 GΩ
5	Sekunder – Ground	2,52	2,52		> 1 GΩ
6	Tersier – Ground	2,55	2,55		> 1 GΩ

Pada tabel 9. di atas, dapat dilihat bahwa hasil pengujian yang didapatkan memenuhi standar dari IEEE C57.125-1991 dan CIGRE 445. Begitu juga dengan hasil pengukuran yang juga telah sesuai dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan dan dapat kita lihat juga sesuai dengan standar dari IEEE C57.125-1991 di ketahui bahwa Transformator 2 GI Padang luar masih dalam keadaan baik.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Thanan Isolasi

Gambar 5. di atas adalah grafik perbandingan antara pengukuran, perhitungan dan standar minimum tahanan isolasi.

Pada perbandingan ini, hasil pengukuran yang dibandingkan adalah hasil pengukuran yang dilakukan dan perhitungan yang telah dilakukan. Kemudian dari hasil pengukuran yang dilakukan

akan dapat diketahui apakah hasil pengukuran yang didapatkan ini memenuhi standar kelayakan transformator yang mengacu kepada standar CIGRE 445.

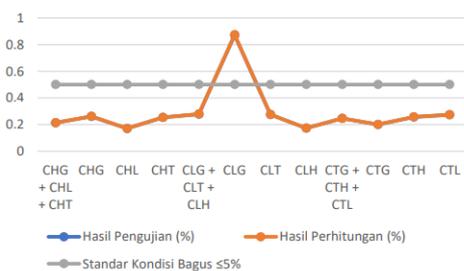
Perbandingan hasil pengukuran tangen delta dan perhitungan yang telah dilakukan dengan standar acuan CIGRE 445 dapat dilihat pada tabel 10 di bawah ini :

Tabel 10
Perbandingan Hasil Pengukuran Tangen Delta

No	Pengujian	Hasil Pengujian (%)	Hasil Perhitungan (%)	Referensi CIGRE 445
1	CHG + CHL + CHT	0,2128	0,2130	≤0,5 % : Bagus
2	CHG	0,2611	0,2617	
3	CHL	0,1706	0,1708	0,5% - 0,7% : Mengalami Penurunan
4	CHT	0,2537	0,2537	
5	CLG + CLT + CLH	0,2786	0,2790	≥1,0 % : Jelek
6	CLG	0,8708	0,8745	
7	CLT	0,2752	0,2755	
8	CLH	0,1731	0,1735	
9	CTG + CTH + CTL	0,2468	0,2469	
10	CTG	0,2009	0,2010	
11	CTH	0,2569	0,2571	
12	CTL	0,2741	0,2742	

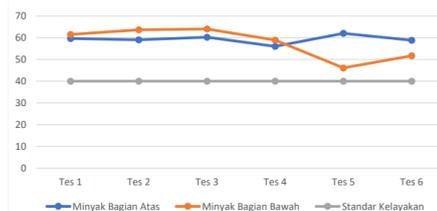
Pada tabel 10. di atas, dapat dilihat bahwa hasil pengujian tangen delta yang didapatkan telah memenuhi standar dari CIGRE 445 dan memiliki sedikit perbedaan dengan perhitungan yang telah dilakukan.

Setelah melihat perbandingan antara nilai pengukuran dan nilai perhitungan tangen delta di atas, nilai-nilai tersebut kemudian dimasukkan dalam grafik perbandingan seperti pada gambar 6. di bawah ini.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Tangen Delta

Pada perbandingan ini, hasil pengukuran yang dibandingkan adalah hasil pengukuran yang dilakukan dan Standar kelayakan Transformator. Kemudian dari hasil pengukuran yang dilakukan akan dapat diketahui apakah hasil pengukuran yang didapatkan ini memenuhi standar kelayakan transformator yang mengacu kepada standar IEC 60422. Perbandingan hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator dengan standar acuan IEC 60422 dapat dilihat pada gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Breakdown Voltage

Pada gambar di atas, dapat dilihat bahwa hasil pengujian tegangan tembus minyak transformator yang didapatkan masih memenuhi standar dari IEC 60422.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran yang dilakukan pada Transformator Daya 2 30 MVA Gardu Induk Padang Luar didapatkan hasil pengukuran tahanan isolasi belitan pada waktu 1 menit dari 8,91 GΩ – 29,7 GΩ, untuk pengukuran indeks polarisasi didapatkan hasilnya sebesar 1,77 – 2,55 dan untuk pengukuran tangen delta belitan didapatkan hasilnya dari 0,1706 % hingga 0,8708 %.
2. Hasil pengujian tegangan tembus minyak pada Transformator Daya 2 30 MVA GI Padang Luar ULTG Bukittinggi didapatkan hasil pengujian 59,3 kV/2,5 mm untuk minyak bagian atas dan 57,6 kV/2,5 mm untuk minyak bagian bawah. Cara kerja pengujian dapat dilakukan dengan mengikuti instruksi kerja pengujian tegangan tembus minyak transformator.
3. Seluruh hasil pengujian dengan parameter di atas masih memenuhi standar internasional (IEEE, IEC dan CIGRE) dan berdasarkan hasil uji parameter tersebut Transformator Daya 2 30 MVA GI Padang Luar ULTG Bukittinggi masih layak dioperasikan walaupun umurnya telah melebihi 10 tahun.

REFERENSI

- [1] U. Muhammadiyah and S. Oleh, 'Analisa Tahanan Isolasi Pada Transformator Tenaga Di Gardu Induk Wonogiri Publikasi Ilmiah Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I pada Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik', 2017.
- [2] 'Skripsi-Novia Fidiанти-5115131462-Teknik Elektro 2013'.
- [3] V. 'Alfionita, 'Analisa Tahanan Isolasi Transformator Tenaga di Gardu Induk Sepatan Dengan Metode Indeks Polarisasi, Tangen Delta dan Break Down Voltage', Universitas Mercubuan, jakarta, 2020.
- [4] A. Rahman Hidayat *et al.*, 'Analysis of Power Transformer Insulation: A Case Study in 150 kV Bantul Substation', *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, vol. 3, no. 2, 2019.
- [5] J. Sebastian Juris, I. Camilo Duran, and A. Rafael Marulanda, 'Correlation between insulation resistance and dissolved gas analysis tests in power transformers', in *2020 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America, T and D LA 2020*, Sep. 2020. doi: 10.1109/TDLA47668.2020.9326248.
- [6] H. Torkaman and F. Karimi, 'Measurement variations of insulation resistance/polarization index during utilizing time in HV electrical machines - A survey', *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 59. Elsevier B.V., pp. 21–29, 2015. doi: 10.1016/j.measurement.2014.09.034.
- [7] Institut Teknologi Bandung. School of Electrical Engineering and Informatics and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: ICHVEPS 2017: proceedings: 2-5 October 2017, Inna Grand Bali Beach, Bali, Indonesia*.
- [8] PT. PLN (Persero), *Kriteria Penggantian Peralatan Utama Gardu Induk di Lingkungan PT. PLN (Persero)*. Jakarta: PT. PLN (Persero), 2013.
- [9] PT. PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*. Jakarta: PT. PLN (Persero), 2014.
- [10] IEEE Staff and IEEE Staff, *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*.
- [11] A. Makkulau, N. Pasra, ; Rifaldi, R. Siswanto, T. Elektro, and S. Tinggi Teknik - PIn, 'Pengujian Tahanan Isolasi Dan Rasio Pada Trafo Ps T15 Pt Indonesia Power Up Mrica'.
- [12] C. Krause, 'Power Transformer Insulation-History, Technology and Design', 2012.
- [13] M. Meira, C. R. Ruschetti, R. E. Álvarez, and C. J. Verucchi, 'Power transformers monitoring based on electrical measurements: State of the art', *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 12. Institution of Engineering and Technology, pp. 2805–2815, Jul. 10, 2018. doi: 10.1049/iet-gtd.2017.2086.
- [14] M. Soleimani, J. Faiz, P. S. Nasab, and M. Moallem, 'Temperature Measuring-Based Decision-Making Prognostic Approach in Electric Power Transformers Winding Failures', *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 69, no. 9, pp. 6995–7003, Sep. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2975386.
- [15] M. M. Islam, G. Lee, and S. N. Hettiwatte, 'A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers', *Electrical Engineering*, vol. 100, no. 2, pp. 581–605, Jun. 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0532-4.
- [16] S. S. Dessouky, D. E. A. Mansour, M. Shaban, and S. A. M. Abdelwahab, 'Insulation performance enhancement of aged current transformers using nanofluids', *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 126, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106613.
- [17] L. Guo *et al.*, 'Study on the thermal properties and insulation resistance of epoxy resin modified by hexagonal boron nitride', *E-Polymers*, vol. 21, no. 1, pp. 681–690, Jan. 2021, doi: 10.1515/epoly-2021-0069.
- [18] H. C. Verma, A. Baral, A. K. Pradhan, and S. Chakravorti, 'A method to estimate activation energy of power transformer insulation using time domain spectroscopy data', *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 5, pp. 3245–3253, Oct. 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006640.
- [19] J. Liu, H. Zheng, Y. Zhang, H. Wei, and R. Liao, 'Grey relational analysis for insulation condition assessment of power transformers based upon conventional dielectric response measurement', *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 10, 2017, doi: 10.3390/en10101526.
- [20] M. Kunicki, A. Cichon, and S. Borucki, 'Measurements on partial discharge in on-site operating power transformer: A case study', *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 10, pp. 2487–2495, May 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1551.