

**ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA
60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN
DELTA, DAN *BREAKDOWN VOLTAGE* PADA GARDU INDUK
150/20 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 :

ARRIVAL MUSTAFID OCTAVIAN

NIM 30602200085

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

2024

***FEASIBILITY ANALYSIS OF 60 MVA POWER TRANSFORMER
ISOLATION BASED ON POLARIZATION INDEX, DELTA
TANGENT, AND BREAKDOWN VOLTAGE AT 150/20 kV
SUBSTATION***

FINAL PROJECT

*THIS REPORT WAS PREPARED TO FULFILL ONE OF THE REQUIREMENTS
FOR OBTAINING A BACHELOR'S DEGREE IN THE ELECTRICAL
ENGINEERING PROGRAM, FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG*



ARRANGED BY :

ARRIVAL MUSTAFID OCTAVIAN

NIM 30602200085

**MAJORING OF INDUSTRIAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2024

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA DAN BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150/20kV” ini disusun oleh:

Nama : Arrival Mustafid Octavian
NIM : 30602200085
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 29 Agustus 2024

Pembimbing


Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIDN : 0628097501

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA DAN BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150/20kV” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 29 Agustus 2024

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Eka Nuryanto Budisusila, S.T., M.T.
NIDN : 0619107301
Ketua

Munaf Ismail, S.T., M.T.
NIDN : 0613127302
Penguji I

Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIDN : 0628097501
Penguji II

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Arrival Mustafid Octavian
NIM : 30602200085
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA DAN *BREAKDOWN VOLTAGE* PADA GARDU INDUK 150/20kV”** 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, 05 September 2024

Yang Menyatakan



Arrival Mustafid Octavian

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Arrival Mustafid Octavian

NIM : 30602200085

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS KELAYAKAN ISOLASI TRANSFORMATOR DAYA 60 MVA BERDASARKAN INDEKS POLARISASI, TANGEN DELTA DAN BREAKDOWN VOLTAGE PADA GARDU INDUK 150/20kV”** 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, 05 September 2024

Yang Menyatakan



Arrival Mustafid Octavian

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirobbilalamin segala puji syukur kita panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wataala, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “ Analisis Kelayakan Isolasi Transformator Daya 60 MVA Berdasarkan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage* Pada Gardu Induk 150/20 kV” dengan lancar. Proses penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang turut membantu dan mendukung agar terselesaikannya laporan ini. Maka dari itu penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada :

1. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Dosen pembimbing saya Bapak Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D yang telah memberikan dukungan dan bimbingan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
3. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas bantuannya dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
4. Kedua orang tua saya yang telah memberikan doa dan dukungan selama saya berkuliah di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Teman seperjuangan saya yang telah banyak membantu selama perkuliahan dan penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna. Penulis meminta maaf dan terbuka terhadap semua kritik maupun saran yang membangun, agar kedepannya tugas akhir dengan judul serupa dapat menjadi lebih baik lagi. Akhir kata penulis berharap semoga penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca maupun penulis juga.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Gardu Induk	9
2.2.2 Komponen Gardu Induk.....	9
2.2.3 Transformator Daya	10
2.2.4 Prinsip Kerja Transformator Daya	11
2.2.5 Bagian – Bagian Transformator Daya.....	11
2.2.6 Jenis - Jenis Transformator.....	14
2.2.7 Tahanan Isolasi.....	14

2.2.8	Indeks Polarisasi	15
2.2.9	Tangen Delta	16
2.2.10	Breakdown Voltage	19
METODE PENELITIAN		21
3.1	Model Penelitian.....	21
3.2	Objek Penelitian	21
3.3	Data Penelitian	21
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	22
3.5	Langkah Penelitian.....	23
DATA DAN ANALISIS		30
4.1	Hasil Penelitian.....	30
4.2	Pengujian Indeks Polarisasi.....	30
4.3	Pengujian Breakdown Voltage.....	33
4.4	Pengujian Tangen Delta.....	34
4.5	Analisis Hasil Pengujian dan Perhitungan Indeks Polarisasi	39
4.6	Analisis Hasil Pengujian dan Perhitungan <i>Breakdown Voltage</i>	41
4.7	Analisis Hasil Pengujian dan Perhitungan Tangen Delta	43
KESIMPULAN DAN SARAN.....		47
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran	48
DAFTAR PUSTAKA		49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gardu Induk [3]	9
Gambar 2. 2 Transformator Daya [8]	10
Gambar 2. 3 Elektromagnetik Pada Trafo [15].....	11
Gambar 2. 3 Elektromagnetik Pada Trafo [15].....	11
Gambar 2. 4 Vektor Hubungan Arus Kapasitansi dengan Arus Resistansi [3]....	17
Gambar 3. 1 Rangkaian Pengujian Indeks Polarisasi Transformator Daya [7] ...	25
Gambar 3. 2 Rangkaian Pengujian Tangen Delta Transformator Daya [8]	26
Gambar 3. 3 Pengujian Breakdown Voltage Transformator Daya [6]	28
Gambar 4. 1 Diagram Hasil Perhitungan Indeks Polarisasi	41
Gambar 4. 2 Diagram Hasil Perhitungan Breakdown Voltage	42
Gambar 4. 3 Diagram Hasil Perhitungan Tangen Delta Belitan Primer	43
Gambar 4. 4 Diagram Hasil Perhitungan Tangen Delta Belitan Sekunder.....	44
Gambar 4. 5 Diagram Hasil Perhitungan Tangen Delta Belitan Tersier.....	45



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Rekomendasi Hasil Pengujian Indeks Polarisasi [15]	16
Tabel 2. 2 Rekomendasi Hasil Pengujian Tangen Delta [15]	18
Tabel 2. 3 Rekomendasi Pengujian Tegangan Tembus [15].....	19
Tabel 3. 1 Name Plate Transformator	24
Tabel 4. 1 Indeks Polarisasi Hasil Pengukuran di Lapangan.....	31
Tabel 4. 2 Indeks Polarisasi Hasil Perhitungan	32
Tabel 4. 3 Pengukuran Tegangan Tembus di Lapangan	33
Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Breakdown Voltage	34
Tabel 4. 5 Tangen Delta Hasil Pengukuran di Lapangan	35
Tabel 4. 6 Tangen Delta Hasil Perhitungan	39



ABSTRAK

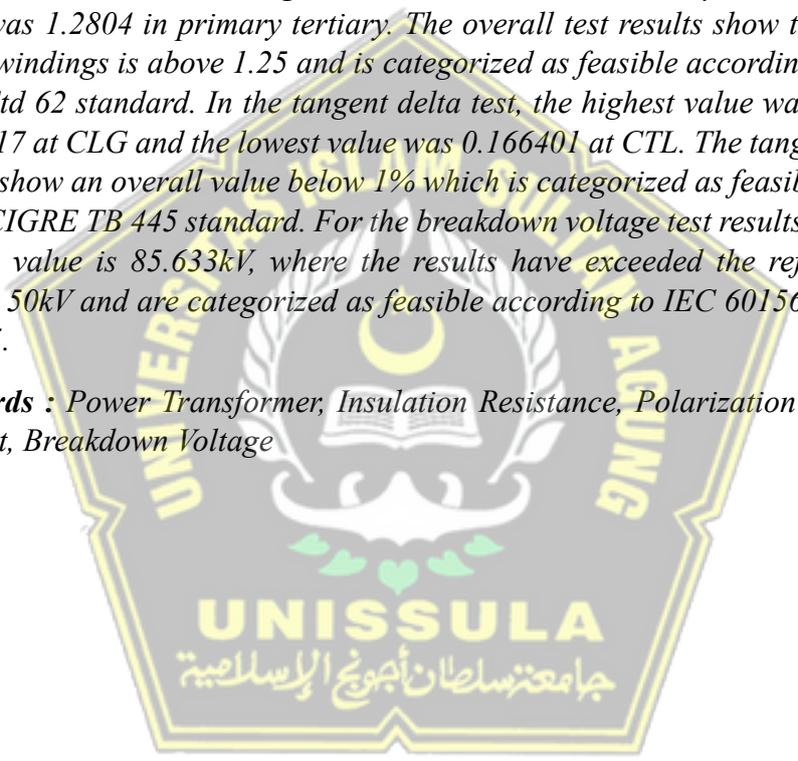
Kualitas isolasi transformator daya merupakan hal yang terpenting dalam trafo dalam perannya sebagai peralatan utama penyaluran tenaga listrik ke pelanggan. Apabila kualitas isolasi trafo buruk, maka dapat menyebabkan kegagalan operasi yang berakibat berkurangnya kehandalan sistem tenaga listrik. Maka dari itu dilakukanlah pengujian secara rutin untuk mengetahui tingkat kualitas isolasi pada trafo dari tahun ke tahun. Metode pengujian yang digunakan meliputi metode indeks polarisasi, metode tangen delta dan metode tegangan tembus. Pada pengujian indeks polarisasi didapatkan nilai tertinggi sebesar 1,4485 pada tersier tanah dan nilai terendah sebesar 1,2804 pada primer tersier. Hasil keseluruhan pengujian menunjukkan nilai pada semua belitan di atas 1,25 dan dikategorikan layak menurut standar IEEE Std 62 tahun 1995. Pada pengujian tangen delta didapatkan nilai tertinggi sebesar 0,534817 pada CLG dan nilai terendah sebesar 0,166401 pada CTL. Hasil pengujian tangen delta menunjukkan nilai secara keseluruhan di bawah 1% yang mana dikategorikan layak menurut standar CIGRE TB 445. Untuk hasil pengujian tegangan tembus didapatkan nilai rata – rata tegangan sebesar 85,633kV dimana hasil tersebut sudah melampaui acuan yang digunakan yaitu 50kV dan dikategorikan layak menurut standar IEC 60156-02 tahun 1995.

Kata kunci : *Transformator Daya, Tahanan Isolasi, Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Breakdown Voltage*

ABSTRACT

The quality of the insulation of a power transformer is the most important thing in a transformer in its role as the main equipment for distributing electric power to customers. If the quality of the transformer insulation is poor, it can cause operational failure which results in reduced reliability of the electric power system. Therefore, routine testing is carried out to determine the level of insulation quality in transformers from year to year. The test methods used include the polarization index method, tangent delta method and breakdown voltage method. In the polarization index test, the highest value was 1.4485 in tertiary soil and the lowest value was 1.2804 in primary tertiary. The overall test results show that the value for all windings is above 1.25 and is categorized as feasible according to the 1995 IEEE Std 62 standard. In the tangent delta test, the highest value was obtained at 0.534817 at CLG and the lowest value was 0.166401 at CTL. The tangent delta test results show an overall value below 1% which is categorized as feasible according to the CIGRE TB 445 standard. For the breakdown voltage test results, the average voltage value is 85.633kV, where the results have exceeded the reference used, namely 50kV and are categorized as feasible according to IEC 60156-02 standard of 1995.

Keywords : *Power Transformer, Insulation Resistance, Polarization Index, Delta Tangent, Breakdown Voltage*



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan tulang punggung kemajuan peradaban manusia, dapat terlihat semakin berkembangnya zaman maka permintaan listrik semakin besar. Bisnis kelistrikan di Indonesia dipegang oleh PLN, yang tugas pokoknya yaitu mendistribusikan listrik ke seluruh negeri agar semua lapisan masyarakat dapat menerima akses listrik[1]. Dalam mewujudkan tugasnya, peran gardu induk sangat diperlukan untuk menyalurkan listrik hingga ke pelanggan. Selain itu gardu induk juga diperlukan untuk menjaga kehandalan penyaluran energi listrik melalui sistem interkoneksi [2].

Gardu induk adalah bagian dari sistem kelistrikan yang berfungsi untuk mentransformasi daya listrik yang diterima dari pembangkit untuk diteruskan ke bagian distribusi. Dalam pengoperasiannya gardu induk mempunyai berbagai peralatan transmisi utama atau biasa disebut MTU (Material Transmisi Utama) yang biasa digunakan untuk menjaga kehandalan dan kontinuitas dalam penyaluran listrik kepada konsumen [3].

Peralatan MTU pada gardu induk terdiri dari 6 peralatan, yaitu Transformator Daya, *Lightning Arrester*, *Current Transformer*, *Potential Transformer*, Pemutus Tenaga, dan Pemisah. Topik analisis kali ini akan berfokus pada salah satu peralatan MTU yaitu Transformator Daya. Transformator daya merupakan salah satu material transmisi utama yang berfungsi untuk mengubah daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah ataupun tegangan rendah ke tegangan tinggi sesuai kebutuhannya dengan frekuensi yang sama [4]. Dalam perannya sebagai peralatan yang sangat vital dalam sistem penyaluran energi listrik dari pembangkit ke konsumen, diharapkan trafo dapat bekerja maksimal terus tanpa henti. Agar trafo dapat bekerja dengan maksimal maka kita harus memastikan bahwa sistem isolasi trafo berjalan dengan baik dan tanpa masalah [3], [5].

Sebuah trafo akan dikatakan bermasalah apabila sistem isolasinya mengalami pemburukan, bisa dikarenakan terkena gangguan atau karena usia. Pemburukan isolasi dapat terjadi pada media isolasinya maupun pada belitan trafo. Trafo dapat dikatakan tidak layak apabila mempunyai kualitas isolasi yang buruk, entah itu pada bagian media isolasi ataupun pada bagian belitannya[6]. Dampak yang terjadi apabila sebuah trafo dikatakan tidak layak maka trafo tersebut tidak akan dioperasikan karena berbahaya untuk sistem dan manusianya. Hal ini dapat berdampak pada berkurangnya kehandalan penyaluran sistem tenaga listrik, yang mana seharusnya trafo tersebut dapat menampung beban penyulang tetapi justru tidak dapat dioperasikan[7].

Demi menjaga kehandalan pasokan listrik, PLN wajib memastikan bahwa trafo pada gardu induk layak untuk beroperasi. Untuk menentukan trafo masih layak beroperasi atau tidak, dilakukan pemeliharaan rutin pada trafo setiap 2 tahun secara *shutdown measurement*. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kelayakan isolasi pada transformator daya dilakukan dengan beberapa metode antara lain pengujian indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage*[8].

Berkaca pada sebelumnya, pernah dilakukan penelitian yang membahas tentang analisis kelayakan tahanan isolasi trafo dengan metode indeks polarisasi dan tangen delta [9],[10]. Penelitian tersebut membahas mengenai kelayakan isolasi trafo tetapi hanya dengan metode pengujian indeks polarisasi dan tangen delta, tidak melibatkan pengujian *breakdown voltage*. Menurut saya metode pengujian yang digunakan oleh beliau masih kurang lengkap karena seharusnya ditambahkan metode *breakdown voltage* untuk menjelaskan mengenai minyak trafo yang mana berperan sebagai media isolasi. Maka dari itu disini saya akan melengkapi hal tersebut dengan menggunakan ketiga pengujian yaitu indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage* untuk menentukan kelayakan isolasi trafo pada gardu induk 150kV.

Selain itu standar yang digunakan oleh penelitian terdahulu yang dijadikan referensi tentu juga berbeda – beda, seperti pada penelitian dengan judul “Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu

Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan *Breakdown Voltage*” [11] menggunakan standar IEEE 43-2000 untuk pengujian indeks polarisasi. Sedangkan pada penelitian ini saya akan menggunakan standar IEEE Std 62 tahun 1995 untuk jadi acuan hasil pengujian indeks polarisasi. Walaupun standar yang kami berdua gunakan berbeda namun nilainya tetap sama yaitu trafo dikatakan baik apabila hasil pengujian di atas 1,25. Lalu untuk penelitian lain yang berjudul “Analisa Perbandingan Kelayakan Tahanan Isolasi Transformator Daya Menggunakan Pengujian Indeks Polaritas, Tangen Delta, BDV (*Breakdown Voltage*), Dan Rasio Tegangan Di Gardu Induk 150 kV Ulee Kareng” [5] menggunakan standar ANSI C57.12.90 untuk pengujian tangen delta. Sedangkan pada penelitian ini saya akan menggunakan standar CIGRE TB 445 untuk jadi acuan hasil pengujian tangen delta. Walaupun standar yang kami berdua gunakan berbeda namun nilainya tetap sama yaitu tangen delta trafo dikatakan baik apabila hasil pengujian di bawah 1%. Lalu penelitian lainnya yang berjudul “Analisis Kemampuan Isolasi Transformator Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta Dan *Break Down Voltage*” [12] menggunakan standar IEC 60422 untuk pengujian *breakdown voltage*. Sedangkan pada penelitian ini saya akan menggunakan standar IEC 60156-02 tahun 1995 untuk jadi acuan hasil pengujian *breakdown voltage*. Walaupun standar yang kami berdua gunakan berbeda namun nilainya tetap sama yaitu *breakdown voltage* trafo dikatakan baik apabila hasil pengujian di atas 50kV.

Berdasarkan uraian mengenai peran vital transformator daya yang telah dipaparkan, peneliti tertarik untuk menganalisis isolasi transformator dengan cara membandingkan antara hasil uji dengan standar yang dipakai pada masing – masing metode pengujian. Sehingga nantinya dapat diketahui kualitas isolasi dan kondisi trafo apakah layak untuk beroperasi atau tidak berdasarkan metode yang telah dijelaskan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibuat, maka peneliti dapat merumuskan masalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana menganalisis hasil pengujian indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage* pada trafo yang dilakukan saat pemeliharaan rutin 2 tahunan ?
- b. Bagaimana menentukan tingkat kelayakan trafo berdasarkan perbandingan hasil pengujian terhadap standar yang digunakan (SKDIR No. 0520-2.K/DIR/2014 Tentang Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga) ?

1.3 Pembatasan Masalah

Untuk menjaga agar pembahasan tidak keluar dari topik permasalahan, peneliti hanya membatasi hal-hal sebagai berikut :

- a. Peralatan yang dipakai untuk penelitian adalah trafo 2 60 MVA pada Gardu Induk 150/20 kV Pasar Kemis.
- b. Penelitian hanya berfokus pada kualitas isolasi transformator.
- c. Pengujian yang dibahas pada penelitian ini hanya pengujian indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage*.
- d. Penelitian tidak dilakukan dengan melakukan pengukuran secara langsung, melainkan hanya mengambil data hasil pemeliharaan.

1.4 Tujuan Penelitian

Terdapat beberapa tujuan dalam penelitian ini, antara lain sebagai berikut :

- a. Menganalisis hasil pengujian indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage* pada trafo yang dilakukan saat pemeliharaan rutin 2 tahunan.
- b. Diketuinya cara menentukan tingkat kelayakan trafo berdasarkan perbandingan hasil pengujian indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage* terhadap standar yang digunakan (SKDIR No. 0520-2.K/DIR/2014 Tentang Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Penelitian ini diharapkan bisa menambah wawasan dan pengetahuan peneliti mengenai hal – hal yang berhubungan dengan isolasi transformator.
- b. Memberikan informasi dan analisis mengenai tingkat kelayakan trafo kepada PT. PLN (Persero).
- c. Mengetahui tingkat kelayakan transformator untuk memastikan kehandalan trafo dalam penyaluran sistem tenaga listrik.

1.6 Sistematika Penulisan

Memberikan gambaran secara garis besar, dalam hal ini dijelaskan isi dari masing – masing bab dari laporan ini. Sistematika penulisan dalam pembuatan laporan ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini berisikan tentang jurnal – jurnal dan penelitian yang pernah dilakukan yang memiliki permasalahan ataupun metode yang digunakan pada penelitian yang akan dilakukan. Selain itu pada bab ini juga berisikan mengenai dasar – dasar teori yang digunakan untuk menunjang pembahasan yang akan dilakukan.

BAB III : METODE PENELITIAN

Bab ini mendeskripsikan tentang model penelitian dan pengambilan data, objek penelitian, data penelitian, prosedur dalam penelitian dan diagram alir dalam penelitian.

BAB IV : DATA DAN ANALISA

Bab ini berisikan tentang data indeks polarisasi, data tangen delta, data *breakdown voltage*, perhitungan nilai indeks polarisasi, perhitungan nilai

tangen delta, perhitungan nilai *breakdown voltage* dan penentuan kelayakan isolasi pada trafo.

BAB V : PENUTUP

Bab ini mendeskripsikan penyelesaian tugas akhir, dapat dibuat pertimbangan dan rekomendasi berdasarkan temuan data penelitian dan analisis yang dilakukan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu dijadikan referensi dalam penulisan tugas akhir ini, antara lain :

- a. “Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Berbasis Indeks Polarisasi dan Tangen Delta Pada Trafo GI 150/20 KV PT.APF”. Hasil pengujian trafo 30 MVA dengan metode indeks polarisasi didapatkan data pengukuran 1,091 dan hasil perhitungan 1,100. Serta hasil pengujian tangen delta didapatkan data pengukuran 1,2% dan hasil perhitungan 0,8%. Keduanya dibandingkan dengan standar nilai yang sesuai untuk indeks polarisasi 1,25-2 dan tangen delta nilainya <0,5%. Maka nilai yang diperoleh tidak sesuai dengan standar IEEE-2000 dan ANSI C 57.12.90 [9].
- b. “Analisa Perbandingan Kelayakan Tahanan Isolasi Transformator Daya Menggunakan Pengujian Indeks Polarisasi, Tangen Delta, BDV (*Breakdown Voltage*), dan Rasio Tegangan di Gardu Induk 150 KV Ulee Kareng”. Hasil pengujian pada penelitian tersebut untuk metode indeks polarisasi mendapatkan nilai di atas 1,5%, kemudian untuk metode pengujian tangen delta mendapatkan nilai di bawah 0,5%, namun pada bagian bushing dan belitan primer terhadap tersier mengalami penurunan. Selanjutnya untuk pengujian tegangan tembus mendapatkan nilai di atas 50kV dan pada pengujian rasio didapatkan nilai pengujian keseluruhan di bawah 0,5% [5]. Hasil perbandingan antara keempat metode tersebut dengan masing – masing standar pengujiannya, disimpulkan bahwa kondisi tahanan isolasi transformator dikategorikan baik dan layak dioperasikan.
- c. “Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Trafo 30 MVA di GI 150/20 KV PT APF Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi dan Tangen Delta”. Untuk penelitian tersebut diperoleh hasil indeks polarisasi pada ketiga belitan memiliki nilai terendah sebesar 1,102 dan nilai tertinggi sebesar 1,924 yang

mana sudah sesuai dengan standar IEEE 43-2000 dan dikatakan bahwa trafo dikategorikan dalam kondisi baik apabila nilai IP berkisar antara 1,25-2. Untuk pengujian tangen delta di transformator 2 keseluruhan mendapatkan hasil yang buruk yaitu di atas 1% tetapi nilai ICH pada trafo 1 mengalami penurunan menjadi sebesar 0,8% [10]. Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan di gardu induk 150kV PT APF untuk transformator 1 dikategorikan dalam kondisi yang baik dan layak tetapi untuk transformator 2 dapat dikategorikan dalam kondisi yang buruk.

- d. “Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, dan *Breakdown Voltage*”. Hasil perhitungan pada penelitian tersebut nilai indeks polarisasi pada ketiga belitan diperoleh sebesar 1,26 untuk nilai terendah dan 1,97 untuk nilai tertinggi dan berdasarkan standar IEEE 43-2000 dikatakan bahwa trafo dikategorikan dalam kondisi baik jika mempunyai nilai IP berkisar antara 1,25-2. Berdasarkan standar tersebut menunjukkan bahwa trafo masih dalam kondisi yang baik. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan maka trafo tenaga 60 MVA bay 4 di gardu induk Kebasen Tegal masih dikategorikan dalam kondisi baik dan layak dioperasikan [11].
- e. “Analisis Kemampuan Isolasi Transformator Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta dan *Breakdown Voltage*” [12]. Dalam penelitian tersebut hasil pengujian indeks polarisasi menunjukkan bahwa kualitas isolasinya masih bagus karena nilai yang dihasilkan masih di atas 1,25. Dari metode tangen delta juga menunjukkan kualitas isolasi pada trafo saat ini masih dalam keadaan bagus karena nilai yang ditunjukkan di bawah 0,5%. Setelah menganalisa pengujian kekuatan isolasi trafo 2 di Gardu Induk Paniki tahun 2021 ke 2022 bila dibandingkan dengan standar PLN yang berlaku dapat disimpulkan kualitas isolasinya masuk kategori baik untuk semua metode pengujian [12].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan salah satu bagian yang sangat vital dalam proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit ke konsumen, yang mana perannya sebagai penyambung antara jaringan tegangan tinggi dan jaringan tegangan menengah secara bersamaan disambungkan melalui busbar dan trafo tenaga [13] yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Gardu Induk [3]

Gardu induk mempunyai beberapa fungsi, yaitu diantaranya adalah:

- Menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah untuk disalurkan kepada konsumen
- Tempat monitoring, manuver serta pengaturan beban sistem tenaga listrik untuk disalurkan ke distribusi.
- Sebagai pemasok tegangan dan penerima tegangan untuk gardu induk lainnya yang berdekatan yang mana untuk mendukung sistem inter koneksi antar gardu induk satu dengan lainnya.

2.2.2 Komponen Gardu Induk

Gardu induk terdiri dari komponen – komponen sebagai berikut :

- a. Transformator tenaga adalah peralatan yang berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan dengan frekuensi dan daya yang sama.
- b. Peralatan tegangan tinggi lainnya yaitu:
 1. *Lightning Arrester* (LA)
 2. Pemutus Tenaga (PMT)
 3. *Disconnecting Switch* (DS)
 4. *Current Transformer* (CT)
 5. *Potensial Transformer* (PT)
 6. Busbar
- c. Peralatan sekunder gardu induk, yang berfungsi untuk mengoperasikan dan monitoring gardu induk dari pusat kontrol yaitu terdiri dari : relay pengukuran, relay proteksi, panel kontrol, peralatan telekomunikasi, scada, rectifier, radio dan lainnya [14].

2.2.3 Transformator Daya

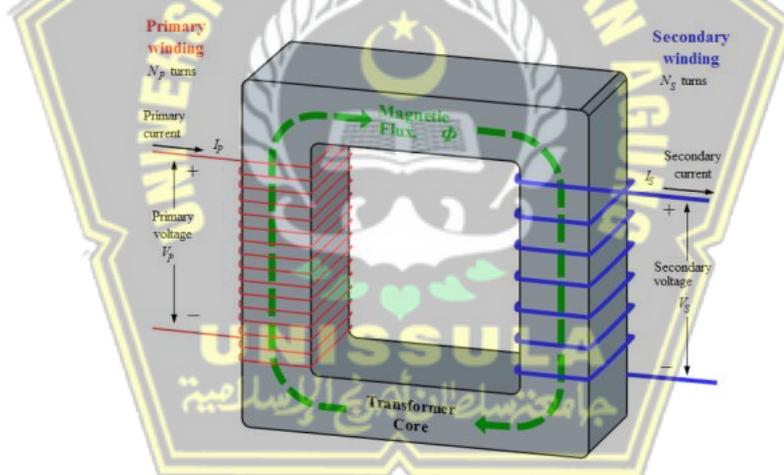
Transformator daya merupakan salah satu jenis transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan (*step up*) atau menurunkan tegangan (*step down*) dengan frekuensi yang sama. Berfungsi menyalurkan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya [5]. Pada gardu induk, jenis trafo yang digunakan yaitu *step down*, karena fungsinya untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah untuk disalurkan oleh distribusi kepada konsumen [2]. Gambaran bentuk trafo daya ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Transformator Daya [8]

2.2.4 Prinsip Kerja Transformator Daya

Menurut IEC 60076-1 tahun 2011 transformator daya merupakan salah satu peralatan statis yang mana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih, secara induksi elektromagnetik mengubah daya yang terdiri dari arus dan tegangan sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama. Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, yang mana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks dapat membangkitkan tegangan induksi. Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan flux yang menginduksi melalui inti besi pada belitan sekunder. Flux magnet tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada belitan sekunder akan terdapat beda potensial / tegangan induksi [15]. Gambaran kerja belitan trafo dapat ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Elektromagnetik Pada Trafo [15]

2.2.5 Bagian – Bagian Transformator Daya

Transformator daya terdiri dari beberapa bagian utama yaitu sebagai berikut :

1. Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk tempat mengalirnya flux yang timbul karena induksi dari arus bolak balik pada belitan primer sehingga dapat menginduksi kembali pada belitan sekunder. Inti besi dibentuk dari lempengan besi tipis yang berisolasi dengan tujuan untuk meminimalisir arus eddy yang merupakan arus yang

timbul saat sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, yang mana arus tersebut dapat mengakibatkan rugi – rugi daya [15].

2. Belitan Trafo

Pada transformator daya terdapat kumparan yang dililitkan pada inti besi. Belitan merupakan kawat hantar yang dapat dialiri arus pada kumparan primer dan kumparan sekunder yang dililitkan pada inti besi. Pada umumnya, transformator daya memiliki 2 buah belitan yaitu primer dan sekunder. Jika belitan primer dihubungkan dengan tegangan dan arus bolak balik (AC) maka pada bagian kumparan primer akan dihasilkan fluks magnet. Fluks magnet inilah akan menginduksi tegangan, dan saat kumparan sekunder dihubungkan dengan beban maka akan dihasilkan arus pada kedua belitan [10]. Oleh sebab itu belitan transformator daya adalah alat untuk mengubah arus dan tegangan dengan frekuensi yang sama. Banyak nya belitan pada primer maupun sekunder trafo tergantung pada type trafo tersebut apakah penaik tegangan atau penurun tegangan.

3. Bushing

Bushing berfungsi sebagai media penghubung antara belitan dengan peralatan di luar. Bushing terdiri dari konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut gunanya untuk pemisah antara konduktor yang ada pada bushing dengan body maintank trafo.

4. Pendingin

Trafo yang sedang beroperasi mempunyai suhu yang cukup tinggi apalagi ditambah dengan faktor lain seperti beban tinggi, suhu lingkungan panas, ataupun kinerja pendingin yang tidak optimal. Suhu yang tinggi dapat merusak isolasi kertas yang terdapat di dalam trafo.

Minyak isolasi pada trafo selain sebagai media isolasi utama juga berfungsi untuk pendingin trafo. Minyak dapat dijadikan pendingin trafo dengan cara bersirkulasi di dalam trafo, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak menuju ke sirip radiator. Pendinginan pada radiator dibantu oleh kipas dan pompa sirkulasi yang dapat meningkatkan efisiensi pendinginan. Pada trafo 150kV

kebanyakan mempunyai sistem pendingin ONAN/ONAF. ONAN berarti *Oil Natural Air Natural*, yang mana menggunakan minyak sebagai pendingin dan menggunakan udara sekitar untuk sirkulasi alamiah trafo. Sedangkan ONAF berarti *Oil Natural Air Force*, yang mana menggunakan minyak sebagai pendingin dan menggunakan udara untuk sirkulasi paksa melalui kipas pada sirip radiator.

5. Konservator

Tangki konservator berfungsi sebagai tempat untuk menampung minyak trafo yang memuai saat beroperasi, yang dalam kondisi tertentu minyak pada trafo akan memuai dikarenakan oleh suhu yang tinggi. Minyak yang memuai ditampung dalam tempat yang disebut tangki konservator. Saat terjadinya kenaikan suhu pada trafo saat bekerja atau beroperasi maka volume minyak bertambah sehingga minyak isolasi akan memuai dan naik ke konservator. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu dalam trafo yang biasanya terjadi saat malam hari, maka kondisi minyak akan menyusut dan akan mengakibatkan volume minyak didalam konservator akan menurun [9].

6. Minyak Isolasi

Minyak isolasi pada trafo mempunyai dua fungsi utama yaitu sebagai media isolasi dan sebagai pendingin trafo. Minyak berperan sebagai media isolasi yang memisahkan antara belitan di dalam trafo terhadap body trafo yang terhubung ke ground. Idealnya minyak trafo harus mempunyai nilai breakdown voltage yang tinggi agar dapat mencegah gangguan yang terjadi pada trafo. Sedangkan untuk fungsi kedua yaitu sebagai pendingin trafo, yang mana minyak berperan untuk menyalurkan panas dari satu titik agar menyebar ke seluruh bagian trafo. Minyak yang disirkulasikan akan didinginkan oleh radiator agar dapat mengurangi suhu trafo ketika sedang beroperasi.

7. Tap Changer

Kualitas listrik pada pln ditentukan oleh kestabilan tegangan yang dapat disalurkan kepada pelanggan. Trafo sebagai peralatan utama yang menurunkan tegangan dituntut untuk memiliki nilai tegangan sekunder yang stabil, sedangkan tegangan input yang masuk kedalam trafo besarnya tidak selalu sama. Hal

tersebut dapat diatasi dengan cara mengubah banyaknya belitan pada primer trafo sehingga dapat mengubah ratio antara belitan primer dan sekunder. Penyesuaian ratio belitan ini disebut tap changer.

2.2.6 Jenis - Jenis Transformator

Berikut merupakan jenis – jenis transformator berdasarkan fungsinya[5] :

- a) Transformator Daya Penaik Tegangan (*Step Up*) merupakan trafo yang mempunyai lilitan pada sekunder lebih banyak daripada lilitan pada primer, sehingga dapat berfungsi untuk menaikkan tegangan. Trafo ini biasa ditemukan pada pembangkit listrik.
- b) Transformator Daya Penurun Tegangan (*Step Down*) merupakan trafo yang mempunyai lilitan pada sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, yang berfungsi untuk menurunkan tegangan. Trafo ini biasanya ada di gardu induk.
- c) Transformator Arus yaitu trafo yang berfungsi untuk menurunkan arus primer yang besar menjadi arus sekunder yang mempunyai nilai kecil, dimana arus sekunder digunakan untuk metering peralatan dan digunakan untuk keperluan input relay proteksi.
- d) Transformator Tegangan yaitu trafo yang berfungsi untuk menurunkan tegangan primer yang besar menjadi tegangan sekunder yang mempunyai nilai kecil, dimana tegangan sekunder digunakan untuk metering peralatan dan digunakan untuk keperluan input relay proteksi.

2.2.7 Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi merupakan tahanan yang ada diantara belitan satu dengan belitan lain atau belitan dengan tanah. Untuk mengetahui kualitas dan kelayakan tahanan isolasi yang baik, maka dibutuhkan pengujian atau pengukuran yang dilakukan antara belitan dan inti besi pada trafo untuk membatasi arus antara belitan dan inti besi [5]. Pengukuran tahanan isolasi pada trafo dikategorikan dalam jenis pemeliharaan yang dilaksanakan saat trafo padam atau *shutdown measurement*. Pengujian ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin 2 tahunan maupun saat

investigasi trafo pasca gangguan. Nilai tahanan isolasi biasanya dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti suhu, kelembapan dan jalur bocor pada bushing seperti ada debu atau kotoran pada bushing [5]. Metode yang sering dipakai adalah memberikan injek tegangan DC melalui alat insulation tester dan alat akan mempresentasikan kondisi isolasi dengan satuan megaohm. Pada dasarnya tahanan isolasi dilakukan pengujian untuk mengetahui seberapa besar kebocoran arus yang terjadi pada ketiga belitan yaitu belitan primer, belitan sekunder maupun belitan tersier. Karena pada setiap trafo kebocoran arus pasti ada walaupun mungkin nilainya sangat kecil. Maka dari itu perlu dilakukan pengukuran tahanan isolasinya untuk memastikan bahwa kebocoran arus tersebut tetap kecil dan tidak mengganggu kualitas isolasi pada trafo. Untuk melakukan pengukuran tahanan isolasi digunakan alat ukur bernama *insulation tester* merk Kyoritsu yang mempunyai kapasitas tegangan injek dari 500Vdc hingga 5000Vdc.

2.2.8 Indeks Polarisasi

Indeks polarisasi adalah salah satu metode untuk menentukan kualitas tahanan isolasi pada trafo apakah layak untuk dioperasikan atau tidak. Indeks polarisasi yang biasa digunakan untuk menguji trafo bekerja dengan cara membandingkan antara pembacaan tahanan isolasi selama 1 menit atau biasa disebut *dielectric absorption ratio* dengan pembacaan tahanan isolasi selama 10 menit. Pembacaan nilai resistansi pada waktu 10 menit ini akan meningkat cepat jika isolasi dalam keadaan bersih dan kering [15]. Metode pengujiannya dengan memberikan tegangan DC untuk merepresentasikan kondisi tahanan isolasinya secara terus menerus dalam waktu yang lama. Rasio hasil perbandingan antara hasil pengujian selama 10 menit dengan hasil pengujian selama 1 menit dikenal sebagai indeks polarisasi. Apabila nilai indeks polarisasi semakin tinggi maka isolasi pada trafo dikategorikan akan semakin baik tahanan isolasinya, dan sebaliknya jika nilai indeks polarisasi terlalu rendah maka dapat dikatakan bahwa kualitas isolasi pada trafo dikategorikan buruk. Jika isolasi pada trafo buruk maka dapat dikatakan bahwa isolasi trafo telah terkontaminasi oleh kotoran, kelembapan dan arus bocor

yang cukup besar. Besarnya indeks polaritas (IP) dapat dirumuskan sebagai berikut [12]:

$$IP = \frac{R \text{ 10 menit}}{R \text{ 1 menit}} \quad (1)$$

Keterangan :

IP = Indeks Polarisasi

R10 = Pengukuran tahanan isolasi pada trafo selama 10 menit

R1 = Pengukuran tahanan isolasi pada trafo selama 1 menit

Setelah nilai indeks polarisasi didapatkan melalui perbandingan antara pengujian 10 menit dengan 1 menit, selanjutnya kita cocokkan dengan rekomendasi hasil pengujian berdasarkan standar IEEE Std 62 tahun 1995 yang dapat dilihat pada tabel 2.1.

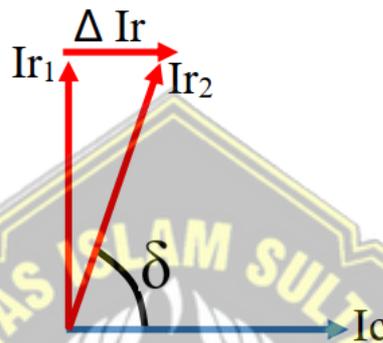
Tabel 2. 1 Rekomendasi Hasil Pengujian Indeks Polarisasi [15]

No	Hasil Uji	Keterangan	Rekomendasi
1	< 1,0	Berbahaya	Investigasi
2	1,0 – 1,1	Jelek	Investigasi
3	1,1 – 1,25	Dipertanyakan	Uji kadar air minyak, uji tan delta
4	1,25 – 2,0	Baik	-
5	> 2,0	Sangat Baik	-

2.2.9 Tangen Delta

Trafo akan dianggap sebagai kapasitor sempurna apabila tidak memiliki sedikitpun arus resistif. Namun kenyataannya trafo mempunyai arus resistif yang jumlahnya sangat sedikit. Tujuan dilakukannya pengujian tangen delta untuk mengetahui seberapa banyak kontaminan yang terdapat di dalam trafo yang mana dapat mengakibatkan pemburukan isolasi trafo. Jika ada kontaminan pada isolasi,

maka nilai tahanan dari isolasi akan berkurang dan isolasi tersebut tidak lagi menjadi kapasitor yang sempurna. Tegangan dan arus akan bergeser kurang dari 90°. Besarnya selisih pergeseran dari 90° tersebut merepresentasikan tingkat kontaminasi pada isolasi. [15]. Di bawah ini merupakan gambar vektor hubungan antara arus kapasitansi dan arus resistif dari sebuah isolasi. Dengan mengukur nilai IR/IC dapat diperkirakan kualitas dari isolasi, yang ditunjukkan oleh gambar 2.4.



Gambar 2. 5 Vektor Hubungan Arus Kapasitansi dengan Arus Resistansi [3]

Kualitas isolasi pada transformator dapat diprediksi dengan menganalisis hasil pengujian tangen deltanya. Yang mana dalam penelitian ini untuk interpretasi hasil pengujian merujuk ke standar CIGRE TB 445. Besar nilai tangen delta dapat dihitung menggunakan rumus di bawah ini [14]:

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \quad (2)$$

Keterangan :

δ = Delta

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

C = Kapasitansi (F)

ω = $2\pi f$

Nilai tangen delta yang didapatkan melalui rumus tersebut dapat kita cocokkan dengan rekomendasi yang berdasarkan standar CIGRE TB 445 yang dapat dilihat pada tabel 2.2

Tabel 2. 2 Rekomendasi Hasil Pengujian Tangen Delta [15]

Item	Batasan	Rekomendasi
Trafo Baru	Max 0,5 %	-
Trafo Operasi	Max 1 %	Periksa kadar air pada minyak isolasi dan kertas isolasi

Dalam menentukan tingkat kelayakan isolasi pada transformator daya dapat menggunakan metode tangen delta, yang mana terdapat dua pengujian tangen delta yang dilakukan yaitu pengujian pada belitan trafo dan pengujian pada *bushing*. Titik pengujian tangen delta pada trafo 3 belitan meliputi :

- a) Primer – Ground
- b) Sekunder – Ground
- c) Tersier – Ground
- d) Primer – Sekunder
- e) Sekunder – Tersier
- f) Primer – Tersier

Dalam pelaksanaan pengujian tangen delta pada trafo terdapat beberapa metode yang digunakan pada rangkaian pengukurannya yaitu UST, GST, dan GSTg.

- a) UST (*Ungrounded Specimen Test*) adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengukur besar kapasitansi antara belitan satu dengan belitan lainnya tanpa dihubungkan ke tanah,
- b) GST (*Grounded Specimen Test*) adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengukur besar kapasitansi antara belitan satu dengan tanah, seperti antara belitan primer dengan tanah.
- c) GSTg (*Grounded Specimen Test with Guard*) adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengukur besar kapasitansi antara belitan dengan tanah tetapi meniadakan referensi terhadap belitan lain.

2.2.10 Breakdown Voltage

Pengujian *breakdown voltage* atau tegangan tembus bertujuan untuk mengetahui kemampuan dielectric dari minyak isolasi dalam menahan stress tegangan. Minyak yang berwarna jernih dan tidak mengandung air akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi karena faktor tersebut yang dapat menurunkan nilai tegangan tembus saat pengujian [1]. Apabila nilai tegangan tembus rendah maka dapat dikatakan bahwa minyak terindikasi ada kontaminan seperti air ataupun partikel karbon yang lain. Dan diharapkan ketika nilai tegangan tembus tinggi maka minyak dapat dipastikan tidak terdapat kontaminan dan kualitas isolasi pada trafo tidak terancam. Tegangan tembus dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut [10]:

$$E_{rata-rata} = \frac{V_b \text{ (rata-rata)}}{d} \quad (3)$$

$E_{rata-rata}$: Kekuatan dielektrik minyak (kV/mm)

V_b : Hasil pengujian (kV)

d : Jarak gap antar elektroda (mm)

Hasil nilai *breakdown voltage* yang telah dihitung menggunakan rumus di atas dapat kita cocokkan dengan rekomendasi yang mengacu pada standar IEC 60156-02 tahun 1995 yang dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Rekomendasi Pengujian Tegangan Tembus [15]

Jenis Pengujian	Batasan Rekomendasi			Tindakan Rekomendasi
	Baik	Sedang	Buruk	
<i>Breakdown Voltage</i>	> 50	40 – 50	< 40	Baik : Lanjut Sedang : Dilakukan pengambilan sample lebih sering untuk monitoring Buruk : Filter minyak

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

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



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Model penelitian merupakan objek transformator tenaga pada gardu induk 150kV PT.PLN (Persero) dengan tipe trafo 3 belitan yaitu belitan primer, belitan sekunder dan belitan tersier. Untuk pengujian tahanan isolasi dan tangen delta dilakukan pada bagian belitan primer,sekunder,tersier. Sedangkan untuk pengujian *breakdown voltage* dilakukan pada minyak isolasi trafo.

3.2 Objek Penelitian

Objek yang dibahas pada penelitian ini yaitu :

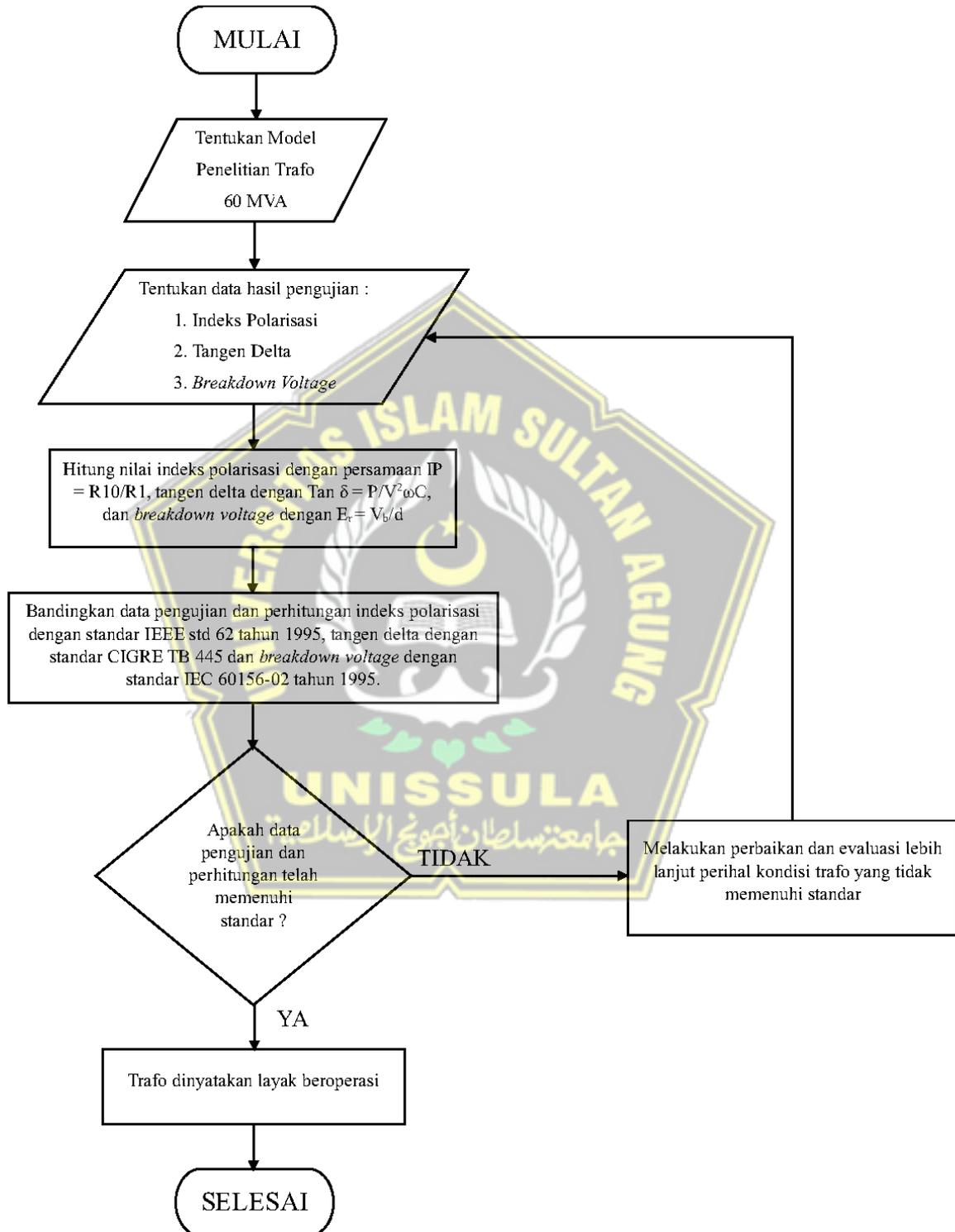
Transformator daya dengan kapasitas 60 MVA di Gardu Induk 150kV milik PT. PLN (Persero). Transformator ini dibuat pada tahun 1994 dan beroperasi secara penuh mulai 6 Januari 1996 hingga saat ini.

3.3 Data Penelitian

Data yang diambil untuk dibahas pada penelitian ini sebagai berikut :

- a. Data spesifikasi trafo GI 150kV.
- b. Hasil pengujian indeks polarisasi trafo GI 150kV pada pemeliharaan rutin 2 tahunan.
- c. Hasil pengujian tangen delta trafo GI 150kV pada pemeliharaan rutin 2 tahunan.
- d. Hasil pengujian *breakdown voltage* trafo GI 150kV pada pemeliharaan rutin 2 tahunan.

3.4 Diagram Alir Penelitian



3.5 Langkah Penelitian

3.5.1 Observasi Lapangan

Tahap awal penelitian, peneliti mewawancarai team leader dari Gardu Induk Pasar Kemis untuk mencari informasi dan data terkait dengan pemeliharaan trafo yang dilakukan pada pemeliharaan rutin. Pada hasil pemeliharaan tersebut peneliti berfokus untuk mengulik data pengujian indeks polarisasi, data pengujian tangen delta dan data pengujian *breakdown voltage*.

3.5.2 Data

Berikut merupakan data yang diperoleh dari hasil observasi di lapangan :

a. Data Indeks Polarisasi

Data pengujian tahanan isolasi dengan metode indeks polarisasi pada tahun 2023 di gardu induk 150kV diperoleh melalui hasil pemeliharaan rutin 2 tahunan bay trafo 2 yang dilaksanakan pada tanggal 27 agustus 2023.

b. Data Tangen Delta

Data pengujian tahanan isolasi dengan metode tangen delta pada tahun 2023 di gardu induk 150kV diperoleh melalui hasil pemeliharaan rutin 2 tahunan bay trafo 2 yang dilaksanakan pada tanggal 27 agustus 2023.

c. Data *Breakdown Voltage*

Data pengujian tahanan isolasi dengan metode *breakdown voltage* pada tahun 2023 di gardu induk 150kV diperoleh melalui hasil pemeliharaan rutin 2 tahunan bay trafo 2 yang dilaksanakan pada tanggal 27 agustus 2023.

d. Data Spesifikasi Trafo

Data spesifikasi trafo 60 MVA didapatkan melalui *name plate* yang terpasang pada body trafo, yang ditunjukkan pada tabel 3.1.

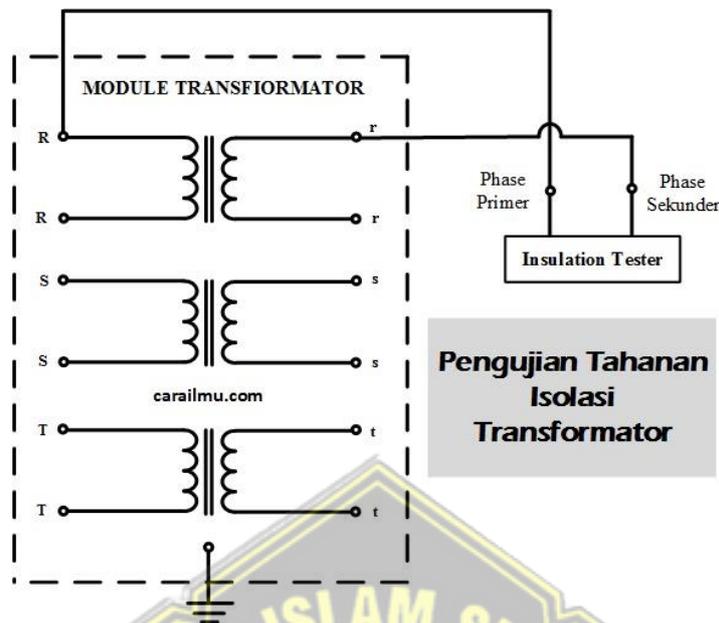
Tabel 3. 1 *Name Plate* Transformator

Merk	Xian Transformer
Type	SFZ-60000/150
Nominal Rating MVA	36/60
Frequency Hertz	50
Installation	Out-Door
Serial Number	A94026-5
Cooling System	ONAN-ONAF
Phase	3
Manufactured	1994
Ambient Tem Max	40°C
Standard	IEC 76-1976
Tap Changer Type	ON LOAD
Current	230.9 A / 1732 A
Connection	STAR – STAR
Vector Group	Ynyn0 (d)
Untaking Mass	8000 kg
Oil Mass	31000 kg
Total Mass	108000 kg
Made In	China

3.5.3 Proses Pengambilan Data

a. Pengujian Indeks Polarisasi

Merupakan suatu pengujian yang dilaksanakan untuk mengetahui kualitas isolasi belitan trafo antara satu belitan dengan yang lain ataupun antara belitan dengan ground. Dengan menggunakan tegangan injek DC akan diperoleh hasil indeks polarisasi dalam satuan mega ohm. Pengukuran dilakukan menggunakan alat insulation tester merk KYORITSU. Gambar rangkaian pengujian indeks polarisasi ditunjukkan oleh gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Rangkaian Pengujian Indeks Polarisasi Transformator Daya [7]

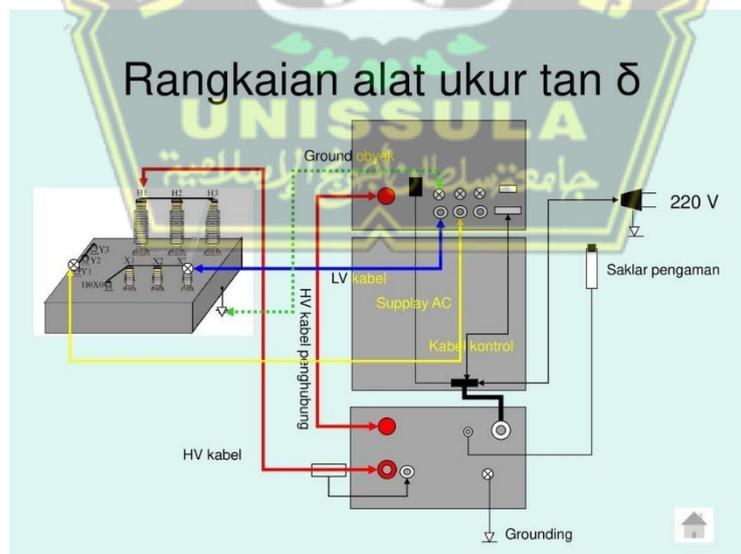
Berikut merupakan langkah – langkah pengujian indeks polarisasi :

- a) Dipastikan seluruh alat uji dan peralatan pendukung kerja dalam kondisi yang baik
- b) Melepas konduktor pada bushing primer dan sekunder
- c) Jumper semua bushing rstn untuk primer, bushing rstn untuk sekunder, dan buhing tersier
- d) Merangkai alat uji tahanan isolasi sesuai instruksi kerja menggunakan alat ukur *insulation tester* merk *Kyoritsu*.
- e) Selanjutnya masukkan kabel merah ke terminal positif (+) dan kabel hitam ke terminal negatif (-)
- f) Lalu yang pertama dilakukan pengukuran tahanan isolasi antara belitan Primer - Sekunder, dengan cara menghubungkan kabel positif dari alat ukur ke primer dan hubungkan kabel negatif ke sekunder.
- g) Set tegangan injek ke 5000V dan putar tombol start
- h) Catat nilai tahanan isolasi ketika pengujian sudah berjalan selama 1 menit
- i) Catat nilai tahanan isolasi dan indeks polarisasi pada blangko pengujian ketika pengujian sudah berjalan 10 menit

- j) Lanjutkan untuk pengujian berikutnya, yaitu Primer – Tersier, Primer – Ground, Sekunder - Ground, Tersier – Ground, Sekunder - Tersier
- k) Setelah seluruh pengujian selesai, catat hasil pada blangko pemeliharaan
- l) Kemudian alat uji dimatikan dengan diputar *switch* ke posisi *OFF*
- m) Lepaskan jumperan pada belitan primer, sekunder dan tersier

b. Pengujian Tangen Delta

Pengujian Tangen delta bertujuan untuk memberikan informasi seberapa banyak kontaminan yang terdapat pada trafo yang mana akan berpengaruh terhadap kualitas isolasi trafo. Pengujian ini membandingkan fase antara tegangan dan arus yang mengalir melalui isolasi untuk mengukur faktor daya atau faktor rugi. Pengujian tangen delta merupakan salah satu metode yang berguna untuk mengidentifikasi masalah pada isolasi peralatan listrik dan memantau kualitas isolasi seiring waktu. Hal ini membantu dalam perawatan preventif, deteksi dini kebocoran isolasi dan pemeliharaan yang tepat untuk mencegah kerusakan lebih lanjut pada peralatan listrik. Gambar rangkaian pengujian tangen delta ditunjukkan oleh gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Rangkaian Pengujian Tangen Delta Transformator Daya [8]

Berikut merupakan langkah – langkah pengujian tangen delta :

- a) Dipastikan seluruh alat uji, apd dan alat pendukung kerja dalam kondisi yang baik
- b) Melepaskan konduktor pada bushing primer dan sekunder
- c) Jumper semua bushing primer rstn, bushing sekunder rstn, dan bushing pada tersier
- d) Merangkai alat uji tangen delta menggunakan alat uji merk Omicron.
- e) Pasang kabel grounding, kabel power dan safety pin ke alat uji
- f) Tancapkan kabel HV dan kabel reference ke alat uji
- g) Pilih pengujian trafo 3 belitan pada alat uji, dan set tegangan injek 10kV untuk primer dan sekunder, dan 2kV untuk tersier
- h) Hubungkan kabel reference warna kuning ke ground
- i) Hubungkan kabel HV ke primer, kabel reference warna biru ke sekunder dan kabel reference warna putih ke tersier
- j) Tekan pin safety dan mulai pengujian tangen delta belitan primer
- k) Catat hasil pengujian tan delta pada blangko pengujian
- l) Pindahkan kabel HV ke sekunder dan kabel reference warna biru ke primer
- m) Tekan pin safety dan mulai pengujian tangen delta belitan sekunder
- n) Catat hasil pengujian tan delta pada blangko pengujian
- o) Pindahkan kabel HV ke tersier dan kabel reference warna putih ke sekunder
- p) Tekan pin safety dan mulai pengujian tangen delta belitan tersier
- q) Catat hasil pengujian tan delta pada blangko pengujian
- r) Setelah seluruh rangkaian pengujian selesai, gulung kabel dan matikan alat uji
- s) Lepaskan jumperan pada belitan primer, sekunder dan tersier

c. Pengujian *Breakdown Voltage*

Uji tegangan tembus bertujuan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan tegangan tembus. Minyak yang bening dan kering akan menampilkan hasil tegangan tembus yang tinggi. Air bebas dan partikel padat, terutama kombinasi keduanya, dapat menurunkan tegangan tembus secara signifikan. Dengan kata lain, pengujian ini dapat menjadi indikasi adanya

kontaminan seperti kadar air dan partikel. Nilai tegangan tembus yang rendah dapat menunjukkan adanya kontaminan, dan tegangan tembus yang tinggi menunjukkan bahwa oli bebas dari semua jenis kontaminan. Gambar pengujian *breakdown voltage* ditunjukkan oleh gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Pengujian Breakdown Voltage Transformator Daya [6]

Berikut merupakan langkah – langkah pengujian *breakdown voltage* :

- a) Dipastikan peralatan uji, apd dan alat pendukung kerja dalam kondisi yang baik dan siap digunakan
- b) Dirangkai alat uji *breakdown voltage* merk Megger
- c) Pasang kabel grounding dan kabel power ke alat uji
- d) Ukur jarak antar elektroda 2.5 mm
- e) Siapkan selang dan stopper yang cocok dengan ukuran *oil sampling*
- f) Cari valve *oil sampling bottom maintank* trafo
- g) Bawa wadah uji beserta selang dan stopper ke dekat valve
- h) Bilas wadah uji sebanyak 3 kali lalu isi wadah uji dengan sample minyak hingga penuh
- i) Tutup wadah uji dan masukkan ke dalam alat uji megger

- j) Isi nama trafo dan standar yang digunakan pada pengujian
- k) Tekan start untuk memulai pengujian
- l) Pengujian berlangsung sebanyak 6 tahap pengujian
- m) Setelah pengujian selesai, catat hasil *breakdown voltage* pada blangko pemeliharaan



BAB IV

DATA DAN ANALISIS

4.1 Hasil Penelitian

Pengujian tahanan isolasi yang meliputi pengujian indeks polarisasi, tangen delta dan tegangan tembus pada trafo 150/20kV sudah dilakukan berdasarkan langkah – langkah yang dipaparkan pada bab sebelumnya. Selanjutnya data tersebut akan dihitung menggunakan rumus untuk disesuaikan atau dibandingkan dengan suatu standarisasi yang digunakan. Pada metode indeks polarisasi menganut standar IEEE Std 62 tahun 1995 dan untuk metode tangen delta menganut standar CIGRE TB 445. Sedangkan untuk metode pengujian tegangan tembus pada penelitian ini menganut standar IEC 60156-02 tahun 1995. Hasil perhitungan yang dapat melampaui standar akan mengindikasikan bahwa isolasi trafo tersebut masih bagus dan layak beroperasi, sedangkan ketika terdapat salah satu hasil perhitungan yang di bawah standar akan mengindikasikan bahwa terdapat suatu masalah pada isolasi trafo dan harus diinvestigasi terlebih dahulu sebelum dioperasikan kembali.

4.2 Pengujian Indeks Polarisasi

Pengujian indeks polarisasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui besar nilai resistansi antara belitan satu dengan yang lain, atau belitan dengan ground. Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil pengujian selama 10 menit dengan pengujian selama 1 menit, yang mana akan didapatkan hasil berupa nilai indeks polarisasi. Item pengujian yang dilakukan pada trafo meliputi primer – tanah, sekunder – tanah, tertier – tanah, primer – sekunder, primer – tersier, sekunder – tersier. Alat ukur yang digunakan berupa *insulation tester* merk Kyoritsu dengan tegangan injek maksimum 5000 Vdc.

Dalam laporan teknik pemeliharaan rutin 2 tahunan *bay* trafo 2 gi pasar kemis didapatkan hasil pengujian tahanan isolasi dengan metode indeks polarisasi melalui pengukuran langsung di lapangan. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Indeks Polarisasi Hasil Pengukuran di Lapangan

Pengujian	Indeks Polarisasi
Primer – Tanah	1,29
Sekunder – Tanah	1,31
Tersier – Tanah	1,45
Primer – Sekunder	1,33
Primer – Tersier	1,28
Sekunder - Tersier	1,42

Untuk membandingkan antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan, indeks polarisasi dapat dihitung dengan cara membagi pengujian selama 10 menit dengan pengujian selama 1 menit. Maka perhitungan indeks polarisasi adalah sebagai berikut :

- a. Perhitungan indeks polarisasi pada belitan primer – tanah

$$IP = \frac{R \text{ 10 menit}}{R \text{ 1 menit}}$$

$$IP = \frac{8820 \text{ M}\Omega}{6840 \text{ M}\Omega}$$

$$IP = 1,2894$$

- b. Perhitungan indeks polarisasi pada belitan sekunder – tanah

$$IP = \frac{R \text{ 10 menit}}{R \text{ 1 menit}}$$

$$IP = \frac{6090 \text{ M}\Omega}{4650 \text{ M}\Omega}$$

$$IP = 1,3096$$

- c. Perhitungan indeks polarisasi pada belitan tersier – tanah

$$IP = \frac{R \text{ 10 menit}}{R \text{ 1 menit}}$$

$$IP = \frac{5490 \text{ M}\Omega}{3790 \text{ M}\Omega}$$

$$IP = 1,4485$$

d. Perhitungan indeks polarisasi pada belitan primer – sekunder

$$IP = \frac{R \text{ 10 menit}}{R \text{ 1 menit}}$$

$$IP = \frac{7130 \text{ M}\Omega}{5360 \text{ M}\Omega}$$

$$IP = 1,3302$$

e. Perhitungan indeks polarisasi pada belitan primer – tersier

$$IP = \frac{R \text{ 10 menit}}{R \text{ 1 menit}}$$

$$IP = \frac{9360 \text{ M}\Omega}{7310 \text{ M}\Omega}$$

$$IP = 1,2804$$

f. Perhitungan indeks polarisasi pada belitan sekunder – tersier

$$IP = \frac{R \text{ 10 menit}}{R \text{ 1 menit}}$$

$$IP = \frac{4560 \text{ M}\Omega}{3210 \text{ M}\Omega}$$

$$IP = 1,4205$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka nilai indeks polarisasi dapat ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Indeks Polarisasi Hasil Perhitungan

Pengujian	10 Menit	1 Menit	Indeks Polarisasi
Primer – Tanah	8820	6840	1,2894
Sekunder – Tanah	6090	4650	1,3096
Tersier – Tanah	5490	3790	1,4485
Primer – Sekunder	7130	5360	1,3302
Primer – Tersier	9360	7310	1,2804
Sekunder - Tersier	4560	3210	1,4205

4.3 Pengujian Breakdown Voltage

Pengujian tegangan tembus dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar tegangan yang dapat ditahan oleh minyak dalam perannya sebagai isolasi trafo. Pengujian dilakukan sebanyak 6 kali dengan rincian 5 menit awal untuk pengujian pertama dan masing – masing 2 menit selanjutnya untuk pengujian kedua hingga keenam. Parameter yang diuji meliputi minyak *maintank* trafo bagian bawah yang diambil melalui lubang fasilitas *sample* minyak. Alat yang digunakan untuk uji tegangan tembus mempunyai merk Megger dan sanggup injek tegangan hingga maksimum 100kV.

Pada laporan teknik pemeliharaan rutin 2 tahunan *bay* trafo 2 gi pasar kemis didapatkan hasil pengujian tahanan isolasi dengan metode *breakdown voltage* melalui pengukuran langsung di lapangan. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Pengukuran Tegangan Tembus di Lapangan

Pengujian <i>Breakdown Voltage</i>	Nilai
<i>Maintank Bottom Trafo</i>	85,6 KV/2.5mm

Tegangan tembus dapat dihitung dengan cara mencari rata - rata keenam hasil pengujian dan dibagi dengan jarak elektroda. Untuk standar IEC 60156-02 tahun 1995 menggunakan jarak antar elektroda sebesar 2,5mm. Maka perhitungan kekuatan dielektrik *breakdown voltage* adalah sebagai berikut :

$$V_b = \frac{\Sigma \text{ Pengujian}}{\text{Total pengujian}}$$

$$V_b = \frac{81,6+87,8+91,2+89,5+82,3+81,4}{6}$$

$$V_b = 85,633 \text{ kV}$$

Rata – rata perhitungan kekuatan dielektrik *breakdown voltage* adalah :

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{V_b (\text{rata-rata})}{d}$$

$$E_{\text{rata-rata}} = \frac{85,633}{2,5}$$

$$E_{\text{rata-rata}} = 34,253 \text{ kV/mm}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka nilai tegangan tembus dapat ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan *Breakdown Voltage*

Pengujian	Diukur Pada Suhu	Hasil Uji (kV)
Pertama	40° C	81,6
Kedua	40° C	87,8
Ketiga	40° C	91,2
Keempat	40° C	89,5
Kelima	40° C	82,3
Keenam	40° C	81,4
Rata - Rata		85,633 kV

4.4 Pengujian Tangen Delta

Pengujian tangen delta dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar kontaminan yang ada di dalam trafo yang dapat menurunkan kualitas isolasi, selain itu tangen delta juga dapat mengukur besar kapasitansi belitan trafo. Tangen delta dapat ditentukan dengan cara membandingkan antara arus resistif terhadap arus kapasitif, karena trafo yang sempurna tanpa kontaminan akan dianggap sebagai kapasitif sempurna.

Pengujian ini dilakukan pada belitan primer, sekunder dan tersier trafo. Metode rangkaian pengukuran tangen delta yang dipakai pada penelitian kali ini menggunakan metode UST (*Ungrounded Specimen Test*) dan metode GSTg (*Grounded Specimen Test with Guard*). Metode UST digunakan untuk mengukur kapasitansi antara belitan satu dengan belitan lainnya tanpa dihubungkan ke ground. Sedangkan metode GSTg digunakan untuk mengukur kapasitansi antara belitan terhadap ground yang memiliki fasilitas guard, yang mana fungsi guard adalah

untuk meniadakan referensi dari belitan lain. Alat ukur yang digunakan untuk pengujian tangen delta mempunyai merk Omicron dan sanggup injek tegangan maksimum hingga 12000 VAC. Untuk belitan primer dan sekunder digunakan tegangan injek sebesar 10kV, sedangkan untuk belitan tersier digunakan tegangan injek sebesar 5kV. Dalam laporan teknik pemeliharaan rutin 2 tahunan *bay* trafo 2 gi pasar kemis didapatkan hasil pengujian tahanan isolasi dengan metode tangen delta melalui pengukuran langsung di lapangan. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Tangen Delta Hasil Pengukuran di Lapangan

No	Metode Pengujian	Titik Diuji	Tan Delta
Primer			
1	UST A	CHL	0,1858 %
	UST B	CHT	0,3313 %
	UST A + B	CHL + CHT	0,189 %
	GSTg A+B	CHG	0,491 %
Sekunder			
2	UST A	CLH	0,1865 %
	UST B	CLT	0,1672 %
	UST A + B	CLH + CLT	0,1733 %
	GSTg A+B	CLG	0,532 %
Tersier			
3	UST A	CTH	0,2524 %
	UST B	CTL	0,1657 %
	UST A + B	CTH + CTL	0,1672 %
	GSTg A+B	CTG	0,2927 %

Untuk membandingkan antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan, nilai tangen delta dapat dihitung dengan rumus berikut :

- a. Perhitungan tangen delta belitan primer terhadap sekunder (CHL)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,39776}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (6,81 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,39776}{213,834} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,186013 \%$$

- b. Perhitungan tangen delta belitan primer terhadap tersier (CHT)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,01664}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (0,1598 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,01664}{5,01772} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,331625 \%$$

- c. Perhitungan tangen delta belitan primer terhadap sekunder + tersier (CHL+CHT)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,41416}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (6,97 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,41416}{218,858} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,189237 \%$$

- d. Perhitungan tangen delta belitan primer terhadap ground (CHG)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,48161}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (3,12 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,48161}{97,968} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,491599 \%$$

e. Perhitungan tangen delta belitan sekunder terhadap primer (CLH)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,39928}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (6,81 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,39928}{213,834} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,186724 \%$$

f. Perhitungan tangen delta belitan sekunder terhadap tersier (CLT)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,69048}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (13,13 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,69048}{412,282} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,167478 \%$$

g. Perhitungan tangen delta belitan sekunder terhadap primer + tersier (CLH + CLT)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1,09}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (19,94 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{1,09}{626,116} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,174089 \%$$

h. Perhitungan tangen delta belitan sekunder terhadap ground (CLG)

$$\text{Tan } \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,24854}{10.000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (1,48 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,24854}{46,472} \times 100\%$$

$$\text{Tan } \delta = 0,534817 \%$$

- i. Perhitungan tangen delta belitan tersier terhadap primer (CTH)

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,00318}{5000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (0,1598 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,00318}{1,25443} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,253502 \%$$

- j. Perhitungan tangen delta belitan tersier terhadap sekunder (CTL)

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,17151}{5000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (13,13 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,17151}{103,0705} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,166401 \%$$

- k. Perhitungan tangen delta belitan tersier terhadap primer + sekunder (CTH + CTL)

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,17515}{5000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (13,29 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,17515}{104,3265} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,167886 \%$$

- l. Perhitungan tangen delta belitan tersier terhadap ground (CTG)

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,28905}{5000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (12,53 \times 10^{-9})} \times 100\%$$

$$\tan \delta = \frac{0,28905}{98,3605} \times 100\%$$

$$\tan \delta = 0,293868 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, maka nilai tangen delta dapat ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Tangen Delta Hasil Perhitungan

Test	Frekuensi (Hz)	Tegangan (kV)	Arus (mA)	Daya Losses (mW)	Cap (nF)	Tan Delta (%)
Primer						
CHL	50	10	21,4	397,76	6,81	0,186013
CHT	50	10	0,502	16,64	0,1598	0,331625
CHL+CHT	50	10	21,9	414,16	6,97	0,189237
CHG	50	10	9,8	481,61	3,12	0,491599
Sekunder						
CLH	50	10	21,4	399,28	6,81	0,186724
CLT	50	10	41,28	690,48	13,13	0,167478
CLH+CLT	50	10	62,7	1090	19,94	0,174089
CLG	50	10	4,67	248,54	1,48	0,534817
Tersier						
CTH	50	5	0,251	3,18	0,1598	0,253502
CTL	50	5	20,66	171,51	13,13	0,166401
CTH+CTL	50	5	20,92	175,15	13,29	0,167886
CTG	50	5	19,72	289,05	12,53	0,293868

4.5 Analisis Hasil Pengujian dan Perhitungan Indeks Polarisasi

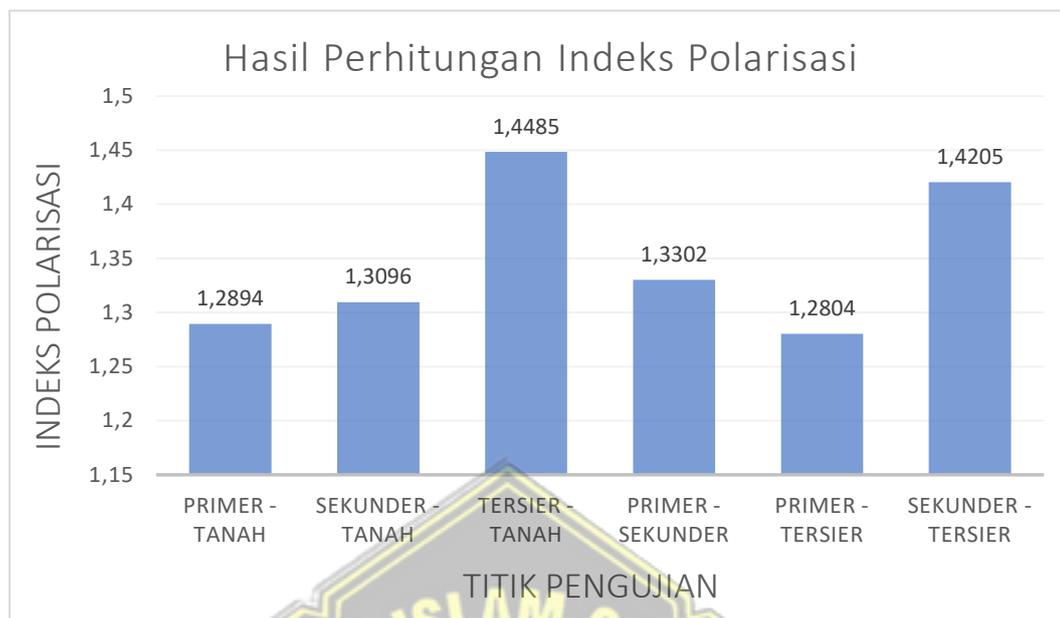
Hasil dari pengujian dan perhitungan indeks polarisasi yang telah dipaparkan selanjutnya dibandingkan dengan standar yang digunakan. Untuk metode indeks polarisasi menggunakan tegangan injek sebesar 5000Vdc dan menggunakan standar IEEE Std 62 tahun 1995 yang ditunjukkan pada tabel 2.1. Dapat dilihat pada tabel 2.1, indeks polarisasi trafo akan dapat dikatakan baik jika memiliki nilai diatas 1,25. Apabila nilai indeks polarisasi dibawah itu, trafo dapat dinyatakan tidak layak operasi dan harus diinvestigasi terlebih dahulu sebelum dioperasikan kembali.

Berdasarkan tabel 4.1 dan 4.2, didapatkan nilai indeks polarisasi untuk belitan primer terhadap tanah sebesar 1,29 berdasarkan pengujian dan 1,2894 berdasarkan perhitungan menggunakan rumus. Kedua hasil tersebut mempunyai nilai di atas 1,25 yang menandakan bahwa indeks polarisasi pada belitan primer terhadap tanah dikategorikan baik. Selanjutnya pada belitan sekunder terhadap tanah diperoleh indeks polarisasi sebesar 1,31 berdasarkan pengujian dan 1,3096 berdasarkan perhitungan. Maka belitan sekunder terhadap tanah dapat dikategorikan baik karena kedua hasil tersebut memiliki nilai di atas 1,25.

Untuk belitan tersier terhadap tanah diperoleh hasil 1,45 berdasarkan pengujian dan 1,4485 berdasarkan perhitungan dengan rumus. Dapat dikatakan bahwa indeks polarisasi belitan tersier terhadap tanah dikategorikan baik karena memiliki nilai di atas standar yaitu 1,25. Selanjutnya untuk belitan primer terhadap sekunder diperoleh hasil indeks polarisasi sebesar 1,33 berdasarkan pengujian dan 1,3302 berdasarkan perhitungan. Indeks polarisasi belitan primer terhadap sekunder dapat dikategorikan baik karena mempunyai nilai di atas 1,25.

Pada belitan primer terhadap tersier didapatkan hasil indeks polarisasi sebesar 1,28 berdasarkan pengujian dan 1,2804 berdasarkan perhitungan. Indeks polarisasi pada belitan primer terhadap tersier dikategorikan baik karena kedua hasil tersebut mempunyai nilai di atas standar yaitu 1,25. Lalu untuk belitan sekunder terhadap tersier mempunyai indeks polarisasi 1,42 berdasarkan pengujian dan 1,4205 berdasarkan perhitungan. Kedua hasil tersebut dikategorikan baik karena mempunyai nilai di atas standar yaitu 1,25.

Hasil indeks polarisasi pada enam titik pengujian seluruhnya dikategorikan dalam keadaan baik yaitu dengan rentang nilai di atas 1,25 seperti yang terlihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Diagram Hasil Perhitungan Indeks Polarisasi

Berdasarkan gambar 4.1 nilai indeks polarisasi tertinggi didapatkan oleh belitan tersier terhadap tanah sebesar 1,4485. Sedangkan nilai indeks polarisasi terendah didapatkan oleh belitan primer terhadap tersier sebesar 1,2804. Untuk indeks polarisasi dengan nilai terendah pun masih dikategorikan baik dikarenakan mempunyai nilai di atas 1,25 begitupun dengan belitan lainnya. Berdasarkan standar IEEE Std 62 tahun 1995 seluruh hasil indeks polarisasi dikategorikan baik dan memenuhi standar dikarenakan semuanya memiliki hasil di atas 1,25. Sehingga dapat dikatakan isolasi transformator antara belitan satu dengan yang lain terisolir dengan baik dan tahanan isolasi trafo berdasarkan metode indeks polarisasi dikategorikan dalam kondisi baik dan layak untuk beroperasi normal.

4.6 Analisis Hasil Pengujian dan Perhitungan *Breakdown Voltage*

Pada metode tegangan tembus, hasil pengujian dan pengukuran akan dibandingkan dengan standar yang digunakan untuk menentukan tingkat kelayakan kekuatan dielektrik pada minyak. Untuk metode *breakdown voltage* menggunakan standar IEC 60156-02 tahun 1995 yang ditunjukkan pada tabel 2.3. Dapat dilihat pada tabel 2.3, *breakdown voltage* akan dapat dikategorikan baik apabila memiliki nilai rata – rata tegangan di atas 50kV. Jika hasil tegangan tembus memiliki nilai di

bawah 40kV akan dikategorikan sebagai pemburukan minyak dan harus dilakukan *treatment* khusus agar kekuatan dielektrik minyak sesuai standar.

Berdasarkan tabel 4.3 dan 4.4 didapatkan rata – rata tegangan pada pengujian dan perhitungan mempunyai nilai yang sama yaitu sebesar 85,6 kV. Dapat dilihat data dari tabel 4.4 perhitungan nilai *breakdown voltage* pada suhu 40°C didapatkan hasil 81,6 kV untuk pengujian pertama. Untuk pengujian kedua sebesar 87,8 kV, pada pengujian ketiga sebesar 91,2 kV, pada pengujian keempat sebesar 89,5 kV, pada pengujian kelima sebesar 82,3 kV dan pada pengujian keenam sebesar 81,4 kV. Diagram perbandingan hasil keenam pengujian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Diagram Hasil Perhitungan *Breakdown Voltage*

Berdasarkan gambar 4.2 hasil tegangan tembus tertinggi diperoleh saat pengujian ketiga dan hasil tegangan tembus terendah diperoleh saat pengujian keenam. Dari keenam pengujian tersebut didapatkan rata – rata tegangan sebesar 85,633 kV yang mana jika dibandingkan dengan standar IEC 60156-02 tahun 1995 dapat dikategorikan baik karena memiliki hasil di atas 50kV. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa kelayakan tahanan isolasi trafo berdasarkan metode *breakdown voltage* dikategorikan dalam kondisi baik dan layak untuk beroperasi normal.

4.7 Analisis Hasil Pengujian dan Perhitungan Tangen Delta

Hasil tangen delta yang telah dipaparkan baik melalui pengukuran maupun melalui perhitungan selanjutnya dibandingkan dengan standar yang digunakan. Untuk metode tangen delta menggunakan standar CIGRE TB 445 yang ditunjukkan pada tabel 2.2. Dapat dilihat pada tabel 2.2, tangen delta trafo yang sudah beroperasi dapat dikatakan baik apabila memiliki nilai di bawah 1%. Apabila hasil tangen delta di atas angka tersebut, maka trafo perlu dicek terlebih dahulu sebelum dioperasikan kembali.

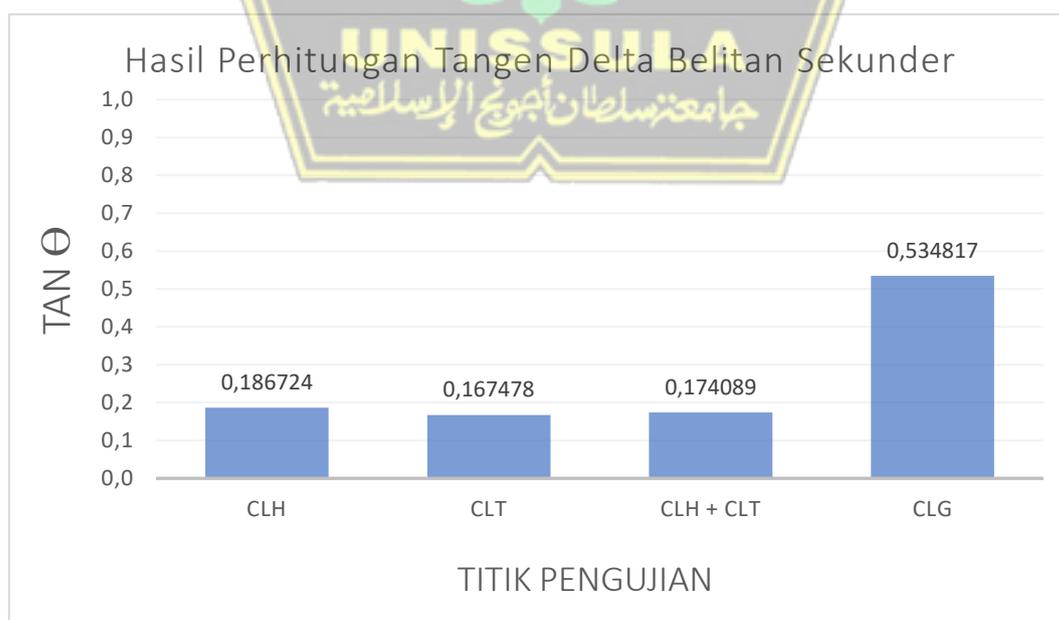
Berdasarkan tabel 4.5 dan 4.6, tangen delta belitan primer terhadap sekunder dengan metode pengujian UST A didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,1858 % dan menurut perhitungan sebesar 0,186013. Lalu untuk belitan primer terhadap tersier dengan metode pengujian UST B didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,3313 % dan menurut perhitungan sebesar 0,331625 %. Belitan primer terhadap sekunder + tersier dengan metode UST A + B memperoleh nilai pengukuran sebesar 0,189 % dan nilai perhitungan sebesar 0,189237 %. Lalu yang terakhir untuk belitan primer terhadap ground dengan metode GSTg A+B didapatkan data pengukuran sebesar 0,491 % dan data perhitungan sebesar 0,491599 %. Diagram hasil perhitungan tan delta pada belitan primer dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Diagram Hasil Perhitungan Tangen Delta Belitan Primer

Berdasarkan gambar 4.3 nilai terendah pada tangen delta belitan primer didapatkan saat pengujian CHL+CHT dengan hasil 0,189237 %. Sedangkan nilai tertinggi didapatkan saat pengujian CHG dengan hasil 0,491599 %. Menurut standar CIGRE TB 445, keempat hasil tangen delta pada belitan primer ini dapat dikategorikan dalam kondisi baik dan memenuhi standar karena seluruhnya di bawah 1%.

Selanjutnya berdasarkan tabel 4.5 dan tabel 4.6, tangen delta belitan sekunder terhadap primer dengan metode pengujian UST A didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,1865 % dan menurut perhitungan sebesar 0,186724%. Untuk belitan sekunder terhadap tersier dengan metode pengujian UST B didapatkan nilai tangen delta sebesar 0,1672 % untuk pengukuran dan 0,167478% untuk perhitungan. Lalu belitan sekunder terhadap primer + tersier dengan metode pengujian UST A+B didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,1733 % dan menurut perhitungan sebesar 0,174089 %. Dan yang terakhir untuk tangen delta belitan sekunder terhadap ground dengan metode pengujian GSTg A+B didapatkan nilai tangen delta sebesar 0,532 % untuk pengukuran dan 0,534817% untuk perhitungan. Diagram hasil perhitungan tan delta pada belitan sekunder ditunjukkan oleh gambar 4.4



Gambar 4. 4 Diagram Hasil Perhitungan Tangen Delta Belitan Sekunder

Berdasarkan gambar 4.4 nilai terendah diperoleh saat melakukan pengujian CLT dengan hasil 0,167478 %. Sedangkan nilai tertinggi diperoleh saat melakukan pengujian CLG dengan hasil 0,534817 %. Menurut standar CIGRE TB 445, keempat hasil tangen delta pada belitan sekunder ini dapat dikategorikan dalam kondisi baik dan memenuhi standar karena seluruhnya di bawah 1%.

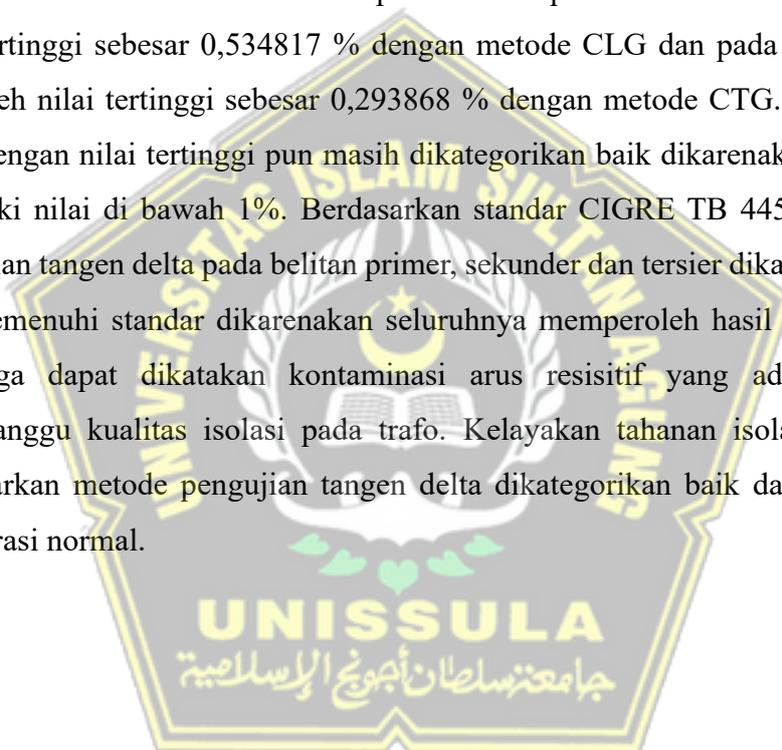
Selanjutnya berdasarkan tabel 4.5 dan 4.6, tangen delta belitan tersier terhadap primer dengan metode pengujian UST A didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,2524 % dan menurut perhitungan sebesar 0,253502 %. Lalu untuk belitan tersier terhadap sekunder dengan metode pengujian UST B didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,1657 % dan menurut perhitungan sebesar 0,166401 %. Untuk belitan tersier terhadap primer + sekunder dengan metode pengujian UST A+B didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,1672 % dan menurut perhitungan sebesar 0,167886 %. Untuk belitan tersier terhadap ground dengan metode GSTg A+B didapatkan nilai tangen delta menurut pengukuran sebesar 0,2927 % dan menurut perhitungan sebesar 0,293868 %. Diagram hasil perhitungan tangen delta belitan tersier dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Diagram Hasil Perhitungan Tangen Delta Belitan Tersier

Berdasarkan gambar 4.5 nilai tange delta yang terendah diperoleh saat pengujian CTL dengan hasil 0,166401 %. Sedangkan untuk nilai tertinggi diperoleh saat pengujian CTG dengan hasil 0,293868 %. Menurut standar CIGRE TB 445, keempat hasil tange delta pada belitan tersier ini dapat dikategorikan dalam kondisi baik dan memenuhi standar karena seluruhnya di bawah 1%.

Setelah dilakukan pengujian tange delta pada seluruh belitan, didapatkan nilai tange delta tertinggi pada masing – masing belitan yaitu sebesar 0,491599 % dengan metode CHG untuk belitan primer. Lalu pada belitan sekunder diperoleh nilai tertinggi sebesar 0,534817 % dengan metode CLG dan pada belitan tersier diperoleh nilai tertinggi sebesar 0,293868 % dengan metode CTG. Untuk tange delta dengan nilai tertinggi pun masih dikategorikan baik dikarenakan seluruhnya memiliki nilai di bawah 1%. Berdasarkan standar CIGRE TB 445 seluruh hasil pengujian tange delta pada belitan primer, sekunder dan tersier dikategorikan baik dan memenuhi standar dikarenakan seluruhnya memperoleh hasil di bawah 1%. Sehingga dapat dikatakan kontaminasi arus resisitif yang ada tidak akan mengganggu kualitas isolasi pada trafo. Kelayakan tahanan isolasi pada trafo berdasarkan metode pengujian tange delta dikategorikan baik dan layak untuk beroperasi normal.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis pengujian tahanan isolasi transformator dengan metode indeks polarisasi, *breakdown voltage* dan tangen delta pada gardu induk 150/20 kV dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil pengujian pada metode indeks polarisasi secara keseluruhan mendapatkan nilai tertinggi sebesar 1,4485 pada tersier tanah dan nilai terendah sebesar 1,2804 pada primer tersier. Dapat dilihat pada hasil terendah pun masih mendapatkan nilai di atas 1,25. Kemudian hasil pengujian metode *breakdown voltage* memperoleh nilai rata – rata tegangan sebesar 85,633kV dimana nilai tersebut sudah melampaui acuan yang digunakan yaitu 50kV. Lalu pada pengujian dengan metode tangen delta secara keseluruhan mendapatkan nilai tertinggi sebesar 0,534817 pada CLG dan nilai terendah sebesar 0,166401 pada CTL. Dapat dilihat pada hasil tertinggi pun masih mendapatkan nilai di bawah 1%.
2. Perbandingan antara hasil dari seluruh metode pengujian dengan masing – masing standarnya didapatkan bahwa hasil dari ketiga metode tersebut dikategorikan layak sesuai dengan standar pengujiannya masing – masing. Hasil metode indeks polarisasi dikategorikan layak menurut standar IEEE Std 62 tahun 1995, hasil metode *breakdown voltage* dikategorikan layak menurut standar IEC 60156-02 tahun 1995 dan hasil metode tangen delta dikategorikan layak menurut standar CIGRE TB 445. Maka dapat ditarik kesimpulan bahwa keseluruhan hasil pengujian kelayakan isolasi transformator daya berdasarkan metode indeks polarisasi, *breakdown voltage* dan tangen delta dapat dikategorikan baik dan kondisi isolasi transformator layak untuk dioperasikan.

5.2 Saran

Saran dari penelitian ini untuk peneliti selanjutnya yaitu diharapkan agar dapat mengembangkan metode – metode yang telah dipakai untuk menentukan kelayakan isolasi trafo. Dapat ditambah dengan metode pengujian yang lain ataupun ditambah variabel yang dibandingkan, seperti data pada trafo lain dengan merk yang sama ataupun data pada pengujian tahun – tahun sebelumnya agar dapat dikembangkan lebih luas lagi.

Dapat juga mencari judul atau topik yang membahas mengenai kelayakan isolasi transformator yang buruk pasca gangguan pada sisi sekunder maupun primer. Dikarenakan ketika terjadi pemburukan isolasi pada trafo diharapkan dapat dicari sumber permasalahannya dan analisisnya apakah trafo layak untuk dioperasikan kembali atau tidak.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Wibawa, “Studi Kelayakan Gardu Induk 1x30 MVA di Krueng Raya Dalam Menunjang Sistem Kelistrikan Kota Banda Aceh,” 2019.
- [2] S. S. Wibowo, “Analisa Sistem Tenaga,” 2018.
- [3] A. Mustafid Octavian, “Analisis Penyebab Hotspot CVT Fasa T Bay PLTU 1 Gardu Induk 150 kV Rembang,” 2021.
- [4] A. M. Suganda, “Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator Daya,” 2021.
- [5] K. Ababil, “Analisa Perbandingan Kelayakan Tahanan Isolasi Transformator Daya Menggunakan Pengujian Indeks Polaritas, Tangen Delta, Bdv (Breakdown Voltage), Dan Rasio Tegangan Di Gardu Induk 150 kV Ulee Kareng,” 2023.
- [6] F. Arif, “Standar Pengujian Peralatan Transformator,” 2018.
- [7] J. Siburian, “Karakteristik Transformator,” 2019.
- [8] U. P. Bekt, “Evaluasi dan Perbaikan Tahanan Isolasi Transformator 60 MVA 150/20kV Cimanggis II,” 2022.
- [9] A. Panji Nugraha, “Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Berbasis Indeks Polarisasi Dan Tangen Delta Pada Trafo GI 150/20 kV PT. APF,” 2023.
- [10] R. Farid Rifqyawan, “Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Trafo 30 Mva Di Gi 150/20 kV PT APF Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi Dan Tangen Delta,” 2022.
- [11] M. Firdaus Robbani and D. Nugroho, “Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage,” 2020.
- [12] B. Purba, L. S Patras, and N. M Tulung, “Analisis Kemampuan Isolasi Transformator Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta Dan Break Down Voltage”.
- [13] A. F. Devianto, “Analisis Tahanan Isolasi Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage Di Gardu Induk 150 kV Kentungan.,” 2019.
- [14] H. Rifqi Febrijanto and R. Hidayat, “Analisis Pengujian Tan Delta Pada Transformator Arus Di GITET Tasikmalaya Bay Penghantar Bandung Selatan-1,” 2022.
- [15] B. Cahyono, “Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga,” 2014.