

**EVALUASI UJI KELAYAKAN TRAFODAYA 20 MVA GI 150  
KV BERDASARKAN ISOLASI, RASIO DAN PROTEKSI  
INTERNAL**

**LAPORAN TUGAS AKHIR**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana S1 Pada  
Prodi Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung



**OLEH :**

**NAMA : FAJAR BAGUS RAMADHAN**

**NIM : 30602200147**

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

**2025**

**FEASIBILITY TEST ANALYSIS OF 20 MVA TRANSFORMER 150 KV  
SUBSTATION BASED ON INSULATION, RATIO AND INTERNAL  
PROTECTION**

**FINAL PROJECT**

*Suggested As One of the Requirements to Get a Bachelor's Degree in a Study  
Program Electrical Engineering at Universitas Islam Sultan Agung.*



**DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING**

**INDUSTRIAL TECHNOLOGY OF FACULTY**

**UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**

**SEMARANG**

**2025**

## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

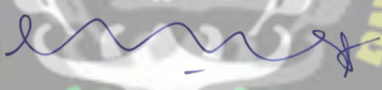
Laporan Tugas Akhir dengan judul “ **EVALUASI UJI KELAYAKAN TRAFO DAYA 20 MVA GI 150 KV BERDASARKAN ISOLASI, RASIO DAN PROTEKSI INTERNAL**” ini disusun oleh:

Nama : Fajar Bagus Ramadhan  
NIM : 30602200147  
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Senin  
Tanggal : 3 Maret 2025

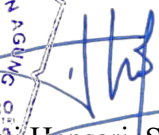
Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.  
NIDN. 0618066301

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, ST., MT.  
170325

NIDN. 0005036501

## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**EVALUASI UJI KELAYAKAN TRAFO DAYA 20 MVA GI 150 KV BERDASARKAN ISOLASI, RASIO DAN PROTEKSI INTERNAL**” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Senin  
Tanggal : 3 Maret 2025

Tim Penguji

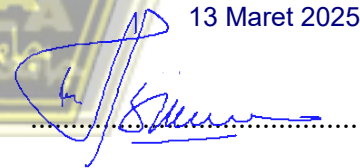
Tanda Tangan

Ir. Ida Widiastuti, MT.  
NIDN : 0005036501  
Ketua



Dr. Muhammad Khosvi'in, ST., MT., IPM  
NIDN : 0625077901  
Penguji I

13 Maret 2025



Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.  
NIDN. 0618066301  
Penguji II



## SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Fajar Bagus Ramadhan  
NIM : 30602200147  
Jurusan : Teknik Elektro  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“EVALUASI UJI KELAYAKAN TRAFODAYA 20 MVA GI 150 KV BERDASARKAN ISOLASI, RASIO DAN PROTEKSI INTERNAL”** 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, 17 Maret 2025

Yang Menyatakan,



Fajar Bagus Ramadhan

NIM. 30602200147

## PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fajar Bagus Ramadhan

NIM : 30602200147

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“EVALUASI UJI KELAYAKAN TRAFO DAYA 20 MVA GI 150 KV BERDASARKAN ISOLASI, RASIO DAN PROTEKSI INTERNAL”** 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, 17 Maret 2025

Yang Menyatakan,



Fajar Bagus Ramadhan

NIM. 30602200147

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Evaluasi Uji Kelayakan Trafo Daya 20 MVA GI 150 kV Berdasarkan Isolasi, Rasio Dan Proteksi Internal”.

Terlaksananya penulisan Laporan Tugas Akhir penulis tidak lepas atas bantuan dan bimbingan dari beberapa pihak. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata Satu (S1) di Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya, sehingga saya bisa menyelesaikan penelitian ini dan Nabi Muhammad SAW yang jadi penuntun setiap umat manusia dalam menempuh dan meraih kebahagiaan di dunia dan akhirat.
2. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST., MT., IPU., ASEAN, Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT. selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran dan kebijaksanaan telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dalam penyusunan penelitian hingga selesai.
6. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan arahan selama masa perkuliahan. Serta seluruh Staff Teknik Elektro yang selalu siap membantu dalam berbagai urusan administratif dan teknis selama masa perkuliahan.

7. Bapak, Ibu serta Saudara-saudara saya tercinta atas dukungan kepada saya berupa kasih sayang, keridhoan, doa dan motivasi yang telah diberikan.
8. Teman-teman seperjuangan yang telah membantu saya dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
9. Semua pihak yang telah memberikan bantuan sehingga laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat membangun sebagai perbaikan pada masa mendatang dan semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Semarang, Februari 2025

Yang menyatakan,

Fajar Bagus Ramadhan



## DAFTAR ISI

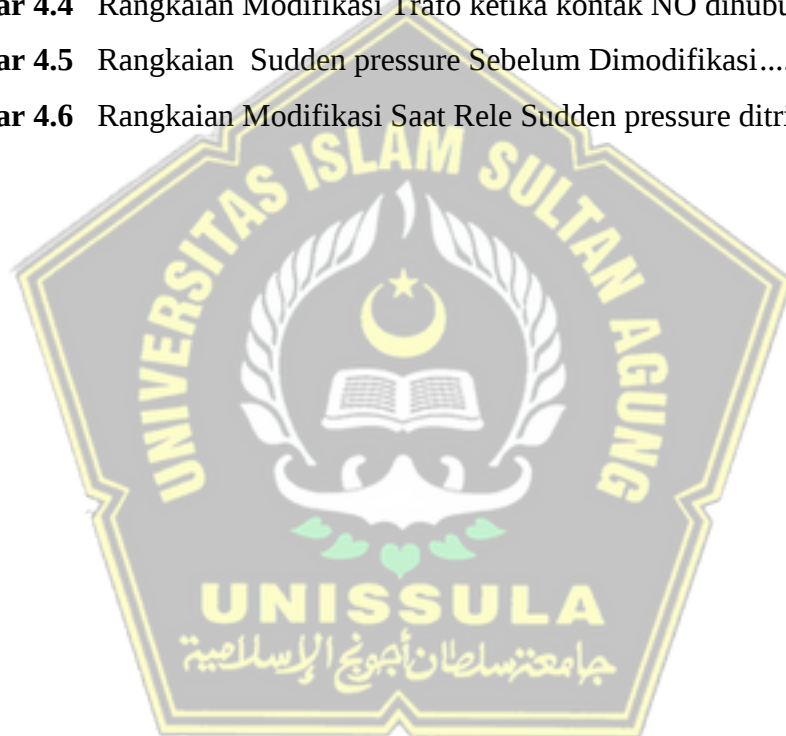
|                                                     |          |
|-----------------------------------------------------|----------|
| HALAMAN JUDUL .....                                 | i        |
| LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING .....                  | ii       |
| LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....                      | iii      |
| SURAT PERNYATAAN .....                              | iv       |
| PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....            | v        |
| KATA PENGANTAR.....                                 | vi       |
| DAFTAR ISI.....                                     | viii     |
| DAFTAR GAMBAR.....                                  | x        |
| DAFTAR TABEL .....                                  | xii      |
| DAFTAR PERSAMAAN .....                              | xiii     |
| ABSTRAK .....                                       | xiv      |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>                       | <b>1</b> |
| 1.1 Latar Belakang .....                            | 1        |
| 1.2. Perumusan Masalah.....                         | 2        |
| 1.3 Pembatasan Masalah .....                        | 2        |
| 1.4 Tujuan Penelitian.....                          | 3        |
| 1.5 Manfaat.....                                    | 3        |
| 1.6 Sistematika Penulisan.....                      | 4        |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b> | <b>5</b> |
| 2.1 Tinjauan Pustaka .....                          | 5        |
| 2.2 Dasar Teori .....                               | 7        |
| 2.2.1 Gardu Induk .....                             | 7        |
| 2.2.2 Transformator Daya.....                       | 7        |
| 2.2.3 Bagian Transformator Daya.....                | 9        |
| 2.2.4 Tahanan isolasi .....                         | 17       |
| 2.2.5 Pengujian Indeks Polarisasi .....             | 17       |
| 2.2.6 Pengujian Tangen Delta.....                   | 18       |
| 2.2.7 <i>Breakdown Voltage</i> .....                | 21       |
| 2.2.8 Pengujian Rasio Tegangan.....                 | 22       |
| 2.2.9 <i>Software Proteus 8</i> .....               | 23       |

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>                              | <b>25</b> |
| 3.1 Model Penelitian.....                                               | 25        |
| 3.2 Obyek Penelitian .....                                              | 27        |
| 3.3 Data Penelitian .....                                               | 27        |
| 3.4 Metode Pengujian.....                                               | 28        |
| 3.5.1 Pengujian Indeks Polarisasi .....                                 | 28        |
| 3.5.2 Pengujian Tangen Delta.....                                       | 29        |
| 3.5.3 Pengujian <i>Breakdown Voltage</i> .....                          | 30        |
| 3.5.4 Pengujian Rasio Tegangan.....                                     | 31        |
| 3.5.5 Uji Fungsi Rangkaian Modifikasi Rele <i>Sudden pressure</i> ..... | 32        |
| 3.5 Diagram Alir Penelitian.....                                        | 34        |
| <b>BAB IV HASIL DAN ANALISA.....</b>                                    | <b>36</b> |
| 4.1 Hasil Pengujian Indeks Polarisasi .....                             | 36        |
| 4.2 Hasil Pengujian Tangen Delta .....                                  | 37        |
| 4.3 Hasil Pengujian <i>Breakdown Voltage</i> .....                      | 39        |
| 4.4 Hasil Pengujian Rasio Tegangan.....                                 | 39        |
| 4.5 Hasil Uji Fungsi Rangkaian Rele Internal.....                       | 41        |
| 4.6 Analisa Hasil Uji Indeks Polaritas.....                             | 42        |
| 4.7 Analisa Hasil Uji Tangen Delta.....                                 | 43        |
| 4.8 Analisa Hasil Uji <i>Breakdown Voltage</i> .....                    | 45        |
| 4.9 Analisa Hasil Pengujian Rasio Tegangan.....                         | 45        |
| 4.10 Validasi Uji Fungsi Rele <i>Sudden pressure</i> .....              | 47        |
| <b>BAB V PENUTUP.....</b>                                               | <b>51</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....                                                     | 51        |
| 5.2 Saran .....                                                         | 52        |
| <b>LAMPIRAN.....</b>                                                    | <b>55</b> |

## DAFTAR GAMBAR

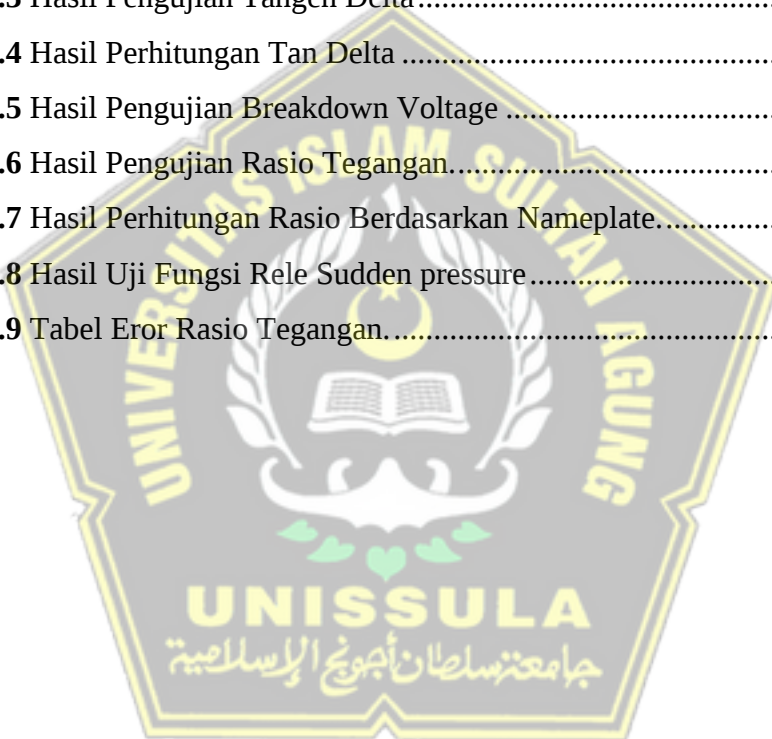
|                    |                                                          |    |
|--------------------|----------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 2.1</b>  | Gardu Induk.....                                         | 7  |
| <b>Gambar 2.2</b>  | Prinsip Induksi Elektromagnetik [1].....                 | 8  |
| <b>Gambar 2.3</b>  | Prinsip Kerja Transformator [1]. ....                    | 8  |
| <b>Gambar 2.4</b>  | Inti Besi [1]. ....                                      | 9  |
| <b>Gambar 2.5</b>  | Belitan Transformator [1]. ....                          | 10 |
| <b>Gambar 2.6</b>  | Bushing Transformator[1]. ....                           | 10 |
| <b>Gambar 2.7</b>  | Konservator.....                                         | 11 |
| <b>Gambar 2.8</b>  | Silicagel [1]. ....                                      | 11 |
| <b>Gambar 2.9</b>  | Konstruksi konservator dengan Rubber Bag [1]. ....       | 12 |
| <b>Gambar 2.10</b> | Minyak Isolasi Trafo [1]. ....                           | 12 |
| <b>Gambar 2.11</b> | Kertas Isolasi Trafo [1]. ....                           | 13 |
| <b>Gambar 2.12</b> | On Load Tap Changer [1]. ....                            | 13 |
| <b>Gambar 2.13</b> | Media Pemadam pada Diverter Switch [1]. ....             | 14 |
| <b>Gambar 2.14</b> | NGR liquid [1]. ....                                     | 14 |
| <b>Gambar 2.15</b> | NGR solid [1]. ....                                      | 15 |
| <b>Gambar 2.16</b> | Rele Bucholtz [1]. ....                                  | 15 |
| <b>Gambar 2.17</b> | Rele Jansen [1]. ....                                    | 16 |
| <b>Gambar 2.18</b> | Rele Sudden pressure [1]. ....                           | 16 |
| <b>Gambar 2.19</b> | Rele Thermal [1]. ....                                   | 17 |
| <b>Gambar 2.20</b> | Alat Ukur Tahanan Isolasi [1]. ....                      | 17 |
| <b>Gambar 2.21</b> | Rangkaian Ekvivalen Isolasi [1]. ....                    | 19 |
| <b>Gambar 2.22</b> | Rangkaian Ekvivalen Isolasi Trafo [1]. ....              | 20 |
| <b>Gambar 2.23</b> | Skema Rangkaian Pengujian Tan Delta Auto Trafo [1]. .... | 21 |
| <b>Gambar 2.24</b> | Struktur Bushing C1 [1]. ....                            | 21 |
| <b>Gambar 2.25</b> | Alat Uji Breakdown Voltage. ....                         | 22 |
| <b>Gambar 2.26</b> | Alat Uji Rasio Tap. ....                                 | 23 |
| <b>Gambar 2.27</b> | Software Proteus [14]. ....                              | 24 |
| <b>Gambar 3.1</b>  | Transformator Daya 20 MVA GI 150 kV Situbondo.....       | 25 |
| <b>Gambar 3.2</b>  | Single Line Diagram Gardu Induk 150 KV Situbondo .....   | 26 |

|                   |                                                                 |    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 3.3</b> | Rangkaian pengujian indeks polarisasi.....                      | 29 |
| <b>Gambar 3.4</b> | Rangkaian pengujian tangen delta. ....                          | 30 |
| <b>Gambar 3.5</b> | Rangkaian Pengujian Rasio Tegangan [3].....                     | 31 |
| <b>Gambar 3.6</b> | Rangkaian modifikasi rele sudden pressure. ....                 | 33 |
| <b>Gambar 3.7</b> | Flowchart Penelitian. ....                                      | 34 |
| <b>Gambar 4.1</b> | Grafik Indeks Polaritas Trafo 20 MVA Gardu Induk Situbondo...43 |    |
| <b>Gambar 4.2</b> | Grafik Pengujian Tangen Delta Trafo 20 MVA. ....                | 44 |
| <b>Gambar 4.3</b> | Rangkaian Rele Sudden pressure Saat Trafo Diberi Tegangan....   | 47 |
| <b>Gambar 4.4</b> | Rangkaian Modifikasi Trafo ketika kontak NO dihubung singkat    | 48 |
| <b>Gambar 4.5</b> | Rangkaian Sudden pressure Sebelum Dimodifikasi.....             | 49 |
| <b>Gambar 4.6</b> | Rangkaian Modifikasi Saat Rele Sudden pressure ditriapkan.....  | 49 |



## DAFTAR TABEL

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabel 2.1</b> Rekomendasi pengujian indeks polarisasi [1]. .....       | 18 |
| <b>Tabel 2.2</b> Rekomendasi pengujian tangen delta [1]. .....            | 19 |
| <b>Tabel 2.3</b> Rekomendasi Hasil Pengujian Breakdown Voltage [1]. ..... | 22 |
| <b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi Transformator Daya 20 MVA .....              | 27 |
| <b>Tabel 4.1</b> Hasil pengujian indeks polarisasi.....                   | 36 |
| <b>Tabel 4.2</b> Hasil perhitungan indeks polarisasi.....                 | 37 |
| <b>Tabel 4.3</b> Hasil Pengujian Tangen Delta .....                       | 38 |
| <b>Tabel 4.4</b> Hasil Perhitungan Tan Delta .....                        | 38 |
| <b>Tabel 4.5</b> Hasil Pengujian Breakdown Voltage .....                  | 39 |
| <b>Tabel 4.6</b> Hasil Pengujian Rasio Tegangan.....                      | 40 |
| <b>Tabel 4.7</b> Hasil Perhitungan Rasio Berdasarkan Nameplate.....       | 41 |
| <b>Tabel 4.8</b> Hasil Uji Fungsi Rele Sudden pressure .....              | 42 |
| <b>Tabel 4.9</b> Tabel Error Rasio Tegangan.....                          | 46 |



## DAFTAR PERSAMAAN

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Persamaan (2. 1) Indeks Polarisasi.....         | 18 |
| Persamaan (2. 2) Tangen Delta .....             | 19 |
| Persamaan (2. 3) <i>Breakdown Voltage</i> ..... | 22 |
| Persamaan (2. 4) Batas Kesalahan .....          | 23 |



## ABSTRAK

Permasalahan yang terjadi pada trafo daya 20 MVA adalah masalah kelayakan isolasi yang diakibatkan penggunaan trafo secara terus menerus, pembebanan tinggi melebihi 50% dan gangguan yang diakibatkan kontak tembus. Selain itu, rata-rata trafo hanya padam 1-2 hari selama satu tahun guna pekerjaan atau pemeliharaan. Dampaknya adalah menyebabkan penurunan kehandalan transformator. Solusinya adalah bagaimana memastikan kelayakan transformator dengan melakukan evaluasi uji kelayakan trafo meliputi subsistem isolasi, rasio tegangan, dan rele internal.

Penelitian ini membahas tentang kelayakan transformator 20 MVA berdasarkan isolasi, rasio tegangan dan rele internal. Model ditetapkan sebagai sebuah transformator 20 MVA GI 150 KV yang diuji tingkat kelayakannya. Parameter yang ditentukan: pengukuran indeks polarisasi, tangen delta, breakdown voltage, rasio tegangan dan uji fungsi rele internal. Metode pengujian dilakukan dengan menggunakan indeks polarisasi, tangen delta, breakdown voltage, rasio tegangan dan uji fungsi rele internal berupa sudden pressure. Rujukan dari seluruh metode pengujian yaitu standar IEEE Std 62-1995 untuk indeks polarisasi, CIGRE TB 445 untuk tangen delta, IEC 60156-02-1995 untuk breakdown voltage, standart IEEE C57.125.1991 untuk rasio tegangan dan uji rele internal divalidasi menggunakan aplikasi Proteus. Sebagai obyek penelitian ditentukan trafo 20 MVA GI 150 kV Situbondo.

Hasil menunjukkan bahwa metode indeks polarisasi, tangen delta, breakdown voltage, rasio tegangan dan uji fungsi rele internal mampu digunakan untuk uji kelayakan isolasi transformator 20 MVA. Hal ini dibuktikan dengan nilai paling buruk yaitu 1,06 pada pengujian indeks polarisasi belitan sekunder terhadap tersier. Nilai tangen delta masih memenuhi standar dibawah 1%. Nilai breakdown voltage memenuhi standar diatas 50 kV. Kemudian 0,53% pada rasio tegangan tap 17 fasa T dan 0,58% pada rasio tegangan tap 18 fasa T. Rele internal bekerja sebagaimana mestinya. Hasil yang didapatkan, Transformator dalam kondisi yang tidak layak dan perlu ada investigasi lebih lanjut agar bisa dioperasikan.

**Kata Kunci :** kelayakan transformator, indeks polarisasi, tangen delta, breakdown voltage, rasio, rele internal.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Gardu induk (GI) 150 kV berfungsi menjadi perantara penyaluran listrik dari pusat-pusat tenaga listrik hingga menuju ke konsumen mulai dari industri, kantor-kantor pemerintah hingga rumah-rumah penduduk. Peralatan pada Gardu Induk biasa disebut dengan Material Transmisi Utama yang pada intinya berfungsi untuk menjaga kehandalan penyaluran energi listrik. Beberapa peralatan transmisi yang ada pada gardu induk adalah Pemutus Tenaga, Pemisah, Trafo Arus, Trafo Tegangan, Kapasitor, Reaktor, *Lightning Arrester*, dan Transformator 20 MVA.

Satu komponen penting dalam gardu induk yang harus dipastikan kelayakannya adalah transformator daya. Transformator daya berfungsi untuk menyalurkan daya dengan mentransformasikan tegangan menjadi ke tegangan lebih rendah atau sebaliknya sesuai peruntukan jenis penyaluran. Transformator daya pada gardu induk menjadi induk pada penyaluran listrik menuju konsumen. Sehingga kehandalan dari transformator daya harus dijaga supaya kesinambungan penyaluran listrik tidak terganggu.

Permasalahan yang terjadi pada trafo daya 20 MVA adalah masalah kelayakan isolasi, pengaturan tegangan dan proteksi internal. Hal ini disebabkan oleh penggunaan trafo secara terus menerus, pembebanan tinggi melebihi 50% dan gangguan yang diakibatkan kontak tembus [1]. Selain itu, rata-rata trafo hanya padam 1-2 hari selama satu tahun guna pekerjaan atau pemeliharaan. Ketidaklayakan isolasi trafo dapat menyebabkan hubung singkat atau gangguan yang berbahaya untuk keselamatan asset dan juga keselamatan jiwa manusia. Selain itu tidak layaknya rasio tegangan menyebabkan buruknya kualitas tegangan pada sisi sekunder (20 kV). Demikian juga ketidaklayakan rele *sudden pressure* menyebabkan *mall function* pada sistem proteksi trafo. Solusinya adalah bagaimana memastikan kelayakan transformator agar dapat beroperasi sesuai standar. Maka diperlukan evaluasi dari subsistem isolasi, rasio tegangan, dan rele internal.

Berdasarkan uraian tersebut maka penelitian ini mengambil judul “Evaluasi Uji Kelayakan Trafo Daya 20 MVA GI 150 kV Berdasarkan Isolasi, Rasio dan Proteksi Internal”. Sebagai obyek penelitian ditentukan trafo 20 MVA GI 150 kV Situbondo Jawa Timur.

## 1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, peneliti merumuskan masalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana cara melakukan pengujian indeks polarisasi, tangen delta, rasio tegangan dan rele internal pada transformator 20 MVA?
- b. Bagaimana cara menganalisa pengujian indeks polarisasi, tangen delta, rasio dan rele internal pada transformator daya ?
- c. Bagaimana cara menentukan tingkat kelayakan transformator daya berdasarkan IEEE Std 62 Tahun 1995 untuk standar pengujian indeks polarisasi, CIGRE TB 445 untuk standar pengujian tangen delta, IEC 60156-02 tahun 1995 untuk standar pengujian *breakdown voltage* , dan IEEE C57.125.1991 untuk standar pengujian rasio tegangan ?
- d. Bagaimana cara menentukan kelayakan proteksi internal rele *sudden pressure* menggunakan perbandingan antara uji fungsi dengan simulasi aplikasi proteus.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Agar pembahasan tidak keluar dari topik, maka peneliti melakukan pembatasan sebagai berikut :

- a. Peralatan yang dipakai adalah Transformator Daya 150/20 kV dengan kapasitas 20 MVA yang terletak di Gardu Induk Situbondo
- b. Peneliti mengambil parameter untuk menentukan tingkat kelayakan trafo yaitu kondisi isolasi, rasio tegangan dan rele internal.
- c. Kualitas isolasi ditentukan dengan menganalisa data hasil pengujian indeks polarisasi, tangen delta dan tegangan tembus dengan menggunakan standar IEEE Std 62 Tahun 1995 untuk pengujian indeks polarisasi, CIGRE TB 445

untuk pengujian tangen delta, IEC IEC 60156-02 tahun 1995 untuk pengujian *breakdown voltage*.

- d. Performa OLTC dalam regulasi tegangan ditentukan dengan menganalisa hasil pengujian rasio OLTC dibandingkan dengan standar IEEE C57.125.1991.
- e. Kelayakan rangkaian proteksi internal trafo ditentukan dengan menganalisa rele *sudden pressure* pada Transformator Daya menggunakan aplikasi Proteus.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Beberapa tujuan dalam penelitian ini, antara lain :

- a. Menganalisa kondisi isolasi Transformator Daya 150/20 kV yang direpresentasikan oleh hasil pengujian index polarisasi, dan tangen delta.
- b. Mengetahui performa regulator tegangan dengan menganalisa hasil uji rasio OLTC Transformator Daya 150/20 kV.
- c. Menganalisa kesiapan rele internal dalam mencegah gangguan yang diakibatkan oleh *non system fault* pada Transformator Daya 150/20 kV.
- d. Mengetahui tingkat kelayakan suatu Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk 150 kV Situbondo dibandingkan dengan standar yang berlaku yaitu IEEE Std 62 Tahun 1995 untuk standar pengujian indeks polarisasi, CIGRE TB 445 untuk standar pengujian tangen delta, IEC 60156-02 tahun 1995 untuk standar pengujian *breakdown voltage*, IEEE C57.125.1991 untuk standar pengujian rasio tegangan, dan modifikasi rele *sudden pressure* menggunakan simulasi aplikasi proteus.

#### 1.5 Manfaat

Penelitian ini menawarkan beberapa manfaat bagi pembaca. Manfaat yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Memperbarui wawasan tentang penyaluran tenaga listrik khususnya seluk beluk transformator dan bagian-bagian penyusunnya.
- b. Mengetahui beberapa metode pengujian yang dilakukan pada saat pemeliharaan transformator.

- c. Memberikan informasi analisa dan tingkat kelayakan Transformator Daya yang dijadikan objek penelitian.
- d. Diketuinya kelayakan Transformator Daya 2 20 MVA di Gardu Induk 150 kV Situbondo sehingga dapat dijadikan sebagai dasar untuk melakukan mitigasi agar penyaluran energi listrik semakin handal.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terdiri dari 5 bagian yang secara garis besar dirangkum dalam formula sebagai berikut :

### BAB I : PENDAHULUAN

Mencangkup beberapa aspek yaitu latar belakang, rumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan laporan tugas akhir

### BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Mengulas penelitian yang terdahulu sebagai referensi penulisan tugas akhir dan menyajikan prinsip dasar mengenai gardu induk, transformator, rele internal dan pengujian pada transformator yang memperkuat penulisan laporan tugas akhir

### BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Menetapkan obyek, metode penelitian , dasar teori, pengambilan data melalui pengujian dan flowchart yang digunakan untuk menggambarkan alur penelitian.

### BAB IV : HASIL DAN ANALISA

Melakukan analisis dari hasil yang didapatkan setelah melakukan pengujian dan membandingkan dengan standar IEEE Std 62-1995 untuk indeks polarisasi, CIGRE TB 445 untuk tangen delta, IEC 60156-02-1995 untuk breakdown voltage, standart IEEE C57.125.1991 untuk rasio tegangan dan uji rele internal divalidasi menggunakan aplikasi Proteus untuk menentukan tingkat kelayakan transformator.

### BAB V : PENUTUP

Memberikan kesimpulan terkait penelitian yang telah dilakukan dan memberikan saran kepada pihak lain apabila ingin melakukan penelitian yang serupa dengan objek yang berbeda.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Tugas akhir ini menggunakan referensi penelitian terdahulu yang memiliki tujuan serupa terkait kelayakan transformator sebagai bahan rujukan dan perbandingan. Beberapa penelitian yang dijadikan referensi sebagai berikut :

- a. Analisis Uji Kelayakan Tahanan Isolasi Trafo 30 MVA di GI 150/20 KV PT APF [1]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kelayakan trafo menggunakan metode pengujian tahanan isolasi. Hasil pengujian indeks polarisasi pada trafo 1 sebesar 1,924 sedangkan trafo 2 sebesar 1,102. Berdasarkan standar IEEE 43-2000 transformator dikatakan baik apabila nilai IP berkisar 1,25-2 , maka untuk nilai IP trafo 2 tidak sesuai dengan standar. Untuk pengujian Tangen Delta trafo 1 0,5% dan trafo 2 diatas 1,17%. Hasil tan delta trafo 2 tidak sesuai standar ANSI C 57.12.90 yaitu di bawah 0,5%.
- 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[3]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kelayakan trafo menggunakan metode pengujian indeks polarisasi, tangen delta, *breakdown voltage* dan Rasio Tegangan. Hasil uji metode indeks polarisasi diatas 1,5 %, kemudian dengan metode pengujian tan delta didapatkan hasil dibawah 0,5 % namun terdapat penurunan pada bushing fasa T dan belitan primer mode CHT. Pengujian *breakdown voltage* didapatkan hasil diatas 50 kV sedangkan untuk pengujian rasio tegangan didapatkan eror dibawah 0,5%.
- c. Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan *Breakdown Voltage* [4]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kelayakan trafo menggunakan metode indeks polarisasi , tangen delta dan *breakdown voltage*. Berdasarkan hasil pengujian indeks polarisasi didapatkan hasil terendah 1,26 hingga 1,97 sesuai dengan standar IEEE 43-2000 yaitu

1,25-2. Pengujian tan delta didapatkan hasil rata-rata di bawah 0,5%, hanya dibagian CHT terdapat pemburukan dimana hasil ujinya sebesar -0,07%. Hasil pengujian minyak trafo menghasilkan nilai rata-rata sebesar 69,9 dan minyak OLTC dengan rata-rata 53,3%.

- d. Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator di PT. PLN (Persero) Bogor [5]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kelayakan trafo menggunakan metode *breakdown voltage*. Hasil pengujian tegangan tembus minyak pada transformator 1 sebesar 41,1 kV/2,5 mm, untuk minyak transformator 2 didapatkan hasil 49,4 kV/2,5 mm dan minyak transformator 3 didapatkan hasil 41,1 kV/2,5 mm. Hasil yang didapatkan, kondisi isolasi transformator masih dalam kondisi baik jika mengacu standar (SPLN) 49-1/1982 yang besarnya >30 kV.
- e. Analisa Tahanan Isolasi Pada Transformator Daya 150/30 KV Gardu Induk Padang Luar PT PLN (Persero) Bukittinggi [6]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kelayakan trafo menggunakan indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage*. Hasil pengujian tahanan isolasi pada waktu 1 menit yaitu 8,91-29,7 G $\Omega$  sedangkan untuk pengukuran indeks polarisasi didapatkan hasil 1,77-2,55. Pengukuran tan delta didapatkan hasil 0,1706% hingga 0,8708%. Hasil pengujian tegangan tembus didapatkan nilai 59,3 kV/2,5mm untuk minyak bagian atas dan 57,6/2,5mm untuk minyak bagian bawah.

Penelitian-penelitian tersebut berhasil menentukan kelayakan isolasi dengan menggunakan metode indeks polarisasi, tangen delta dan *breakdown voltage* serta kelayakan pengaturan tegangan dengan menggunakan metode rasio tegangan. Fokus penelitian ini membahas tentang uji kelayakan trafo 20 MVA yang menggunakan penggabungan metode Indeks Polaritas, Tangen Delta, *breakdown voltage*, rasio tegangan dan proteksi rele internal (*sudden pressure*). Standar yang digunakan untuk validasi hasil uji kelayakan menggunakan Std IEEE No. 62 Tahun 1995 untuk pengujian indeks polarisasi, CIGRE TB 445 untuk pengujian tangen delta dan IEC 60156-02 tahun 1995 untuk pengujian *breakdown voltage*. Untuk pengujian rasio tegangan mengacu pada IEEE C57.125.1991, dan untuk proteksi internal berdasarkan perbandingan simulasi dan hasil uji.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan bagian dari subsistem penyaluran tenaga listrik. Jika dilihat dari diagram penyaluran, gardu induk merupakan simpul atau titik percabangan yang mempunyai peran untuk memutus dan menghubungkan jalur transmisi tenaga listrik. Peralatan pada gardu induk didesain untuk dapat memutus atau menghubungkan rangkaian listrik pada saat kondisi normal ataupun abnormal. Beberapa peralatan transmisi utama pada Gardu Induk yaitu Pemutus Tenaga, Pemisah Bus, Trafo Arus, Trafo Tegangan, Pemisah *Line*, Pemisah Tanah dan *Lightning Arrester*.

Fungsi Gardu Induk dalam sub sistem penyaluran transmisi adalah

- i. Menghubungkan atau memutuskan jalur transmisi dalam kondisi normal maupun abnormal ( gangguan )
  - ii. Mentransformasikan tegangan sistem ke tegangan lebih rendah ataupun tinggi sesuai kategori penyaluran.
  - iii. Pengukuran, pengawasan, operasi dan pengamanan sistem tenaga listrik.
- Gambar gardu induk penyaluran tenaga listrik ditunjukkan pada Gambar 2.1.

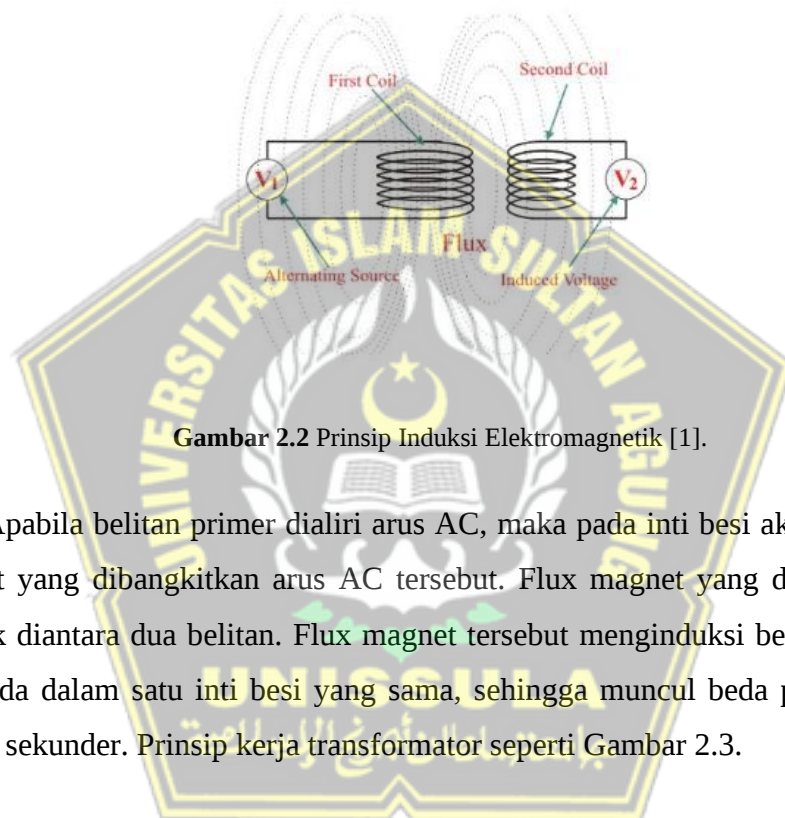


**Gambar 2.1** Gardu Induk.

### 2.2.2 Transformator Daya

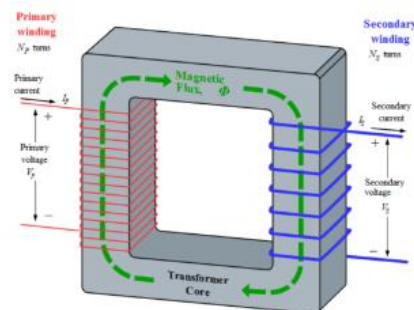
Trafo merupakan peralatan listrik yang terdiri dari rangkaian magnetik dan dua atau lebih belitan. Trafo berfungsi untuk mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama

(IEC 60076 -1 tahun 2011) [1]. Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet/ fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi [6]. Ilustrasi induksi elektromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Prinsip Induksi Elektromagnetik [1].

Apabila belitan primer dialiri arus AC, maka pada inti besi akan dialiri flux magnet yang dibangkitkan arus AC tersebut. Flux magnet yang dialiri inti besi terletak diantara dua belitan. Flux magnet tersebut menginduksi belitan sekunder yang ada dalam satu inti besi yang sama, sehingga muncul beda potensial pada belitan sekunder. Prinsip kerja transformator seperti Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Prinsip Kerja Transformator [1].

### 2.2.3 Bagian Transformator Daya

#### 1. *Electromagnetic Circuit* (Inti Besi)

Inti besi merupakan tempat mengalirnya flux magnetik yang dibangkitkan pada salah satu belitan. Flux magnetik mengalir pada inti besi kemudian menginduksikan arus bolak balik pada kumparan yang melingkar pada inti besi sehingga terdapat beda potensial pada belitan yang lain. Konstruksi inti besi dibuat lembaran-lembaran besi tipis berisolasi. Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi yang diakibatkan oleh *eddy current* yang merupakan arus sirkulasi inti besi. Bentuk fisik inti besi yang digunakan transformator sebagai tempat mengalirnya flux dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Inti Besi [1].

#### 2. *Current Carrying Circuit* ( *Winding* )

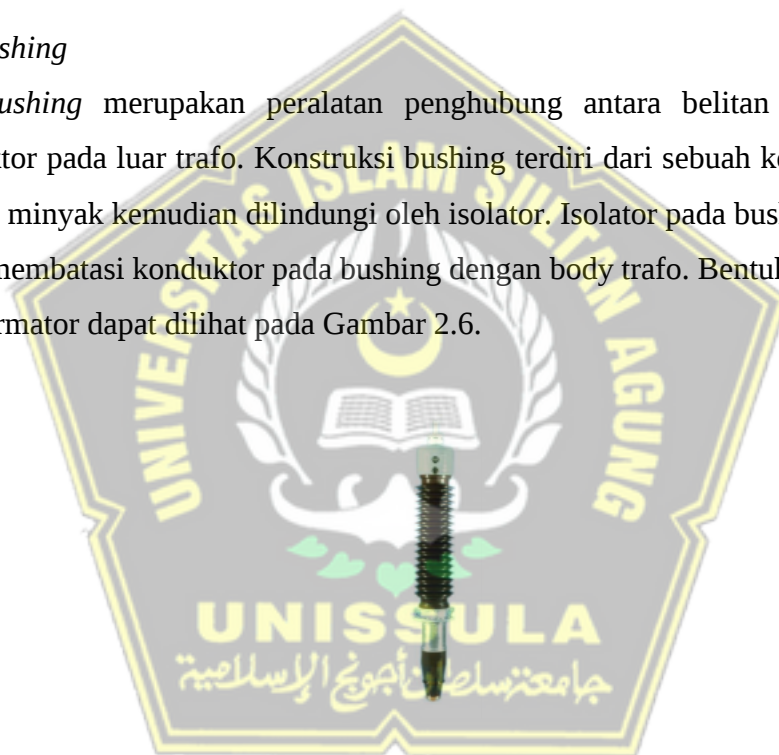
Belitan pada trafo terbuat dari batang tembaga yang berisolasi seperti kertas melingkari inti besi. Ketika arus bolak balik mengelilingi belitan maka akan membangkitkan fluks magnetik pada inti besi. Fluks tersebut diinduksikan ke belitan lain pada satu inti besi yang sama sehingga membangkitkan beda potensial pada belitan tersebut. Bentuk fisik belitan transformator yang umumnya digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Belitan Transformator [1].

### 3. *Bushing*

*Bushing* merupakan peralatan penghubung antara belitan trafo dengan konduktor pada luar trafo. Konstruksi *bushing* terdiri dari sebuah konduktor yang dilapisi minyak kemudian dilindungi oleh isolator. Isolator pada *bushing* berfungsi untuk membatasi konduktor pada *bushing* dengan body trafo. Bentuk fisik *bushing* transformator dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Bushing Transformator [1].

### 4. Pendingin

Saat beroperasi, transformator mengalami suhu tinggi yang dipengaruhi oleh tegangan, belitan trafo dan suhu lingkungan. Tentu hal tersebut dapat menyebabkan kerusakan kertas isolasi trafo. Diperlukan pendinginan yang efektif. Selain sebagai isolasi, minyak juga dapat berfungsi sebagai pendingin. Saat minyak bersirkulasi, panas dari belitan akan dibawa minyak ke jalur sirkulasinya kemudian didinginkan pada sirip-sirip radiator. Percepatan pendinginan dapat dilakukan dengan bantuan kipas yang ada pada kisi-kisi radiator.

### 5. *Oil Preservation & Expansion* (Konservator)

Ketika temperatur pada trafo naik saat operasi, maka level minyak isolasi pada trafo akan naik karena terjadi pemuaian volume minyak isolasi. Sebaliknya ketika temperatur trafo rendah saat beroperasi, maka volume minyak akan menyusut dan level minyak turun. Naik turunnya volume minyak ketika terjadi perubahan suhu pada trafo ditampung pada konservator seperti pada Gambar 2.7.



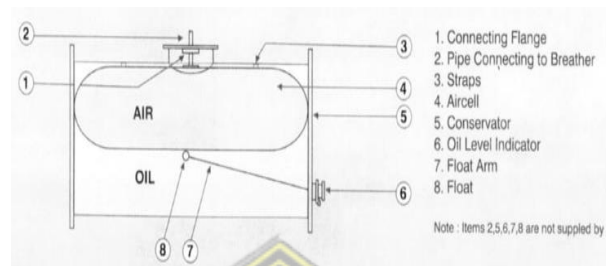
**Gambar 2.7** Konservator.

Gambar 2.7 menjelaskan bahwa dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara di dalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara di dalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe konservator tanpa *rubber bag*), maka sebelum masuk ke konservator udara akan difilter melalui *silicagel* sehingga dapat meminimalisir kandungan uap air. Gambar 2.8 merupakan letak *silicagel* pada transformator.



**Gambar 2.8** Silicagel [1].

Konservator saat ini dirancang menggunakan *breather bag* / *rubber bag* untuk mencegah transformator berhubungan dengan udara luar. Adapun *Breather bag* / *rubber bag* yaitu sejenis balon karet yang dipasang di dalam tangki konservator. Konstruksi konservator dengan *rubber bag* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Konstruksi konservator dengan *Rubber Bag* [1].

## 6. *Dielectric* (Minyak Isolasi Trafo & Isolasi Kertas)

### a. Minyak Isolasi Trafo

Isolasi minyak pada transformator berfungsi untuk media isolasi, pendingin trafo, dan melindungi belitan dari oksidasi yang menyebabkan perkaratan. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, napthanik serta aromatik [7]. Sampel minyak isolasi trafo terdapat pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Minyak Isolasi Trafo [1].

### b. Kertas Isolasi Trafo

Isolasi kertas di belitan trafo berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan mempunyai kemampuan mekanis [8]. Model kertas yang digunakan menjadi isolasi trafo terdapat pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Kertas Isolasi Trafo [1].

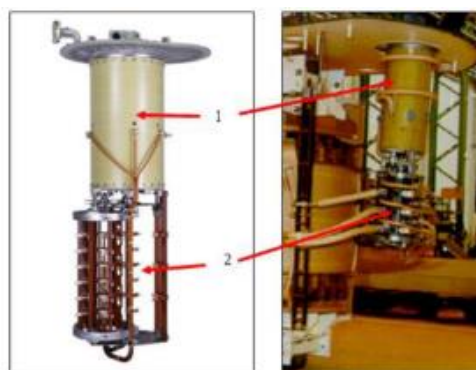
### 7. *On Load Tap Changer*

Kualitas tegangan di suatu jaringan listrik dapat dinilai dari parameter yang salah satunya yaitu kestabilan tegangan [9]. Trafo dituntut untuk memberikan nilai tegangan keluaran yang stabil sedangkan besarnya tegangan masukan tidak selalu sama. Tegangan keluaran dapat disesuaikan dengan kebutuhan walaupun tegangan masukannya berubah-ubah. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah jumlah belitan sehingga mengubah rasio belitan antara belitan primer dan sekunder. Adanya *On Load Tap changer* membantu menyesuaikan belitan saat trafo dalam keadaan bertegangan.

Komponen OLTC terdiri dari:

- a. *Selector Switch*.
- b. *Diverter Switch*.
- c. Tahanan Transisi.

Konstruksi OLTC dalam transformator dapat dilihat pada Gambar 2.12



**Gambar 2.12** *On Load Tap Changer* [1].

Keterangan:

1. Kompartemen *Diverter Switch*

2. *Selector Switch*

*Diverter switch* menggunakan media minyak dan vacuum dalam memadamkan *arcing* saat proses *switching*. Gambar 2.13 merupakan media pemadam *arcing* menggunakan minyak (kiri) dan media pemadam *arcing* menggunakan *vacuum bottle* (kanan).



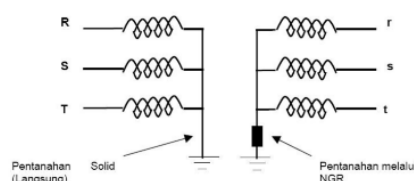
**Gambar 2.13** Media Pemadam pada *Diverter Switch* [1].

8. NGR (*Neutral Grounding Resistor*)

Salah satu metode pentanahan pada sistem tenaga listrik adalah dengan menggunakan *Neutral Grounding Resistor* (NGR). NGR dipasang pada sistem pentanahan trafo untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah. NGR dipasang secara seri dengan netral sekunder pada trafo sebelum terhubung ke tanah. Ada dua jenis NGR: liquid dan solid

a. Liquid

NGR dengan tipe liquid resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung di dalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan. Ilustrasi NGR jenis liquid pada transformator dapat dilihat pada Gambar 2.14.



**Gambar 2.14** NGR liquid [1].

b. Solid

Sedangkan NGR solid terbuat dari *Stainless Steel*, *FeCrAl*, *Cast Iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur sesuai nilai tahanannya. NGR jenis liquid pada transformator dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 NGR solid [1].

9. Proteksi Mekanik Trafo

a. Rele *Bucholz*

Ketika trafo mengalami gangguan internal, yang menyebabkan suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis di dalamnya, aliran minyak dengan tekanan yang tinggi muncul dan menghasilkan gelembung gas yang mudah terbakar. Rele bucholz mendeteksi tekanan minyak dan gelembung gas setelah mereka mengalir melalui pipa dan naik ke konservator. Bentuk rele bucholz pada trafo dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Rele Bucholtz [1].

b. Rele *Jansen*

Rele jansen mempunyai cara kerja yang sama dengan rele *bucholz* yaitu menggunakan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya

anomali pada internal trafo, bedanya rele ini terletak pada OLTC. Tekanan minyak dan gas dari kompartemen OLTC akan dibaca rele *jansen* sebagai anomali atau gangguan pada kompartemen OLTC. Bentuk rele *buchholz* pada trafo seperti Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Rele Jansen [1].

**c. Rele Sudden pressure**

Ketika terjadi tekanan tiba-tiba pada trafo, tekanan tersebut akan menuju titik terlemah yang mana pada titik tersebut terpasang rele *sudden pressure*. Perubahan tekanan secara mendadak di internal transformator dibaca sebagai gangguan oleh rele *sudden pressure*. Adanya titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melewati *sudden pressure* sehingga tidak merusak bagian lain pada trafo. Bentuk rele *sudden pressure* pada trafo dapat dilihat pada Gambar 2.18.

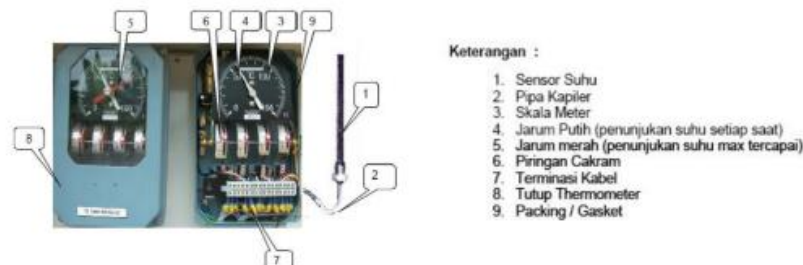


Gambar 2.18 Rele Sudden pressure [1].

**d. Rele Thermal**

Kualitas jaringan , rugi-rugi trafo, dan suhu lingkungan mempengaruhi suhu pada trafo yang sedang beroperasi. Hal ini dapat menyebabkan degradasi isolasi kertas di dalam trafo. Rele thermal dapat mengetahui suhu operasi trafo dan anomali suhu saat trafo keadaan operasi. Rele ini tersusun dari sensor suhu berupa

*thermocouple*, pipa kapiler dan meter penunjukan. Bentuk rele *thermal* beserta komponen penyusunnya dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Rele Thermal [1].

#### 2.2.4 Tahanan isolasi

Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan *ground* dan isolasi antara dua belitan. Prinsip pengujian tahanan isolasi adalah melakukan *inject* tegangan dc dan mengukur arus bocor yang melewati belitan isolasi tersebut. Kondisi isolasi dapat direpresentasikan dengan satuan *megohm*. Hal yang mempengaruhi hasil pengujian tahanan isolasi yaitu suhu, kelembapan dan kontaminan. Alat uji yang digunakan untuk melakukan pengujian tahanan isolasi yaitu Megaohm meter dengan pilihan tegangan masukan 500, 1000, 2500 atau 5000 Vdc, seperti pada Gambar 2.21.



Gambar 2.20 Alat Ukur Tahanan Isolasi [1].

#### 2.2.5 Pengujian Indeks Polarisasi

Pengujian indeks polarisasi trafo dilakukan untuk mengidentifikasi kelayakan kondisi isolasi trafo. Bisa dikatakan pengujian indeks polarisasi merupakan

pengujian tahanan isolasi berkelanjutan selama 10 menit. Pengujian ini berguna untuk mengidentifikasi akumulasi kontaminan dan perubahan fisik pada isolasi. Formula akhir dari indeks polarisasi yaitu pembacaan nilai tahanan isolasi pada menit ke 10 dibandingkan menit ke 1. Formula ini biasa disebut *Polarization Index* ( PI ). Nilai Indeks Polarisasi (IP) ditunjukkan seperti persamaan (2.1).

$$PI = \frac{\text{Pengukuran Ris 10 menit}}{\text{Pengukuran Ris 1 menit}} \dots\dots\dots (2.1)$$

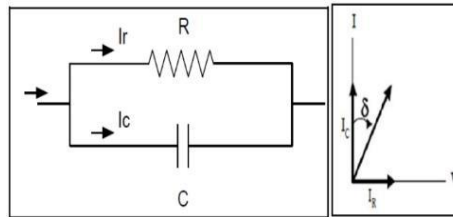
Rekomendasi hasil pengujian indeks polarisasi berdasarkan standar IEEE Std 62 Tahun 1995 [10] ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Rekomendasi pengujian indeks polarisasi [1].

| 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<br>Uji tan delta |
| 4   | 1,25 - 2,0 | Baik          | -                                     |
| 5   | >2,0       | Sangat Baik   | -                                     |

### 2.2.6 Pengujian Tangen Delta

Secara teoritis, isolasi dianggap baik jika bersifat kapasitif sempurna, seperti halnya isolator yang terletak di antara dua elektroda kapasitor. Dalam kapasitor sempurna, tegangan dan arus fasa berubah 90 derajat. Arus yang melewati isolasi disebut arus kapasitif. Jika isolasi terkontaminasi, nilai tahanan isolasi berkurang, sehingga arus resistif yang melewati isolasi meningkat. Akibatnya, isolasi tidak lagi berfungsi sebagai kapasitor ideal. Tingkat pergeseran tegangan dan arus menjadi kurang dari 90 derajat daripada berputar 90 derajat. Gambar 2.22 menunjukkan rangkaian ekivalen isolasi serta diagram phasor arus kapasitansi dan resistif isolasi. Mengukur nilai IR/IC memungkinkan untuk memperkirakan kualitas isolasi.



**Gambar 2.21** Rangkaian Ekvivalen Isolasi [1].

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 Persamaan (2.2).

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 \omega C} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan:  $\delta$  = Delta

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

C = Kapasitansi (F)

$\omega = 2\pi f$

Hasil pengujian tan delta yang didapatkan melalui persamaan (2.2) dapat kita bandingkan dengan rekomendasi pengujian tan delta berdasarkan standar CIGRE TB 445 [11], yang terdapat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Rekomendasi pengujian tangen delta [1].

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

### 1. Pengujian Tangen Delta Pada Isolasi Trafo

Secara umum, isolasi trafo sistem mencakup isolasi antara dua belitan dan belitan dengan tanah. Tiga metode pengujian trafo tersedia di lingkungan PT PLN: metode trafo dua belitan, metode trafo tiga belitan, dan metode autotrafo.

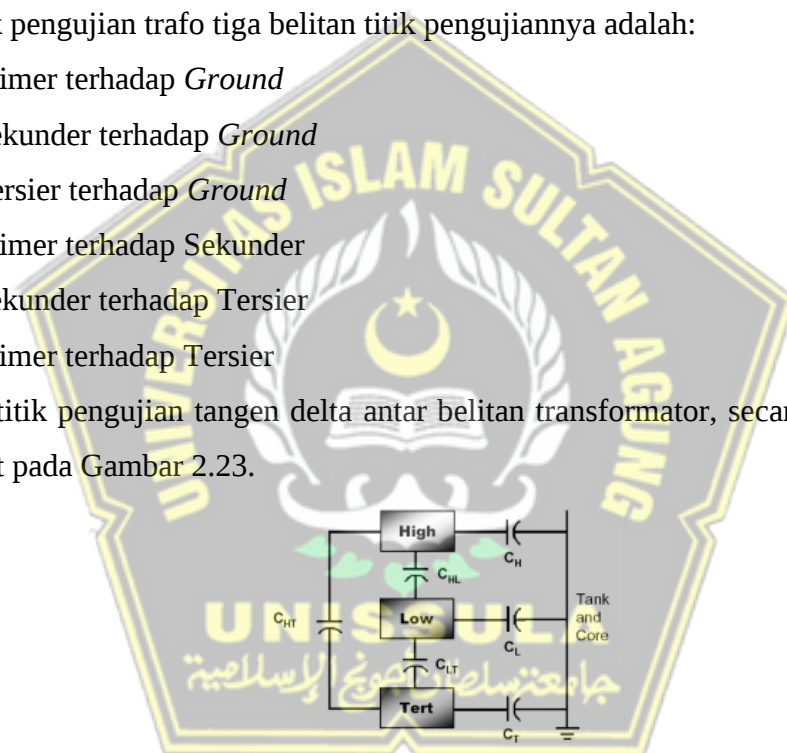
Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

- Primer terhadap *Ground* (CH)
- Sekunder terhadap *Ground* (CL)
- Primer terhadap Sekunder (CHL)

Untuk pengujian trafo tiga belitan titik pengujiannya adalah:

- Primer terhadap *Ground*
- Sekunder terhadap *Ground*
- Tersier terhadap *Ground*
- Primer terhadap Sekunder
- Sekunder terhadap Tersier
- Primer terhadap Tersier

Titik-titik pengujian tangen delta antar belitan transformator, secara grafis dapat dilihat pada Gambar 2.23.



**Gambar 2.22** Rangkaian Ekuivalen Isolasi Trafo [1].

Sementara itu pada autotrafo, pengujian tangen delta dilakukan seperti metode trafo dua belitan, tetapi dengan beberapa pertimbangan tambahan. Pertama, sisi HV dan LV trafo dirangkai menjadi satu belitan yang tidak dapat dipisahkan, sehingga bushing HV, LV, dan Netral dijadikan satu titik pengujian (Primer), dan sisi belitan TV dijadikan satu titik pengujian (Sekunder). Gambar 2.24 menunjukkan rangkaian pengujian tangen delta autotrafo.

## 2. Pengujian Tangen Delta pada *Bushing*

Center Conductor  
Tapped Capacitance-Graded Core Layer  
Liquid Compound Filler  
Main Insulating Core  
Insulating Weathershed  
Capacitance Graded Core Layers  
Tap-Cover  
Tap Insulation  
Tap Electrode  
Connection to Tapped Core Layer  
Mounting Flange  
Ground Sleeve

### 2.2.7 Breakdown Voltage

Pengujian *Breakdown Voltage* bertujuan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan stress tegangan. Pengujian ini dapat mengetahui tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh minyak trafo. Apabila nilai tegangan tembus minyak rendah maka terdapat indikasi tingginya kontaminan pada minyak isolasi. Tegangan tembus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.3).

$$E_{rata-rata} = \frac{V_{b rata-rata}}{d} \dots\dots\dots (2.3)$$

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

$V_b$  = Hasil pengujian (kV)

$d$  = Jarak gap antar elektroda (mm)

Hasil nilai *breakdown voltage* melalui perhitungan diatas dapat kita bandingkan dengan rekomendasi *breakdown voltage* berdasarkan standar IEC 60156-02 tahun 1995 [12] yang tertera pada Tabel 2.3

**Tabel 2.3** Rekomendasi Hasil Pengujian *Breakdown Voltage* [1].

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

Alat uji *breakdown voltage* dapat dilihat pada Gambar 2.26.



**Gambar 2.25** Alat Uji *Breakdown Voltage*.

### 2.2.8 Pengujian Rasio Tegangan

Tujuan pengujian rasio tegangan adalah untuk memastikan apakah ada masalah dengan antar belitan dan bagian sistem isolasi pada trafo. Selain mengidentifikasi indikasi hubung singkat antar lilitan dan anomali pada tap

changer, pengujian ini juga dapat menemukan masalah putusnya lilitan pada belitan. Pengujian rasio tegangan menggunakan tegangan masukan variabel pada sisi belitan primer dan kemudian mengukur keluaran belitan sekunder. Nilai rasio diperoleh dengan membagi tegangan keluaran belitan primer dengan tegangan keluaran belitan sekunder. Alat Pengujian *Transformer Turn Ratio test* dapat digunakan untuk melakukan pengujian. Alat uji ratio test dapat dilihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26 Alat Uji Rasio Tap.

Kelayakan pengujian rasio pada trafo dapat diketahui dengan membandingkan hasil pengujian dengan rasio pada *name plate* trafo dengan batasan kesalahan sebesar 0.5 % (standart IEEE C57.125.1991) [13]. Jika hasil pengujian ratio test lebih dari 0.5 % maka disarankan untuk melakukan pengujian - pengujian lainnya [1]. Batasan kesalahan ditentukan berdasarkan Persamaan (2.4) [14].

$$\text{Batasan Kesalahan} = \left| \frac{\text{Rasio Pengukuran} - \text{Rasio Perhitungan}}{\text{Rasio Pengukuran}} \right| \cdot 100 \dots\dots (2.4)$$

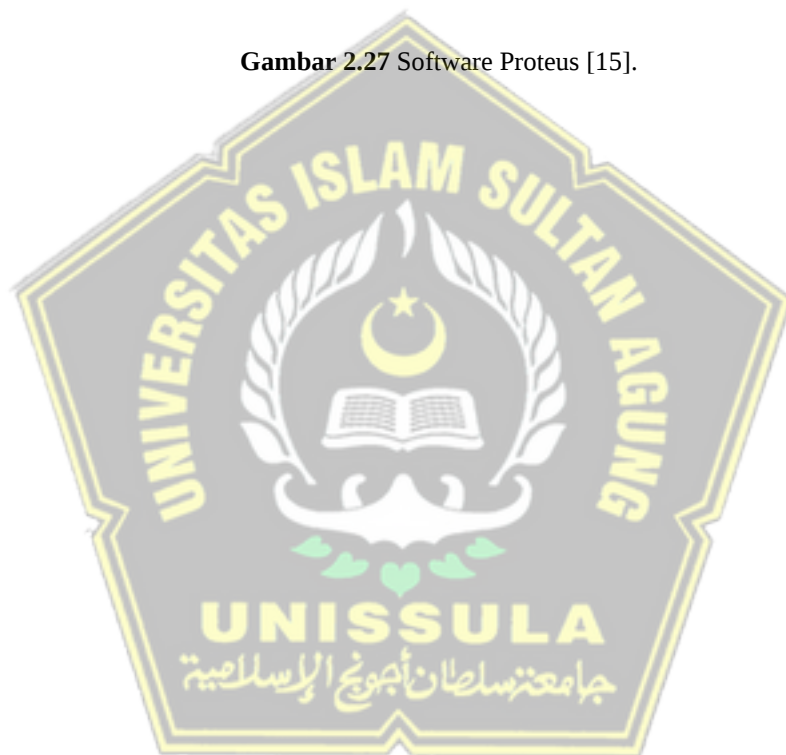
### 2.2.9 Software Proteus 8

Proteus 8 Professional merupakan salah satu perangkat lunak yang digunakan para teknisi untuk mensimulasikan kerja rangkaian listrik. Aplikasi ini memiliki dua fitur yaitu sebagai alat untuk menggambar rangkaian skematik dan digunakan untuk menggambar *Printed Circuit Board* (PCB). Aplikasi Proteus 8 Profesional memiliki banyak library dengan beberapa komponen elektronika seperti komponen pasif, Analog, Transistor, SCR, FET, jenis button/tombol, jenis saklar/relay, IC digital, IC penguat, IC *programmable* (mikrokontroler) dan IC *memory*. Layaknya sistem kelitrikan pada dunia nyata, aplikasi ini dilengkapi alat ukur seperti

Voltmeter, Amperemeter, Oscilloscope, signal Analyzers, serta pembangkit frekuensi [15]. Logo aplikasi Proteus seperti pada Gambar 2.27



**Gambar 2.27** Software Proteus [15].

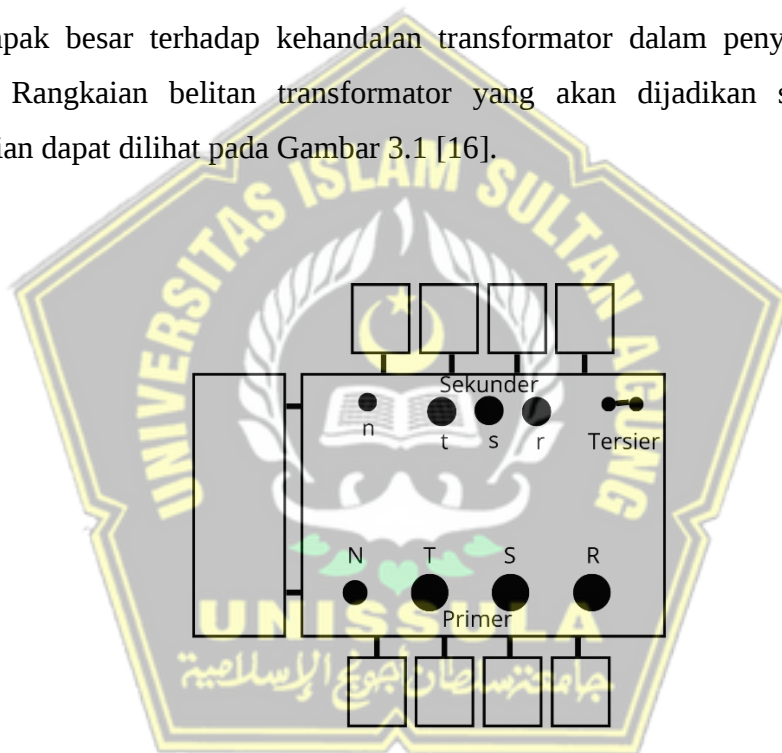


## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Model Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan menentukan objek yang akan ditentukan kelayakannya. Untuk mengetahui kelayakan dari transformator daya, ditentukan pengujian yang merepresentasikan masing-masing sub sistem yang kedudukannya penting dari transformator. Apabila ada anomali dari sub sistem tersebut maka akan berdampak besar terhadap kehandalan transformator dalam penyaluran tenaga listrik. Rangkaian belitan transformator yang akan dijadikan sebagai objek penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 [16].

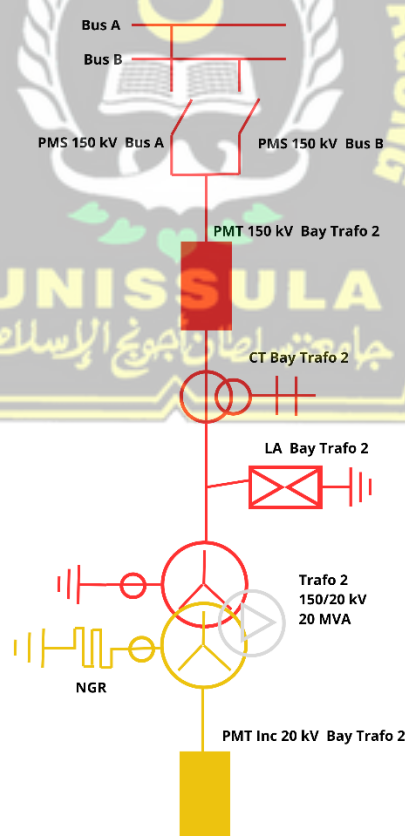


**Gambar 3.1** Transformator Daya 20 MVA GI 150 kV Situbondo.

Kondisi isolasi dari transformator ditentukan dengan melakukan pengujian indeks polarisasi dan tangen delta pada belitan primer, sekunder, dan tersier, serta pengujian *breakdown voltage* untuk mengetahui kondisi minyak transformator. Karena fungsi transformator daya yang utama adalah mengubah tegangan keluaran menjadi lebih besar atau kecil, maka diperlukan keakuratan tap changer dalam menstabilkan tegangan keluaran ditengah ketidakpastian antara suplai dan beban.

Menentukan keakuratan *On Load Tap Changer* diperlukan pengujian rasio tegangan pada setiap tapnya.

Kondisi rangkaian rele internal pada transformator daya setelan dari pabrik sangat mungkin mengakibatkan malfungsi rangkaian *trip* dari transformator. PT. PLN ( Persero ) Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali yang merupakan induk dari Gardu Induk 150 KV Situbondo tempat dimana penelitian dilaksanakan, menerapkan modifikasi rangkaian rele internal *sudden pressure* untuk mengatasi gangguan yang diakibatkan bukan dari sistem. Oleh karena itu untuk mengetahui keakuratan rangkaian tersebut, diperlukan validasi antara hasil pengujian langsung dalam hal ini *test trip*, dengan simulasi pada aplikasi proteus. Apabila hasil dari Analisa sesuai dibandingkan dengan standar yang digunakan PT. PLN ( Persero ), maka transformator daya dalam kondisi layak dalam menyalurkan energi listrik. Letak transformator dalam sistem transmisi Gardu Induk 150 KV Situbondo tertera pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Single Line Diagram Gardu Induk 150 KV Situbondo

### 3.2 Obyek Penelitian

Obyek yang dijadikan pada penelitian ini yaitu Transformator Daya 150/20 kV dengan kapasitas 20 MVA Gardu Induk Situbondo Jl. Bukit Putih no 5, Kelurahan Ardirejo, Panji, Kabupaten Situbondo, Provinsi Jawa Timur. Spesifikasi transformator yang akan dijadikan sebagai objek penelitian tertera pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Spesifikasi Transformator Daya 20 MVA

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| Merk            | Xian          |
| Tipe            | SFZ-20000/150 |
| Nomor Seri      | A95022-1      |
| Kapasitas       | 20 MVA        |
| Tegangan        | 150 / 20 kV   |
| Tahun Pembuatan | 1995          |

### 3.3 Data Penelitian

Dibutuhkan beberapa data sebagai masukan untuk analisa. Analisa dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian dengan perhitungan. Kemudian data tersebut dibandingkan dengan standar yang digunakan PT. PLN ( Persero ). Data yang akan dijadikan bahan penelitian yaitu :

1. Spesifikasi Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Situbondo.
2. Hasil Uji Indeks Polarisasi Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Situbondo.
3. Hasil Uji Tangen Delta Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Situbondo.
4. Hasil Uji *Breakdown Voltage* Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Situbondo.
5. Hasil Uji Rasio Tegangan Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Situbondo.
6. Hasil Uji fungsi rangkaian modifikasi rele *sudden pressure* Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Situbondo.

### 3.4 Metode Pengujian

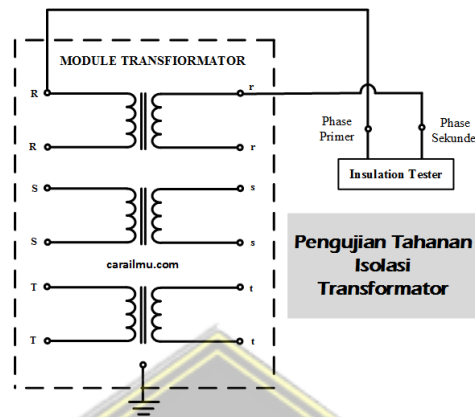
Data pada sub bab 3.3 yang akan dijadikan sebagai bahan analisa untuk menentukan kelayakan transformator didapatkan dengan melakukan beberapa pengujian yaitu pengujian indeks polarisasi, pengujian tangen delta, pengujian breakdown voltage, pengujian rasio tegangan dan uji fungsi transformator.

#### 3.5.1 Pengujian Indeks Polarisasi

Pengukuran indeks polarisasi menggunakan alat *insulation tester* merk KYORITSU. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan injek dc kemudian didapatkan nilai tahanan dalam satuan mega ohm. Rangkaian pengujian indeks polarisasi dapat dilihat pada Gambar 3.3. Berikut Langkah pengujian indeks polarisasi :

1. Menggunakan APD secara lengkap meliputi *safety helm*, *full body harness*, sarung tangan dan sepatu *safety*.
2. Mempersiapkan alat uji *insulation tester* dan memastikan dalam kondisi yang baik.
3. Melepas konduktor *bushing* primer dan sekunder.
4. Menghubung singkat fasa R,S,T, N untuk *bushing* primer dan sekunder sedangkan untuk koneksi *bushing* tersier normalnya sudah terhubung singkat.
5. Merangkai alat uji *insulation tester* merk Kyoritsu
6. Menghubungkan kabel warna hitam ke *bushing* sekunder sedangkan kabel warna merah dihubungkan ke *bushing* primer setelah injek tegangan untuk menghindari tegangan induksi dari *bushing*.
7. Memutar *selector switch* ke arah 5000 V, menekan tombol *time set* untuk merekam hasil secara otomatis di menit ke 1 dan 10 , kemudian menekan dan memutar tombol *lock* ke kanan.
8. Mengamati dan mencatat hasil pengukuran.
9. Melanjutkan pengujian dengan titik Primer-Tersier, Sekunder-Tersier, Primer-Ground, Sekunder-Ground, dan Tersier-Ground

10. Menekan dan memutar tombol merah kekiri, memutar *selector switch* ke posisi off dan melepas rangkaian pengujian indeks polarisasi



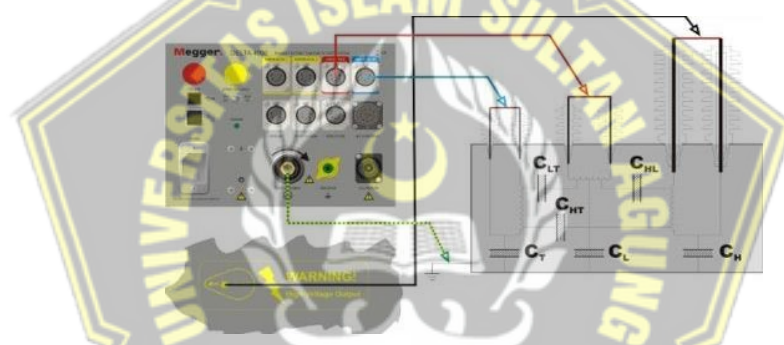
Gambar 3.3 Rangkaian pengujian indeks polarisasi

### 3.5.2 Pengujian Tangen Delta

Pengujian Tangen Delta menggunakan alat uji Megger Delta 4000. Rangkaian pengujian tangen delta dapat dilihat pada Gambar 3.5. Berikut Langkah pengujian tangen delta.

1. Menggunakan APD secara lengkap meliputi *safety helm*, *full body harness*, sarung tangan dan sepatu *safety*.
2. Mempersiapkan alat uji Megger Delta 4000 dan memastikan dalam kondisi yang baik.
3. Melepas konduktor pada bushing primer dan sekunder.
4. Menghubung singkat fasa R,S,T dan N masing-masing pada *bushing* primer dan *bushing* sekunder.
5. Merangkai alat Megger Delta 4000.
6. Memasang *grounding*, kabel power, *safety pin*, koneksi ke laptop, kabel HV, dan kabel *reference* ke alat uji.
7. Menghubungkan laptop ke alat uji kemudian membuka aplikasi PowerDB untuk menjalankan test, memilih injek tegangan 10000 VAC untuk pengujian.
8. Menghubungkan kabel HV ke belitan primer, kabel *reference* merah ke belitan sekunder dan kabel *reference* biru ke belitan tersier.

9. Menekan *safety pin* dan tombol *start* untuk melakukan pengujian, apabila sudah muncul hasil kemudian melepas tombol *safety pin*.
10. Memindahkan kabel HV ke belitan sekunder , kabel *reference* merah ke belitan primer dan kabel *reference* biru ke belitan tersier.
11. Menekan *safety pin* dan tombol *start* untuk melakukan pengujian, apabila sudah muncul hasil kemudian melepas tombol *safety pin*.
12. Memindahkan kabel HV ke tersier, kabel *reference* merah ke belitan primer dan kabel *reference* biru ke belitan sekunder.
13. Menyimpan hasil pengujian untuk keperluan analisa.
14. Mematikan alat uji setelah seluruh rangkaian pengujian selesai.
15. Melepaskan jumperan pada belitan primer, sekunder dan tersier.



Gambar 3.4 Rangkaian pengujian tangen delta.

### 3.5.3 Pengujian *Breakdown Voltage*

Pengujian *breakdown voltage* menggunakan alat uji baur DTA 100C. Sampel minyak yang diambil dari *maintank* dan kompartemen OLTC. Tampilan alat uji *breakdown voltage* dapat dilihat pada Gambar 3.5.

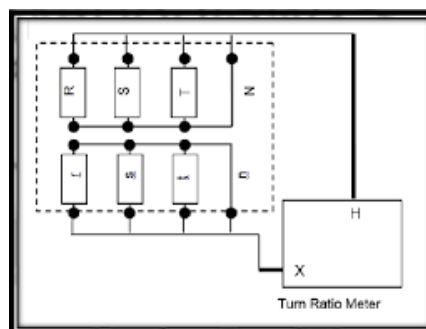
Berikut langkah pengujian *breakdown voltage*.

1. Menggunakan APD secara lengkap meliputi *safety* helm, sarung tangan dan sepatu *safety*.
2. Merangkai alat uji *breakdown voltage* merek baur DTA 100C.
3. Hubungkan kabel *ground* dan kabel *power*.
4. Mengukur jarak elektroda 2,5 mm.

5. Menyiapkan selang dan stopper yang cocok dengan ukuran *valve sampling oil*.
6. Mencari *valve oil sampling bottom maintank* trafo.
7. Membawa wadah alat uji mendekati selang dan membilas tiga kali menggunakan minyak yang mengalir untuk menghilangkan kontaminan.
8. Mengisi wadah uji dengan minyak hingga penuh.
9. Menutup wadah uji dan memasukan ke dalam alat uji brur DTA 100C.
10. Isi nama trafo dan standar pengujian kemudian menekan start untuk memulai pengujian.
11. Melakukan tahapan pengujian sebanyak 6 kali.
12. Mencatat hasil pengujian untuk keperluan analisa.
13. Mengambil sampel minyak OLTC dengan mencari *draining valve* OLTC.
14. Melakukan Langkah yang sama pada poin 7-12.
15. Bila sudah selesai melakukan pengujian, sampel minyak pada wadah uji dibuang.
16. Mematikan alat uji, melepas kabel *power* dan kabel *ground*.

#### 3.5.4 Pengujian Rasio Tegangan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai rasio belitan pada masing-masing tap OLTC. Alat uji yang dipakai yaitu Vanguard TTRA-03. Prinsip pengujian rasio tegangan ini adalah memberikan tegangan input pada *bushing* primer dan mengukur tegangan keluaran pada *bushing* sekunder. Rangkaian pengujian rasio tegangan dapat dilihat pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.5** Rangkaian Pengujian Rasio Tegangan [3].

Berikut langkah-langkah pengujian rasio tegangan.

1. Menyiapkan Menggunakan APD secara lengkap meliputi *safety* helm, sarung tangan dan sepatu *safety*.
2. Merangkai alat uji *breakdown voltage* merek brur DTA 100C.
3. Hubungkan kabel *ground* dan kabel *power*.
4. Memasang kabel *input* tegangan pada fasa R dan N pada bushing primer serta kabel sense tegangan pada *bushing* sekunder fasa R dan N.
5. Membuka aplikasi vanguard , buat lembar kerja baru, memasukan nilai tegangan primer dan sekunder setiap tap.
6. Memposisikan tap trafo di posisi 1.
7. Memulai pengujian rasio dari tap 1 hingga 18.
8. Apabila sudah selesai, kabel input dan sense tegangan dipindah ke fasa S, selanjutnya T.
9. Menyimpan hasil pengujian guna keperluan analisa.

### 3.5.5 Uji Fungsi Rangkaian Modifikasi Rele *Sudden pressure*

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan rangkaian modifikasi berfungsi dengan baik dengan beberapa *event* pada rele *sudden pressure* trafo. Rangkaian modifikasi rele internal dapat dilihat pada Gambar 3.7. Berikut langkah uji fungsi rangkaian modifikasi rele *sudden pressure*.

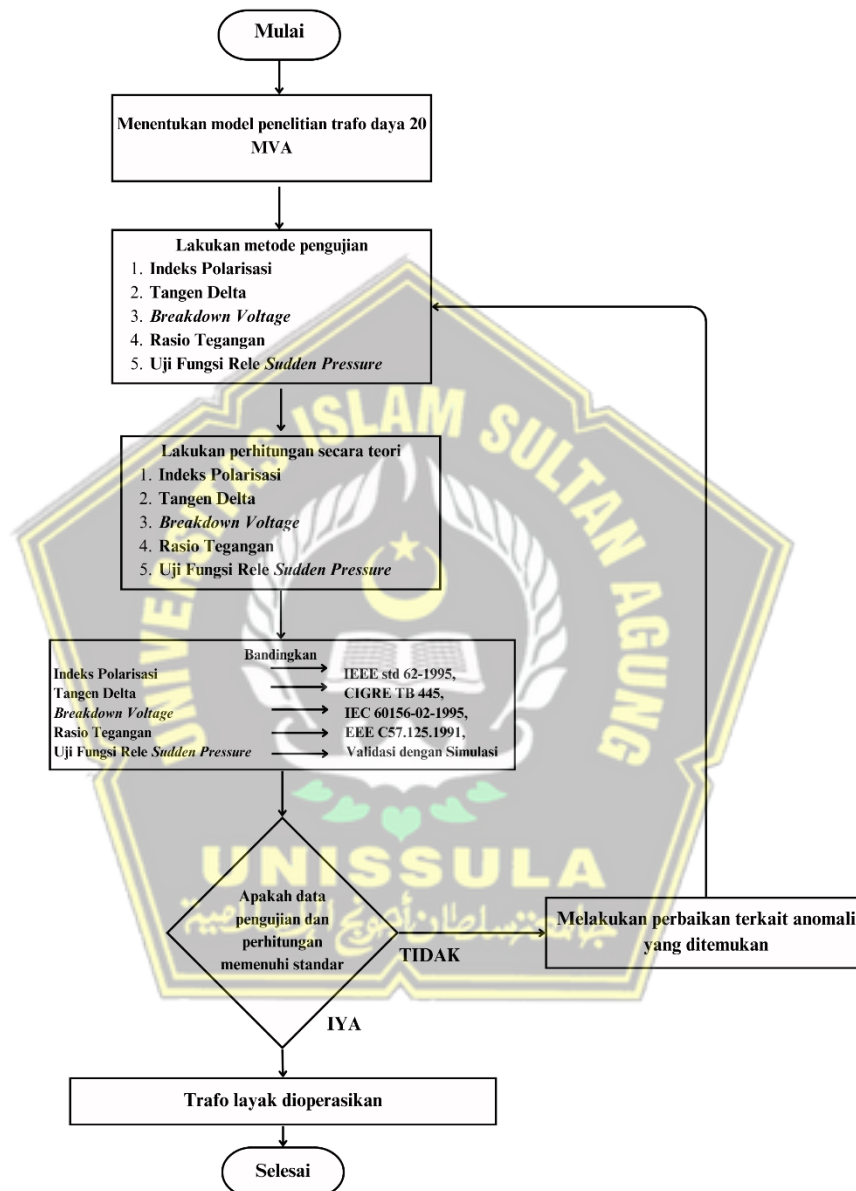
1. Menggunakan APD secara lengkap meliputi *safety* helm, sarung tangan dan sepatu *safety*.
2. Membuka tutup rele *sudden pressure*.
3. Mencari kontak *Positif Command*, *Normally Open* dan *Normally close* di dalam rele *sudden pressure*.
4. Menghubung singkat kontak *Positif Command* dengan kontak *Normally Open*.
5. Mengamati dan mencatat *anunciator* yang muncul.
6. Melepas koneksi antara kontak *Positif Command* dan kontak *Normally Open*.

**Gambar 3.6** Rangkaian modifikasi rele *sudden pressure*.

Gambar 3.6 merupakan rangkaian modifikasi rele *sudden pressure*. Sebelum dimodifikasi, rangkaian *sudden pressure* hanya terdiri dari kontaktor 63Q-X yang berfungsi untuk mengirim sinyal trip dan indikasi apabila terdapat *supply* yang diakibatkan oleh bekerjanya rele *sudden pressure*. Setelah adanya modifikasi, ditambahkan *auxiliary* kontaktor 1 dan 2 yang berfungsi untuk memotong jalur trip ketika kontak *sudden pressure* terhubung singkat karena kontaminan atau embun air sehingga mencegah gangguan yang diakibatkan dari luar sistem. Adanya *health lamp* berfungsi untuk mengetahui kesiapan rangkaian modifikasi rele *sudden pressure*.

### 3.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian yang merupakan langkah dalam menentukan kelayakan trafo dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Flowchart Penelitian.

Penelitian diawali dengan menentukan model penelitian sesuai Gambar 3.1, dilakukan beberapa metode pengujian yang menghasilkan data indeks polarisasi pada Tabel 4.1, tangen delta pada Tabel 4.3, *breakdown voltage* pada Tabel 4.5,

rasio tegangan pada Tabel 4.6 dan uji fungsi rele internal pada Tabel 4.8. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian dengan perhitungan merujuk pada persamaan 2.1 hingga 2.4 dibandingkan dengan standar IEEE Std 62-1995 untuk indeks polarisasi, CIGRE TB 445 untuk tangen delta, IEC 60156-02-1995 untuk breakdown voltage, IEEE C57.125.1991 untuk rasio tegangan serta uji fungsi rele internal *sudden pressure* divalidasi menggunakan aplikasi Proteus.



## BAB IV

### HASIL DAN ANALISA

Merujuk pada model penelitian sesuai Gambar 3.1 dan data hasil uji indeks polarisasi pada Tabel 4.1 data hasil uji tan delta pada Tabel 4.3, data hasil uji breakdown voltage pada Tabel 4.5, data hasil uji rasio tegangan pada Tabel 4.6, serta data hasil uji fungsi rangkaian modifikasi rele internal pada Tabel 4.8, selanjutnya digunakan untuk penentuan kelayakan Transformator Daya 20 MVA.

#### 4.1 Hasil Pengujian Indeks Polarisasi

Pengujian indeks polarisasi merupakan pengujian tahanan isolasi dari belitan transformator pada menit ke 1 dan menit ke 10. Pengujian ini bertujuan mengetahui kelayakan isolasi trafo untuk dioperasikan bahkan *over voltage test* sekalipun [1]. Item yang dilakukan pengujian pada transformator daya meliputi primer-sekunder, sekunder-tersier, primer-tersier, primer-ground, sekunder-ground, dan tersier ground. Hasil pengujian indeks polarisasi pada Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk 150 kV Situbondo dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Hasil pengujian indeks polarisasi

| Pengujian        | Indeks Polarisasi |
|------------------|-------------------|
| Primer-Ground    | 1,19              |
| Sekunder-Ground  | 1,31              |
| Tersier-Ground   | 1,73              |
| Primer-Sekunder  | 1,34              |
| Sekunder-Tersier | 1,06              |
| Primer Tersier   | 1,19              |

Hasil pengujian indeks polarisasi dibandingkan dengan hasil perhitungan merujuk pada persamaan (2.1) yaitu nilai tahanan isolasi menit ke 10 dibagi dengan nilai tahanan isolasi menit 1 [1]. Data nilai tahanan isolasi menit 1, tahanan isolasi menit 10, dan indeks polarisasi hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Hasil perhitungan indeks polarisasi

| Pengujian        | R menit ke 1 ( $G\Omega$ ) | R menit ke 10 ( $G\Omega$ ) | Indeks Polarisasi |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Primer-Ground    | 1,05                       | 1,25                        | 1,19              |
| Sekunder-Ground  | 1,13                       | 1,49                        | 1,31              |
| Tersier-Ground   | 0,984                      | 1,71                        | 1,73              |
| Primer-Sekunder  | 0,921                      | 1,24                        | 1,34              |
| Sekunder-Tersier | 0,588                      | 0,625                       | 1,06              |
| Primer Tersier   | 1,26                       | 1,5                         | 1,19              |

Berikut contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai indeks polarisasi pada belitan primer terhadap ground berdasarkan data masukan pada Tabel 4.2.

$$IP = \frac{1,25 \text{ } G\Omega}{1,05 \text{ } G\Omega} = 1,19$$

Hasil indeks Polarisasi hasil pengujian dan perhitungan menunjukkan hasil yang sama, selanjutnya dijadikan bahan untuk menentukan kelayakan trafo daya 20 MVA.

#### 4.2 Hasil Pengujian Tangen Delta

Pada dasarnya isolasi yang baik bersifat kapasitif [17]. Namun karena adanya beberapa faktor seperti usia dan kontaminan memungkinkan isolasi mengalami penurunan ditandai dengan adanya arus resistif. Pengujian tangen delta bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi dengan membandingkan antara arus resistif dengan arus kapasitif.

Pengujian ini dilakukan pada belitan primer, belitan sekunder dan belitan tersier. Beberapa mode yang digunakan untuk melakukan pengujian ini yaitu UST ( *Ungrounded Specimen Test* ) dan GSTg ( *Grounded Specimen Test with Guard* ). Metode UST ( *Ungrounded Specimen Test* ) digunakan untuk menguji tangen delta antar belitan tanpa menggunakan *ground*. Sedangkan metode ( *Grounded Specimen Test with Guard* ) digunakan untuk menguji tangen delta antara belitan dan *ground*, fasilitas *guard* berfungsi untuk menghilangkan referensi dari belitan lain. Dalam

pengujian langsung tangen delta pada pemeliharaan rutin 2 tahunan Bay Trafo 2 di lapangan didapatkan data pengujian pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Hasil Pengujian Tangen Delta

| No. | Belitan yang diuji | Metode Uji | Tan Delta |
|-----|--------------------|------------|-----------|
| 1.  | Primer-Sekunder    | UST-R      | 0,39 %    |
| 2.  | Sekunder-Tersier   | UST-B      | 0,40%     |
| 3.  | Tersier-Primer     | UST-R      | 0,39%     |
| 4.  | Primer-Ground      | GSTg-RB    | 0,58%     |
| 5.  | Sekunder-Ground    | GSTg-RB    | 0,87%     |
| 6.  | Tersier-Ground     | GSTg-RB    | 0,47%     |

Hasil pengujian dibandingkan dengan hasil perhitungan tangen delta merujuk persamaan (2.2). Data yang digunakan untuk perhitungan menggunakan data pengujian yang ada pada Tabel 4.4. Berikut contoh perhitungan tangen delta belitan primer terhadap sekunder.

$$\text{Tan } \delta = \frac{0,5737}{10000^2 \times (2 \times 3,14 \times 50) \times (4768,85 \times 10^{-12})} = 0,38\%$$

Hasil pengujian tangen delta pada semua belitan dan parameter ditunjukkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Hasil Perhitungan Tan Delta

| Test | Frekuensi<br>(Hz) | Tegangan<br>(V) | Arus<br>( mA ) | Daya<br>Losses<br>(mW) | Cap<br>(pF) | Tan<br>Delta<br>(%) |
|------|-------------------|-----------------|----------------|------------------------|-------------|---------------------|
| CHL  | 50                | 10.000          | 14,930         | 0,5737                 | 4768,85     | 0,38                |
| CLT  | 50                | 10.000          | 29,304         | 1,1584                 | 9329,79     | 0,40                |
| CHT  | 50                | 10.000          | 29,279         | 1,1529                 | 9326,46     | 0,39                |
| CHG  | 50                | 10.000          | 8,735          | 0,5070                 | 2781,99     | 0,58                |
| CLG  | 50                | 10.000          | 2,549          | 0,2207                 | 813,55      | 0,86                |
| CTG  | 50                | 10.000          | 30,057         | 1,4007                 | 9567,38     | 0,47                |

Nilai tangen delta hasil perhitungan menggunakan input nilai frekuensi, tegangan, arus, rugi daya, kapasitansi dari pengujian pada Tabel 4.4 didapatkan hasil yang sama dengan nilai tangen delta hasil pengujian pada Tabel 4.3. Hasil tersebut dijadikan bahan untuk analisa kelayakan trafo daya 20 MVA.

#### 4.3 Hasil Pengujian *Breakdown Voltage*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan minyak terhadap tegangan dimana peran minyak pada transformator sebagai media isolasi. Sampel minyak yang diambil yaitu pada *maintank bottom* trafo dan juga pada kompartemen On Load Tap Changer melalui fasilitas *draining valve*. Kemudian sampel tersebut diuji terpisah. Pengujian dilakukan sebanyak 6 kali, dimana pada pengujian awal selama 5 menit, pengujian kedua hingga seterusnya masing-masing 2 menit. Alat uji yang digunakan yaitu baur DTA 100 C dengan maksimal tegangan mencapai 100 kV. Berikut data hasil pengujian *breakdown voltage*. Hasil uji *breakdown voltage*, dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian *Breakdown Voltage*.

| Titik Pengujian | Hasil Pengujian |
|-----------------|-----------------|
| <i>Maintank</i> | 67,0 kV         |
| OLTC            | 51,8 kV         |

Minyak pada *maintank* trafo didapatkan nilai hasil pengujian *breakdown voltage* sebesar 67,0 kV, sedangkan untuk hasil pengujian *breakdown voltage* pada kompartemen OLTC didapatkan nilai 51,8 kV.

#### 4.4 Hasil Pengujian Rasio Tegangan

Pengujian rasio tegangan bertujuan untuk mengetahui nilai rasio tiap-tiap posisi tap. Nilai rasio menunjukkan perbandingan antara belitan primer dan belitan sekunder. Pengaturan rasio masing-masing tap *On Load Tap Changer* diperlukan untuk menjaga stabilitas tegangan di sisi sekunder dalam menghadapi ketidakpastian beban di sisi sekunder dan juga *supply* disisi primer. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat uji Vanguard TTRA-03. Prinsip pengujian

rasio tegangan yaitu alat uji memberikan input tegangan pada sisi belitan primer, kemudian koneksi yang lain dihubungkan ke sisi belitan sekunder untuk membaca keluaran tegangan sekunder. Nilai rasio didapatkan dari perhitungan tegangan primer dibagi dengan tegangan sekunder. Hasil pengujian rasio tegangan pada Bay Trafo 2 Gardu Induk 150 KV Situbondo dapat dilihat pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Hasil Pengujian Rasio Tegangan.

| Posisi Tap | Fasa | Hasil Pengujian | Posisi Tap | Fasa | Hasil Pengujian |
|------------|------|-----------------|------------|------|-----------------|
| 1          | R    | 8,276           | 10         | R    | 7,285           |
|            | S    | 8,276           |            | S    | 7,285           |
|            | T    | 8,286           |            | T    | 7,294           |
| 2          | R    | 8,166           | 11         | R    | 7,175           |
|            | S    | 8,166           |            | S    | 7,175           |
|            | T    | 8,175           |            | T    | 7,184           |
| 3          | R    | 8,057           | 12         | R    | 7,065           |
|            | S    | 8,057           |            | S    | 7,065           |
|            | T    | 8,065           |            | T    | 7,073           |
| 4          | R    | 7,946           | 13         | R    | 6,954           |
|            | S    | 7,946           |            | S    | 6,954           |
|            | T    | 7,955           |            | T    | 6,963           |
| 5          | R    | 7,836           | 14         | R    | 6,845           |
|            | S    | 7,836           |            | S    | 6,845           |
|            | T    | 7,845           |            | T    | 6,852           |
| 6          | R    | 7,726           | 15         | R    | 6,735           |
|            | S    | 7,726           |            | S    | 6,735           |
|            | T    | 7,735           |            | T    | 6,742           |
| 7          | R    | 7,616           | 16         | R    | 6,625           |
|            | S    | 7,616           |            | S    | 6,624           |
|            | T    | 7,624           |            | T    | 6,632           |
| 8          | R    | 7,506           | 17         | R    | 6,514           |
|            | S    | 7,506           |            | S    | 6,513           |
|            | T    | 7,514           |            | T    | 6,522           |
| 9          | R    | 7,396           | 18         | R    | 6,404           |
|            | S    | 7,396           |            | S    | 6,404           |
|            | T    | 7,404           |            | T    | 6,412           |

Untuk mengetahui kelayakan rasio transformator, nilai rasio yang sudah terukur dibandingkan dengan rasio hasil perhitungan tegangan primer dibagi dengan tegangan sekunder masing-masing posisi tap yang tertera pada name plate

trafo [1]. Dari perbandingan tersebut didapatkan eror kemudian dibandingkan dengan standar IEEE C57.125.1991. Hasil perhitungan rasio transformator daya 20 MVA Gardu Induk 150 kV Situbondo dapat dilihat pada Tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Hasil Perhitungan Rasio Berdasarkan *Nameplate*.

| Posisi Tap | Tegangan Primer ( V ) | Tegangan Sekunder ( V ) | Rasio  |
|------------|-----------------------|-------------------------|--------|
| 1          | 165750                | 20000                   | 8,2875 |
| 2          | 163500                | 20000                   | 8,1750 |
| 3          | 161250                | 20000                   | 8,0625 |
| 4          | 159000                | 20000                   | 7,9500 |
| 5          | 156750                | 20000                   | 7,8375 |
| 6          | 154500                | 20000                   | 7,7250 |
| 7          | 152250                | 20000                   | 7,6125 |
| 8          | 150000                | 20000                   | 7,5000 |
| 9          | 147750                | 20000                   | 7,3875 |
| 10         | 145500                | 20000                   | 7,2750 |
| 11         | 143250                | 20000                   | 7,1625 |
| 12         | 141000                | 20000                   | 7,0500 |
| 13         | 138750                | 20000                   | 6,9375 |
| 14         | 136500                | 20000                   | 6,8250 |
| 15         | 134250                | 20000                   | 6,7125 |
| 16         | 132000                | 20000                   | 6,6000 |
| 17         | 129750                | 20000                   | 6,4875 |
| 18         | 127500                | 20000                   | 6,3750 |

Contoh perhitungan pada tap 1 trafo daya untuk mendapatkan nilai rasio berdasarkan data *name plate* sebagai berikut :

$$\text{Rasio} = \frac{165750}{20000} = 8,2875$$

#### 4.5 Hasil Uji Fungsi Rangkaian Rele Internal

Uji fungsi dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian modifikasi rele *sudden pressure* bekerja sebagaimana mestinya. Diambil beberapa kasus pada rele *sudden pressure*, kemudian diamati respon dari rangkaian proteksi. Berikut hasil

uji fungsi rangkaian modifikasi *sudden pressure*. Hasil Pengujian rangkaian internal transformator dapat dilihat pada Tabel 4.8

**Tabel 4.8** Hasil Uji Fungsi Rele *Sudden pressure*.

| Event                                                    | Kondisi PMT<br>150 KV | Kondisi PMT<br>20 KV | Anunciator                      | Healthy<br>Lamp<br>Nyala |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Normal                                                   | Close                 | Close                | -                               | Nyala                    |
| Kontak NO<br>rele <i>sudden<br/>pressure</i><br>dihubung | Close                 | Close                | PRD Tembus                      | Nyala                    |
| <i>Trip</i> melalui<br>Rele <i>sudden<br/>pressure</i>   | <i>Trip</i>           | <i>Trip</i>          | <i>Sudden<br/>pressure Trip</i> | Mati                     |

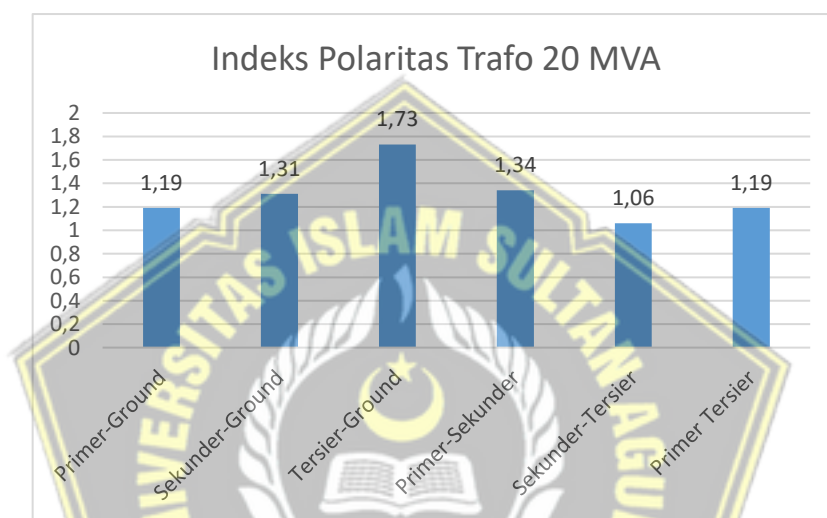
#### 4.6 Analisa Hasil Uji Indeks Polaritas

Hasil uji indeks polaritas secara real apabila dibandingkan dengan hasil perhitungan menunjukkan hasil yang sama. Kemudian dari hasil tersebut dibandingkan dengan standar indeks polarisasi IEEE Std 62 tahun 1995 [10]. Indeks polarisasi dikatakan baik apabila nilainya lebih dari 1,25.

Nilai indeks polarisasi antara belitan primer terhadap *ground* adalah 1,19. Apabila dibandingkan dengan standar yang ada, nilai tersebut dalam kategori dipertanyakan. Disarankan untuk melakukan uji lanjutan salah satunya adalah uji tangen delta untuk mengetahui kualitas isolasi belitan primer terhadap *ground*. Selanjutnya untuk nilai indeks polarisasi antara belitan primer terhadap sekunder yaitu 1,34. Menurut rujukan standar yang ada, hasil ini dapat dikategorikan baik.

Indeks polarisasi belitan sekunder terhadap *ground* bernilai 1,31. Berdasarkan standar yang ada, hasil ini dikategorikan baik. Sedangkan untuk nilai indeks polarisasi antara belitan sekunder dengan tersier memiliki nilai 1,09 yang mana hasil ini pada kategori jelek. Perlu dilakukan investigasi untuk mengetahui kelayakan dari isolasi antara belitan primer dan sekunder.

Nilai indeks polarisasi belitan tersier terhadap *ground* sebesar 1,79. Hasil ini ada pada kategori baik sehingga tidak perlu dilakukan investigasi lanjutan. Sedangkan pada hasil indeks polarisasi belitan primer terhadap tersier sebesar 1,19. Hasil ini apabila dibandingkan pada standar, ada pada kategori dipertanyakan. Oleh karena itu perlu uji lanjutan salah satunya adalah uji tan delta. Dari keseluruhan hasil pengujian indek polarisasi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Grafik Indeks Polaritas Trafo 20 MVA Gardu Induk Situbondo.

Terdapat 3 koneksi yang memiliki hasil kurang dari standar yang ditetapkan. Hal ini ditindaklanjuti dengan melakukan uji lainnya yang waktunya bersamaan dengan uji indeks polaritas yaitu uji tangen delta dan *breakdown voltage*. Ketiga pengujian ini merupakan item wajib saat pemeliharaan rutin yang bertujuan untuk mengetahui kualitas isolasi trafo.

#### 4.7 Analisa Hasil Uji Tangen Delta

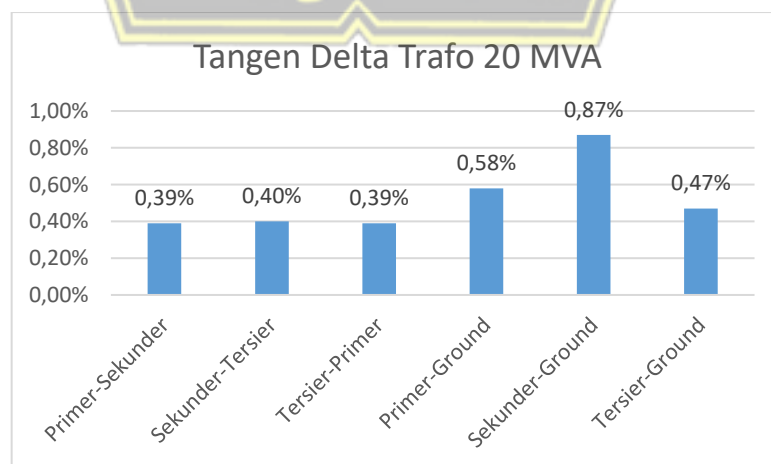
Hasil pengujian dan perhitungan yang tertera pada tabel 4.3 serta tabel 4.4 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Kemudian hasil tersebut dibandingkan dengan standar CIGRE TB 445 [11]. Untuk Trafo yang sudah beroperasi nilai maksimal tangen delta adalah 1 %. Apabila nilai tangen delta trafo

melebihi standar yang telah ditetapkan, maka perlu adanya uji minyak dan kertas isolasi untuk mengetahui bagian yang mengalami pemburukan.

Hasil pengujian tangen delta antara belitan primer terhadap sekunder dengan menggunakan metode UST-R didapatkan nilai 0,39%. Hasil ini masih dikategorikan baik apabila dibandingkan dengan standar. Selanjutnya koneksi antara belitan primer terhadap *ground* dengan metode uji GSTg-RB didapatkan nilai tangen delta 0,58%. Artinya nilai tangen delta belitan primer terhadap *ground* masih dalam kategori baik.

Koneksi belitan sekunder terhadap tersier memiliki nilai tangen delta sebesar 0,40% ketika diuji menggunakan metode UST-B. Hasil ini dikategorikan baik menurut standar yang berlaku. Untuk koneksi sekunder terhadap *ground* memiliki nilai 0,87% Ketika diuji menggunakan metode GSTg-RB. Nilai ini merupakan yang tertinggi dari seluruh hasil pengujian tangen delta, tetapi masih dalam kategori baik sehingga tidak perlu dilakukan tindak lanjut.

Hasil pengujian tangen delta belitan tersier terhadap *ground* menggunakan metode GSTg-RB memiliki nilai 0,47%. Apabila dibandingkan dengan standar maka masih dalam kategori baik. Selanjutnya untuk koneksi tersier primer diuji dengan menggunakan metode UST-R memiliki nilai 0,39%. Hasil ini masih dalam kategori baik sehingga tidak perlu dilakukan tindak lanjut. Dari keseluruhan hasil uji tangen delta, dapat dilihat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Grafik Pengujian Tangen Delta Trafo 20 MVA.

Hasil pengujian tangen delta dari seluruh koneksi belitan didapatkan hasil paling tinggi 0,87% yaitu koneksi antara belitan sekunder terhadap *ground*. Meskipun demikian, hasil ini masih dikategorikan baik berdasarkan standar CIGRE TB 445. Arus resistif yang ada pada isolasi trafo tidak mempengaruhi kualitas isolasi. Selanjutnya hanya perlu melakukan pengujian rutin setiap dua tahunan.

#### 4.8 Analisa Hasil Uji *Breakdown Voltage*

Hasil pengujian tegangan tembus atau *breakdown voltage* pada *maintank* dan kompartemen OLTC, kemudian dibandingkan terhadap standar yang dirujuk pada penelitian ini yaitu IEC 60156-02 tahun 1995 [12]. Nilai tegangan tembus dapat dikatakan baik apabila rata-rata dari keseluruhan pengujian nilainya lebih dari 50 kV[1]. Apabila nilai tegangan tembus dalam *range* 40-50 kV maka dapat dikategorikan sedang. Jika nilai tegangan tembus dibawah 40 kV maka dapat dikategorikan jelek.

Sampel minyak yang diambil dari *maintank* trafo didapatkan nilai tegangan tembus rata-rata pada seluruh pengujian sebesar 67,0 kV. Apabila dibandingkan dengan standar yang berlaku maka dikategorikan baik. Hasil pengujian minyak pada *tank* OLTC didapatkan nilai tegangan tembus rata-rata pada seluruh pengujian sebesar 51,8 kV. Jika dibandingkan dengan standar yang berlaku maka dikategorikan dalam kondisi baik. Minyak yang digunakan sebagai isolasi pada *maintank* dan juga *tank* OLTC masih dalam kondisi baik dan layak digunakan. Selanjutnya hanya diperlukan pengambilan sampel minyak secara rutin untuk memonitoring kondisi minyak transformator.

#### 4.9 Analisa Hasil Pengujian Rasio Tegangan

Berdasarkan standar IEEE C57.125.1991 kondisi rasio antara belitan primer dan sekunder yang baik apabila nilai hasil pengujian memiliki batasan kesalahan kurang dari  $\pm 0,5\%$  terhadap standar yang telah ditetapkan pabrikan. Rasio masing-masing tap yang telah ditetapkan oleh pabrik biasanya tertera pada *name plate* transformator. Apabila batasan kesalahan melebihi  $\pm 0,5\%$  disarankan untuk

melakukan pengujian lainnya. Contoh perhitungan batasan kesalahan tap berdasarkan Persamaan (2.4) adalah sebagai berikut.

Tap 1

$$\text{Fasa R} = \left[ \frac{8,276 - 8,2875}{8,276} \right] \times 100\% = 0,14 \%$$

$$\text{Fasa S} = \left[ \frac{8,276 - 8,2875}{8,276} \right] \times 100\% = 0,14 \%$$

$$\text{Fasa T} = \left[ \frac{8,286 - 8,2875}{8,286} \right] \times 100\% = 0,02 \%$$

Hasil perhitungan error rasio tegangan trafo antara pengujian dengan perhitungan dari data *nameplate* dapat dilihat pada Tabel 4.9.

**Tabel 4.9** Tabel Error Rasio Tegangan.

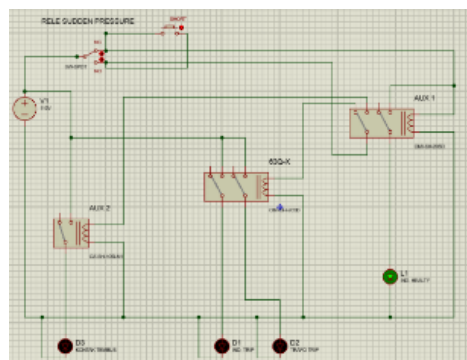
| Posisi Tap | Error ( % ) |        |        |
|------------|-------------|--------|--------|
|            | Fasa R      | Fasa S | Fasa T |
| 1          | 0,14        | 0,14   | 0,02   |
| 2          | 0,11        | 0,11   | 0,00   |
| 3          | 0,07        | 0,07   | 0,03   |
| 4          | 0,05        | 0,05   | 0,06   |
| 5          | 0,02        | 0,02   | 0,10   |
| 6          | 0,01        | 0,01   | 0,13   |
| 7          | 0,05        | 0,05   | 0,15   |
| 8          | 0,08        | 0,08   | 0,19   |
| 9          | 0,11        | 0,11   | 0,22   |
| 10         | 0,14        | 0,14   | 0,26   |
| 11         | 0,17        | 0,17   | 0,30   |
| 12         | 0,21        | 0,21   | 0,33   |
| 13         | 0,24        | 0,24   | 0,37   |
| 14         | 0,29        | 0,29   | 0,39   |
| 15         | 0,33        | 0,33   | 0,44   |
| 16         | 0,38        | 0,36   | 0,48   |
| 17         | 0,41        | 0,39   | 0,53   |
| 18         | 0,45        | 0,45   | 0,58   |

Hasil perhitungan error rasio pada *name plate* dengan rasio hasil pengujian didapatkan data pada tabel 4.9. Nilai error rasio belitan pada posisi tap 1 hingga 16

tidak ada angka yang melebihi 0,5 % pada masing masing fasanya. Maka pada tap 1 hingga tap 16 eror rasio masih dalam keadaan baik. Tetapi pada posisi tap 17 terdapat nilai eror sebesar 0,53% pada belitan fasa T dan pada posisi tap 18 terdapat nilai eror sebesar 0,58% pada belitan fasa T. Berdasarkan standar IEEE C57.125.1991 apabila nilai eror melebihi 0,5% maka diperlukan pengujian lain untuk menentukan kelayakan. Menindaklanjuti hal ini, dilakukan penanganan resiko berdasarkan interval jangka waktu. Untuk jangka pendek dilakukan pengujian lain yang masih merupakan item pengujian pada pemeliharaan rutin untuk menentukan kelayakan belitan dengan rasio yang melebihi standar yaitu pengujian tangen delta dan *breakdown voltage* [1]. Selain itu perlu juga pemantauan petugas gardu induk saat tap transformator pada posisi 16 dan 17 apakah selisih tegangan antar fasa terlampaui jauh atau tidak. Untuk resiko jangka menengah perlu adanya investigasi pada belitan transformator untuk mengetahui kondisi belitan. Sedangkan untuk penanganan jangka panjang diperlukan penggantian trafo agar penyaluran energi listrik semakin handal.

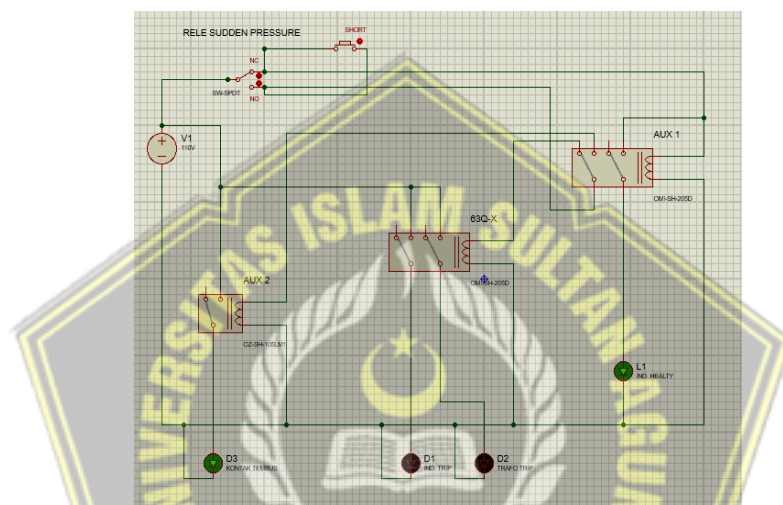
#### 4.10 Validasi Uji Fungsi Rele Sudden pressure

Dari kondisi *real* saat uji transformator saat dilakukan percobaan beberapa kasus. Kemudian dilakukan simulasi dengan menggunakan aplikasi Proteus. Dilakukan uji kasus pertama yaitu saat trafo diberi tegangan. Yang terjadi pada rangkaian *real* pada panel control yaitu lampu *healty lamp* menyala. Simulasi pada aplikasi Proteus saat pertama kali trafo diberi tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



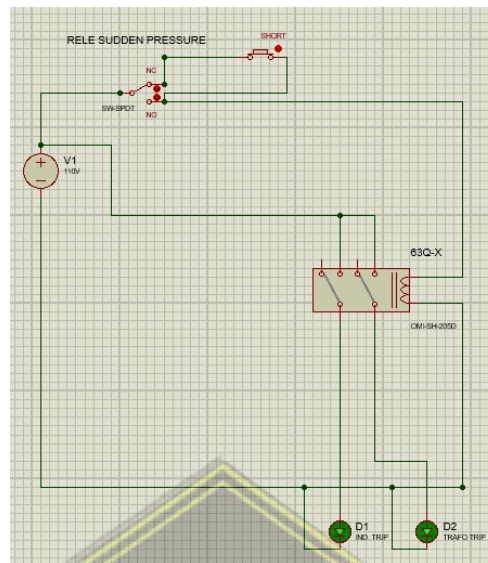
**Gambar 4.3** Rangkaian Rele Sudden pressure Saat Trafo Diberi Tegangan.

Ketika rangkaian simulasi dijalankan, lampu *healthy* menyala. Sama seperti keadaan secara real dimana saat rangkaian modifikasi rele internal diinstal, dalam trafo kondisi normal lampu *healthy lamp* menyala. Artinya saat kondisi normal rangkaian modifikasi rele internal bekerja sebagaimana fungsinya. Kemudian diberikan case kedua yaitu terminal kontak NO dihubungkan singkat seolah-olah terjadi tegangan tembus pada rele *sudden pressure*. Simulasi saat kontak NO rele *sudden pressure* dihubungkan singkat dapat dilihat pada Gambar 4.4.



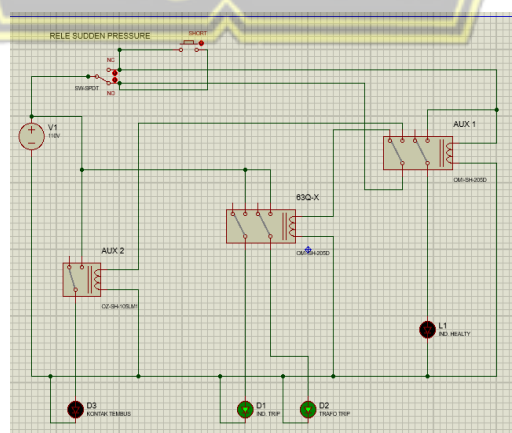
**Gambar 4.4** Rangkaian Modifikasi Trafo ketika kontak NO dihubungkan singkat.

Berdasarkan hasil pengujian *real* saat kontak NO rele *sudden pressure* dihubungkan singkat pada tabel 4.8, trafo tidak mengalami *trip*. Muncul *annunciator* pada panel proteksi bahwa terjadi tegangan tembus. Sama halnya dengan pengujian *real*, simulasi pada Proteus menunjukkan hasil yang sama saat kontak NO dihubungkan singkat, yaitu lampu indikator kontak tembus nyala menandakan terjadi kontak tembus pada rele *sudden pressure*. Berbeda dengan rangkaian rele *sudden pressure* sebelum dilakukan modifikasi yang bisa dilihat pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Rangkaian *Sudden pressure* Sebelum Dimodifikasi

Saat kontak NO dihubungkan singkat, transformator langsung mengalami hilang tegangan atau *trip*. Hal ini dikarenakan tegangan positif dc menuju ke kontak A1 kontaktor karena kontak NO terhubung. Kemudian mengerjakan kontaktor 63Q-X untuk mengirim sinyal *trip* ke PMT dan Anunciator. Inilah perbedaan dan sekaligus keunggulan rangkaian modifikasi rele internal, yaitu mencegah trafo dari gangguan yang bukan berasal dari sistem sehingga meningkatkan kehandalan trafo. Selanjutnya apabila rele *sudden pressure* dikerjakan seolah-olah terjadi gangguan pada internal trafo, maka terjadi hal seperti pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Rangkaian Modifikasi Saat Rele *Sudden pressure* ditripkan.

Ketika rele *sudden pressure* ditriapkan, PMT pada transformator langsung mengalami *trip*. Serupa dengan pengujian real, pada saat simulasi trafo kontaktor 63Q-X langsung mengirim sinyal *trip* ke PMT. Pada kasus ini, rangkaian berfungsi sebagaimana mestinya. Dilihat dari *wiring*, rangkaian ini juga tidak menghalangi sinyal dari rele *sudden pressure* untuk men-*trip*-kan trafo sehingga gangguan dapat diatasi oleh PMT dari transformator dan tidak meluas ke rangkaian lain. Berdasarkan uji fungsi rangkaian modifikasi rele *sudden pressure* pada kondisi real dan simulasi, ketiga kasus yang dicoba pada uji fungsi menunjukkan respon yang sama. Artinya rangkaian modifikasi ini mendukung kehandalan trafo dengan mencegah gangguan yang berasal dari luar sistem.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

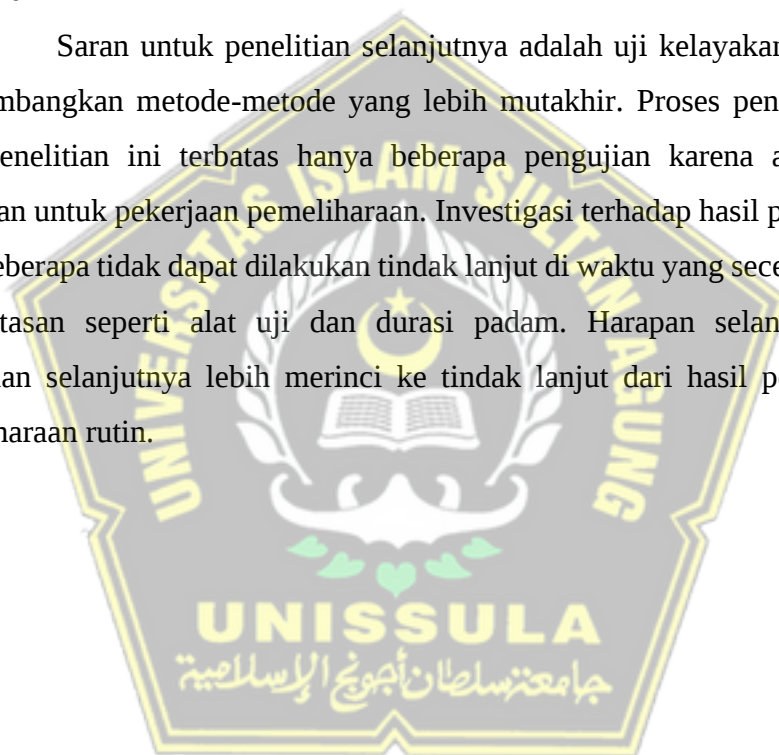
Berdasarkan hasil pengujian indeks polarisasi, tangen delta, *breakdown voltage*, rasio tegangan dan uji fungsi rele internal didapatkan hasil sebagai berikut.

1. Hasil pengujian indeks polarisasi dari semua koneksi belitan, didapatkan nilai tertinggi 1,73 dan nilai terendah 1,06. Belitan memiliki nilai yang sama yaitu 1,19 koneksi antara belitan primer *ground* dan primer tersier serta 1,06 pada koneksi belitan sekunder tersier. Berdasarkan standar IEEE Std 62 tahun 1995 belitan tersebut disarankan untuk melakukan pengujian lanjutan yaitu tangen delta dan *breakdown voltage*. Sedangkan untuk belitan sekunder-tersier disarankan untuk melakukan investigasi.
2. Hasil pengujian tangen delta semua koneksi belitan didapatkan hasil pengujian yang masih memenuhi standar CIGRE TB 445. dengan hasil tangen delta tertinggi 0,87 % pada belitan sekunder *ground*.
3. Pengujian *breakdown voltage* pada *maintank* didapatkan hasil pengujian 67 kV/2,5 mm , sedangkan untuk hasil pengujian *breakdown voltage* pada OLTC didapatkan hasil 51,8 kV/2,5 mm. Berdasarkan standar IEC 60156-02 tahun 1995 , hasil pengujian tersebut dalam kondisi baik dimana nilainya lebih dari 50 kV.
4. Terdapat 2 tap yang rasionya tidak sesuai standar standart IEEE C57.125.1991. yaitu belitan fasa T pada posisi tap 17 dan 18. sesuai rekomendasi dilakukan pengujian lainnya dalam hal ini yaitu tangen delta dan *breakdown voltage*.
5. Rangkaian modifikasi rele internal terbukti mencegah gangguan yang diakibatkan dari luar sistem seperti kontak tembus setelah dilakukan validasi dengan aplikasi Proteus sehingga menambah kehandalan transformator.

6. Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian transformator 20 MVA pada GI Situbondo dalam kondisi yang tidak layak. Terjadi penurunan indeks polarisasi pada belitan sehingga perlu diinvestigasi lebih lanjut dengan cara pembongkaran transformator. selain itu terdapat juga ketidaksesuaian rasio dengan standar pada posisi tap 17 dan 18. apabila dipaksakan beroperasi karena kebutuhan penyaluran, maka perlu adanya inspeksi secara intensif oleh petugas Jargi hingga transformator dilakukan investigasi lebih lanjut.

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah uji kelayakan trafo dengan mengembangkan metode-metode yang lebih mutakhir. Proses pengambilan data pada penelitian ini terbatas hanya beberapa pengujian karena alat uji hanya ditujukan untuk pekerjaan pemeliharaan. Investigasi terhadap hasil pengujian yang jelek beberapa tidak dapat dilakukan tindak lanjut di waktu yang secepatnya karena keterbatasan seperti alat uji dan durasi padam. Harapan selanjutnya adalah penelitian selanjutnya lebih merinci ke tindak lanjut dari hasil pengujian pada pemeliharaan rutin.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PLN (Persero), *Pedoman Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik PT PLN (Persero) di Regional Jawa Madura Bali*. PT PLN (Persero) REGIONAL JAMALI DIVISI RJT, 2022.
- [2] R. F. Rifqyawan, “Analisis Kelayakan Tahanan Isolasi Trafo 30 MVA di GI 150/20 KV PT APF dengan Menggunakan Indeks Polarisasi dan Tangen Delta,” *Unissula*, 2023.
- [3] 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,” *Ar-raniry*, 2023.
- [4] M. F. Robbani *et al.*, “Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage,” *Elektrika*, pp. 60–66, 2020.
- [5] C. Widyastuti and R. A. Wisnuaji, “Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator di PT . PLN ( Persero ) Bogor,” *Elektron*, vol. 11, pp. 75–78, 2019.
- [6] G. A. Prima, Z. Anthony, and A. Anugrah, “Analisa Tahanan Isolasi Pada Transformator Daya 150 / 30 KV Gardu Induk Padang Luar PT PLN ( Persero ) Bukittinggi,” *INAJET*, vol. 6, no. 1, pp. 23–33, 2023.
- [7] O. Thiessaputra, M. Haddin, and S. A. D. Prasetyowati, *DGA Method Based on Fuzzy for Determination of Transformer Oil Quality*, vol. 149, no. Smartcyber. 2021. doi: 10.1007/978-981-15-7990-5\_35.
- [8] A. Pramono, M. Haddin, and D. Nugroho, “Analisis Minyak Transformator Daya Berdasarkan Dissolved Gas Analysis (Dga) Menggunakan Data Mining Dengan Algoritma J48,” *Telematika*, vol. 9, no. 2, p. 78, 2016, doi: 10.35671/telematika.v9i2.457.
- [9] PT. PLN (Persero), *Pemeliharaan OLTC*. Jakarta: PT. PLN (Persero ) Pusat Pendidikan dan Pelatihan, 2009.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], *Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors IEEE Std 62-1995*, vol. 1995. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 1993.

- [11] C. Rajotte *et al.*, “Cigré Brochure 445 - Guide for Transformer Maintenance,” *CIGRE Technical Brochure*, no. February, p. 23, 2011.
- [12] International Electrotechnical Commission (IEC), “Iec 60156,” *61010-1 © Iec:2001*, vol. 3, p. 13, 2018.
- [13] *IEEE Std C57.125-1991: IEEE Guide for Failure Investigation, Documentation, and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors*. IEEE 2015, 2015. [Online]. Available: <http://lib.ugent.be/catalog/ebk01:3780000000090758>
- [14] A. Hukoro and M. Khosyi'in, “Sistem Monitoring Impressed Current Cathodic Protection Berbasis IoT untuk Lambung Kapal,” *CYCLOTRON*, vol. 8, no. 01, pp. 48–55, 2025.
- [15] C. B. Waluyo, “Pengenalan simulasi elektronika dengan Software Proteus 8 Profesional,” *Calesmart*. [Online]. Available: [https://calesmart.com/artikel/Pengenalan-simulasi-elektronika-dengan-Software-Proteus-8-Profesional\\_132.html](https://calesmart.com/artikel/Pengenalan-simulasi-elektronika-dengan-Software-Proteus-8-Profesional_132.html)
- [16] A. P. Nugraha and M. Haddin, “Isolation Resistance Feasibility Test Analysis Based on Polarization Index and Delta Tangent in,” *IJISET*, vol. 10, no. 06, pp. 98–106, 2023.
- [17] S. R. Pertiwi, U. Latifa, R. Hidayat, and I. Ibrahim, “Analisis Kelayakan CVT (Capacitive Voltage Transformer) Fasa S Bay Busbar 2 150 kV di GI PT. XYZ Indonesia,” *Techné : Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, vol. 20, no. 1, pp. 35–42, 2021, doi: 10.31358/techné.v20i1.259.