

**OPTIMASI OPERASI PARALEL TRANSFORMATOR  
150/20 kV DENGAN MENGURANGI DAMPAK  
PERBEDAAN RASIO TEGANGAN DAN  
PENINGKATAN ARUS**

**LAPORAN TUGAS AKHIR**

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



**DISUSUN OLEH:**

**ALIVIA RENANTIVANI**

**NIM 30602200109**

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

**2025**

***OPTIMIZATION OF 150/20 kV TRANSFORMER  
PARALLEL OPERATION BY REDUCING THE IMPACT  
OF VOLTAGE RATIO DIFFERENCES  
AND CURRENT INCREASE***

***FINAL PROJECT***

***PROPOSED TO COMPLETE THE REQUIREMENT TO OBTAIN A  
BACHELOR'S DEGREE (S1) AT DEPARTEMENT OF ELECTRICAL  
ENGINEERING, FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY, UNIVERSITAS  
ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG***



**ARRANGED BY:**

**ALIVIA RENANTIVANI**

**NIM 30602200109**

**DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG**

**2025**

## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**OPTIMASI OPERASI PARALEL TRANSFORMATOR 150/20 kV DENGAN MENGURANGI DAMPAK PERBEDAAN RASIO TEGANGAN DAN PENINGKATAN ARUS**” ini disusun oleh:

Nama : Alivia Renantivani  
NIM : 30602200109  
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Jumat  
Tanggal : 7 Maret 2025

Pembimbing I

  
Ir. Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.

NIDN : 0628097501

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro

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

NIDN : 0607018501

## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “OPTIMASI OPERASI PARALEL TRANSFORMATOR 150/20 kV DENGAN MENGURANGI DAMPAK PERBEDAAN RASIO TEGANGAN DAN PENINGKATAN ARUS” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jumat  
Tanggal : 7 Maret 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

12 Maret 2025

Dr. Muhammad Khosy'in, S.T., M.T., IPM.

NIDN : 0625077901

Ketua

Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.

NIDN : 0614117701

Penguji I

Ir. Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.

NIDN : 0628097501

Penguji II

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Alivia Renantivani

NIM : 30602200109

Fakultas : Teknologi Industri

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang dengan judul “Optimasi Operasi Paralel Transformator 150/20 kV dengan Mengurangi Dampak Perbedaan Rasio Tegangan dan Peningkatan Arus”, adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, 27 Februari 2025

Yang Menyatakan



**Alivia Renantivani**

**NIM. 30602200109**

## PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Alivia Renantivani

NIM : 30602200109

Fakultas : Teknologi Industri

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan Judul: **“Optimasi Operasi Paralel Transformator 150/20 kV dengan Mengurangi Dampak Perbedaan Rasio Tegangan dan Peningkatan Arus”**. Saya memberikan izin kepada Universitas Islam Sultan Agung untuk menggunakan karya saya untuk keperluan akademis serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain 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 Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 27 Februari 2025

Yang Menyatakan,



**Alivia Renantivani**

**NIM. 30602200109**

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah Rabbil 'Aalamiin, puji syukur kita panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Optimasi Operasi Paralel Transformator 150/20 kV dengan Mengurangi Dampak Perbedaan Rasio Tegangan dan Peningkatan Arus” dengan lancar. Proses penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang turut membantu dan mendukung agar terselesaikannya laporan ini. Maka dari itu penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., MH selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST., MT., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Dosen pembimbing saya Bapak Ir. Arief Marwanto, S.T., M.Eng., Ph.D, IPM. yang telah memberikan saya dukungan dan bimbingan dalam penyusunan laporan tugas akhir.
5. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas bantuannya dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
6. Orang tua dan adik saya yang telah memberikan doa dan dukungan selama saya berkuliah di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
7. Teman seperjuangan saya yang telah banyak membantu selama perkuliahan dan penyusunan laporan tugas akhir ini.
8. Segenap keluarga besar ULTG dan GI Jember yang memberikan dukungan dan menyediakan data untuk keperluan penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna. Penulis meminta maaf dan terbuka terhadap semua kritik maupun saran yang

membangun, agar kedepannya tugas akhir dengan judul serupa dapat menjadi lebih baik.. Akhir kata penulis berharap semoga penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca maupun penulis secara pribadi.

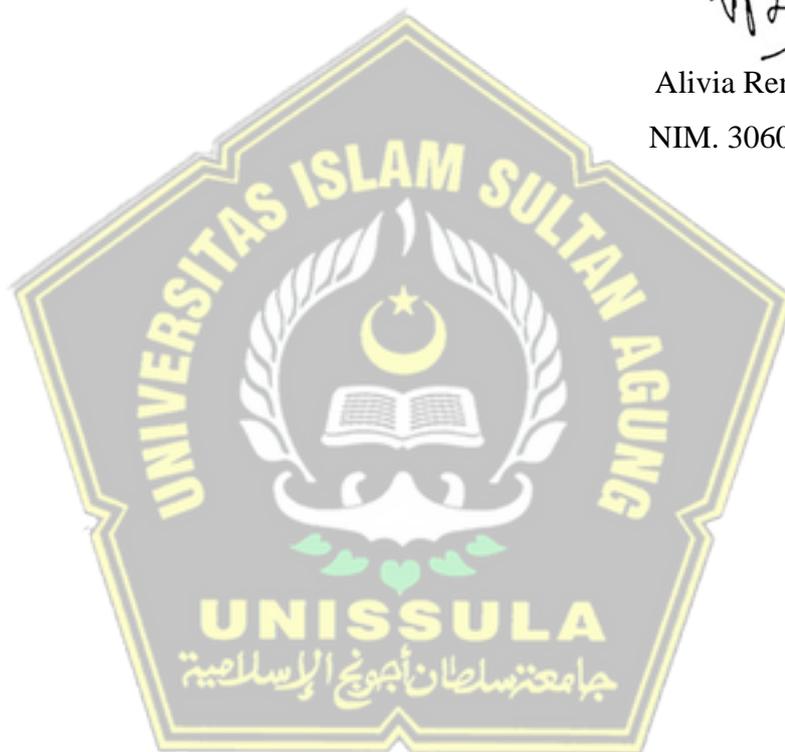
Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Semarang, 27 Februari 2025



Alivia Renantivani

NIM. 30602200109



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING</b> .....	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI</b> .....	<b>iii</b>
<b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Pembatasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Dampak Masalah .....	5
1.6 Manfaat Penelitian .....	5
1.7 Sistematika Penulisan .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI</b> .....	<b>7</b>
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 Landasan Teori .....	9
2.2.1 Pemutus Tenaga (PMT) .....	9
2.2.2 Transformator Tenaga.....	10
2.2.3 Arus Sirkulasi.....	20
2.2.4 <i>Software</i> ETAP 12.6.0 .....	21
2.2.5 <i>Software</i> Proteus .....	22
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>24</b>
3.1 Pendahuluan.....	24
3.2 Deskripsi Metode Penelitian Gabungan .....	24

3.3 Tahapan Penelitian.....	24
3.4 Teknik Pengumpulan Data .....	26
3.5 Skenario Penelitian .....	27
3.6 Proses Manuver Penormalan atau Pemberian Tegangan.....	27
3.7 Sistem Model Penelitian .....	28
3.6 Teknik Analisis Data .....	30
3.7 Alat dan Bahan .....	30
3.8 Tahapan Realisasi Simulasi .....	36
3.9 Tahapan Pengujian Simulasi.....	37
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISA .....</b>	<b>39</b>
4.1 Analisis Peningkatan Arus dan Dampaknya Akibat Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan .....	39
4.1.1 Simulasi Dampak Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan .....	39
4.1.2 Konsekuensi Teknis Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan .....	45
4.2 Perhitungan Arus Sirkulasi Akibat Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan.....	46
4.3 Pengoptimalan Pencegahan Timbulnya Arus Sirkulasi Akibat Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan .....	50
4.3.1 Rancangan Sistem Proteksi untuk Optimasi Kinerja Operasi Paralel Transformator 150/20 kV .....	50
4.3.2 Dampak Potensial Setelah Penerapan Rancangan Sistem Proteksi yang Baru.....	54
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>58</b>
5.1 Kesimpulan .....	58
5.2 Saran .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>60</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>xv</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis Pemutus Tenaga (PMT) Berdasarkan Kelas Tegangan.....	9
Gambar 2. 2 Prinsip Kerja Elektromagnetik Transformator .....	10
Gambar 2. 3 Transformator Tenaga .....	10
Gambar 2. 4 Polaritas Trafo yang Benar (1) dan Polaritas Trafo yang Salah (2)	14
Gambar 2. 5 Kondisi Tanpa Gangguan.....	16
Gambar 2. 6 Kondisi Gangguan di Luar .....	17
Gambar 2. 7 Kondisi Gangguan di Dalam .....	17
Gambar 2. 8 Arus Sirkulasi pada Paralel Trafo Beban Nol .....	20
Gambar 2. 9 Rangkaian Pengganti Operasi Paralel Trafo Tenaga.....	20
Gambar 2. 10 Tampilan Awal <i>Software</i> ETAP 12.6.0.....	22
Gambar 2. 11 Tampilan Awal <i>Software</i> Proteus.....	23
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	26
Gambar 3. 2 Proses Penormalan Beban Penyulang Trafo 2 dari Trafo 3 .....	28
Gambar 3. 3 Diagram Blok Rancangan Sistem Proteksi .....	29
Gambar 3. 4 <i>Single Line Diagram</i> Gardu Induk 150 kV Jember.....	31
Gambar 4. 1 Kondisi Transformator dengan Rasio Tegangan Sama.....	40
Gambar 4. 2 Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Sama sebelum Penormalan PMT <i>Incoming</i> 20 kV Trafo 2.....	41
Gambar 4. 3 Simulasi Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Sama .....	41
Gambar 4. 4 Kondisi Transformator dengan Rasio Tegangan Berbeda .....	43
Gambar 4. 5 Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Berbeda sebelum Penormalan PMT <i>Incoming</i> 20 kV Trafo 2.....	44
Gambar 4. 6 Simulasi Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Berbeda..	44
Gambar 4. 7 Rangkaian Pengganti Operasi Paralel Trafo Tenaga Beda Rasio Tegangan .....	47
Gambar 4. 8 Arah Arus Sirkulasi Sesuai Perhitungan .....	49
Gambar 4. 9 Gambar Rancangan Sistem Proteksi pada <i>Software</i> Proteus .....	51
Gambar 4. 10 Simulasi saat Kondisi Rasio Tegangan Sama .....	52
Gambar 4. 11 Tampilan LCD saat Kondisi Rasio Tegangan Sama.....	52
Gambar 4. 12 Simulasi saat Kondisi Rasio Tegangan Berbeda.....	53
Gambar 4. 13 Tampilan LCD saat Kondisi Rasio Tegangan Berbeda .....	53

Gambar 4. 14 Pengoperasian *Switch Bypass Block Closing* untuk ON dan  
OFF *CB Incoming* ..... 54

Gambar 4. 15 Simulasi Beban Terparalel dengan Trafo Posisi Tap Rendah..... 56



## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data Spesifikasi .....	32
Tabel 3. 2 Data <i>Setting</i> Relai Diferensial dan AVR.....	33
Tabel 3. 3 Rasio Tegangan Per Tap Trafo 2 dan Trafo 3 Gardu Induk Jember....	34
Tabel 3. 4 Data Pembebanan Trafo 2 dan Trafo 3 Gardu Induk Jember .....	35
Tabel 4. 1 Data pada Simulasi Paralel Trafo Beda Rasio Tegangan .....	46



## ABSTRAK

*Operasi paralel transformator 150/20 kV dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem tenaga listrik. Dalam pengoperasiannya harus memperhatikan syarat paralel transformator yang salah satu syaratnya rasio tegangan harus sama. Perbedaan rasio tegangan dapat menyebabkan peningkatan arus dan dampak negatif pada sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peningkatan arus dan dampak perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV dengan menggunakan software ETAP 12.6.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan rasio tegangan dapat menyebabkan peningkatan arus yang signifikan dan menyebabkan kenaikan deviasi pembebanan sebesar 6,96%, juga menimbulkan konsekuensi teknis yaitu arus sirkulasi yang dapat berdampak pada sistem dan finansial perusahaan. Oleh karena itu, dilakukan optimasi operasi paralel transformator untuk mengurangi dampak perbedaan rasio tegangan dan peningkatan arus dengan penyetelan ulang relai diferensial serta menerapkan tindakan preventive untuk mencegah human error dengan merancang sistem proteksi baru menggunakan sistem interlock pada PMT Incoming 20 kV yang tidak dapat menutup saat rasio tegangan berbeda.*

**Kata Kunci:** *Operasi Paralel Transformator, Perbedaan Rasio Tegangan, Peningkatan Arus, Dampak, Optimasi Operasi, Tenaga Listrik*

## **ABSTRACT**

*The parallel operation of 150/20 kV transformers can enhance the efficiency and reliability of the power system. However, it must meet specific operational requirements, one of which is maintaining an identical voltage ratio. A mismatch lead to technical consequences in the voltage ratio can lead to increased current and negative impacts on the system. This study aims to analyze the rise in current and the effects of voltage ratio differences in the parallel operation of 150/20 kV transformers using ETAP 12.6.0 software. The results show that voltage ratio differences can cause a significant increase in current and lead to a loading deviation increase of 6.96%. It also lead to technical consequences, such as circulating currents that may affect system performance and financial costs. Therefore, optimizing the parallel operation of transformers is necessary to mitigate the effects of voltage ratio differences and current increases. This is achieved by resetting the differential relay and implementing preventive measures to reduce human error, including designing a new protection system with an interlock mechanism on the 20 kV Incoming Circuit Breaker (CB) to prevent closure when voltage ratios differ.*

**Keywords:** *Parallel Transformer Operation, Voltage Ratio Difference, Current Increase, Impact, Operation Optimization, Electric Power*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik memiliki peran yang signifikan dalam mendukung perkembangan zaman dan memenuhi kebutuhan manusia. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri dari pembangkit, transmisi, dan distribusi yang saling terhubung untuk menyalurkan energi listrik dari pembangkit ke konsumen [1]. Dalam penyaluran listrik ke konsumen, PT PLN (Persero) sebagai perusahaan yang memiliki andil dalam mengelola kelistrikan negara menjadi tumpuan bagi masyarakat untuk menjaga pasokan listrik agar tetap andal. PT PLN (Persero) dalam penyaluran energi listrik juga melakukan berbagai upaya agar pasokan listrik dapat mengalir secara kontinu ke konsumen dan meminimalisir terjadinya pemadaman baik yang disebabkan akibat gangguan maupun akibat pekerjaan pemeliharaan atau perbaikan [2].

Dalam sistem penyaluran tenaga listrik gardu induk memiliki peranan penting dalam mentransformasi daya listrik yang diterima dari pembangkit untuk disalurkan ke konsumen. Salah satu peralatan utama pada gardu induk adalah transformator. Transformator dalam kerjanya berfungsi untuk mentransformasikan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya menggunakan prinsip induksi elektromagnetik (*EMF Induction*) dengan jenis transformator tertentu dan dengan frekuensi yang sama [3][4]. Untuk meningkatkan keandalan sistem pada gardu induk 150 kV umumnya memiliki lebih dari satu transformator yang nantinya dapat dioperasikan secara paralel untuk meningkatkan kapasitas transformator [4][5].

Pengoperasian paralel transformator memiliki fungsi agar sistem tetap andal dengan tetap tersuplainya pasokan listrik ke konsumen tanpa adanya padam pelanggan. Namun, pada pengoperasian paralel transformator ini terdapat salah satu tantangan teknis yakni adanya arus sirkulasi yang berdampak terhadap stabilitas penyaluran listrik [4][5][6]. Arus sirkulasi muncul akibat adanya perbedaan karakteristik antar transformator yang diparalel meliputi impedansi, rasio tegangan,

maupun sudut fasa [4][5][6]. Salah satu faktor yang dapat menyebabkan munculnya arus sirkulasi yaitu karena adanya *human error* pada saat manuver penormalan atau proses pemberian tegangan pada bay trafo [5]. Faktor *human error* ini timbul karena operator tidak melakukan penyesuaian tap OLTC (*On Load Tap Changer*) pada saat proses pemberian tegangan sehingga terjadi arus sirkulasi. Dampak dari arus sirkulasi yaitu dapat menurunkan kinerja operasi transformator dan meningkatkan rugi-rugi daya yang dapat memicu peningkatan suhu pada transformator, mengganggu stabilitas sistem, serta menyebabkan kegagalan proteksi [5].

Di wilayah ULTG Jember pernah terjadi gangguan yang disebabkan oleh *human error* karena petugas belum menyesuaikan posisi tap *changer* saat proses penormalan trafo sehingga tegangan sisi sekunder trafo yang diparalel belum sama atau tidak identik. Peristiwa tersebut terjadi di Gardu Induk 150 kV Tanggul pada tanggal 24 Oktober 2018, pukul 14:30 WIB PMT 150 kV dan PMT *Incoming* 20 kV bay trafo 3 *trip* dengan indikasi *Differential* Fasa BC yang artinya trip PMT dipicu oleh kerja relai diferensial trafo 3. Dari peristiwa tersebut penulis mengacu pada beberapa penelitian terdahulu sebagai referensi untuk menemukan solusi pencegahan gangguan akibat *human error* pada saat melakukan operasi paralel transformator 150/20 kV.

Pada penelitian dengan pembahasan mengenai paralel IBT oleh Nugraha, Dimas Aji, et al. (PT PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan, 2021) dengan judul "Kajian Pengaruh Paralel IBT 500 kV UIT JBM" menggunakan simulasi dan analisa pemodelan sistem dengan software Digsilent dan ATP untuk mendapatkan perkiraan arus hubung singkat, pembagian pembebanan, dan arus sirkulasi untuk masing-masing skenario saat melakukan paralel IBT yang hasilnya menunjukkan arus sirkulasi muncul akibat adanya perbedaan rasio tegangan antara IBT-IBT yang diparalelkan [6]. Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Andriansyah, Rizko, et al. (Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2020) dengan judul "Analisis Operasi Paralel Transformator Unit Gardu Bergerak Beda Jam Trafo di Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan Semarang" dengan observasi tanpa padam menunjukkan hasil penelitian transformator yang diparalel dengan impedansi dan

rating kVA yang sama, tetapi memiliki perbedaan rasio dengan salah satu transformator memiliki perbedaan tapping tegangan, apabila trafo diberi beban penuh, maka arus sirkulasi dapat mengalir pada kedua trafo yang diparalel dan tidak mengalir ke beban dan menyebabkan trafo *overheat* [5]. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Sudarmantoro, Niky, et al. (Alumni Teknik Elektro Universitas Riau, Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau, 2015) dengan judul "Evaluasi Hubungan Paralel Transformator Fakultas Teknik Universitas Riau Pada Kondisi Beban Normal dan Beban Puncak" dengan simulasi menggunakan *software* ETAP 7.0.0 membuktikan bahwa paralel transformator dengan rasio tegangan yang berbeda dapat menyebabkan arus yang tidak seimbang dan dampak dari arus sirkulasi ini memiliki pengaruh yang signifikan apabila memiliki total beban 80% atau lebih dari kapasitas trafo [7].

Dari beberapa acuan penelitian yang dijadikan referensi, pembahasan hanya berfokus terhadap arus sirkulasi yang terjadi, sehingga penulis mengembangkan analisis menggunakan simulasi *software* ETAP 12.6.0 dan membuat rancangan sistem proteksi dengan *software* proteus untuk optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV pada penelitian ini penulis berfokus pada optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV dengan mengurangi dampak perbedaan rasio tegangan dan peningkatan arus. Tujuannya adalah meminimalisir dampak arus sirkulasi yang timbul akibat perbedaan rasio tegangan sebelum menyebabkan gangguan yang meluas dan mencegah risiko gangguan akibat *human error* atau kesalahan manusia dalam melakukan penyesuaian rasio tegangan saat proses pemberian tegangan atau manuver penormalan pada bay trafo (serangkaian peralatan penghubung trafo ke busbar).

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, adapun perumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana cara menganalisis peningkatan arus yang cukup signifikan dan dampaknya akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV?

2. Bagaimana perhitungan arus sirkulasi yang terjadi akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV?
3. Bagaimana pencegahan arus sirkulasi akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV dapat dioptimalkan?

### 1.3 Pembatasan Masalah

Adapun pembatasan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Batasan lingkup penelitian hanya pada operasi paralel transformator 150/20 kV pada Gardu Induk 150 kV dengan perbedaan rasio tegangan yang diakibatkan oleh faktor *human error*.
2. Simulasi yang dirancang hanya menggunakan parameter transformator yang dioperasikan secara paralel tanpa memperhitungkan faktor eksternal seperti cuaca maupun gangguan lainnya.
3. Pengujian dilakukan sebatas menggunakan simulasi *software* proteus untuk simulasi rancangan sistem dengan penambahan rangkaian *interlock* atau pengaman pada PMT di sisi 20 kV dan *software* ETAP 12.6.0 untuk simulasi aliran daya tanpa dilakukan pengujian langsung di lapangan.
4. Relai proteksi yang terkait dengan penelitian ini hanya relai diferensial, tanpa melibatkan relai pengaman lainnya dan sistem proteksi baru yang dirancang berupa penambahan rangkaian *interlock* atau rangkaian pengaman sistem, sensor tegangan, dan monitoring secara *real time*.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui cara menganalisis peningkatan arus yang cukup signifikan dan dampaknya akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV.
2. Mengetahui cara menghitung arus sirkulasi yang terjadi akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV.
3. Mengetahui cara mengoptimalkan pencegahan arus sirkulasi yang timbul akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV.

### 1.5 Dampak Masalah

Adapun dampak potensial dalam permasalahan penelitian ini merujuk pada dampak berikut:

#### 1. Dampak terhadap Sistem

Dampak terhadap sistem merupakan dampak yang dirasakan secara langsung dan mempengaruhi kerja sistem setelah adanya pengoptimalan pencegahan arus sirkulasi yang timbul akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV.

#### 2. Dampak terhadap Finansial

Dampak terhadap finansial merupakan dampak terhadap finansial perusahaan apabila terjadi gangguan yang terjadi akibat *human error* saat melakukan operasi paralel transformator 150/20 kV.

### 1.6 Manfaat Penelitian

Berdasarkan hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

#### 1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk ilmu kelistrikan terkhusus di bidang transmisi tentang optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV dengan mengurangi dampak perbedaan rasio tegangan dan peningkatan arus, dapat menjadi referensi bagi peneliti berikutnya, serta menjadi bukti empiris yang dapat dijadikan literatur dalam bidang kelistrikan terkhusus pada topik operasi paralel transformator 150/20 kV.

#### 2. Manfaat Praktis

##### a. Bagi Perusahaan

Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu perusahaan dalam pengoptimalan pencegahan arus sirkulasi yang timbul akibat faktor *human error* saat proses pemberian tegangan transformator akibat perbedaan rasio tegangan agar transformator tidak *trip* dan menyebabkan gangguan yang meluas.

##### b. Bagi Masyarakat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat lebih menjaga keandalan listrik untuk meminimalisir *drop* tegangan dan mencegah meluasnya gangguan yang dampaknya dapat dirasakan langsung oleh masyarakat.

### **1.7 Sistematika Penulisan**

Memberikan gambaran secara garis besar mengenai isi dari masing-masing bab dari laporan ini. Sistematika penulisan dalam pembuatan laporan ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB I: PENDAHULUAN**

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

#### **BAB II: TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI**

Bab ini berisikan jurnal dan penelitian terdahulu yang memiliki permasalahan ataupun metode untuk digunakan sebagai acuan pada penelitian yang akan dilakukan. Selain itu, pada bab ini memuat dasar-dasar teori yang digunakan untuk menunjang pembahasan yang akan dilakukan.

#### **BAB III: METODE PENELITIAN**

Bab ini mendeskripsikan tentang metode penelitian yang digunakan, tahapan penelitian, teknik pengumpulan data, skenario penelitian, proses manuver penormalan, sistem model penelitian, teknik analisis data, alat dan bahan, tahapan realisasi pembuatan simulasi, dan tahapan pengujian simulasi.

#### **BAB IV: HASIL DAN ANALISA**

Bab ini berisikan tentang cara menganalisis peningkatan arus dan dampaknya akibat perbedaan rasio tegangan pada operasi paralel transformator 150/20 kV, perhitungan arus sirkulasi, dan pengoptimalan pencegahan timbulnya arus sirkulasi.

#### **BAB V: PENUTUP**

Bab ini mendeskripsikan kesimpulan dari tugas akhir yang dapat dijadikan bahan pertimbangan dan rekomendasi berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penyusunan penelitian ini, penulis menggunakan penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi dan gambaran dalam melakukan penelitian selanjutnya. Berikut merupakan beberapa referensi yang menjadi acuan penulis:

Setijasa, Hery, et al. (Staf Pengajar Teknik Elektro Politeknik Negeri Semarang, 2023), *Kerja Paralel Transformator Daya*. Jurnal tersebut menyatakan bahwa, transformator merupakan salah satu komponen penting dalam penyaluran energi listrik ke konsumen dan untuk menjaga keandalan, serta kestabilan penyaluran listrik diperlukan metode paralel transformator untuk meningkatkan kapasitas transformator dan mencegah terjadinya kelebihan beban (*overload*). Syarat keberhasilan paralel transformator harus memperhatikan perbandingan belitan, polaritas kutub belitan, impedansi belitan, tegangan kerja per fasa, frekuensi, dan urutan fasanya harus sama. Dalam melakukan paralel trafo konfigurasi hubungan belitan trafo harus memiliki posisi vektor grup yang sama, apabila terdapat perbedaan maka dapat mempengaruhi proses paralel trafo 3 fasa [4].

Nugraha, Dimas Aji, et al. (PT PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan, 2021), *Kajian Pengaruh Paralel IBT 500 kV UIT JBM*. Laporan kajian ini menjelaskan mengenai pengaruh paralel IBT 500 kV di UIT JBM dengan menggunakan simulasi dan analisa pemodelan sistem dengan *software* Digsilent dan ATP untuk mendapatkan perkiraan arus hubung singkat, pembagian pembebanan, dan arus sirkulasi untuk masing-masing skenario yang diamati. Hasil penelitian menunjukkan arus sirkulasi muncul akibat adanya perbedaan rasio tegangan antara IBT-IBT yang diparalelkan. Semakin besar deviasi rasionya, semakin tinggi arus sirkulasinya. Dampak arus sirkulasi dapat menambah stres termal pada IBT dan menurunkan umur peralatan [6].

Andriansyah, Rizko, et al. (Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2020), *Analisis Operasi Paralel Transformator Unit Gardu Bergerak Beda Jam Trafo di Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan*

*Semarang*. Jurnal tersebut menjelaskan persyaratan paralel transformator terkait rasio tegangan yang apabila masi masuk dalam batas toleransi dapat dilakukan operasi parallel. Apabila perbedaan rasio tegangannya cukup jauh maka dapat menyebabkan perbedaan induksi pada belitan sekunder kedua trafo yang menyebabkan arus sirkulasi saat trafo diparalel walaupun belum diberi beban. Pada penelitian ini meggunakan metode observasi tanpa padam. Hasil penelitian menunjukkan apabila dua transformator yang diparalel dengan impedansi dan rating kVA yang sama, tetapi memiliki perbedaan rasio dengan salah satu transformator memiliki perbedaan *tapping* tegangan, apabila trafo diberi beban penuh, maka arus sirkulasi dapat mengalir pada kedua trafo yang diparalel dan tidak mengalir ke beban. Akibat yang ditimbulkan yaitu trafo yang diparalel *overheat* [5].

Sudarmantoro, Niky, et al. (Alumni Teknik Elektro Universitas Riau, Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau, 2015) *Evaluasi Hubungan Paralel Transformator Fakultas Teknik Universitas Riau Pada Kondisi Beban Normal dan Beban Puncak*. Jurnal tersebut membahas tentang hasil evaluasi terhadap hubungan paralel pada transformator distribusi menggunakan metode simulasi ETAP 7.0.0. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan paralel transformator dengan rasio tegangan yang berbeda dapat menyebabkan arus yang tidak seimbang di mana faktor kelelahan transformator karena dialiri arus yang cukup besar mengakibatkan menurunnya *lifetime* transformator. Dampak dari arus sirkulasi ini memiliki pengaruh yang signifikan apabila memiliki total beban 80% atau lebih dari kapasitas trafo [7].

Pujianto, et al. (Politeknik Energi dan Mineral Akamigas (PEM Akamigas), Cepu) *Analisis Aliran Beban pada Sistem Tenaga Listrik di PT XYZ*. Jurnal tersebut membahas mengenai rencana pemindahan Generator D3512B2 untuk area X dengan solusi yang diambil menggunakan cara penyambungan jalur 20 kV dari PLN yang disimulasikan melalui *software* ETAP. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan terdapat 3 unit trafo (KW-03 2, KW-03 3 dan Timur Jauh) mengalami *overload* melebihi 50% dari kapasitas trafo, beberapa *bus load* mengalami *over voltage* diakibatkan pengaturan *tapping* trafo yang tidak sesuai dan pada SDP Gunung Picis mengalami *under voltage* diakibatkan beban dan jarak kabel sehingga mengakibatkan tegangan jatuh dapat ditindaklanjuti dengan pemasangan

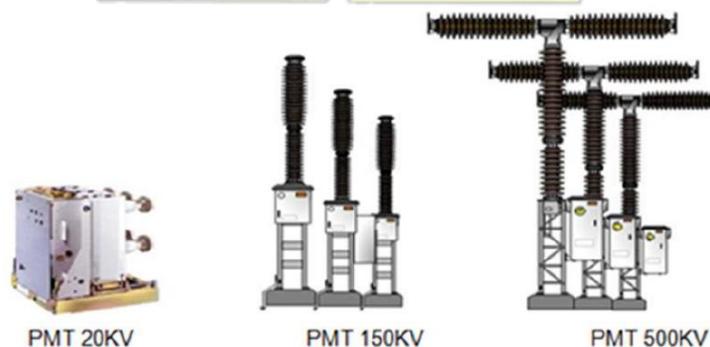
transformator 125 kVA yang sesuai. Gangguan *overload* terbesar terjadi pada trafo SP-05 yang mencapai 96%, hampir mendekati kapasitas maksimum trafo, hal ini disebabkan pengaturan *tapping* yang berbeda disaat trafo dihubung paralel [8].

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Pemutus Tenaga (PMT)

*Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) berdasarkan IEV (*International Electrotechnical Vocabulary*) 441-14-20 yaitu peralatan saklar mekanis, yang berfungsi menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal, serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam kondisi abnormal atau gangguan termasuk hubung singkat[9]. Pada gardu induk memiliki beberapa variasi tegangan begitu pula jenis peralatannya termasuk PMT. Berikut merupakan klasifikasi dari PMT berdasarkan kelas tegangannya[9].

1. PMT tegangan rendah (*Low Voltage*) : Range tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3).
2. PMT tegangan menengah (*Medium Voltage*): Range tegangan 1 s/d 35 kV (SPLN 1.1995 – 3.4).
3. PMT tegangan tinggi (*High Voltage*) : Range tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995 – 3.5).
4. PMT tegangan ekstra tinggi (*Extra High Voltage*): Range tegangan lebih besar dari 245 kVAC (SPLN 1.1995 – 3.6).

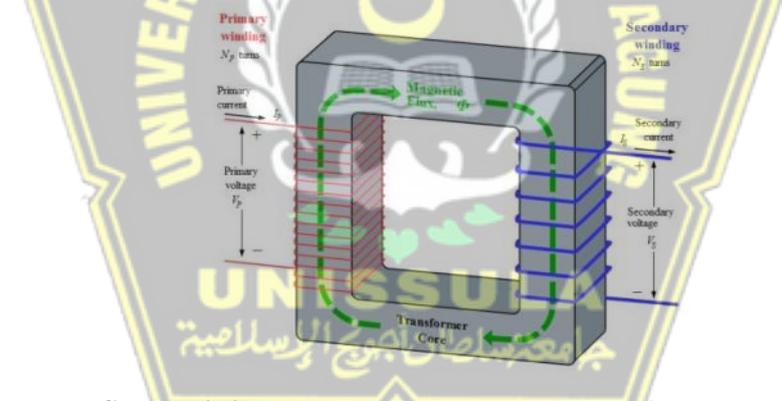


**Gambar 2. 1** Jenis Pemutus Tenaga (PMT) Berdasarkan Kelas Tegangan [9]

## 2.2.2 Transformator Tenaga

### 1. Pengertian dan Prinsip Kerja

Trafo tenaga merupakan peralatan statis dengan rangkaian magnetik dan terdiri dari dua atau lebih belitan. Trafo bekerja secara induksi elektromagnetik dengan mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011). Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi. Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan flux magnet yang mengalir melalui inti besi, selanjutnya flux magnet menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial / tegangan induksi. Gambaran kerja belitan trafo dapat ditunjukkan pada gambar 2.2 [3].



Gambar 2. 2 Prinsip Kerja Elektromagnetik Transformator [3]

### 2. Komponen Transformator



Gambar 2. 3 Transformator Tenaga [Dokumen Pribadi]

Suatu transformator tenaga terdiri atas beberapa komponen dalam operasinya yang tiap komponennya memiliki fungsi masing-masing. Berikut merupakan komponen-komponen transformator dan fungsinya [3].

a. Inti Besi

Inti besi atau *electromagnetic circuit* merupakan komponen yang terdiri dari lempengan besi pipih sebagai isolator untuk mengurangi *eddy current* yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet. Arus tersebut dapat mengakibatkan rugi - rugi (*losses*). Inti besi juga berfungsi untuk memudahkan jalan fluksi magnetik yang timbul akibat arus listrik melalui kumparan [3].

b. Kumparan Trafo

Kumparan trafo merupakan komponen berbentuk batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi. Saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan *flux* magnetik. Kumparan trafo terdiri dari kumparan primer dan juga kumparan sekunder [3].

c. Minyak trafo

Minyak trafo merupakan komponen berbahan isolasi cair yang berfungsi untuk pendingin, insulator, dan pelindung komponen di dalam trafo. Minyak trafo ini memiliki senyawa hidrokarbon di dalamnya yang antara lain hidrokarbon aromatik, naftenik dan juga parafinik [3].

d. Bushing

Bushing trafo merupakan komponen penghubung antara kumparan trafo dengan jaringan luar, juga sebagai pemisah antara konduktor dengan *main tank* trafo. Pada bushing terdapat fasilitas untuk menguji kondisi bushing yang disebut *center tap* [3].

e. Tangki konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak serta uap akibat dari pemanasan trafo. Konservator dilengkapi proteksi rele mekanik yaitu rele bucholz dan pada saluran pelepasan terdapat tabung *silica gel* untuk penyaring minyak dan penyaring kelembaban. Konservator juga dilengkapi indikator level minyak untuk melihat level minyak.

f. *Tap changer*

*Tap changer* merupakan alat yang dirancang sebagai pengatur tegangan agar tegangan selalu dalam kondisi yang baik, stabil dan berkelanjutan. *Tap changer* berkerja dengan mengubah rasio perbandingan belitan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder akibat adanya perubahan tegangan pada sisi primer. Tegangan *output* dapat dikendalikan dengan pemasangan tapping pada sisi primer transformator. Prinsip pengaturan tegangan sekunder berdasarkan perubahan jumlah belitan dapat dilihat pada rumus berikut [3].

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \quad (1)$$

Di mana  $V_1$  dan  $N_1$  merupakan tegangan dan jumlah belitan primer, sedangkan  $V_2$  dan  $N_2$  merupakan tegangan dan jumlah belitan sekunder.

g. *Dehydrating Breather*

*Dehydrating Breather* merupakan alat pernapasan transformator. Perubahan besar beban transformator dan perubahan suhu udara sekitar, mengakibatkan suhu minyak berubah ubah mengikuti perubahan tersebut. Kenaikan suhu minyak akan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki dan penurunan suhu minyak mendorong udara masuk. Kondisi ini merupakan proses pernapasan transformator. Udara yang lembab dapat menurunkan nilai tegangan tembus minyak, maka transformator dilengkapi dengan alat pernapasan yang berupa tabung berisi zat *hygroskopis*, seperti kristal *silica gel* [3].

h. Indikator

Indikator bertujuan untuk mengetahui kondisi baik permukaan minyak maupun suhu yang ada di trafo untuk memudahkan petugas dalam melakukan inspeksi visual. Pada trafo terdapat beberapa indikator seperti indikator level minyak, indikator suhu, dan indikator lainnya [3].

i. Peralatan Proteksi

Pada transformator dilengkapi proteksi mekanik atau proteksi internal trafo yang meliputi rele bucholz, rele jansen, rele sudden pressure, dan rele termal [3].

j. Alat tambahan

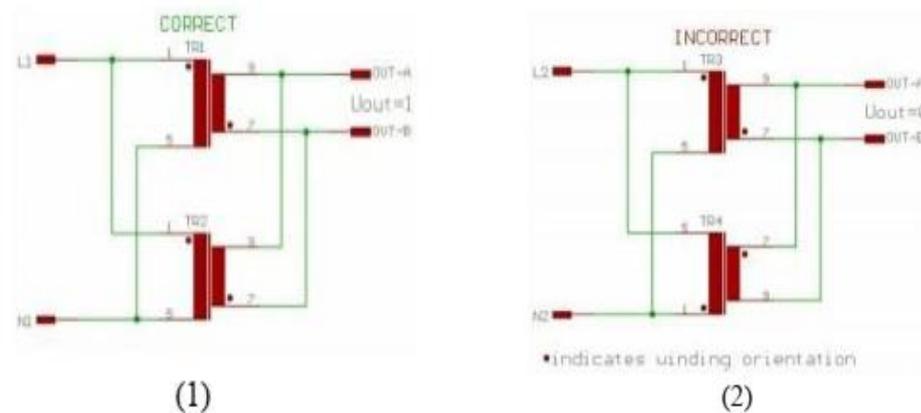
Alat tambahan pada transformator dapat berupa alat pemadam kebakaran yang dapat digunakan pada keadaan-keadaan darurat, alat ini biasanya disebut dengan sergi [3].

**3. Syarat Kerja Paralel Transformator**

Dalam melaksanakan operasi paralel transformator, terdapat beberapa persyaratan yang perlu diperhatikan dan dipenuhi antara lain:

a. Polaritas transformator harus sama

Untuk menentukan polaritas sudah sesuai maka dapat dengan melihat arah lilitan kumparan transformator sehingga dapat diketahui arah tegangan induksi yang dibangkitkan serta polaritas transformator tersebut. Penentuan polaritas kutub belitan dapat diketahui dengan melakukan pengujian polaritas. Saat melakukan paralel transformator polaritasnya harus benar dan sesuai agar saat trafo diparalel tidak menjadi beban [4].



**Gambar 2. 4** Polaritas Trafo yang Benar (1) dan Polaritas Trafo yang Salah (2) [4]

b. Tegangan harus sama

Dalam melakukan paralel transformator perlu memperhatikan syarat operasi paralelnya yang mana parameter rasio trafo, persen impedansi dan rasio perbandingan X/R pada trafo yang diparalel adalah sama. Apabila salah satu parameter tidak terpenuhi maka dapat menimbulkan arus sirkulasi antar trafo dan pembagian pembebanan trafo tidak sesuai dengan tujuan awal. Hal tersebut dapat menurunkan efisiensi trafo serta menurunkan kemampuan trafo dalam menyuplai beban. Berikut merupakan dampak dari paralel trafo apabila satu parameternya tidak sama [4].

- Dapat menyebabkan trafo mengalami kelebihan beban (*overload*).
- Arus sirkulasi antar trafo meningkat 10% dari arus pada saat kapasitas penuh.
- Gabungan antara arus sirkulasi trafo yang diparalel, serta arus saat beban penuh akan melebihi kapasitas arus saat beban penuh pada masing-masing trafo yang diparalel.

c. Urutan fasa harus sama

Urutan fasa harus sama artinya arah putaran (*phase sequence*) transformator yang diparalel harus sama. Transformator yang diparalel dengan kelompok vektor grup berbeda masih dapat dihubungkan paralel, dengan catatan perbedaan potensial atau tegangan antara terminal sekunder antar transformator sangat kecil (mendekati nol).

Untuk mendapatkan selisih tegangan yang sangat kecil antara terminal sekunder kedua transformator, tegangan sekunder transformator yang akan diparalel harus sama dan sefasa. Urutan fasa dapat dilihat dari sudut fasa yang sama sehingga dapat menghasilkan tegangan yang sefasa [4].

d. Frekuensi kerja harus sama

Syarat lain untuk memparalel transformator yakni frekuensi kerja harus sama. Agar kerja operasi paralel trafo dapat berjalan dengan baik wajib memperhatikan standar yang telah ditetapkan [4]. Frekuensi kerja harus berada pada batas yang ditentukan yaitu  $\pm 1\%$  dari frekuensi standar yang ada di Indonesia, standarnya yaitu 50 Hz. Frekuensi kerja ini memiliki pengaruh dalam menjaga kestabilan sistem [10].

#### 4. Gangguan pada Transformator

Secara umum jenis gangguan pada transformator berdasarkan penyebabnya sama dengan gangguan pada sistem tenaga, gangguan tersebut dapat disebabkan karena faktor-faktor berikut [11].

a. Gangguan yang berasal dari sistem (*System Fault*)

Gangguan yang berasal dari sistem terdapat dua jenis yaitu [11]:

- *System Fault Active* yaitu gangguan yang disebabkan oleh petir, CT/CVT meledak, *crane*, kegagalan isolasi, gangguan peralatan, dan sebagainya.
- *System Fault Passive* yaitu gangguan yang disebabkan oleh *over/under frequenc*, *overvoltage*, *overloading*, dan *power swing*.

b. Gangguan yang berasal dari luar sistem (*Non System Fault*)

Gangguan yang berasal dari luar sistem dapat disebabkan karena beberapa hal antara lain karena kegagalan sistem proteksi (relai mal operasi, *CB low pressure*, teleproteksi mal operasi, dan gangguan *DC ground*), pengaruh lingkungan, binatang, benda asing, dan *human error* [11].

## 5. Relai Proteksi pada Transformator

Transformator dilindungi oleh proteksi elektrik yang berfungsi untuk melindungi transformator dari gangguan hubung singkat baik internal maupun eksternal. Proteksi elektrik pada transformator terdiri dari beberapa jenis relai antara lain:

### a. Relai Diferensial

Relai diferensial adalah relai yang beroperasi ketika mendeteksi perbedaan fasor atau nilai sesaat antara arus masuk dan arus keluar. Perbandingan ini dilakukan pada arus belitan primer, sekunder, atau tersier (jika dibebani). Prinsip kerjanya didasarkan pada Hukum Kirchhoff I, yang menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk ke suatu titik percabangan sama dengan jumlah arus yang keluar [12].

$$I_{diff} = I_{hv} + I_{lv} \quad (2)$$

Keterangan :

$I_{diff}$  : arus diferensial (Amp)

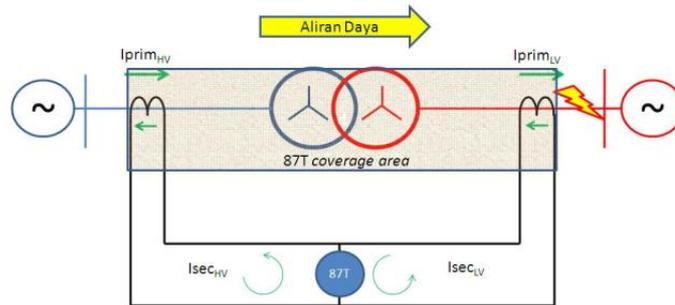
$I_{hv}$  : arus sisi tegangan tinggi transformator (Amp)

$I_{lv}$  : arus sisi tegangan rendah transformator (Amp)

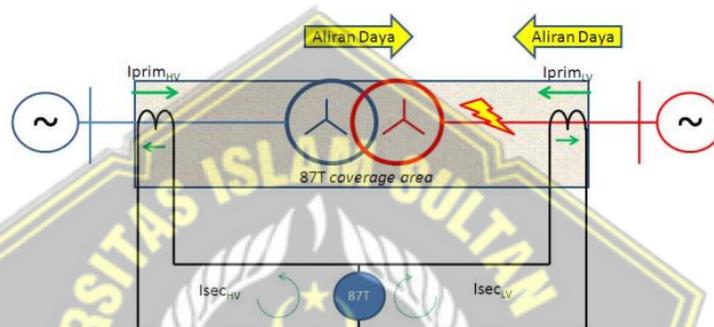
Berikut merupakan gambar dari prinsip kerja relai diferensial [12].



**Gambar 2. 5** Kondisi Tanpa Gangguan [12]



**Gambar 2. 6** Kondisi Gangguan di Luar [12]



**Gambar 2. 7** Kondisi Gangguan di Dalam [12]

Pada prinsip kerja relai diferensial jika gangguan terjadi di luar zona proteksi, maka jumlah arus pada titik percabangan adalah nol. Namun, ketika gangguan terjadi di dalam zona proteksi, arus masuk tidak lagi sama dengan arus keluar ( $I_{HV} \neq I_{LV}$ ), sehingga muncul arus diferensial di titik percabangan. Jika arus diferensial tersebut mencapai nilai setelan (*pickup*), maka relai akan aktif [12].

Pengaplikasian relai diferensial perlu memperhatikan hal-hal berikut [12].

- Pemilihan lokasi *Current Transformer* (CT) yang meliputi CT diameter, CT bushing, dan CT bay.
- Pemilihan CT dengan memperhatikan faktor koreksi rasio, faktor koreksi sudut fasa, dan faktor kompensasi arus urutan nol. Pada relai numerik, faktor-faktor tersebut sudah dikalkulasi oleh internal relai.
- Faktor kesalahan pengatur pengubah sadapan berbeban (OLTC) di mana pada kondisi transformator dan sistem proteksi normal relai

diferensial harus stabil saat terjadi *Inrush current* (Arus lonjakan awal saat trafo diberi beban), arus gangguan yang terjadi di luar zona proteksi, *Overfluxing* (Flux magnetik melebihi batas normal) pada transformator, dan perubahan tap saat berbeban.

b. Relai *Restricted Earth Fault* (REF)

Relai REF berfungsi untuk melindungi transformator dari gangguan fasa ke tanah yang terjadi di sekitar titik netral transformator. Relai ini dipasang pada transformator dengan desain vektor grup YNyn yang memiliki pentanahan. Area proteksi REF mencakup bagian yang tidak dapat dijangkau oleh relai diferensial [12]. Besarnya arus gangguan fasa ke tanah dipengaruhi oleh nilai tahanan yang digunakan pada pentanahan titik netral [12]. Berikut merupakan jenis-jenis REF [12].

1) REF *High Impedance*

Dalam penerapan jenis relai ini, beberapa hal yang perlu diperhatikan meliputi:

- Kapasitas pembebanan CT (*burden* CT)
- Impedansi total rangkaian, termasuk impedansi CT, impedansi pengawatan, dan impedansi relai
- Tingkat kejenuhan CT
- Arus magnetisasi CT
- Nilai tahanan geser
- Tegangan maksimum yang dapat terjadi pada terminal relai (persyaratan metrosil)
- Lokasi penempatan CT untuk memastikan cakupan area proteksi

2) REF *Low Impedance*

Aspek utama yang perlu diperhatikan pada jenis ini adalah sensitivitas dan kemiringan kurva proteksi (*slope*).

c. Relai Arus Lebih/ *Over Current Relay* (OCR) dan Relai Gangguan ke Tanah/ *Ground Fault Relay* (GFR)

Relai arus lebih atau *Over Current Relay* (OCR) pada transformator adalah jenis tidak berarah (*non-directional*), yang berarti relai ini dapat berfungsi pada gangguan baik di dalam maupun di luar transformator. Relai ini dipasang pada kedua sisi transformator, sehingga penyetelan arus dan waktu kerja harus diperhatikan dengan cermat. Saat melakukan penyetelan OCR pada transformator, pengaturan arus kerja (*pickup*) harus lebih tinggi dari kapasitas transformator untuk menjaga operasional, namun dalam kondisi tertentu, setelan arus kerja bisa lebih rendah. Setelan OCR *highset* berfungsi untuk mengatasi arus gangguan yang sangat besar dengan waktu kerja yang cepat untuk memutuskan gangguan tersebut [12].

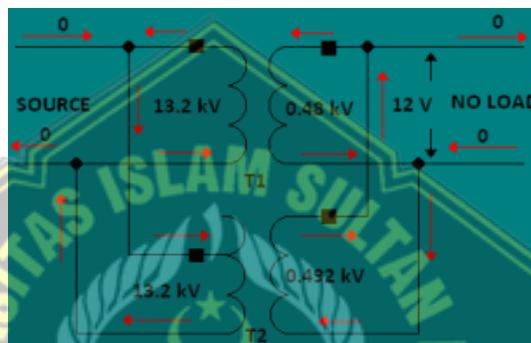
Sedangkan Relai Gangguan ke Tanah/ *Ground Fault Relay* (GFR) memiliki prinsip kerja mirip dengan relai arus lebih, yaitu mendeteksi arus urutan nol yang sangat kecil pada gangguan ke tanah. *Setting* GFR sangat dipengaruhi oleh kombinasi belitan transformator. Elemen *highset* relai ini diblokir, kecuali pada sistem pentanahan langsung (*solid*). Karena relai gangguan ke tanah dipasang di beberapa titik pengamanan, seperti sisi primer, sekunder, NGR, dan penyulang (*outgoing feeder*), penyetelan relai harus dikoordinasikan [12].

d. Relai *Standby Earth Fault* (SBEF)

Relai *Standby Earth Fault* (SBEF) adalah relai yang berfungsi untuk melindungi NGR dari kerusakan akibat panas, yang terjadi karena arus hubung singkat atau arus urutan nol yang mengalir secara terus-menerus ke titik netral transformator. Prinsip kerjanya mirip dengan relai gangguan ke tanah (GFR/RGT) dan dipasang pada sistem pentanahan yang bukan langsung atau menggunakan NGR (*Neutral Grounding Resistor*). Karena nilai resistansi pentanahan titik netral bervariasi, *setting* relai harus mempertimbangkan nilai nominal dan ketahanan termis dari resistansi tersebut. Oleh karena itu, karakteristik waktu relai ini sangat penting, dengan kurva waktu kerja yang bersifat *long time inverse* [12].

**2.2.3 Arus Sirkulasi**

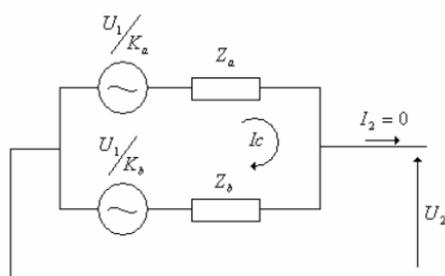
Arus sirkulasi (*circulating current*) adalah arus yang mengalir pada saat transformator tidak diberi beban, sedangkan arus beban penuh (*full load current*) merupakan arus yang mengalir pada saat transformator terhubung ke beban (*load*) [5]. Arus sirkulasi dapat muncul pada saat transformator yang diparalel memiliki impedansi dan rating kVA sama, namun posisi *tapping* tegangannya berbeda sehingga rasio tegangannya berbeda, kondisi tersebut dapat menimbulkan arus sirkulasi pada masing-masing transformator seperti gambar 2.8 [5].



**Gambar 2. 8** Arus Sirkulasi pada Paralel Trafo Beban Nol [5]

Adanya perbedaan tegangan pada sisi sekunder transformator menyebabkan mengalirnya arus sirkulasi dari trafo dengan rasio tegangan yang lebih kecil ( $K_a$ ) ke transformator dengan rasio tegangan ( $K_b$ ) yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 [6]. Arus sirkulasi nilainya maksimal saat keadaan tidak berbeban dan digolongkan sebagai rugi-rugi [6]. Arus sirkulasi karena deviasi rasio tegangan berpengaruh terhadap persentase deviasi pembebanan yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [6].

$$\%Deviasi\ Pembebanan = \frac{Beban\ Trafo\ Max - Beban\ Trafo\ Min}{Total\ Beban\ Trafo} \times 100\% \quad (3)$$



**Gambar 2. 9** Rangkaian Pengganti Operasi Paralel Trafo Tenaga [6]

Pada operasi paralel transformator, transformator dengan rasio tegangan yang besar tegangan sekundernya kecil, sementara transformator dengan rasio tegangan yang kecil tegangan sekundernya lebih besar. Arus sirkulasi pada paralel dua trafo dapat dihitung dengan persamaan berikut [6].

$$I_c = \frac{\frac{U_1}{K_a} - \frac{U_1}{K_b}}{Z_a + Z_b} \quad (4)$$

Di mana U adalah tegangan primer dari trafo dalam kV, K adalah rasio tegangan pada tap operasi dan Z adalah impedansi hubung singkat dari transformer dalam %[6]. Untuk menghitung impedansi sesuai dengan posisi tap trafo yang di paralel dapat dihitung menggunakan metode pendekatan interpolasi linier karena tidak ada data nonlinier tambahan Berikut merupakan rumus interpolasi linier [6].

$$Z_x = Z_a + \left( \frac{Z_b - Z_a}{T_b - T_a} \right) \times (T_x - T_a) \quad (5)$$

Keterangan:

$Z_x$  : Impedansi pada tap yang dicari

$Z_a, Z_b$  : Impedansi yang diketahui pada tap terdekat

$T_a, T_b$  : Nomor tap yang diketahui

$T_x$  : Nomor tap yang dihitung

Setelah mencari impedansi pada posisi tap yang dituju, impedansi dan tegangan dapat diubah ke dalam satuan pu seperti persamaan berikut.

$$pu \text{ (per unit)} = \frac{\text{nilai persentase}}{100} \quad (6)$$

$$pu \text{ (per unit)} = \frac{V_{aktual}}{V_{base}} \quad (7)$$

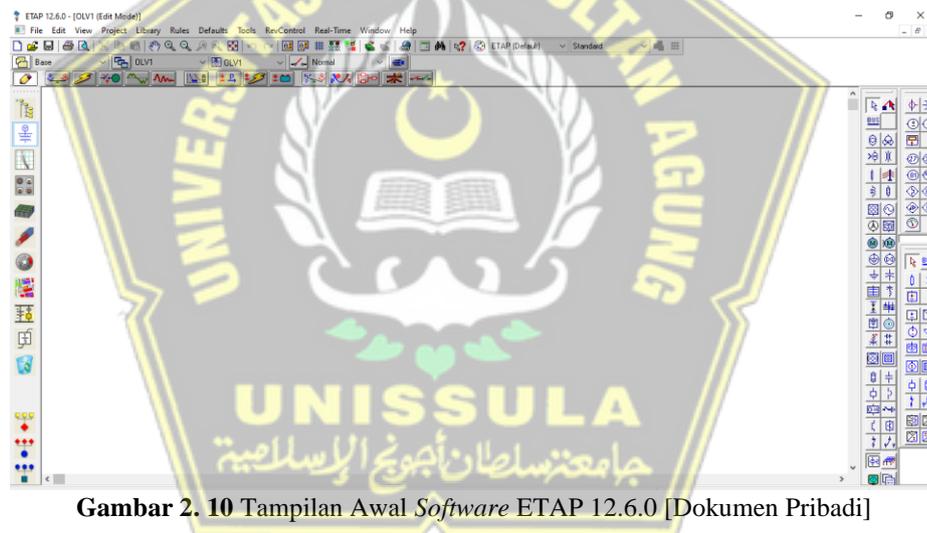
Arus sirkulasi yang timbul terpisah dari beban. Jika transformator diberi beban penuh, maka arus sirkulasi yang mengalir akan menimbulkan kenaikan temperatur pada setiap transformator yang diparalel, karena arus sirkulasi tersebut tidak dapat mengalir ke beban, hanya bersirkulasi di antara transformator yang diparalel [5].

#### 2.2.4 Software ETAP 12.6.0

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) adalah perangkat lunak yang mendukung operasi sistem tenaga listrik. Aplikasi ini dapat berfungsi dalam mode *offline* untuk simulasi sistem tenaga listrik, maupun dalam mode *online* untuk

pengelolaan data secara real time. ETAP 12.6.0 memiliki fitur-fitur yang dapat digunakan untuk menganalisis pembangkitan, transmisi, dan distribusi tenaga listrik. ETAP 12.6.0 memungkinkan pembuatan proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*) serta jalur sistem pentanahan untuk berbagai jenis analisis. Berikut merupakan analisis yang dapat dilakukan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 [13].

1. Aliran daya
2. Hubung singkat
3. *Starting* motor
4. *Trancient stability*
5. Koordinasi relai proteksi
6. Sistem harmonisasi.



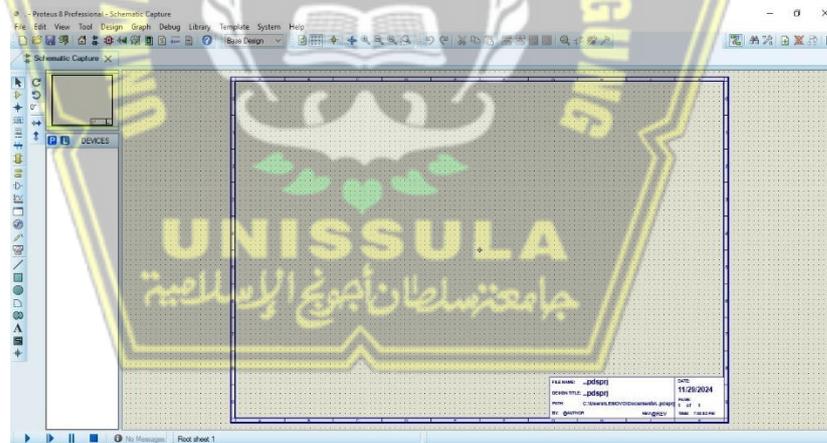
**Gambar 2. 10** Tampilan Awal *Software* ETAP 12.6.0 [Dokumen Pribadi]

### 2.2.5 *Software* Proteus

Proteus adalah perangkat lunak untuk merancang PCB yang dilengkapi dengan kemampuan simulasi PSPICE pada level skematik. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk menguji kesesuaian desain sebelum memprosesnya ke tahap pencetakan PCB. Proteus mengintegrasikan dua program utama yaitu ISIS yang digunakan untuk membuat desain skematik rangkaian dan ARES yang berfungsi untuk membuat layout PCB berdasarkan skematik tersebut. *Software* ini cocok untuk merancang rangkaian berbasis mikrokontroler dan belajar elektronika, mulai dari konsep dasar hingga aplikasi mikrokontroler. Proteus juga menyediakan

berbagai contoh aplikasi desain yang dapat membantu pengguna mempelajari dan memahami fitur-fiturnya. Berikut merupakan fitur-fitur dari *software* proteus [14].

1. Simulasi Rancangan: Mendukung simulasi digital, analog, maupun gabungan keduanya.
2. Dukungan Mikrokontroler: Memungkinkan simulasi berbagai mikrokontroler seperti PIC dan seri 8051.
3. Model Peripheral Interaktif: Termasuk LED, tampilan LCD, RS232, dan berbagai pustaka lainnya.
4. Instrumentasi Virtual: Menyediakan alat virtual seperti voltmeter, ammeter, osiloskop, dan logic analyzer.
5. Analisis Grafis: Menyediakan analisis seperti transient, frekuensi, noise, distorsi, AC, dan DC.
6. Komponen Analog: Mendukung berbagai jenis komponen analog.
7. Arsitektur Terbuka: Memungkinkan integrasi program, seperti C++, untuk kebutuhan simulasi.



**Gambar 2. 11** Tampilan Awal *Software* Proteus [Dokumen Pribadi]

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Pendahuluan**

Bagian ini mengenalkan metode penelitian yang digunakan penulis. Skripsi ini mengimplementasikan metode penelitian gabungan dari kuantitatif dan kualitatif dalam optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV dengan mengurangi dampak perbedaan rasio tegangan dan peningkatan arus, yang terdiri dari serangkaian tahapan yaitu studi literatur, observasi, pengumpulan data, analisa data, perancangan sistem, simulasi, dan evaluasi.

#### **3.2 Deskripsi Metode Penelitian Gabungan**

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode penelitian gabungan dari kuantitatif dan kualitatif yang merupakan metode penelitian dengan mengkombinasikan hasil observasi untuk mendapatkan data yang akan dianalisa dan dibuat sebuah rancangan simulasi untuk menghasilkan suatu kesimpulan berdasarkan data-data, perhitungan, dan analisis yang dilakukan penulis. Alasan pemilihan model penelitian gabungan adalah karena proses pengambilan data dilakukan secara langsung sehingga penulis mendapatkan pemahaman tentang penelitian dan memiliki fleksibilitas dalam melakukan penelitian, serta penulis juga merancang simulasi dan melakukan analisis menggunakan *software* terkait setelah data terkumpul.

#### **3.3 Tahapan Penelitian**

Berikut merupakan tahapan penelitian yang dilakukan penulis dalam pembuatan tugas akhir:

1. Studi Literatur

Penulis mengumpulkan informasi dari jurnal, laporan tugas akhir, buku, *e-book*, tulisan bebas baik dari artikel maupun dari internet yang berhubungan dengan penelitian maupun simulasi yang akan dilakukan.

2. Observasi

Tahapan observasi yaitu dengan melakukan pengamatan *single line diagram* pada bay trafo dan melakukan wawancara kepada petugas jergi maupun tim pemeliharaan terkait.

### 3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data yaitu dengan mengumpulkan *datasheet* baik spesifikasi, data pembebanan, data *setting* maupun data terkait lainnya.

### 4. Analisis Data

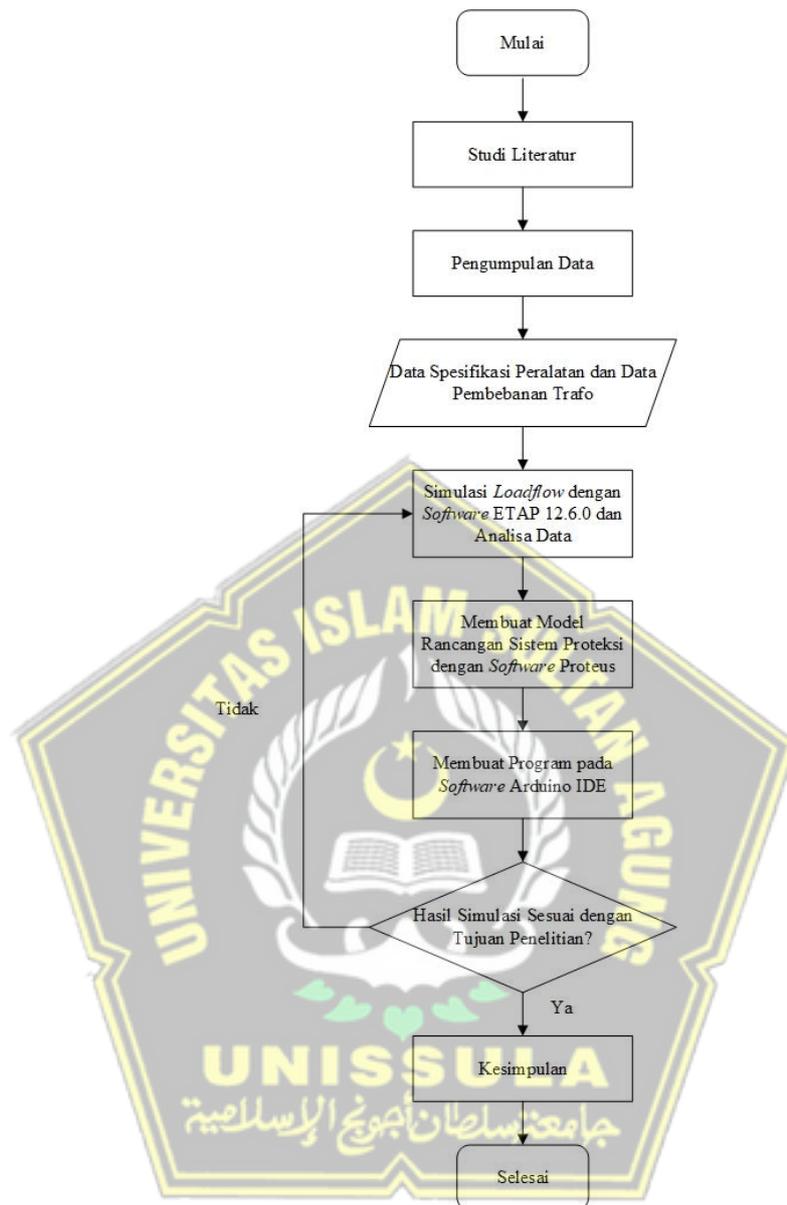
Melakukan analisis data dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 untuk simulasi aliran daya dan sebagai sumber untuk acuan perhitungan arus sirkulasi yang timbul akibat perbedaan rasio tegangan pada transformator.

### 5. Perancangan Sistem Proteksi

Perancangan sistem proteksi untuk pengoptimalan pencegahan timbulnya arus sirkulasi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Membuat pemodelan sistem dengan menggunakan *software* proteus untuk membuat model rancangan sistem proteksi untuk pengoptimalan pencegahan timbulnya arus sirkulasi.
- b. Membuat program pada *software* Arduino IDE untuk menjalankan simulasi pada *software* proteus.
- c. Melakukan simulasi terhadap operasi paralel transformator 150/20 kV dengan rasio tegangan yang berbeda untuk mengetahui respon sistem setelah diterapkan pemodelan sistem.

Berikut merupakan diagram alir dari sistem kerja penelitian ini :



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

## 6. Evaluasi

Evaluasi yang dilakukan dengan pengumpulan kritik dan saran dari pegawai PT PLN (Persero) maupun petugas terkait terhadap efisiensi dan efektivitas optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV dengan mengurangi dampak perbedaan rasio tegangan dan peningkatan arus.

### 3.4 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data mencakup beberapa kegiatan sebagai berikut:

### 1. Studi Literatur

Menganalisis studi serupa dan literatur teknis untuk mengumpulkan informasi tentang metode dan perhitungan yang akan digunakan.

### 2. Observasi

Melakukan pengamatan *single line diagram* pada bay trafo dan melakukan wawancara kepada petugas jergi maupun tim pemeliharaan terkait.

### 3. Pelaksanaan Pengajuan

Waktu dan tempat pelaksanaan penelitian yaitu:

Waktu : 1 November 2024 – 1 Februari 2025

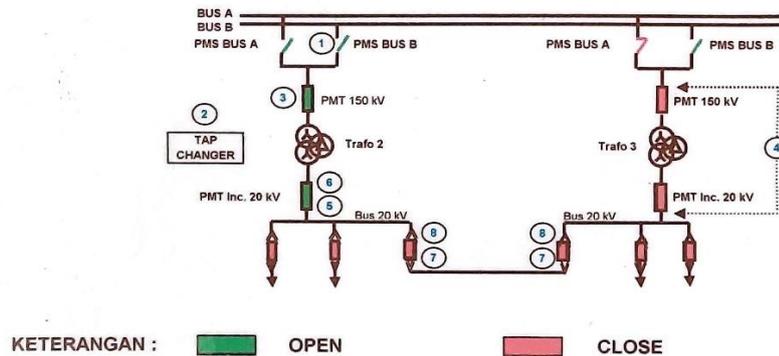
Tempat : PT PLN (Persero) ULTG Jember dan Gardu Induk 150 kV Jember

### 3.5 Skenario Penelitian

Pada penelitian ini penulis mengambil objek penelitian pada trafo 2 dan trafo 3 Gardu Induk 150 kV Jember yang pada simulasinya trafo 2 selesai dipelihara dengan beban masih terparalel dengan trafo 3 dan trafo 2 akan dinormalkan dengan dua skenario yaitu menggunakan rasio tegangan yang sama dan menggunakan rasio tegangan yang berbeda pada saat penormalan. Berdasarkan prosedur manuver pemberian tegangan atau penormalan beban, kesalahan manusia atau *human error* dapat terjadi pada saat menentukan posisi tap trafo 2 dengan menyamakan rasio tegangan di mana petugas dapat melakukan kesalahan dalam pembacaan parameter operasi dan mengatur posisi *tap changer* trafo maupun petugas melewatkan langkah tersebut dan langsung mengkondisikan PMT *Incoming* 20 kV trafo 2 dalam kondisi ON sehingga menimbulkan gangguan akibat faktor *human error* yang berdampak pada sistem.

### 3.6 Proses Manuver Penormalan atau Pemberian Tegangan

Berikut merupakan prosedur manuver pemberian tegangan atau penormalan beban penyulang trafo 2 dari trafo 3:

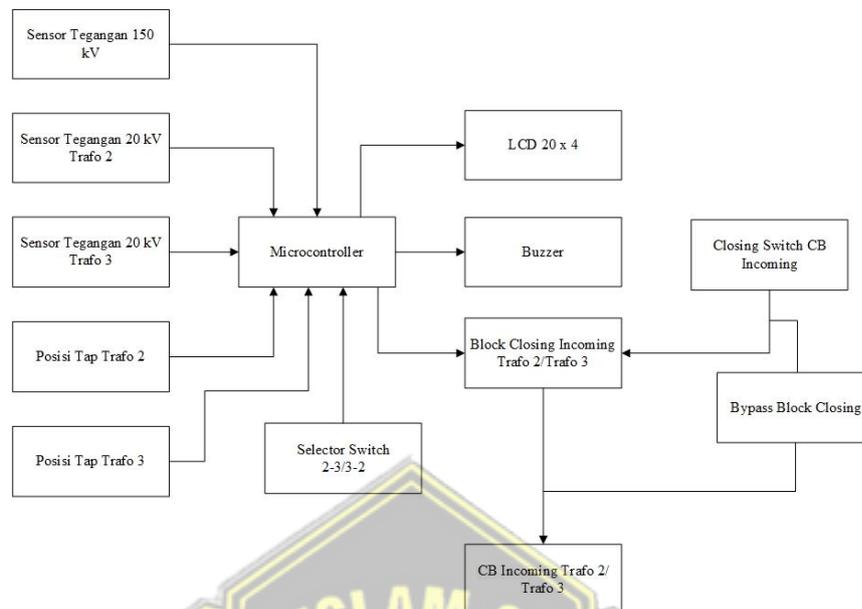


**Gambar 3. 2** Proses Penormalan Beban Penyulang Trafo 2 dari Trafo 3

1. Mengkondisikan PMS Bus B 150 kV Trafo 2 dalam kondisi ON.
2. Menurunkan tap changer maksimal pada posisi tap 3 (untuk menghindari *inrush current*).
3. Mengkondisikan PMT 150 kV Trafo 2 dalam kondisi ON.
4. Menentukan posisi tap trafo 2 dengan cara mencari rasio trafo 3 (Membagi tegangan sisi primer dengan tegangan sisi sekunder), selanjutnya pilih tap trafo 2 dengan rasio yang sama dengan trafo 3 sesuai dengan tabel 3.3.
5. Mengkondisikan PMS 20 kV Trafo 2 dalam kondisi ON.
6. Mengkondisikan PMT *Incoming* 20 kV Trafo 2 dalam kondisi ON.
7. Melepas PMT 20 kV Kopel Trafo 2 dan PMT 20 kV Kopel Trafo 3 sehingga kedua PMT tersebut dalam kondisi OFF.
8. Melepas PMS 20 kV Kopel Trafo 2 dan PMS 20 kV Kopel Trafo 3 sehingga kedua PMS tersebut dalam kondisi OFF.

### 3.7 Sistem Model Penelitian

Berikut merupakan sistem model penelitian yang digunakan penulis sebagai rancangan sistem proteksi untuk pengoptimalan pencegahan arus sirkulasi pada operasi paralel transformator 150/20 kV beda rasio tegangan dalam bentuk diagram blok.



**Gambar 3.3** Diagram Blok Rancangan Sistem Proteksi

Berdasarkan gambar 3.3 dapat diketahui bahwa rancangan ini memiliki *input* berupa sensor tegangan primer 150 kV dan sensor tegangan sekunder 20 kV yang ditarik dari *Potential Transformer* (PT) Bus 150 kV dan 20 kV, posisi tap changer trafo, serta *selector switch* untuk mengetahui trafo yang digunakan untuk *backup* pelimpahan beban. Selanjutnya *input* diproses oleh *microcontroller* dengan menggunakan Arduino Mega 2560. *Output* yang dihasilkan berupa LCD 20x4 yang memuat beberapa informasi antara lain arah kopel atau paralel beban penyulang ke trafo yang dituju, nilai tegangan primer, nilai tegangan sekunder, posisi tap changer, dan nilai rasio tegangan trafo yang diparalel, serta informasi *Circuit Breaker Incoming* (CB Incoming)/PMT Incoming 20 kV. Apabila PMT Incoming 20 kV aman di *close* (posisi ON) ditandai dengan informasi “BOLEH KOPEL” saat rasio tegangan sudah sama dan PMT Incoming 20 kV tidak boleh *close* ditandai dengan informasi “BLOCK” saat rasio tegangan berbeda. *Output* lainnya yaitu berupa *buzzer* untuk peringatan apabila kondisi rasio tidak sama “BLOCK” dan *Block Closing Incoming* berfungsi untuk memutuskan rangkaian apabila kondisi rasio tidak sama “BLOCK”. Apabila petugas melakukan langkah keenam pada prosedur penormalan dengan menutup *closing switch CB Incoming*, CB Incoming/PMT Incoming 20 kV tidak dapat *close*/tetap OFF karena rasio tegangan berbeda. Selain

itu, pada sistem ini ditambahkan *Switch Bypass Block Closing* sebagai fasilitas untuk pengujian peralatan saat pemeliharaan *CB Incoming*.

### 3.6 Teknik Analisis Data

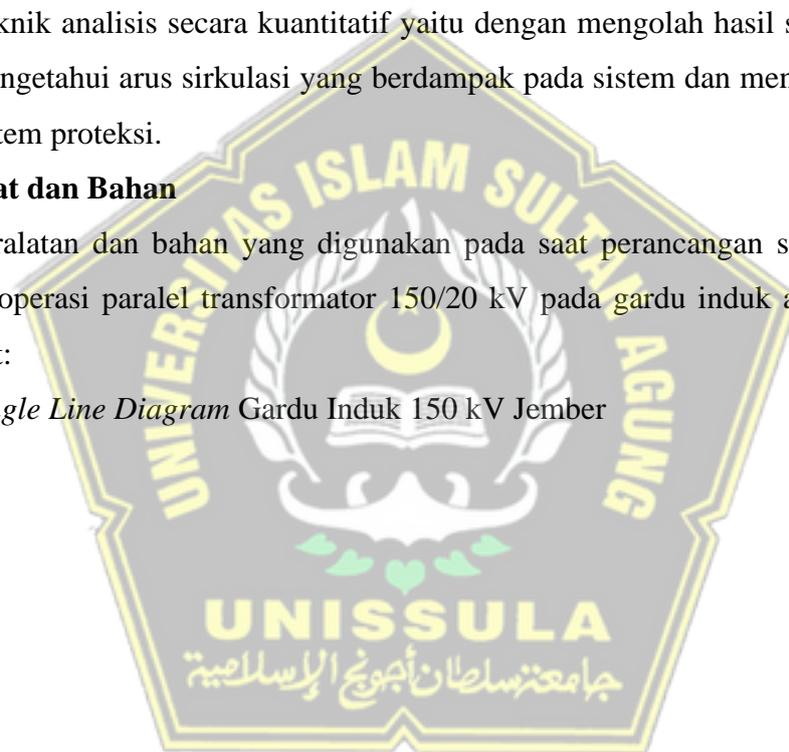
Teknik analisis data menggunakan metode gabungan dengan mengkombinasikan metode kualitatif dan metode kuantitatif dapat diuraikan sebagai berikut:

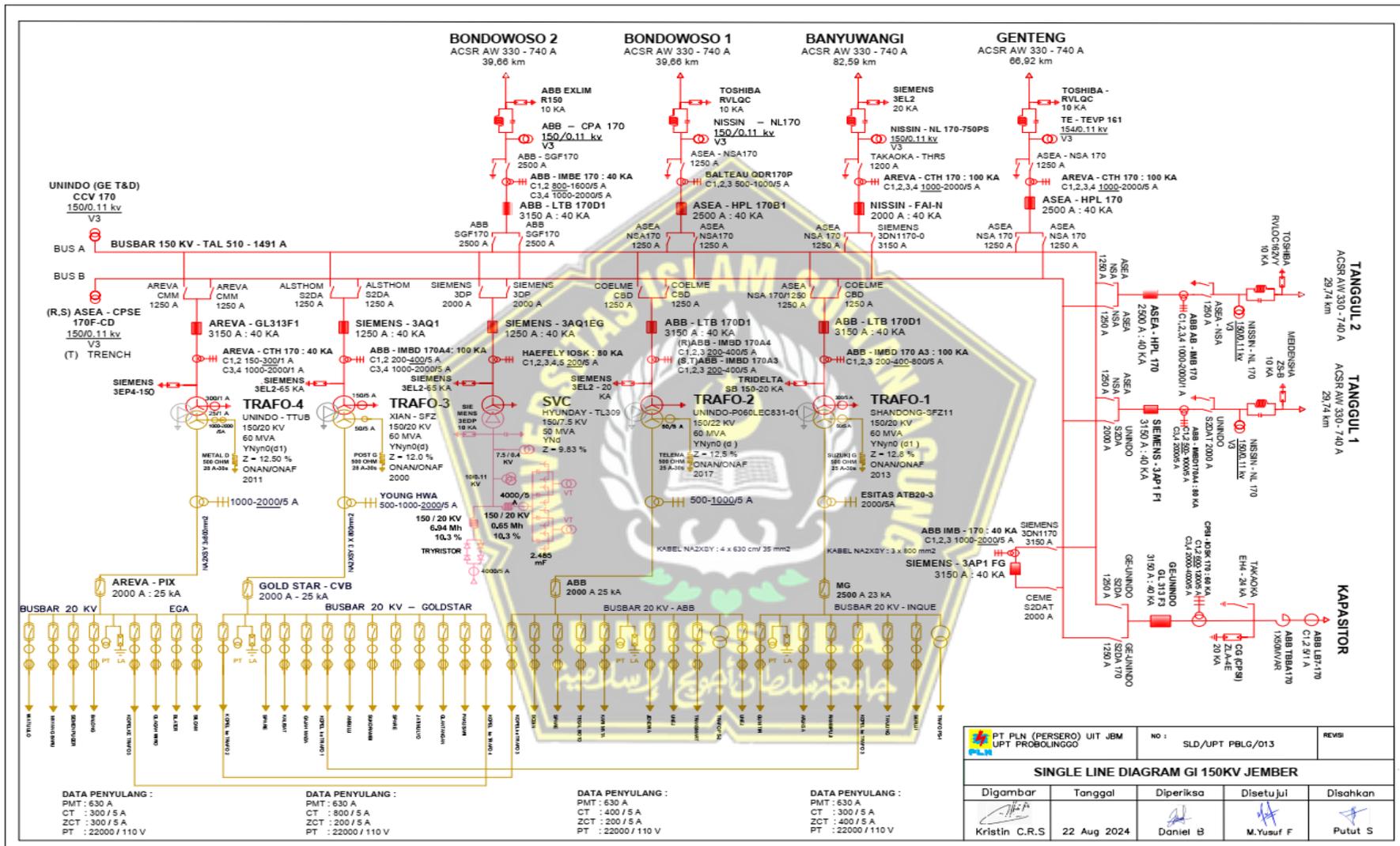
- a. Teknik analisis secara kualitatif yaitu dengan menginterpretasikan hasil observasi dan wawancara di lapangan untuk memperkuat analisis.
- b. Teknik analisis secara kuantitatif yaitu dengan mengolah hasil simulasi untuk mengetahui arus sirkulasi yang berdampak pada sistem dan menilai keandalan sistem proteksi.

### 3.7 Alat dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan pada saat perancangan sistem proteksi untuk operasi paralel transformator 150/20 kV pada gardu induk adalah sebagai berikut:

1. *Single Line Diagram* Gardu Induk 150 kV Jember





Gambar 3. 4 Single Line Diagram Gardu Induk 150 kV Jember

2. Data spesifikasi dan *setting* transformator yaitu pada peralatan trafo 2 dan trafo 3 Gardu Induk 150 kV Jember.

**Tabel 3. 1** Data Spesifikasi

<b>Spesifikasi</b>	<b>Trafo 2</b>	<b>Trafo 3</b>
MERK	UNINDO	XIAN
DESIGN NO	P060LEC831-01	SFZ-60000/150
TYPE	STEP DOWN-POWER TRANSFORMER	STEP DOWN-POWER TRANSFORMER
YEAR OF MANUFACTURE	2017	1994
TRANSFORMER TYPE	OIL IMMERSED	OIL IMMERSED
STANDARD	IEC 60076	IEC 76-1976
VECTOR GROUP	YNyn0+d	YNyn0+d
RATED VOLTAGE	150/22 kV	150/20 kV
RATED POWER	36/60 MVA	36/60 MVA
RATED FREQUENCY	50 Hz	50 Hz
TYPE OF COOLING	ONAN/ONAF	ONAN/ONAF
NO. OF PHASES	3	3
TEMP. RISE TOP OIL/WINDING/HOTSPOT	50 K/55 K/68 K	53 K /58 K /-
AVERAGE AMBEIENT	30°C	40°C (Max)
TYPE OF OIL	ONAN/ONAF	ONAN/ONAF
IMPEDANCE VOLTAGE AT MIN/RATED/MAX TAP	13,4% / 12,65% / 12,1%	11,985% / 12% / 13,254%
NUMBER OF TAPS	17	18

Tabel 3. 2 Data *Setting* Relai Diferensial dan AVR

No	Setting	Trafo 2	Trafo 3
1.	Relai Diferensial		
	Merk	ALSTOM	TOSHIBA
	Tipe	MICOM P642	GRT 100
	Rasio CT-Primer (A)	400/5	400/5
	Rasio CT-Sekunder (A)	2000/5	2000/5
	Id>	0,3 PU	0,3 PU
	Id>>	1,5 PU	1 PU
	K1 (%)	30	30
	K2 (%)	80	80
2.	<i>Auto Voltage Regulator</i> (AVR)		
	Merk	A - EBERLE	ABB
	Tipe	REG-DA	REU 615
	Rasio PT (kV)	22/0,11	22/0,11
	Vset (kV)	20,8	20,8
	<i>Bandwith</i> (%)	1,45	2,9
	Teg (L-H) (kV)	20,7-21,3	20,7-21,3
	T1 (s)	60	10
	T2(s)	10	10
	Vu (kV)	-	18
	V0 (kV)	-	22
	Batas Atas (kV)	21,3	21,3
	Batas Bawah (kV)	20,7	20,7
	Keterangan	AVR Auto	AVR Auto

## 3. Data rasio tegangan per tap trafo 2 dan trafo 3 Gardu Induk 150 kV Jember

Tabel 3. 3 Rasio Tegangan Per Tap Trafo 2 dan Trafo 3 Gardu Induk Jember

TRAFO 2 UNINDO 60 MVA 150/22 kV				TRAFO 3 XIAN 60 MVA 150/20 kV			
NO TAP	V (kV) Primer	V (kV) Sekunder	Rasio (Vp/Vs)	NO TAP	V (kV) Primer	V (kV) Sekunder	Rasio (Vp/Vs)
1	165,000	22,00	7,5	1	165,75	20,00	8,3
2	163,125	22,00	7,4	2	163,50	20,00	8,2
3	161,250	22,00	7,3	3	161,25	20,00	8,1
4	159,375	22,00	7,2	4	159,00	20,00	8,0
5	157,500	22,00	7,2	5	156,75	20,00	7,8
6	155,625	22,00	7,1	6	154,5	20,00	7,7
7	153,750	22,00	7	7	152,25	20,00	7,6
8	151,875	22,00	6,9	8	150,00	20,00	7,5
9A	150,000	22,00	6,8	9	147,75	20,00	7,4
9B	150,000	22,00	6,8	10	145,50	20,00	7,3
9C	150,000	22,00	6,8	11	143,25	20,00	7,2
10	148,125	22,00	6,7	12	141,00	20,00	7,1
11	146,250	22,00	6,6	13	138,75	20,00	6,9
12	144,375	22,00	6,6	14	136,50	20,00	6,8
13	142,500	22,00	6,5	15	134,25	20,00	6,7
14	140,625	22,00	6,4	16	132,00	20,00	6,6
15	138,750	22,00	6,3	17	129,75	20,00	6,5
16	136,875	22,00	6,2	18	127,5	20,00	6,4
17	135,000	22,00	6,1				

## 4. Data pembebanan trafo 2 dan trafo 3 Gardu Induk Jember

**Tabel 3. 4** Data Pembebanan Trafo 2 dan Trafo 3 Gardu Induk Jember

Bay	Tanggal	Jam	VR	VS	VT	vr	vs	vt	IR	IS	IT	MW	MVAR	%	OTI	HTI	LTI
BUSBAR A	26/11/2024	10	142.60	144.90	142.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
BUSBAR B	26/11/2024	10	147.00	148.60	144.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
TRF 150/22KV TRAFO#2	26/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.53	20.81	20.55	886.00	922.00	904.00	31	8.36	53.23	54	56	54
TRF 150/20KV TRAFO#3	26/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.67	20.94	20.69	980.00	1033.00	999.99	34	11.20	59.64	44	52	52
BUSBAR A	27/11/2024	10	142.00	142.00	142.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
BUSBAR B	27/11/2024	10	145.00	145.00	145.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
TRF 150/22KV TRAFO#2	27/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.40	20.70	20.50	605.00	615.00	607.00	21	5.60	35.51	52	52	54
TRF 150/20KV TRAFO#3	27/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.70	21.00	20.70	869.00	906.00	893.00	30	10.00	52.31	45	55	55
BUSBAR A	28/11/2024	10	142.00	144.50	142.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
BUSBAR B	28/11/2024	10	146.40	148.20	144.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
TRF 150/22KV TRAFO#2	28/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.44	20.75	20.49	881.60	913.90	893.60	32	8.06	52.77	55	56	55
TRF 150/20KV TRAFO#3	28/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.58	20.82	20.60	997.00	1051.00	999.99	35	11.30	60.68	45	55	55
BUSBAR A	29/11/2024	10	144.20	146.40	144.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
BUSBAR B	29/11/2024	10	148.80	150.30	146.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
TRF 150/22KV TRAFO#2	29/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.55	20.80	20.62	808.00	842.00	823.00	29	7.31	48.61	47	48	47
TRF 150/20KV TRAFO#3	29/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.93	21.17	20.95	955.00	1007.00	981.00	34	11.18	58.14	39	50	50
BUSBAR A	30/11/2024	10	143.00	143.00	143.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
BUSBAR B	30/11/2024	10	146.00	146.00	146.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0	0
TRF 150/22KV TRAFO#2	30/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.50	20.80	20.60	584.00	595.00	588.00	20	5.00	34.35	52	52	53
TRF 150/20KV TRAFO#3	30/11/2024	10	0.00	0.00	0.00	20.80	21.00	20.90	854.00	890.00	871.00	30	8.90	51.39	45	55	88

5. *Software* ETAP 12.6.0 untuk analisa *load flow* dan acuan perhitungan besar arus sirkulasi akibat perbedaan rasio tegangan pada transformator yang diparalel.
6. *Software* Proteus dan Arduino IDE untuk pemodelan sistem proteksi dan menyimulasikan rancangan sistem proteksi untuk pengoptimalan pencegahan arus sirkulasi pada operasi paralel transformator 150/20 kV beda rasio tegangan.

### 3.8 Tahapan Realisasi Simulasi

Penulis melakukan analisis menggunakan *software* ETAP 12.6.0 untuk analisis *load flow* dan sebagai acuan dalam penentuan besar arus sirkulasi akibat perbedaan rasio tegangan pada transformator yang diparalel, tampilan *software* ETAP 12.6.0 seperti pada gambar 2.8. Untuk membuat simulasi berikut langkah-langkah yang dilakukan:

1. Membuka *software* ETAP 12.6.0 kemudian memilih menu *File > New Project* untuk membuat proyek baru.
2. Memberi nama proyek dan menentukan lokasi penyimpanan, kemudian klik OK.
3. Membuat *single line diagram* sesuai dengan rencana proyek.
4. Memasukkan parameter atau data peralatan terkait ke dalam *single line diagram*.

Selanjutnya, penulis membuat rangkain model sistem proteksi untuk pengoptimalan pencegahan arus sirkulasi pada operasi paralel transformator 150/20 kV beda rasio tegangan dengan menggunakan *software* Proteus, tampilan *software* proteus seperti pada gambar 2.9. Untuk membuat simulasi berikut langkah-langkah yang dilakukan:

1. Membuka *software* proteus dan melakukan pengaturan arduino pada proteus dengan memilih Menu *File > Preferences > Checklist* pada kotak "*Compilation*".
2. Membuat rangkaian simulasi pada menu utama *software* proteus.
3. Mengunggah program arduino pada simulasi di proteus dengan *> Double Click* pada arduinonya kemudian unggah *file* programnya.

Selanjutnya penulis membuat program arduino untuk simulasi kontrol perangkat maupun peralatan, tampilan *software* arduino IDE seperti pada gambar 2.10. Untuk membuat program berikut langkah-langkah yang dilakukan:

1. Membuka *software* Arduino IDE dan memilih menu *File > New* untuk membuat program baru.
2. Memilih jenis *board* yang digunakan pada menu *Tools > Board*.
3. Menulis program pada area kerja yang tersedia.
4. Melakukan verifikasi dengan menekan tombol *Verify* untuk memeriksa kesalahan dalam kode pada program.
5. Menekan tombol “*Upload*” pada *toolbar* Arduino IDE untuk mengunggah program.

### 3.9 Tahapan Pengujian Simulasi

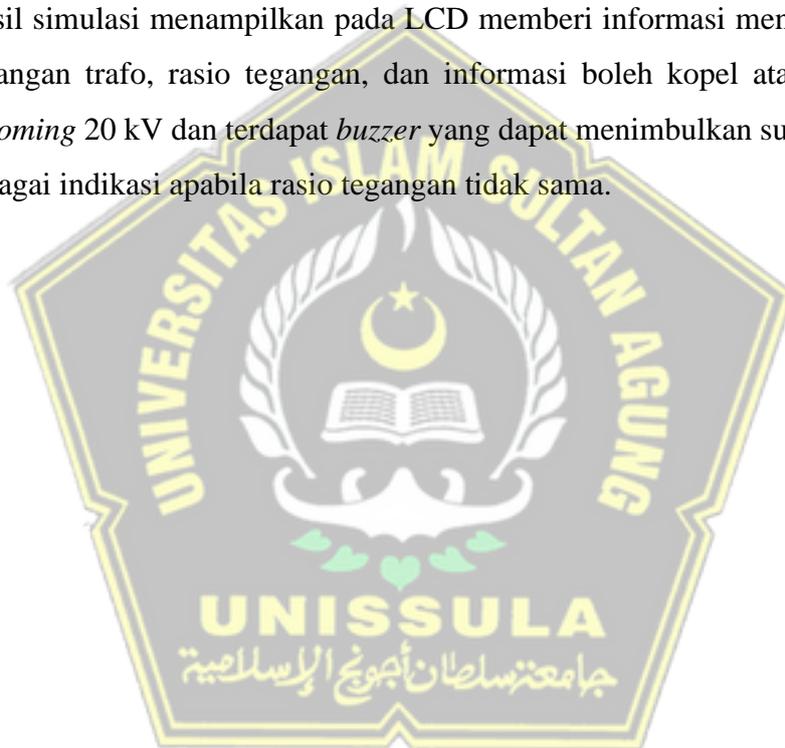
Penulis melakukan analisis menggunakan *software* ETAP 12.6.0 untuk analisis *load flow*. Berikut merupakan langkah – langkah simulasi menggunakan *software* ETAP 12.6.0:

1. Membuka *software* ETAP 12.6.0 dan buka project yang telah dibuat.
2. Memilih menu *Load Flow* dari menu analisis atau menekan ikon aliran daya pada *toolbar*.
3. Menjalankan simulasi aliran daya dengan menekan *Run* pada lembar kerja. Sistem akan melakukan perhitungan untuk menentukan distribusi daya dalam sistem dan hasil aliran daya akan ditampilkan.
4. Memilih *Results* atau *Report* pada menu untuk memunculkan laporan hasil analisis.

Dari hasil simulasi nantinya digunakan sebagai penunjang analisis dan acuan perhitungan besar arus sirkulasi akibat perbedaan rasio tegangan pada transformator yang diparalel yang memiliki dampak signifikan untuk sistem.

Selanjutnya, penulis melaksanakan uji simulasi rancangan sistem proteksi untuk pengoptimalan pencegahan arus sirkulasi pada operasi paralel transformator 150/20 kV beda rasio tegangan menggunakan *software* proteus. Berikut merupakan langkah-langkah simulasi menggunakan *software* proteus:

1. Menyiapkan data pembebanan meliputi tegangan primer dan tegangan sekunder transformator sebagai *input*.
2. Membuka *software* Proteus dan buka *project* yang telah dibuat.
3. Memasukkan data yang dibutuhkan pada *project* tersebut.
4. Mengunggah program dengan *double click* arduino pada rangkaian yang telah dibuat.
5. Menjalankan simulasi proteus dengan cara klik tombol *Play* untuk menjalankan simulasi pada bagian pojok kiri bawah.
6. Hasil simulasi menampilkan pada LCD memberi informasi mengenai info tap tegangan trafo, rasio tegangan, dan informasi boleh kopel atau *block* PMT *Incoming* 20 kV dan terdapat *buzzer* yang dapat menimbulkan suara peringatan sebagai indikasi apabila rasio tegangan tidak sama.



## **BAB IV**

### **HASIL DAN ANALISA**

#### **4.1 Analisis Peningkatan Arus dan Dampaknya Akibat Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan**

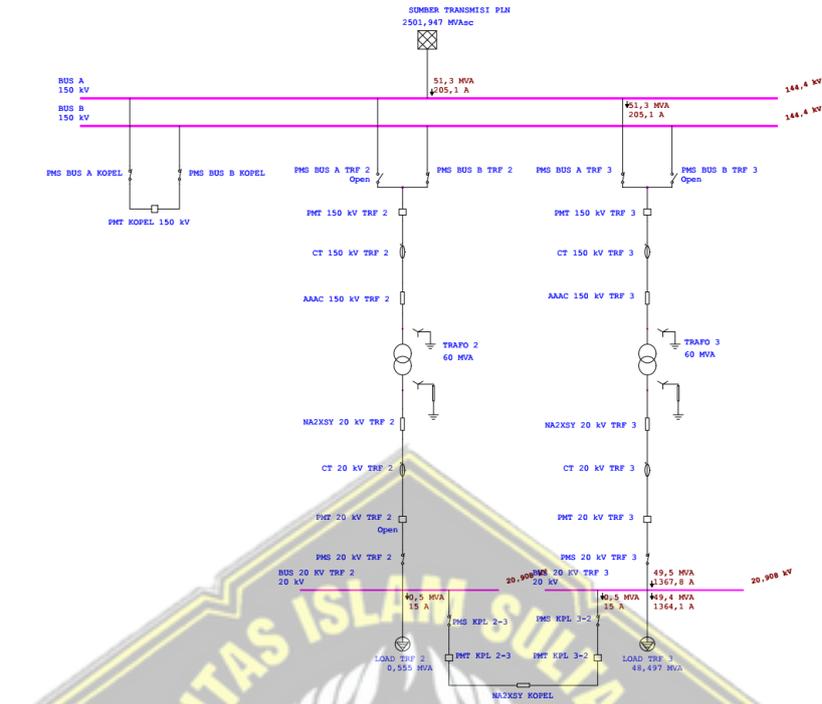
Paralel transformator memiliki tujuan utama untuk keandalan penyaluran tenaga listrik dan reduksi tenaga listrik, agar tenaga listrik tetap tersedia dan memiliki alternatif pelimpahan beban saat salah satu transformator sedang dilakukan pemeliharaan sehingga tidak mengakibatkan padam pelanggan. Namun, dalam melakukan paralel transformator perlu memenuhi syarat paralel transformator yang salah satunya harus memiliki rasio tegangan yang sama. Maka dari itu, petugas operator perlu memperhatikan prosedur manuver pemberian tegangan atau penormalan agar tidak terjadi kesalahan atau gangguan yang disebabkan oleh *human error* pada proses manuver tersebut.

##### **4.1.1 Simulasi Dampak Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan**

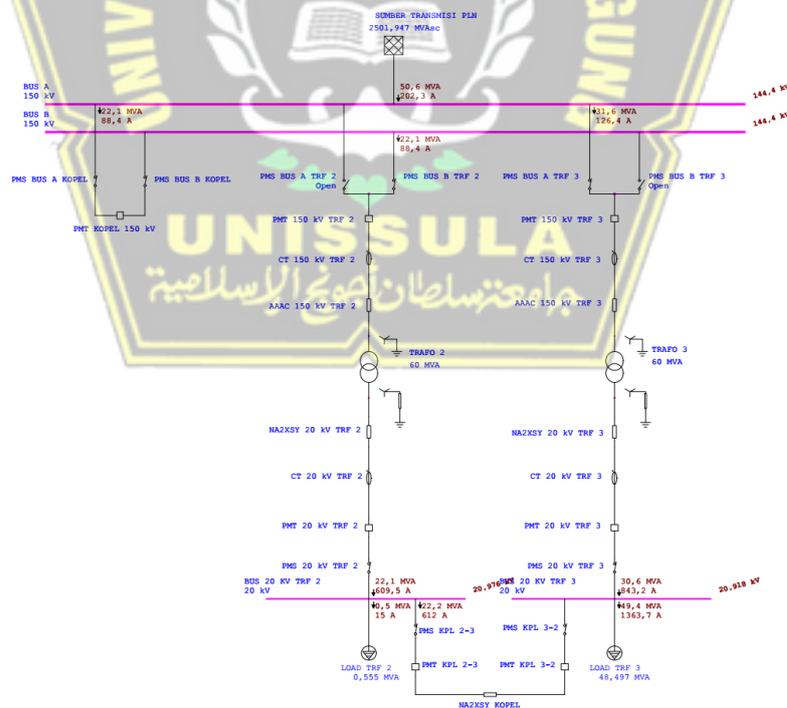
Pada pembahasan ini disimulasikan operasi paralel transformator 150/20 kV dengan rasio tegangan sama dan berbeda menggunakan *software* ETAP 12.6.0 untuk mengetahui pengaruh operasi paralel transformator 150/20 kV apabila rasio tegangannya berbeda. Berikut merupakan gambaran dari proses paralel transformator menggunakan *software* ETAP 12.6.0 dan sebagai tambahan pada gambar 4.2 dan 4.5 PMT dan PMS Kopel sisi 20 kV kondisinya masih *Open* yang menunjukkan kondisi transformator belum diparalel dengan tujuan untuk menampilkan tegangan sekunder transformator karena pada *software* tersebut tegangan sekunder hanya bisa ditampilkan saat kondisi PMT 20 kV terhubung ke busbar 20 kV.

Pada skenario pertama disimulasikan paralel trafo dengan rasio tegangan sama di mana trafo 2 dan trafo 3 Gardu Induk Jember diparalel dengan beban keseluruhan dilimpahkan pada trafo 3 yang bebannya sekitar 80% dari kapasitas trafo, sedangkan trafo 2 sudah selesai dipelihara dan sedang dilakukan proses penormalan atau pemberian tegangan. Simulasi pada gambar 4.1 menunjukkan tegangan primer





**Gambar 4. 2** Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Sama sebelum Penormalan PMT *Incoming* 20 kV Trafo 2



**Gambar 4. 3** Simulasi Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Sama

Pada gambar 4.3 dapat dilihat pada saat PMT *Incoming* 20 kV trafo 2 kondisinya ON maka tegangan pada busbar 20 kV yang terparalel tidak mengalami

penurunan yang signifikan karena memiliki tegangan primer dan sekunder yang sama di mana tegangan awal yaitu 20,93 kV pada saat diparalel menjadi 20,976 kV pada trafo 2 dan 20,918 kV pada trafo 3, serta arus keluaran dari sisi sekunder trafo tidak terlalu jauh berbeda. Untuk persentase deviasi pembebanan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\%Deviasi\ Pembebanan = \frac{Beban\ Trafo\ Max - Beban\ Trafo\ Min}{Total\ Beban\ Trafo} \times 100\% \quad (3)$$

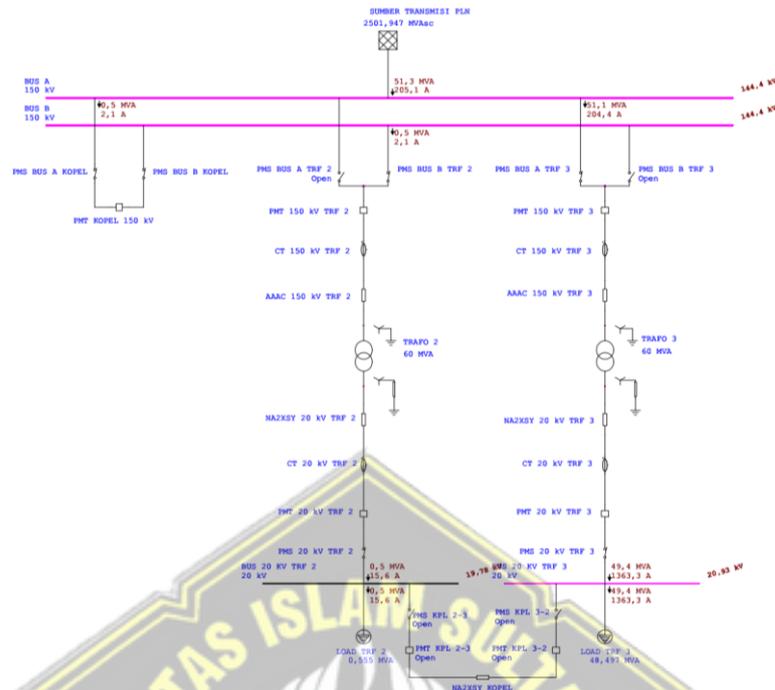
$$\%Deviasi\ Pembebanan = \frac{843,2\ A - 609,5\ A}{609,5\ A + 843,2\ A} \times 100\%$$

$$\%Deviasi\ Pembebanan = \frac{233,7\ A}{1452,7\ A} \times 100\%$$

$$\%Deviasi\ Pembebanan = 16,1\%$$

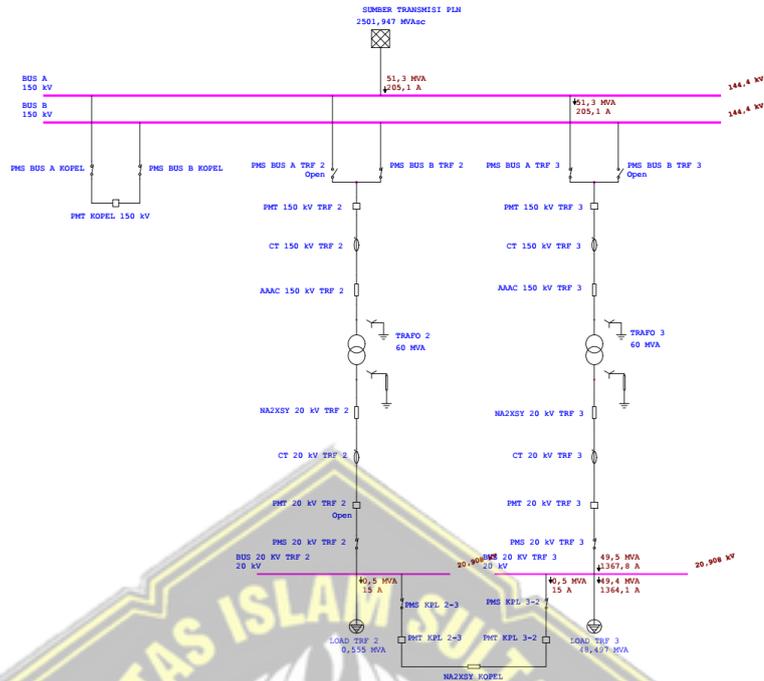
Dari perhitungan persentase deviasi pembebanan trafo 2 dan trafo 3 sebesar 16,1% kondisi tersebut masih dapat dikatakan ideal karena tidak terpaut jauh dan dilihat dari *output* tegangan sekundernyapun sudah ideal karena nilainya hampir sama. Sehingga simulasi yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dapat dikatakan sudah memenuhi syarat paralel transformator yakni memiliki rasio tegangan yang sama.

Selanjutnya pada skenario kedua disimulasikan paralel transformator dengan rasio tegangan beda, di mana trafo 2 dan trafo 3 Gardu Induk Jember diparalel dengan beban keseluruhan dilimpahkan pada trafo 3 dengan beban sekitar 80% dari kapasitas trafo, sedangkan trafo 2 sudah selesai dipelihara dan sedang dilakukan proses penormalan atau pemberian tegangan, tetapi pada proses pelaksanaannya petugas melewatkan prosedur penyesuaian tap sebelum memposisikan PMT *Incoming* 20 kV dalam kondisi ON sehingga posisi tap masih pada tap 3 sesuai langkah kedua pada prosedur penormalan. Simulasi pada gambar 4.5 menunjukkan tegangan primer sebesar 144,43 kV yang diambil dari rata-rata tegangan primer data beban dan tegangan sekunder trafo 3 sebesar 20,93 kV. Pada kondisi tersebut trafo 3 pada posisi tap 13 dengan rasio tegangan 6,9. Karena trafo 2 belum disesuaikan tapnya, trafo 2 masih berada pada posisi tap 3 dengan rasio tegangan 7,3 yang mana menghasilkan tegangan sekunder trafo 2 sebesar 19,78 kV.

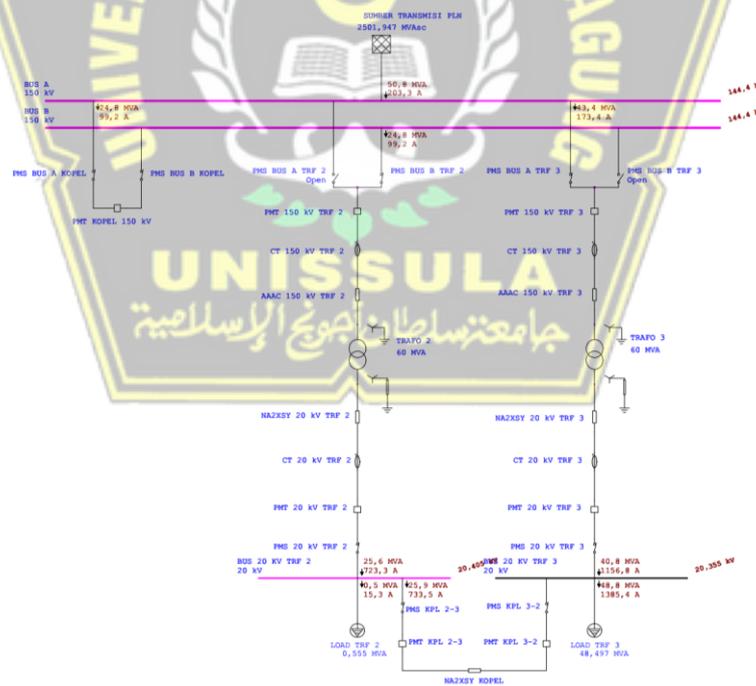


**Gambar 4. 4** Kondisi Transformator dengan Rasio Tegangan Berbeda

Sebelum proses penormalan, beban masih dipikul oleh trafo 3 dengan kondisi PMT *Incoming* 20 kV belum ON yang ditunjukkan pada gambar 4.5. Dapat dilihat bahwa tegangan sekunder trafo 2 yang diparalel dengan trafo 3 menampilkan tegangan busbar 20 kV sebesar 20,908 kV. Selanjutnya PMT *Incoming* 20 kV dinormalkan atau diposisikan ON sehingga beban terparalel pada trafo 2 dan trafo 3 yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4. 5 Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Berbeda sebelum Penormalan PMT Incoming 20 kV Trafo 2



Gambar 4. 6 Simulasi Paralel Transformator dengan Rasio Tegangan Berbeda

Pada gambar 4.6 dapat dilihat pada saat PMT Incoming 20 kV trafo 2 kondisinya ON maka tegangan pada busbar 20 kV yang terparalel mengalami penurunan pada trafo 3 di mana tegangan awal yaitu 20,93 kV menjadi 20,355 kV,

penurunan tegangan tersebut cukup signifikan yakni sebesar 2,75% dari tegangan trafo 3 sebelum PMT *Incoming* 20 kV trafo 2 ON dan kondisi tersebut dapat dikatakan abnormal dengan ditunjukkan garis berwarna hitam pada simulasi di busbar 20 kV trafo 3 yang menandakan ada permasalahan pada proses paralel yang ditunjukkan pada gambar 4.6. Tegangan trafo 2 yang mulanya terbaca 19,78 kV karena ada ketidaknormalan tegangan menjadi 20,405 kV. Sesuai aturan terbaru UP2D Jawa Timur bahwa batas minimum tegangan yang disalurkan ke konsumen adalah 20,7 kV sehingga ketika paralel beda rasio tegangan dapat menyebabkan tegangan yang tersalurkan masuk dalam kategori *under voltage*. Selain itu, arus keluaran dari sisi sekunder trafo deviasinya cukup signifikan. Untuk persentase deviasi pembebanan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\%Deviasi\ Pembebanan = \frac{Beban\ Trafo\ Max - Beban\ Trafo\ Min}{Total\ Beban\ Trafo} \times 100\% \quad (3)$$

$$\%Deviasi\ Pembebanan = \frac{1156,8\ A - 723,3\ A}{723,3\ A + 1156,8\ A} \times 100\%$$

$$\%Deviasi\ Pembebanan = \frac{433,5\ A}{1880,1\ A} \times 100\%$$

$$\%Deviasi\ Pembebanan = 23,06\%$$

Dari perhitungan persentase deviasi pembebanan trafo 2 dan trafo 3 sebesar 23,06% kondisi tersebut mengalami kenaikan deviasi sebesar 6,96% dibanding saat trafo diparalel dengan rasio tegangan yang sama dan dilihat dari tegangan sekundernyapun penurunannya cukup signifikan dan sudah masuk kategori *under voltage*.

#### **4.1.2 Konsekuensi Teknis Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan**

Dari simulasi operasi paralel transformator 150/20 kV sebelumnya pada skenario pertama dapat dikatakan sudah sesuai dengan syarat paralel transformator, sedangkan pada skenario kedua apabila dua transformator yang diparalel rasio tegangannya berbeda maka terdapat beberapa konsekuensi teknis. Apabila dilihat dari hasil simulasi aliran daya beban trafo dengan tegangan sekunder lebih tinggi yakni trafo 3 dengan tegangan 20,93 kV akan menarik beban lebih besar dibandingkan trafo 2 dengan tegangan sekunder lebih rendah yaitu 19,78 kV dan

beban akan lebih banyak mengalir ke trafo 3 karena tegangan yang lebih tinggi menyebabkan aliran daya lebih besar. Akibatnya dapat menimbulkan *overload* pada trafo 3 apabila bebannya melebihi 80% dari kapasitas trafo dan adanya perbedaan rasio tegangan menyebabkan munculnya arus sirkulasi yang berdampak pada sistem.

Arus sirkulasi yang timbul akibat perbedaan rasio tegangan saat operasi paralel transformator dapat menambah *stress* termal pada trafo, menimbulkan potensi *overheating* yang dapat merusak isolasi transformator, mengakibatkan kondisi pembebanan tidak seimbang, dan dapat menimbulkan potensi penurunan *lifetime* trafo. Di sisi lain, arus sirkulasi juga dapat memicu kerja relai diferensial yang bekerja bukan karena gangguan internal, tetapi karena *false trip* di mana relai membaca adanya perbedaan arus dan apabila arus sirkulasinya cukup besar relai diferensial menganggap seolah arus tersebut sebagai gangguan internal.

#### 4.2 Perhitungan Arus Sirkulasi Akibat Operasi Paralel Transformator

##### 150/20 kV Beda Rasio Tegangan

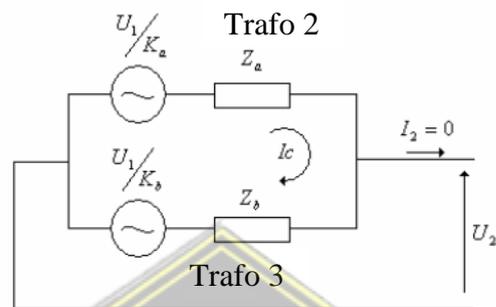
Dari simulasi aliran daya pada gambar 4.7 dapat dijadikan sebagai acuan untuk menghitung arus sirkulasi yang terjadi akibat operasi paralel transformator 150/20 kV yang berbeda rasio tegangannya. Berikut data dari spesifikasi dan hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Data pada Simulasi Paralel Trafo Beda Rasio Tegangan

Data	Trafo 2	Trafo 3
Impedansi Min/Rated/Max (%)	13,4 / 12,65 / 12,1	11,985 / 12 / 13,254
Tegangan Primer $V_p$ (kV)	144,43	144,43
Tegangan Sekunder $V_s$ (kV)	19,78	20,93
Posisi Tap	3	13
Rasio Tegangan ( $V_p/V_s$ )	7,3	6,9
Arus Sisi Primer $I_{HV}$ (A)	99,2	173,4
Arus Sisi Sekunder $I_{LV}$ (A)	723,3	1156,8
Rasio CT Primer	400/5	400/5
Rasio CT Sekunder	2000/5	2000/5

Berikut merupakan perhitungan dan dampak yang ditimbulkan arus sirkulasi apabila nilainya cukup signifikan.

a. Perhitungan Arus Sirkulasi



**Gambar 4. 7** Rangkaian Pengganti Operasi Paralel Trafo Tenaga Beda Rasio Tegangan

Pada perhitungan arus sirkulasi dibutuhkan data impedansi pada posisi tap trafo yang diparalel. Untuk menghitung impedansi pada posisi tap trafo 2 dan trafo 3 sesuai data tabel 4.1 maka digunakan metode pendekatan interpolasi linier karena tidak ada data nonlinier tambahan sesuai dengan persamaan 4. Data trafo 2 menunjukkan impedansi min/rated/max yaitu berada pada posisi tap 1 (13,4%), tap 9 (12,65%), dan tap 17 (12,1%). Trafo 2 diketahui berada pada posisi tap 3 sehingga perhitungannya sebagai berikut.

$$Zx = Za + \left( \frac{Zb - Za}{Tb - Ta} \right) \times (Tx - Ta) \quad (5)$$

$$Z3 = Z1 + \left( \frac{Z9 - Z1}{T9 - T1} \right) \times (T3 - T1)$$

$$Z3 = 13,4\% + \left( \frac{12,65\% - 13,4\%}{9 - 1} \right) \times (3 - 1)$$

$$Z3 = 13,4\% + \left( \frac{-0,75\%}{8} \right) \times 2$$

$$Z3 = 13,4\% - 0,1875\% = 13,2125\% \approx 13,21\%$$

$$pu \text{ (per unit)} = \frac{13,21}{100} = 0,1321 \text{ pu} \quad (6)$$

Jadi impedansi trafo 2 pada tap 3 adalah 13,21% atau 0,1321 pu

Data trafo 3 menunjukkan impedansi min/rated/max yaitu berada pada posisi tap 1 (11,985%), tap 9 (12%), dan tap 18 (13,254%). Trafo 3 diketahui berada pada posisi tap 13 sehingga perhitungannya sebagai berikut.

$$Z_x = Z_a + \left( \frac{Z_b - Z_a}{T_b - T_a} \right) \times (T_x - T_a) \quad (5)$$

$$Z_{13} = Z_9 + \left( \frac{Z_{18} - Z_9}{T_{18} - T_9} \right) \times (T_{13} - T_9)$$

$$Z_{13} = 12\% + \left( \frac{13,254\% - 12\%}{18 - 9} \right) \times (13 - 9)$$

$$Z_{13} = 12\% + \left( \frac{1,254\%}{9} \right) \times 4$$

$$Z_{13} = 12\% + 0,557\% = 12,557\%$$

$$pu \text{ (per unit)} = \frac{12,557}{100} = 0,12557 pu \approx 0,1256 pu \quad (6)$$

Jadi impedansi trafo 3 pada tap 13 adalah 12,557% atau 0,1256 pu

Mencari arus sirkulasi:

$$I_c = \frac{\frac{U_1}{K_a} - \frac{U_1}{K_b}}{Z_a + Z_b} \quad (4)$$

$$I_c = \frac{\frac{144,43 \text{ kV}}{7,3} - \frac{144,43 \text{ kV}}{6,9}}{0,1321 + 0,1256}$$

$$I_c = \frac{19,78 \text{ kV} - 20,93 \text{ kV}}{0,2577}$$

Mengubah tegangan ke dalam satuan pu:

$$pu \text{ (per unit)} = \frac{V_{aktual}}{V_{base}} \quad (7)$$

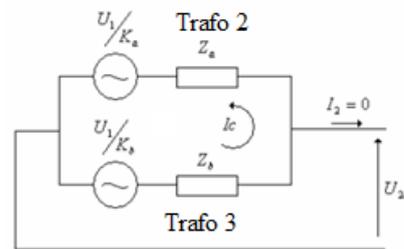
$$\text{Trafo 2} = \frac{19,78 \text{ kV}}{22 \text{ kV}} = 0,899 pu$$

$$\text{Trafo 3} = \frac{20,93 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} = 1,0465 pu$$

$$I_c = \frac{0,899 pu - 1,0465 pu}{0,2577 pu} = -0,572 pu$$

$$I_c = 0,572 pu \times I_n$$

$$I_c = 0,572 pu \times 1732 A = 990,7 A$$



**Gambar 4. 8** Arah Arus Sirkulasi Sesuai Perhitungan

Tanda negatif dari perhitungan arus sirkulasi menunjukkan arah arus sirkulasi seperti pada gambar 4.8. Artinya arus sirkulasi sebesar 0,572 pu atau 990,7 A mengalir dari trafo 3 dengan tegangan sekunder yang lebih tinggi menuju ke trafo 2 dengan tegangan sekunder yang lebih rendah untuk menyeimbangkan perbedaan tegangan di busbar 20 kV pada saat operasi paralel ditunjukkan seperti pada gambar 4.13. Arus sirkulasi tersebut memaksa tegangan pada busbar 20 kV trafo 2 dan trafo 3 menjadi sama sehingga tegangan yang dihasilkan trafo 2 sebesar 20,405 kV dan trafo 3 sebesar 20,355 kV yang mengakibatkan adanya penurunan tegangan dari kondisi sebelum diparalel.

#### b. Dampak Besarnya Arus Sirkulasi

Dari simulasi aliran daya pada gambar 4.6, perbedaan rasio tegangan antara transformator menyebabkan terjadinya arus sirkulasi yang signifikan. Trafo 3 menarik beban lebih banyak dibanding trafo 2 dan berfungsi sebagai sumber arus sirkulasi. Dampak dari besarnya arus sirkulasi ini dapat memicu kerja relai diferensial trafo 3 karena mendeteksi arus primer lebih besar daripada arus sekundernya sehingga mengakibatkan adanya arus diferensial yang dapat memicu *trip*. Sedangkan trafo 2 yang menerima arus sirkulasi, arus primer dan arus sekundernya tetap seimbang sehingga tidak mendeteksi adanya arus diferensial. Dengan nilai arus sirkulasi sebesar 0,572 pu atau 990,7 A, arus tersebut dinilai cukup besar dan kondisi ini dapat mengakibatkan *trip* pada relai diferensial jika *setting slope* relai rendah dan *pickup current* kecil. Apabila arus sirkulasi cukup besar hingga memicu kerja relai diferensial artinya arus tersebut sudah melampaui arus *threshold* yaitu ambang batas yang digunakan relai untuk membedakan antara kondisi normal dan gangguan. Di sisi lain apabila tidak terdapat kesalahan *setting*

awal relai dapat diartikan bahwa relai diferensial sudah bekerja dengan benar yaitu melindungi transformator dari aliran arus sirkulasi besar dalam waktu lama yang dapat menimbulkan *overheat* yang dapat merusak isolasi trafo.

Untuk mengoptimalkan kinerja operasi paralel trafo, ada beberapa metode yang dapat dilakukan antara lain:

- a. Penyetelan/redesain/desain ulang relai diferensial: Penyetelan untuk meningkatkan *setting slope* relai dan *pickup current* agar tidak mendeteksi arus sirkulasi sebagai gangguan.
- b. Pemantauan dan analisis arus sirkulasi secara berkala: Pemantauan dan analisis untuk mendeteksi perubahan kondisi operasi paralel dan mengambil tindakan preventif.

Untuk itu, diperlukan metode pencegahan timbulnya arus sirkulasi dengan merancang sistem proteksi sebagai tindakan preventif terhadap adanya kemungkinan gangguan yang disebabkan oleh *human error* saat manuver penormalan atau proses pemberian tegangan pada bay trafo yang padam saat operasi paralel transformator.

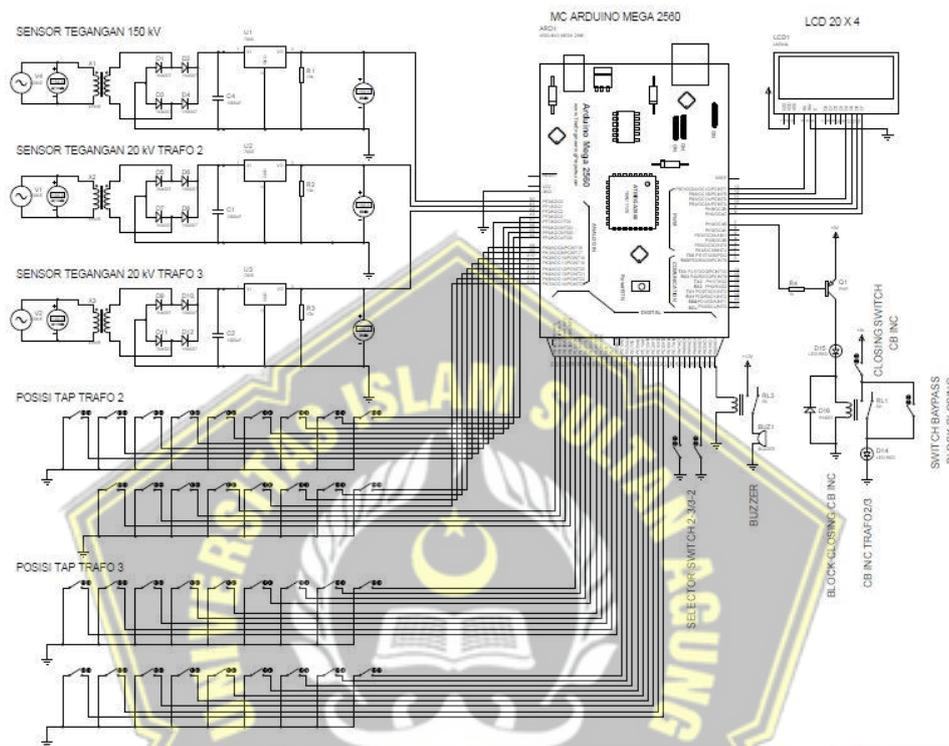
#### **4.3 Pengoptimalan Pencegahan Timbulnya Arus Sirkulasi Akibat Operasi Paralel Transformator 150/20 kV Beda Rasio Tegangan**

Untuk optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV maka dirancang sistem proteksi untuk pengoptimalan pencegahan timbulnya arus sirkulasi akibat operasi paralel transformator 150/20 kV beda rasio tegangan. Rancangan ini bertujuan sebagai tindakan preventif terhadap adanya kemungkinan gangguan yang disebabkan oleh *human error* saat manuver penormalan atau proses pemberian tegangan pada bay trafo yang padam saat operasi paralel transformator, sehingga diharapkan tidak terjadi kesalahan petugas operator dalam melakukan penyesuaian posisi tap *changer* pada proses manuver penormalan tersebut.

##### **4.3.1 Rancangan Sistem Proteksi untuk Optimasi Kinerja Operasi Paralel Transformator 150/20 kV**

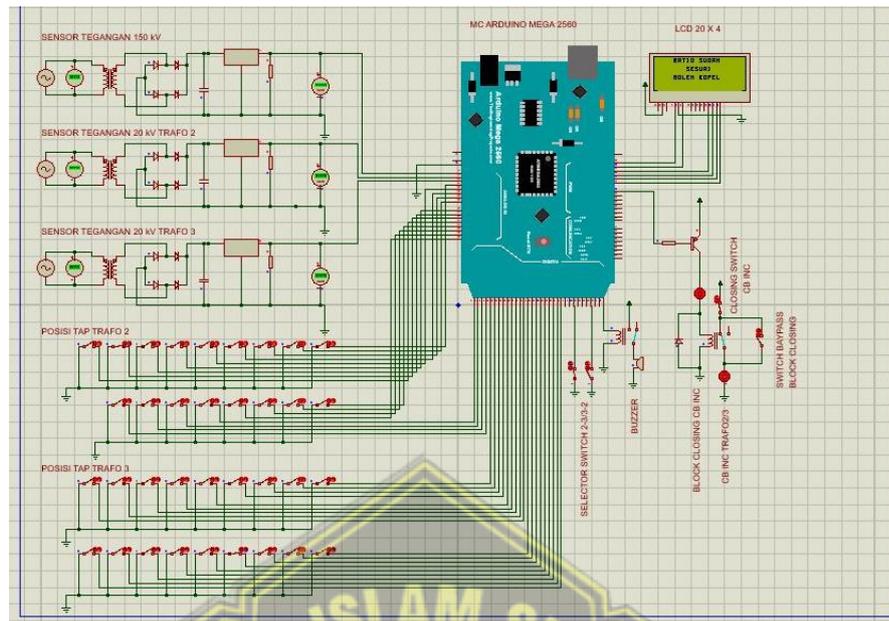
Rancangan sistem proteksi untuk operasi paralel transformator 150/20 kV ini merupakan bentuk pengembangan proteksi sistem yang pada penelitian ini akan dirancang dan disimulasikan untuk membandingkan kerja rangkaian saat operasi

paralel transformator 150/20 kV dengan rasio tegangan yang sama dan rasio tegangan yang berbeda sesuai dengan skenario pembahasan sebelumnya. Berikut merupakan gambaran dari rancangan sistem proteksi untuk operasi paralel transformator 150/20 kV menggunakan *software* proteus.

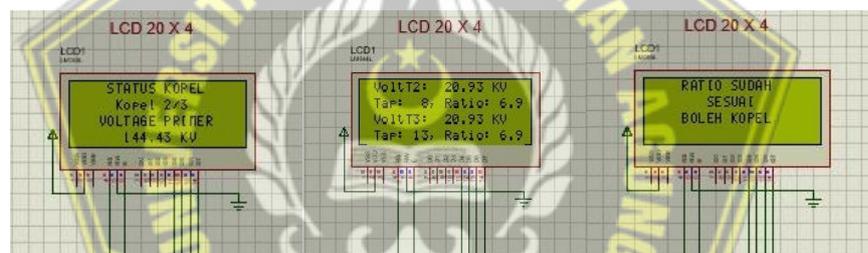


**Gambar 4. 9** Gambar Rancangan Sistem Proteksi pada *Software* Proteus

Percobaan pertama disimulasikan trafo 2 hendak dinormalkan kembali dengan kondisi rasio tegangan trafo 2 dan trafo 3 sama. Tegangan primer sudah tersalurkan sebesar 144,43 kV dan trafo 3 yang memikul beban trafo 2 berada pada posisi tap 13 dengan rasio tegangan 6,9 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 20,93 kV. Pada kondisi awal seperti pada prosedur manuver penormalan, trafo 2 sebelumnya berada pada tap 3. Untuk menormalkan trafo 2 maka rasio tegangan trafo 2 harus sama dengan rasio tegangan trafo 3 yakni 6,9 yang mana trafo 2 harus diposisikan pada tap 8 sesuai dengan tabel 3.3 untuk menghasilkan rasio yang sama. Karena pada kedua trafo yang diparalel rasio tegangannya sudah sama maka pada LCD menampilkan informasi “BOLEH KOPEL” dan *Switch Closing CB Incoming* dapat ditutup atau diposisikan ON sehingga *CB Incoming* Trafo 2 dapat ON.



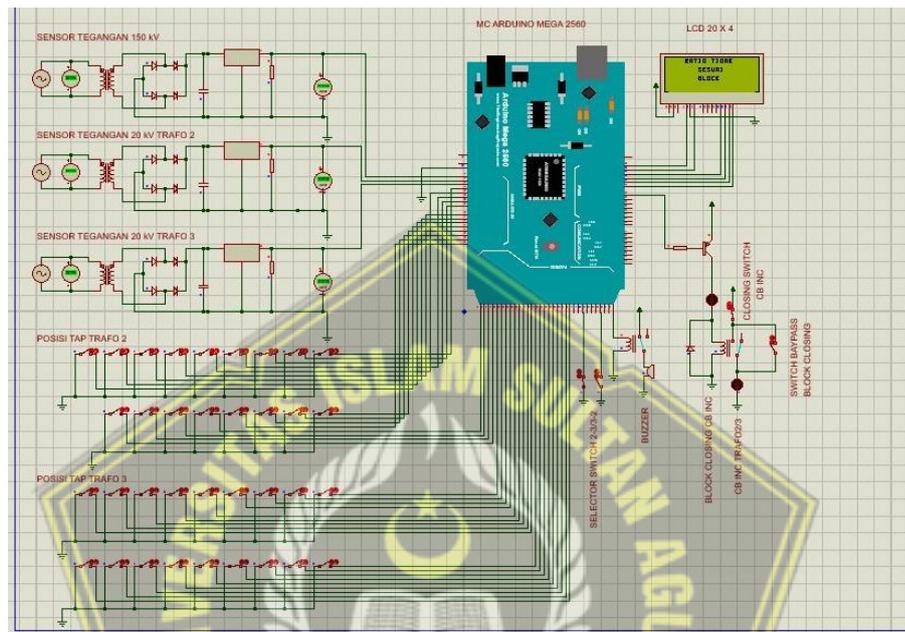
Gambar 4. 10 Simulasi saat Kondisi Rasio Tegangan Sama



Gambar 4. 11 Tampilan LCD saat Kondisi Rasio Tegangan Sama

Percobaan kedua disimulasikan trafo 2 hendak dinormalkan kembali dengan kondisi rasio tegangan trafo 2 dan trafo 3 berbeda. Tegangan primer sudah tersalurkan sebesar 144,43 kV dan trafo 3 yang memikul beban trafo 2 berada pada posisi tap 13 dengan rasio tegangan 6,9 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 20,93 kV. Pada kondisi awal seperti pada prosedur penormalan, trafo 2 sebelumnya berada pada tap 3. Pada kasus ini petugas kurang fokus sehingga terdapat *human error* di mana petugas belum menyamakan rasio tegangan dan langsung menutup *Switch Closing CB Incoming* untuk memposisikan *PMT Incoming 20 kV* dalam kondisi ON. Karena pada kedua trafo yang diparalel rasio berbeda di mana rasio tegangan trafo 3 pada tap 13 adalah 6,9 dan rasio tegangan trafo 2 pada tap 3 adalah 7,3 dengan tegangan sekondr 19,78 kV maka pada LCD menampilkan informasi “BLOCK”, mengaktifkan *buzzer*, dan mengerjakan kontak *block closing incoming*

yang kontaknya *normally close* (dalam kondisi normal terhubung dan dalam kondisi gangguan terputus) sehingga ketika petugas menutup *Switch Closing CB Incoming*, *CB Incoming/PMT Incoming 20 kV Trafo 2* akan tetap OFF karena arus diputus oleh kontak *block closing incoming*.

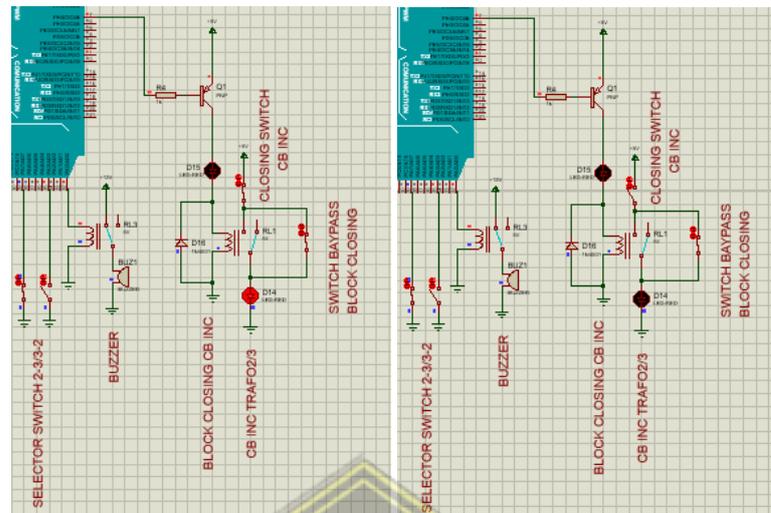


Gambar 4. 12 Simulasi saat Kondisi Rasio Tegangan Berbeda



Gambar 4. 13 Tampilan LCD saat Kondisi Rasio Tegangan Berbeda

Pada rancangan sistem proteksi ini penambahan *Switch Bypass Block Closing* sebagai fasilitas untuk pengujian peralatan saat pemeliharaan *CB Incoming / PMT Incoming 20 kV* sehingga dapat bebas mengoperasikan untuk ON dan OFF *CB Incoming* tanpa harus menyamakan rasio tegangan yang ditunjukkan pada gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Pengoperasian *Switch Bypass Block Closing* untuk ON dan OFF *CB Incoming*

#### 4.3.2 Dampak Potensial Setelah Penerapan Rancangan Sistem Proteksi yang Baru

Rancangan sistem proteksi untuk operasi paralel transformator 150/20 kV untuk mencegah terjadinya gangguan akibat kesalahan manusia atau *human error* dapat menimbulkan dampak potensial setelah sistem tersebut diterapkan. Dampak yang timbul dapat mempengaruhi sistem dan juga segi finansial perusahaan. Berikut merupakan dampak yang dapat ditimbulkan pasca penerapan rancangan sistem proteksi untuk operasi paralel transformator 150/20 kV.

##### a. Dampak terhadap Sistem

Penerapan rancangan sistem proteksi untuk operasi paralel transformator 150/20 kV ini menggunakan sistem *interlock* atau sistem pengaman yang prinsip kerjanya hanya dapat mengerjakan perintah *close* PMT *Incoming* 20 kV dengan syarat rasio tegangan harus sama pada saat dua transformator diparalel atau dikopel. Hal tersebut berpengaruh terhadap sistem karena pada saat pekerjaan pemeliharaan transformator dapat menghambat proses pengujian PMT *Incoming* 20 kV karena pada saat pemeliharaan rasio tegangan antar dua trafo dapat berbeda. Namun, permasalahan tersebut dapat di atasi dengan menambahkan *Switch Bypass Block Closing* seperti pada gambar 4.14. Fungsi dari *switch* tersebut untuk melakukan *bypass* atau melewati rangkaian *block closing incoming* sehingga ketika diaktifkan *CB Incoming*/PMT *Incoming* 20 kV dapat di ON dan OFF tanpa

harus menyamakan rasio tegangan dan mengatur tap changer. Namun, pada saat sebelum proses penormalan atau pemberian tegangan *switch* harus dikembalikan ke posisi semula (OFF).

Dampak potensial yang lain terhadap sistem dari rancangan ini yaitu dapat meningkatkan keandalan sistem dengan adanya sistem monitoring secara *real time* mengenai informasi tegangan sistem, informasi posisi tap, informasi rasio tegangan trafo yang diparalel, dan *buzzer* sebagai peringatan apabila terdapat ketidaksesuaian rasio tegangan. Rancangan ini juga berperan sebagai faktor keamanan untuk mencegah terjadinya kesalahan manusia atau *human error* dalam menyamakan rasio tegangan sebelum proses *closing* PMT *Incoming* 20 kV saat proses manuver penormalan atau pemberian tegangan pada bay trafo yang padam dalam kondisi diparalel dengan trafo lainnya. Selain itu, rancangan ini apabila diterapkan dapat mengurangi atau meminimalkan *downtime* pada bay trafo yang artinya dapat meminimalisir waktu ketidakterediaan trafo akibat kerusakan, pemeliharaan, atau gangguan lainnya, sehingga proses penyaluran energi listrik dapat tetap berjalan dengan lancar dan efektif.

#### b. Dampak terhadap Finansial

Tujuan awal dibuatnya rancangan sistem proteksi ini yaitu untuk optimasi pencegahan timbulnya arus sirkulasi yang disebabkan oleh *human error* saat operasi paralel transformator beda rasio tegangan. Saat belum diterapkan sistem proteksi yang baru apabila terjadi gangguan akibat *human error* atau kesalahan manusia dapat menyebabkan gangguan yang berdampak pada kerugian finansial terhadap perusahaan. Dampak yang ditimbulkan dari gangguan tersebut antara lain:

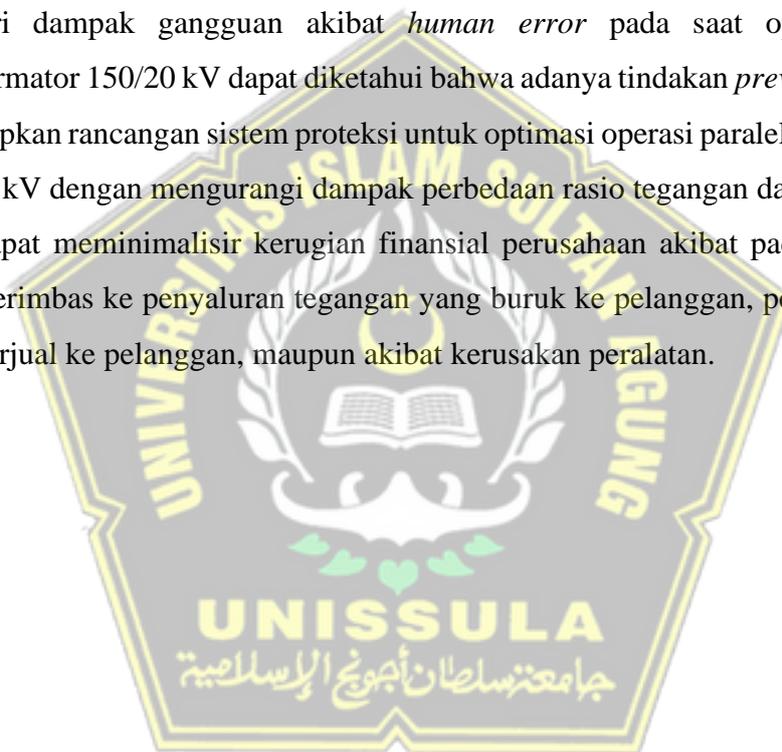
##### 1. Padam Bay Trafo Akibat Gangguan

Padam bay trafo akibat gangguan yang disebabkan *human error* berdampak pada tidak tersalurkannya energi listrik. Sebagai contoh, pada saat pekerjaan pemeliharaan bay trafo 2 beban diparalel dengan trafo 3. Saat proses penormalan atau pemberian tegangan trafo 2 terdapat kesalahan petugas di mana posisi tap belum disesuaikan sehingga rasio tegangannya berbeda dan mengakibatkan trafo 3 yang menanggung keseluruhan beban akan *trip* atau padam. Kondisi beban yang masih terparalel dengan trafo 2 tidak mengakibatkan padam pelanggan, namun



trafo *overheat* yang dapat merusak isolasi trafo dan berpotensi menurunkan *lifetime* trafo. Dampak terburuk dari rusaknya isolasi trafo yaitu terjadi kerusakan transformator secara keseluruhan, sehingga dibutuhkan adanya penggantian transformator itu sendiri. Menurut referensi harga trafo Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali (UIT JBM) harga beli transformator baru 150/20 kV dengan daya 60 MVA adalah Rp. 14.010.574.346,- dan biaya pengiriman trafo ke Jawa Timur sebesar Rp. 280.000.000,- harga tersebut belum termasuk jasa penggantian dan material lainnya.

Dari dampak gangguan akibat *human error* pada saat operasi paralel transformator 150/20 kV dapat diketahui bahwa adanya tindakan *preventive* dengan menerapkan rancangan sistem proteksi untuk optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV dengan mengurangi dampak perbedaan rasio tegangan dan peningkatan arus dapat meminimalisir kerugian finansial perusahaan akibat padam bay trafo yang berimbas ke penyaluran tegangan yang buruk ke pelanggan, penurunan daya yang terjual ke pelanggan, maupun akibat kerusakan peralatan.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis dari perancangan sistem proteksi untuk operasi paralel transformator 150/20 kV ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Dari hasil simulasi aliran daya, operasi paralel transformator 150/20 kV dengan rasio tegangan yang sama dan operasi paralel transformator 150/20 kV dengan rasio tegangan yang berbeda mengalami peningkatan arus di sisi sekunder trafo dan mengalami peningkatan deviasi pembebanan 6,96%, dari deviasi pembebanan sebesar 16,1% menjadi 23,06%, serta memiliki konsekuensi teknis menimbulkan arus sirkulasi yang berdampak bagi sistem dan finansial perusahaan.
2. Berdasarkan hasil perhitungan arus sirkulasi sebesar 0,572 pu atau 990,7 A mengalir dari trafo 3 dengan tegangan sekunder lebih tinggi ke trafo 2 dengan tegangan sekunder lebih rendah untuk menyeimbangkan tegangan di busbar 20 kV dan memaksa tegangan kedua busbar menjadi sama, di mana tegangan bus 20 kV pada trafo 2 sebesar 20,405 kV dan trafo 3 sebesar 20,355 kV dan tegangan tersebut sudah masuk kategori *under voltage* menurut rekomendasi batas minimum tegangan yang disalurkan ke pelanggan dari UP2D Jawa Timur yakni sebesar 20,7 kV.
3. Untuk optimasi pencegahan timbulnya arus sirkulasi akibat operasi paralel transformator 150/20 kV beda rasio tegangan dapat dilakukan penyetelan ulang relai diferensial dengan meningkatkan *setting slope* dan *pickup current*, serta melakukan pemantauan dan analisis arus sirkulasi secara berkala dengan menerapkan tindakan *preventive* untuk mencegah *human error* dengan menerapkan sistem *interlock* atau pengaman pada PMT *Incoming* 20 kV sehingga tidak dapat *close* atau ON apabila rasio tegangan antar trafo yang diparalel tidak sama.
4. Dampak potensial dari penerapan rancangan sistem proteksi untuk paralel transformator 150/20 kV yang baru terhadap sistem yaitu dapat menghambat

proses pengujian PMT *Incoming* 20 kV saat pemeliharaan, tetapi dapat di atasi dengan penambahan *Switch Bypass Block Closing*. Selain itu, rancangan ini dapat meningkatkan keandalan sistem dengan adanya monitoring secara *real time*, berperan sebagai faktor keamanan untuk risiko *human error*, dan dapat mengurangi atau meminimalkan *downtime* pada bay trafo.

5. Dampak potensial dari penerapan rancangan sistem proteksi untuk paralel transformator 150/20 kV yang baru terhadap finansial perusahaan yaitu dapat meminimalisir kerugian finansial perusahaan akibat padam bay trafo yang berimbas ke penyaluran tegangan yang buruk ke pelanggan, penurunan daya yang terjual ke pelanggan, maupun akibat kerusakan peralatan.

## 5.2 Saran

Setelah melakukan analisis terhadap optimasi operasi paralel transformator 150/20 kV dengan mengurangi dampak perbedaan rasio tegangan dan peningkatan arus terdapat beberapa saran penulis sebagai berikut.

1. Perlunya *refreshment* berkala terhadap petugas operator gardu induk dan pengawas manuver terutama pada saat proses operasi paralel transformator.
2. Pembuatan instruksi kerja dengan rancangan sistem proteksi yang baru apabila diimplementasikan dan ditempel pada panel kontrol agar dapat menjadi perhatian petugas operator gardu induk.
3. Rancangan sistem proteksi tersebut dapat dilakukan implementasi dan kajian lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. H. Annuru and I. Abdi Bangsa, "Optimalisasi Manuver Jaringan Menggunakan Supervisory Control and Data Acquisition (Scada) dalam Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi 20 kV di PT PLN (Persero) UP3 Bekasi," *Aisyah J. Informatics Electr. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 56–66, 2024, doi: 10.30604/jti.v6i1.167.
- [2] M. K. Anam, O. Penangsang, and S. Soediby, "Studi Operasi Paralel Jaringan Distribusi yang Disuplai oleh Satu Gardu Induk pada Sistem Kelistrikan Distribusi Jawa Tengah. Studi Kasus : GI Sronдол Semarang," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 2, 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i2.31051.
- [3] PT PLN (Persero), "Pedoman Pemeliharaan Transformator," no. 0520, pp. 1–145, PT PLN (Persero), Jakarta, 2024.
- [4] H. Setijasa, A. Subagyo, and H. Santosa, "Kerja Paralel Transformator Daya," *Orbith Maj. Ilm. Pengemb. Rekayasa dan Sos.*, vol. 19, no. 1, pp. 86–94, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/orbith/article/view/4402>
- [5] R. Andriansyah, Gunawan, and A. A. Nugroho, "Analisis Operasi Paralel Transformator Unit Gardu Bergerak Beda Jam Trafo di Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan Semarang," *Pustak. Rev. UNISSULA*, 2020, [Online]. Available: <http://repository.unissula.ac.id/17925/>
- [6] A. A. Nugraha, G. Supriyadi, A. S. Alam, H. Habibi, J. Hartono, and B. Bramantyo, "Kajian Pengaruh Paralel IBT 500 kV UIT JBM," PT PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan, Jakarta, 2021.
- [7] N. Sudarmantoro, Firdaus, and Feranita, "Evaluasi Hubungan Paralel Transformator Fakultas Teknik Universitas Riau pada Kondisi Beban Normal dan Beban Puncak," *Jom FTEKNIK*, vol. 2, no. 1, pp. 4–15, 2015.
- [8] Pujiyanto, A. K. Dewi, and A. Mulyono, "Analisis Aliran Beban pada Sistem Tenaga Listrik di PT XYZ," *J. Nas. Pengelolaan Energi MigasZoom*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2021, doi: 10.37525/mz/2021-1/262.

- [9] PT PLN (Persero), *Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga*, vol. 157, no. 9, PT PLN (Persero), Jakarta, 2024.
- [10] A. M. Simamora, J. Sinaga, P. Mutiara, L. Mariaty, and R. Sitohang, “Analisa Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Frekuensi Generator Satu Fasa,” *Jesce*, vol. 7, no. 1, pp. 47–55, 2023, doi: 10.31289/jesce.v6i2.10194.
- [11] A. Nugraha, “Design Rangkaian Serial Kontak Alarm dan Kontak Trip pada Proteksi Temperatur Transformator 2 - 30 MVA Gardu Induk Blora,” Universitas Sultan Agung Semarang, Semarang, 2023.
- [12] PT PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban Jawa-Bali, *Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali*, vol. 1, PT PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengaturan Beban Jawa-Bali, Jakarta, 2013.
- [13] I. Bursa, “Analisis Rugi-Rugi Daya Akibat Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder di PT. PLN (Persero) ULP Watang Sawitto,” Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar, 2021.
- [14] M. H. Widiyanto, “Proteus Sebagai Aplikasi Software Pengendali Mikrokontroler,” Binus University. [Online]. Available: <https://binus.ac.id/bandung/2020/03/proteus-sebagai-aplikasi-software-pengendali-mikrokontroler/>