

**LAPORAN TUGAS AKHIR**  
**ANALISIS PERBAIKAN *DROP VOLTAGE* MELALUI**  
**PERUBAHAN TAP CHANGER PADA TRAFO DISTRIBUSI 50**  
**kVA 3 PHASA MENGGUNAKAN ETAP 19**

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



**DISUSUN OLEH :**

**MAULANA YUSUF ARRAIHAN**  
**NIM 30602300149**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**  
**UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**  
**SEMARANG**  
**2025**

**FINAL PROJECT**

***ANALYSIS OF VOLTAGE DROP IMPROVEMENT THROUGH  
TAP CHANGER ADJUSTMENT ON A 50 kVA TRIPLE-PHASE  
DISTRIBUTION TRANSFORMER USING ETAP 19***

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



**MAJORING OF INDUSTRIAL ENGINEERING  
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG  
SEMARANG  
2025**

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maulana Yusuf Arraihan  
NIM : 30602300149  
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 "**ANALISIS PERBAIKAN DROP VOLTAGE MELALUI PERUBAHAN TAP CHANGER PADA TRAFO DISTRIBUSI 50 kVA 3 PHASA MENGGUNAKAN ETAP 19**", 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, Jumat, 12 September  
2025

Yang Menyatakan



Maulana Yusuf Arraihan  
NIM. 30602300149

## **PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH**

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maulana Yusuf Arraihan  
NIM : 30602300149  
Fakultas : TEKNOLOGI INDUSTRI  
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO

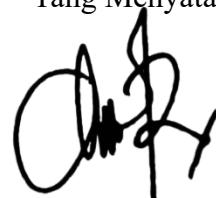
Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS PERBAIKAN DROP VOLTAGE MELALUI PERUBAHAN TAP CHANGER PADA TRAFOL DISTRIBUSI 50 kVA 3 PHASA MENGGUNAKAN ETAP 19”**, menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dan pangkalan data dan dipublikasikan di internet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap menyantumkan 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 pribasi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, Jumat, 12 September

2025

Yang Menyatakan



**Maulana Yusuf Arraihan**

NIM. 30602300149

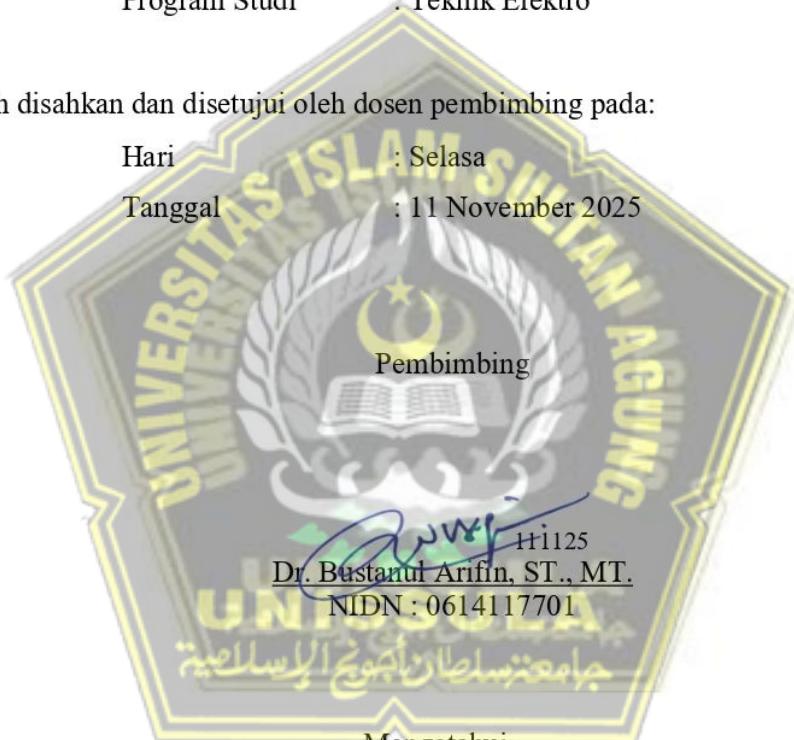
## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**ANALISIS PERBAIKAN DROP VOLTAGE MELALUI PERUBAHAN TAP CHANGER PADA TRAFO DISTRIBUSI 50 kVA 3 PHASA MENGGUNAKAN ETAP 19**” ini disusun oleh:

Nama : MAULANA YUSUF ARRAIHAN  
NIM : 30602300149  
Program Studi : Teknik Elektro

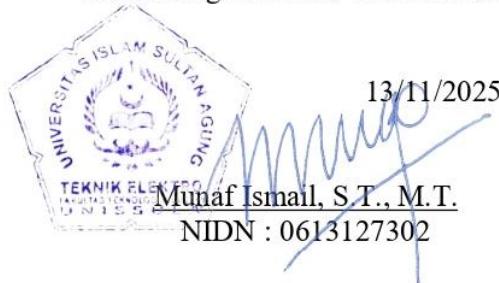
Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Selasa  
Tanggal : 11 November 2025



Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro



## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "**ANALISIS PERBAIKAN DROP VOLTAGE MELALUI PERUBAHAN TAP CHANGER PADA TRAFO DISTRIBUSI 50 kVA 3 PHASA MENGGUNAKAN ETAP 19**" ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Rabu  
Tanggal : 22 Oktober 2025

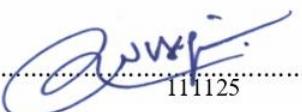
Tim Penguji

Tanda Tangan

Prof. Dr. Ir. Muhamad Haddin, M.T.  
NIDN : 0618066301  
Penguji I

Dr. Gunawan, S.T., M.T.  
NIDN : 0607117101  
Penguji II

Dr. Bustanul Arifin, ST., MT  
NIDN : 0614117701  
Penguji III

  
111125

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Segala puji dan syukur kami persembahkan kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas rahmat-Nya yang melimpah dan petunjuk-Nya, yang telah memberikan saya kesempatan untuk terus menuntut ilmu dalam keadaan sehat dan kuat. Selain itu, kami selalu mendoakan dan mengucapkan salam kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wa sallam yang kami cintai, semoga kita semua mendapatkan syafaatnya di akhirat. Amin, ya Tuhan semesta alam.

Laporan Tugas Akhir berjudul "ANALISIS PERBAIKAN DROP VOLTAGE MELALUI PERUBAHAN TAP CHANGER PADA TRAFO DISTRIBUSI 50 kVA 3 PHASA MENGGUNAKAN ETAP 19" ini lahir dari komitmen dan usaha sungguh-sungguh, yang tak dapat dipisahkan dari arahan serta bantuan dari berbagai pihak terkait. Karenanya, pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ungkapan terima kasih yang tulus dan mendalam kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Hj. Novi Marlyana, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Dosen pembimbing Bapak Dr. Bustanul Arifin, ST., MT. yang telah memberikan bimbingan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
4. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas bantuannya dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.
5. Kedua orang tua saya yang telah memberikan doa dan dukungan selama saya berkuliahan di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
6. Seluruh Karyawan PT.PLN (Persero) ULP Adonara yang telah membantu saya dalam memperoleh data.
7. Teman seperjuangan saya yang telah banyak membantu selama perkuliahan dan penyusunan laporan tugas akhir ini.

8. Alya Dewi Ishma Wardhani, yang sudah membersamai penulis dalam mengerjakan laporan tugas akhir ini hingga bisa menyelesaikan laporan bersama.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis memohon maaf atas segala kekurangan dan menerima kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, penulis berharap semoga karya ini bermanfaat bagi pembaca, sekaligus menjadi pembelajaran berharga bagi penulis sendiri.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Semarang, 25 Juli 2025

Penulis,

Maulana Yusuf Arraihan

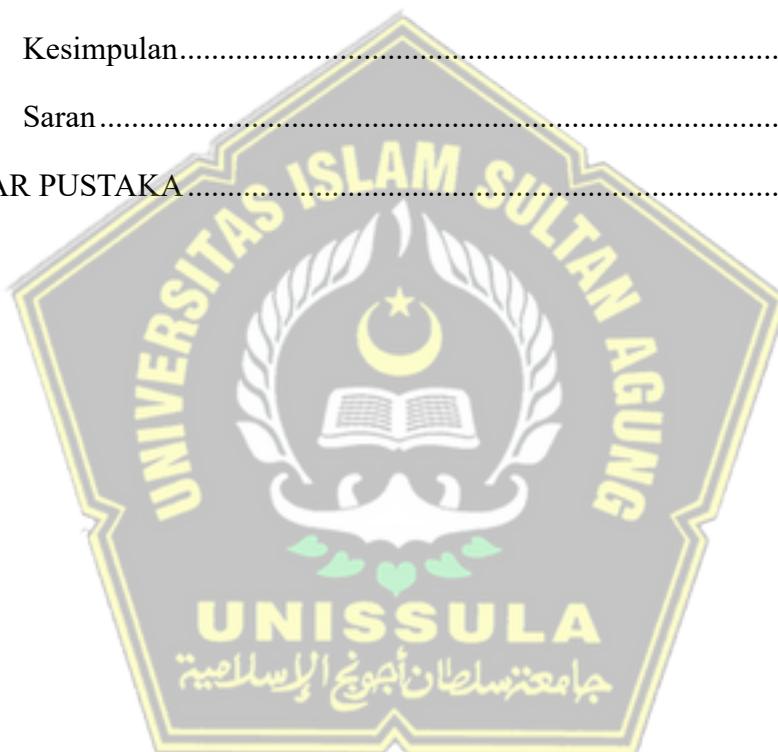


## DAFTAR ISI

DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRACT.....</i>	ii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Pembatasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II.....	7
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 Dasar Teori .....	9
2.2.1 Sistem Distribusi.....	9
2.2.2 Gardu Distribusi.....	11
2.2.3 Transformator.....	15
2.2.4 <i>Tap Changer</i> Transformator.....	26
2.2.5 Jenis Beban .....	35
2.2.6 Rugi Pembebatan Transformator .....	35
2.2.7 Daya .....	36

2.2.8	Jatuh Tegangan.....	37
2.2.9	Electrical Transient Analysis Program (ETAP) .....	39
BAB III.....		41
METODE PENELITIAN.....		41
3.1	Model Penelitian.....	41
3.2	Data Penelitian.....	42
3.3	Langkah Penelitian .....	45
3.3.1	Studi Literatur .....	45
3.3.2	Pengumpulan Data Lapangan .....	45
3.3.3	Simulasi.....	45
3.3.4	Analisa.....	46
3.3.5	Implementasi Lapangan .....	46
3.3.6	Penyusunan Laporan .....	46
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	46
BAB IV .....		48
HASIL DAN PEMBAHASAN.....		48
4.1	Analisis Kondisi Layanan Trafo dan Pertumbuhan Konsumen pada ULP Adonara .....	48
4.2	Perhitungan Tegangan Sekunder Pada Trafo.....	51
4.2.1	Perhitungan ratio lilitan trafo .....	51
4.2.2	Perhitungan tegangan sekunder pada putaran <i>tap changer</i> trafo ....	51
4.3	Analisa Perhitungan Tegangan Sekunder Pada Trafo.....	56
4.4	Simulasi Perubahan <i>Tap changer</i> Trafo Menggunakan ETAP .....	59
4.4.1.	Hasil Simulasi Tegangan Sebelum Pengaturan Tap Transformator	59
4.4.2.	Simulasi perubahan <i>tap changer</i> trafo .....	64

4.4.3. Analisa Hasil Simulasi Perubahan <i>Tap Changer</i> Trafo Dengan Beban	
66	
4.5 Penyeimbangan Beban dan Perbaikan Sambungan Rumah (SR) Deret.	67
4.6 Praktik perubahan <i>tap changer</i> pada Trafo Distribusi Gardu AD41 .....	72
4.7 Pengaruh Perubahan pada Pelanggan.....	75
4.8 Perbandingan Hasil Simulasi dan Praktik Lapangan .....	76
BAB V PENUTUP.....	78
5.1 Kesimpulan.....	78
5.2 Saran .....	79
DAFTAR PUSTAKA.....	81



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik.....	10
Gambar 2. 2 Gardu Cantol .....	12
Gambar 2. 3 Gardu Portal .....	12
Gambar 2. 4 Gardu Beton .....	13
Gambar 2. 5 Gardu Mobil .....	14
Gambar 2. 6 Gardu Kios .....	14
Gambar 2. 7 Inti Besi ( <i>Core</i> ) pada Transformator .....	16
Gambar 2. 8 Kumparan pada Transformator.....	16
Gambar 2. 9 <i>Bushing</i> Transformator.....	17
Gambar 2. 10 <i>Tap Changer</i> Transformator .....	18
Gambar 2. 11 <i>Dehydrating Breather</i> Transformer .....	19
Gambar 2. 12 Rugi-rugi transformator.....	20
Gambar 2. 13 Transformator keadaan tanpa beban.....	23
Gambar 2. 14 Transformator keadaan berbeban .....	25
Gambar 2. 15 Konstruksi <i>OLTC</i> pada transformator.....	28
Gambar 2. 16 Mekanisme kerja <i>OLTC tap Selector-Diverter</i> .....	31
Gambar 2. 17 Mekanisme kerja <i>OLTC tap selector</i> .....	32
Gambar 2. 18 Segitiga daya beban listrik bersifat kapasitif .....	36
Gambar 2. 19 Segitiga daya listrik bersifat induktif.....	37
Gambar 2. 20 Hubungan antara tegangan dengan R dan X .....	38
Gambar 2. 21 Tampilan Etap.....	40
Gambar 3. 1 <i>Single Line Diagram</i> Penyalur Lamahala.....	41
Gambar 3. 2 Form Pengukuran Gardu AD41.....	44
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian.....	47
Gambar 4.1 Diagram Satu Garis Saluran Transmisi TM 20 kV .....	60
Gambar 4. 2 Hasil Analisis Tegangan dengan ETAP Sebelum.....	63
Gambar 4. 3 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-2 .....	64
Gambar 4. 4 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-3 .....	65
Gambar 4. 5 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-4 .....	65
Gambar 4. 6 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-5 .....	66

Gambar 4. 7 Peta Pelanggan per Tiang Sebelum Perbaikan .....	69
Gambar 4. 8 Peta Pelanggan per Tiang Setelah Perbaikan .....	71
Gambar 4. 9 Posisi Awal Tap ke-1 .....	74
Gambar 4. 10 Posisi Akhir Tap ke-3 .....	74



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi daya trafo .....	22
Tabel 3. 1 Nameplate Trafo.....	42
Tabel 3. 2 Simulasi perubahan posisi Tap trafo dengan beban .....	45
Tabel 4.1 Perhitungan ratio lilitan trafo .....	51
Tabel 4.2 Perhitungan tegangan sekunder.....	52
Tabel 4.3 Perhitungan tegangan sekunder.....	53
Tabel 4.4 Perhitungan Tegangan Sekunder .....	53
Tabel 4. 5 Perhitungan tegangan sekunder.....	54
Tabel 4. 6 Perhitungan tegangan sekunder.....	55
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan tegangan sekunder .....	56
Tabel 4. 8 Data Pengukuran Tegangan dan Beban Gardu AD41 Siang Hari .....	61
Tabel 4. 9 Data Pengukuran Tegangan BebanGardu AD41 Malam Hari.....	62
Tabel 4. 10 Tabel Data Beban Per Tiang Sebelum Dilakukan Perbaikan Sr Deret	69
Tabel 4. 11 Tabel Data Beban Per Tiang Setelah Dilakukan Perbaikan SR Deret	71
Tabel 4. 12 Tabel Data Pengukuran Tegangan dan Beban Sebelum Dilakukan Perubahan <i>Tap Changer</i> .....	73
Tabel 4. 13 Tabel Data Pengukuran Tegangan dan Beban Setelah Dilakukan Perubahan <i>Tap Changer</i> .....	75
Tabel 4. 14 Data Pengukuran Pelanggan TR.....	75

## ABSTRAK

Kualitas tegangan merupakan aspek krusial yang harus dijaga dalam sistem distribusi tenaga listrik. Salah satu permasalahan yang timbul adalah penurunan tegangan (*drop voltage*) pada ujung saluran distribusi, yang disebabkan oleh beban yang tinggi dan jarak saluran yang panjang, seperti yang diamati pada Gardu Distribusi AD41 PT PLN (Persero) ULP Adonara. Permasalahan ini dapat berdampak pada kualitas daya dan merugikan pelanggan. Maka, salah satu upaya yang dapat diterapkan untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan memanfaatkan penyesuaian posisi tap changer pada trafo distribusi. Penelitian ini bertujuan menganalisis perbaikan *drop voltage* melalui simulasi perubahan posisi tap changer pada trafo distribusi 50 kVA, 3 phasa. Metode yang digunakan adalah pemodelan sistem distribusi dalam bentuk *single line diagram* dan analisis aliran daya menggunakan perangkat lunak ETAP 19. Model penelitian menggunakan parameter data pengukuran tegangan dan beban serta spesifikasi sistem distribusi untuk menentukan posisi tap trafo yang optimal. Penelitian ini menyimpulkan bahwa ETAP 19 mampu digunakan untuk simulasi perbaikan *drop voltage* melalui perubahan *tap changer* dibuktikan dengan hasil analisis simulasi aliran daya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi awal (sebelum penyesuaian tap), tegangan pada sisi sekunder trafo adalah 217 V, berada di bawah batas standar tegangan yang diizinkan. Setelah dilakukan simulasi perubahan tap changer ke posisi optimal, yaitu tap ke-3, tegangan sistem meningkat signifikan menjadi 228 V, sehingga sudah memenuhi standar pelayanan yang berlaku.

**Kata Kunci:** Drop Voltage, Trafo 50 kVA, Tap Changer, ETAP 19

## ***ABSTRACT***

*The voltage quality is a crucial aspect that must be maintained in an electrical power distribution system. One of the problems that arises is the decrease in voltage (drop voltage) at the end of the distribution line, caused by high loads and long line distances, as observed at the AD41 Distribution Substation of PT PLN (Persero) ULP Adonara. This problem can impact power quality and harm customers. Therefore, one effort that can be applied to overcome this is to utilize the adjustment of the tap changer position on the distribution transformer. This research aims to analyze the improvement of drop voltage through the simulation of tap changer position changes on a 50 kVA, 3-phase distribution transformer. The method used is the modeling of the distribution system in the form of a single line diagram and power flow analysis using the ETAP 19 software. The research model utilizes peak load data parameters and distribution system to determine the optimal transformer tap position. This study concludes that ETAP 19 is capable of being used for simulating drop voltage improvement through tap changer adjustment, which is proven by the results of the power flow simulation analysis. The simulation results show that in the initial condition (before tap adjustment), the voltage on the secondary side of the transformer was 217 V, which is below the permitted standard voltage limit. After simulating the tap changer change to the optimal position, namely tap 3, the system voltage increased significantly to 228 V, thus meeting the applicable service standards.*

**Keywords:** Drop Voltage, Transformator 50 kVA, Tap Changer, ETAP 19

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan, yang mencakup aspek transmisi dan distribusi, sering menghadapi berbagai kendala, termasuk peningkatan beban listrik yang terus menerus. Keandalan sistem kelistrikan bergantung pada kemampuannya untuk memastikan pasokan listrik yang terus menerus dengan kualitas daya yang memadai, termasuk regulasi tegangan dan frekuensi yang stabil. Kualitas daya listrik dipengaruhi oleh berbagai elemen dalam sistem, mulai dari unit pembangkit, jaringan transmisi, hingga sirkuit distribusi. Berdasarkan Standar Perencanaan Listrik Negara (SPLN) Nomor 72 Tahun 1987, batas penurunan tegangan yang diperbolehkan dalam jaringan distribusi adalah 2% untuk sistem spindel atau kluster dan 5% untuk sistem radial[1].

Permintaan energi listrik yang terus meningkat, baik di sektor industri, pembangunan, maupun rumah tangga, menuntut pengelolaan sistem yang lebih efisien. Jaringan distribusi memegang peran krusial karena menjadi penghubung langsung dengan konsumen. Namun, konsumen yang jauh dari pembangkit sering mengalami penurunan tegangan yang signifikan, sehingga diperlukan upaya untuk mempertahankan atau meningkatkan profil tegangan sistem tanpa mengubah infrastruktur yang ada.

Masalah drop tegangan atau jatuh tegangan merupakan salah satu keluhan umum masyarakat. Fenomena ini terjadi ketika tegangan listrik turun selama proses distribusi, sehingga tegangan yang diterima konsumen tidak sesuai dengan yang dikirim. Penyedia listrik seperti PLN dituntut untuk memenuhi standar kualitas dan kuantitas daya, termasuk kontinuitas layanan, faktor daya, dan frekuensi yang stabil. Namun, PLN menghadapi kendala seperti susut daya dan rugi-rugi pada saluran transmisi dan distribusi. Upaya perbaikan seperti pemasangan kapasitor, modifikasi konfigurasi jaringan, dan penyesuaian tegangan pada gardu induk belum sepenuhnya efektif[2].

Selain perubahan tap trafo, beberapa metode lain yang dapat digunakan untuk memperbaiki tegangan drop adalah pemasangan kapasitor untuk kompensasi daya reaktif dan peningkatan faktor daya, modifikasi konfigurasi jaringan seperti rekonfigurasi penyulang atau penambahan penyulang baru untuk mempersingkat jarak distribusi dan mengurangi impedansi, serta peningkatan ukuran konduktor untuk mengurangi resistansi saluran. Penggunaan pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulator/AVR*) dan *Distributed Generation* (DG) atau pembangkit tersebar di dekat pusat beban juga dapat menjadi solusi efektif untuk menjaga stabilitas dan profil tegangan sistem.

Dalam konteks Trafo Distribusi 50 kVA pada Gardu Distribusi AD41, perubahan *tap changer* dipilih sebagai fokus penelitian karena merupakan solusi yang relatif mudah diimplementasikan dan memiliki biaya operasional serta investasi awal yang lebih rendah dibandingkan metode lain seperti penambahan kapasitor bank besar atau rekonfigurasi jaringan ekstensif. Perubahan *tap changer* pada transformator distribusi memungkinkan penyesuaian rasio transformasi tegangan secara langsung di lokasi, memberikan fleksibilitas untuk mengatasi fluktuasi tegangan tanpa memerlukan perubahan infrastruktur fisik yang signifikan atau waktu henti operasional yang lama. Pendekatan ini juga sangat relevan dengan masalah spesifik penurunan tegangan dari 20 KV menjadi 19 KV yang terjadi di gardu tersebut.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini akan menganalisis pengaruh perubahan tap trafo distribusi untuk memperbaiki tegangan drop pada Trafo Distribusi 50 kVA menggunakan ETAP 19. Penelitian ini bertujuan untuk memantau dan menjaga keandalan sistem distribusi, khususnya pada Trafo Distribusi 50 kVA pada Gardu Distribusi AD41, di mana terjadi penurunan tegangan dari 20 KV menjadi 19 KV. Dengan menggunakan ETAP 19, penelitian ini dapat mensimulasikan kondisi aktual transformator dan beban, sehingga hasilnya lebih akurat dan efisien dibandingkan penelitian sebelumnya.

## 1.2 Perumusan Masalah

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

- a. Bagaimana kondisi jatuh tegangan pada Trafo Distribusi 50 kVA di Gardu AD41 sebelum dilakukan perubahan tap trafo dan dampaknya terhadap kualitas daya yang diterima oleh konsumen?
- b. Bagaimanakah pengaruh perubahan posisi *tap changer* pada transformator distribusi terhadap peningkatan profil tegangan dan minimalisasi *voltage drop* pada Trafo Distribusi 50 kVA di Gardu AD41, ditinjau dari hasil simulasi ETAP 19 dan implementasi di lapangan?

### 1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan hasilnya dapat diukur secara efektif, ruang lingkup analisis dibatasi pada hal-hal berikut:

- a. Penelitian hanya dilakukan pada Trafo Distribusi 50 kVA Gardu Distribusi AD41 di PT PLN (Persero) ULP Adonara, dengan fokus pada trafo distribusi 20 KV yang mengalami masalah *voltage drop*.
- b. Parameter Analisis:
  1. Variabel utama: perubahan posisi tap charger pada trafo distribusi.
  2. Parameter yang diukur: tegangan sekunder trafo dan ketidakseimbangan beban.
  3. Tidak membahas komponen lain seperti gangguan harmonik atau susut energi (losses).
- c. Analisis menggunakan ETAP 19 untuk pemodelan sistem dan simulasi perubahan tap, dengan asumsi:
  1. Data beban dan jaringan mengacu pada kondisi riil di lapangan.
  2. Karakteristik trafo dan jaringan dianggap ideal (tanpa gangguan eksternal).
- d. Batasan Operasional:
  1. Tidak mencakup modifikasi fisik jaringan (hanya simulasi perubahan tap).
  2. Periode pengamatan dibatasi pada satu siklus beban puncak dan normal.
  3. Tidak mengevaluasi dampak perubahan tap pada peralatan lain di gardu induk

## 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan dan pembatasan masalah yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk:

- a. Mengidentifikasi kondisi jatuh tegangan (voltage drop) pada Gardu Distribusi AD41, di mana tegangan saat ini tercatat sebesar 217 V di pangkal dan 204 V di ujung jaringan sebelum dilakukan perubahan tap transformator, serta mengkaji dampaknya terhadap kualitas daya yang diterima oleh konsumen.
- b. Mengevaluasi pengaruh perubahan posisi tap charger terhadap perbaikan profil tegangan (*voltage regulation*) di sisi sekunder trafo, pengurangan drop tegangan yang dialami konsumen.
- c. Membuktikan keakuratan solusi melalui simulasi dinamik menggunakan ETAP 19, dengan membandingkan hasil sebelum dan setelah penyesuaian tap.
- d. Menyusun strategi operasional bagi PLN dalam menangani masalah drop tegangan, termasuk: Panduan perubahan tap optimal, Batasan teknis untuk menghindari risiko operasional.

## 1.5 Manfaat Penelitian

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

- a. Bagi PLN: Solusi *cost-effective* untuk meningkatkan kualitas daya tanpa investasi infrastruktur baru.
- b. Bagi Konsumen: Mengurangi gangguan akibat tegangan tidak stabil.
- c. Bagi Penelitian Selanjutnya: Data dasar untuk studi optimasi jaringan distribusi berbasis simulasi.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Bagian ini akan memberikan Gambaran umum secara garis besar mengenai struktur dan isi dari setiap bab yang tersaji dalam laporan ini. Dengan demikian, pembaca dapat memahami alur dan fokus pembahasan dari awal hingga akhir.

Sistematika penulisan yang diterapkan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

## BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang Gambaran umum dari permasalahan yang akan dibahas. Terdiri dari 6 sub bab yaitu latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

## BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini memuat landasan teoretis yang bersumber dari berbagai jurnal ilmiah dan penelitian sebelumnya. Sumber-sumber tersebut dipilih berdasarkan relevansinya, baik karena memiliki permasalahan serupa maupun karena menggunakan metode yang relevan dengan penelitian yang akan dilaksanakan. Di samping itu, bab ini juga menyajikan dasar-dasar teori fundamental yang akan menjadi penunjang utama dalam menganalisis dan membahas temuan-temuan penelitian ini.

## BAB III : METODE PENELITIAN

Bab ini menguraikan secara rinci model penelitian yang digunakan, proses pengambilan data, objek penelitian yang menjadi fokus, jenis data yang dikumpulkan, prosedur yang ditempuh selama penelitian, serta diagram alir yang menggambarkan langkah-langkah penelitian.

## BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang data dan analisis yang mendukung penelitian mengenai pengaruh perubahan *tap changer* trafo distribusi terhadap perbaikan *voltage drop*. Data yang disajikan terdiri dari data hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 19 dan data teknis lapangan yang diperoleh dari pengukuran langsung di Gardu Distribusi AD41. Analisis akan berfokus pada perbandingan antara hasil simulasi yang bersifat teoritis dengan kondisi nyata di lapangan, untuk memvalidasi keefektifan perubahan *tap* trafo dalam meningkatkan kualitas tegangan dan mengatasi penurunan tegangan pada pelanggan.

## BAB V : PENUTUP

Bab ini memaparkan penyelesaian tugas akhir secara menyeluruh, serta pertimbangan dan rekomendasi yang didasarkan pada temuan data penelitian serta analisis yang dilakukan.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

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

- a. “Analysis of Voltage Quality And Losses Improvement Using Tap Changer Transformer” melakukan penelitian penting tentang pengaruh pengaturan *tap changer* terhadap kualitas daya melalui studi kasus di penyulang WBK. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyesuaian posisi *tap changer* yang tepat mampu meningkatkan kualitas tegangan secara signifikan, dengan dampak positif pada efisiensi sistem distribusi dan pengurangan rugi-rugi daya. Temuan ini tidak hanya bernilai akademis tetapi juga memiliki aplikasi praktis dalam perbaikan jaringan distribusi, dengan potensi penghematan biaya operasional hingga 12%[3].
- b. “Pengaruh Optimalisasi Maintenance Terhadap On Load Tap Changer Transformator Daya 50 MVA 150/20 kV,” memberikan kontribusi penting dalam optimalisasi perawatan *On Load Tap Changer (OLTC)* pada transformator daya 50 MVA 150/20 kV. Penelitian ini berfokus pada analisis komponen kritis dan pengembangan strategi *maintenance preventif* yang terbukti mampu memperpanjang masa pakai *OLTC* hingga 30% dan mengurangi downtime transformator sebesar 40%. Temuan ini menjadi landasan penting dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik[4].
- c. “Volume 4 Pengaruh Setting Tap Transformator Terhadap Profil Tegangan Pada Jaringan IEEE 14 Bus,” melakukan penelitian menggunakan model sistem *IEEE 14 bus* untuk menganalisis pengaruh variasi pengaturan tap changer terhadap profil tegangan. Melalui simulasi digital, penelitian ini berhasil mengidentifikasi setting tap optimal yang dapat meminimalkan deviasi tegangan, memberikan rekomendasi operasional yang berharga bagi sistem distribusi. Hasil penelitian menegaskan peran krusial pengaturan tap changer dalam menjaga kualitas daya[5].

- d. “Rancangan Perubah Sadapan (Tap Changer) Transformator Distribusi,” dalam penelitiannya tentang transformator distribusi 20 kV menemukan hubungan linear antara posisi *tap changer* dengan output tegangan. Dengan menggunakan simulasi komputer, penelitian ini menunjukkan kemampuan reduksi deviasi tegangan hingga 8%, sekaligus menyusun pedoman teknis untuk operasi transformator distribusi yang lebih efektif. Temuan ini memberikan dasar penting untuk peningkatan akurasi regulasi tegangan[6].
- e. “Analisa Pengukuran Ratio Transformator Daya Yang Menggunakan On Load Tap Changer (Aplikasi Pada Transformator Daya Paya Geli Pln Medan),” melakukan studi lapangan pada transformator di Gardu Induk PLN Binjai untuk menganalisis kinerja *OLTC*. Hasil penelitian menunjukkan korelasi kuat ( $R^2=0,92$ ) antara posisi tap dengan tegangan output, membuktikan efektivitas *OLTC* dalam menstabilkan tegangan selama fluktuasi beban. Penelitian ini memberikan bukti empiris tentang pentingnya pengelolaan *OLTC* yang tepat[7].
- f. “Analisis Perbaikan Tegangan Ujung Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 Kv Dengan Simulasi ETAP (Studi Kasus PT PLN (Persero) Rayon Kuala,” Penelitian ini menganalisis perbaikan tegangan ujung pada jaringan 20 kV di Penyulang BN.04 Gardu Induk Binjai menggunakan simulasi ETAP. Hasil menunjukkan bahwa kondisi eksisting mengalami rugi daya sebesar 12,7% (652,5 kW) dan drop tegangan 22,8% (4,643 kV), melebihi standar SPLN No.72/1987 (maksimal 5% rugi daya dan 10% drop tegangan). Solusi yang diusulkan adalah pemisahan penyulang dengan penambahan kabel XLPE 240 mm<sup>2</sup>, yang berhasil menurunkan rugi daya menjadi 5,71% (326,4 kW) dan drop tegangan menjadi 6,51% (1,326 kV). Selain itu, strategi ini menghemat biaya produksi listrik hingga Rp4,3 miliar/tahun dengan payback period 7,15 tahun[8].
- g. “Pengaruh Perubahan Tap Charger Pada Trafo Distribusi 20 Kv Terhadap Nilai Tegangan Sekunder Dan Susut Energi Transformator (Losses) Di Gardu Induk Pandean Lamper,” mengkaji dampak *voltage drop* pada sistem distribusi yang disebabkan oleh berbagai faktor seperti fluktuasi beban. Penelitian ini

mengidentifikasi masalah penurunan kinerja peralatan dan keluhan pelanggan terkait kualitas daya, sekaligus menawarkan solusi melalui optimasi pengaturan *tap changer* sebagai pendekatan yang efektif secara biaya. Temuan penelitian ini juga mencakup strategi manajemen beban puncak yang komprehensif[9].

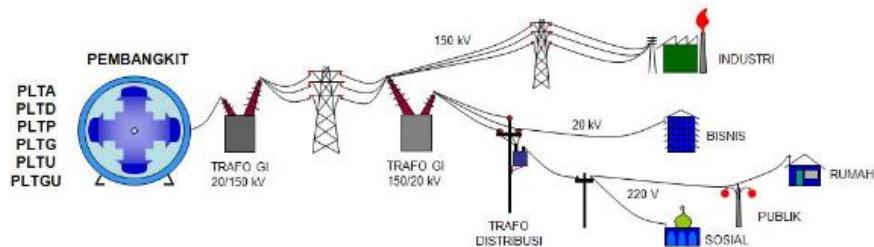
## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Sistem Distribusi

Jaringan distribusi listrik memainkan peran krusial dalam rangkaian penyampaian daya listrik, mulai dari sumber pembangkitan hingga ke tangan konsumen akhir. Sistem ini mencakup berbagai tahapan perubahan tegangan yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi transmisi sekaligus mengurangi kehilangan daya selama proses penyaluran. Pada tahap pertama, pembangkit listrik menghasilkan energi dengan tegangan menengah yang biasanya berada pada kisaran 11 kV sampai 24 kV. Tegangan ini kemudian ditingkatkan secara besar-besaran di gardu induk melalui transformator *step-up* menjadi level tegangan ekstra tinggi, seperti 70 kV, 154 kV, 220 kV, atau bahkan mencapai 500 kV. Prinsip dasar yang digunakan adalah bahwa besarnya daya yang hilang pada konduktor berbanding lurus dengan kuadrat dari arus yang mengalir. Artinya, dengan mengurangi besarnya arus yang mengalir melalui konduktor, maka kehilangan daya juga akan berkurang secara signifikan. Maka dari itu, dengan meningkatkan level tegangan, arus listrik yang mengalir dapat diperkecil secara drastis sehingga mengurangi kehilangan daya selama proses transmisi[10].

Pasca melintasi saluran transmisi bertegangan ekstra tinggi, daya listrik kemudian memasuki gardu induk distribusi. Pada gardu tersebut, tegangan dikurangi ke tingkat menengah (sekitar 20 kV) melalui penggunaan transformator pengurang tegangan. Lebih lanjut, energi listrik disalurkan melalui jaringan primer distribusi ke sejumlah gardu distribusi yang tersebar di berbagai wilayah. Di gardu distribusi, tegangan diturunkan lagi menjadi tingkat rendah, yakni 220/380 Volt, yang menjadi standar untuk kebutuhan rumah tangga maupun industri skala kecil.

Tegangan rendah ini kemudian didistribusikan melalui jaringan sekunder hingga sampai ke konsumen akhir.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Gambar 2.1 memperlihatkan sistem distribusi tenaga listrik yang merupakan jaringan rumit dan krusial dalam menyalurkan daya elektrik dari pusat pembangkitan hingga ke pengguna akhir. Alur distribusi ini mencakup beberapa fase, dimulai dari pengiriman energi listrik dari unit pembangkit ke gardu induk transmisi, kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi bertegangan ekstra tinggi, selanjutnya mengalami penurunan tegangan di gardu distribusi induk, sebelum akhirnya didistribusikan ke pelanggan melalui jaringan bertegangan menengah dan rendah. Secara umum, sistem tenaga listrik terbagi menjadi empat komponen utama yang meliputi subsistem pembangkitan, transmisi, distribusi, dan jaringan pelayanan. Setiap subsistem memiliki peran dan ciri khas tersendiri, namun saling berhubungan dan membentuk satu kesatuan sistem yang utuh.

Sistem distribusi sebagai fokus utama pembahasan dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori pokok, yaitu jaringan distribusi tegangan menengah dan jaringan distribusi tegangan rendah. Jaringan distribusi tegangan menengah beroperasi pada rentang 1 kV hingga 35 kV, sedangkan jaringan distribusi tegangan rendah beroperasi pada 0,4 kV. Secara umum, jaringan tegangan menengah dimulai dari gardu induk dengan konfigurasi radial atau loop, sedangkan jaringan tegangan rendah biasanya menggunakan konfigurasi radial sederhana. Pada bagian terminal sistem distribusi, terdapat sambungan listrik yang menghubungkan jaringan distribusi dengan instalasi pelanggan. Sambungan ini dilengkapi dengan Alat Pembatas dan Pengukur (APP) yang berfungsi ganda sebagai pengaman instalasi

konsumen dari gangguan listrik sekaligus sebagai alat pengukur pemakaian energi listrik[11].

### **2.2.2 Gardu Distribusi**

Gardu distribusi memegang posisi strategis sebagai salah satu elemen utama dalam sistem distribusi tenaga listrik, dengan fungsi krusial sebagai penghubung antara jaringan transmisi dan pelanggan akhir. Peran utamanya adalah membagi dan mendistribusikan energi listrik ke berbagai jenis beban, pada tingkat tegangan menengah maupun rendah. Dalam melaksanakan tugasnya, gardu distribusi ini dilengkapi dengan sejumlah peralatan esensial, seperti transformator distribusi, panel kontrol, dan sistem proteksi.

Transformator distribusi yang digunakan di gardu-gardu ini umumnya berjenis *step-down* (penurun tegangan), yang berfungsi untuk mengkonversi tegangan tinggi menjadi tegangan siap pakai. Sebagai contoh, transformator ini mampu menurunkan tegangan dari level menengah 20 kV menjadi tegangan rendah 380V untuk keperluan industri atau 220V untuk kebutuhan rumah tangga. Proses penurunan tegangan ini sangat penting karena menyesuaikan tegangan transmisi yang tinggi dengan kebutuhan peralatan listrik konsumen yang umumnya beroperasi pada tegangan lebih rendah[12].

Dalam proses distribusi daya listrik, terdapat berbagai tipe gardu distribusi yang umum diterapkan, di antaranya:

a. **Gardu Cantol**

Sistem gardu cantol merupakan salah satu jenis gardu distribusi berbasis tiang dengan pemasangan terbuka (outdoor). Konstruksi gardu portal ini memanfaatkan satu tiang tunggal, di mana transformator ditempatkan pada bagian atas tiang. Transformator yang digunakan meliputi tipe satu fasa dan tiga fasa, masing-masing dengan jenis serta kapasitas beban yang disesuaikan.



Gambar 2. 2 Gardu Cantol

Gambar 2.2 menampilkan contoh gardu cantol baik dengan konfigurasi trafo 1 fasa maupun 3 fasa. Perangkat proteksi dan *switching* telah terintegrasi sepenuhnya di dalam tangki transformator. Untuk menyediakan lapisan perlindungan ekstra, *Lightning Arrester* (LA) diinstal secara terpisah. Instalasi LA tersebut didukung oleh konduktor pembumian yang terhubung langsung ke beban transformator. Di sisi lain, Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) dibatasi hingga kapasitas dua jurusan dan dilengkapi dengan pemutus pemisah pada sisi masuknya.

#### b. Gardu Portal

Gardu portal merupakan jenis gardu instalasi terbuka (outdoor) yang menggunakan struktur dua tiang atau lebih. Pemasangan gardu portal dilakukan di area atas, sedangkan papan hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR) ditempatkan di bagian bawah gardu portal.

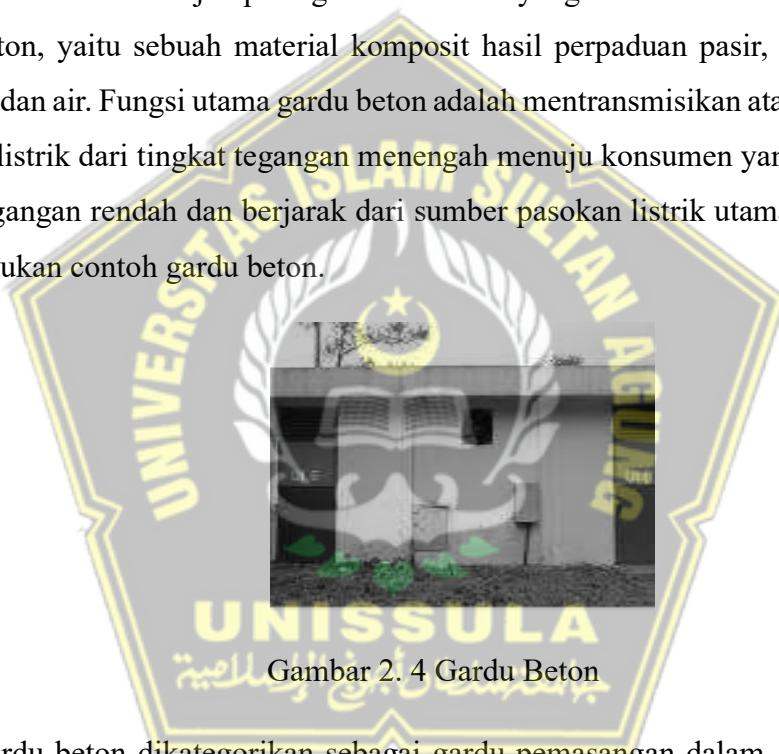


Gambar 2. 3 Gardu Portal

Gambar 2.3 menampilkan konfigurasi Gardu portal. Umumnya gardu portal yang dipasok dari Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah tipe T-section, dilengkapi dengan peralatan proteksi yang terdiri dari *Fuse Cut-Out* (FCO) untuk mengamankan transformator dari arus hubung singkat melalui elemen leburnya, serta *Lightning Arrestor* (LA) sebagai perangkat pencegah lonjakan tegangan pada transformator akibat sambaran petir.

#### c. Gardu Beton

Gardu beton merujuk pada gardu distribusi yang elemen konstruksinya terbuat dari beton, yaitu sebuah material komposit hasil perpaduan pasir, agregat kasar, semen, dan air. Fungsi utama gardu beton adalah mentransmisikan atau meneruskan tenaga listrik dari tingkat tegangan menengah menuju konsumen yang berlokasi di area tegangan rendah dan berjarak dari sumber pasokan listrik utama. Gambar 2.4 menunjukkan contoh gardu beton.

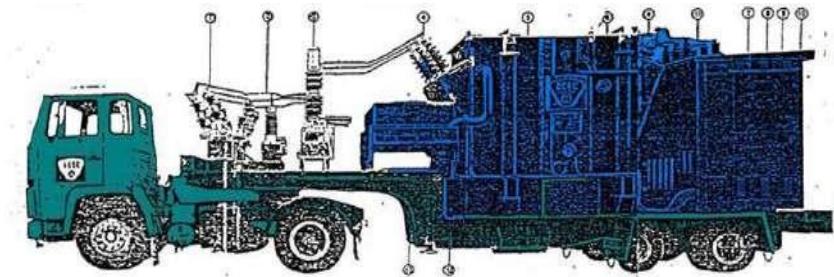


Gambar 2. 4 Gardu Beton

Gardu beton dikategorikan sebagai gardu pemasangan dalam, merujuk pada fakta bahwa sebagian besar perangkat penghubung, pemutus sirkuit, pemisah, dan transformator distribusi ditempatkan di dalam struktur beton. Selama proses konstruksi, seluruh komponen dipasang di lokasi yang ditentukan untuk pembangunan gardu beton.

#### d. Gardu Mobil

Gardu mobil adalah gardu distribusi yang dipasang di atas kendaraan, memungkinkannya untuk dipindahkan ke lokasi yang memerlukan pasokan daya tambahan. Oleh karena itu, gardu mobil bersifat temporer.



Gambar 2. 5 Gardu Mobil

Gambar 2.5 merupakan contoh konfigurasi dari gardu mobil. Gardu mobil secara umum dikategorikan menjadi dua tipe. Tipe pertama adalah gardu mobil tipe pasang dalam, yang mana seluruh instrumennya berada di dalam struktur baja serupa kios dan ditempatkan di atas sebuah unit mobil. Tipe kedua adalah gardu mobil tipe pasang luar, yang diangkut menggunakan *trailer*, sehingga memiliki dimensi yang lebih lapang dan memanjang. Pada tipe ini, komponen-komponen seperti sakelar pembebanan, pemisah, dan transformator distribusi dapat diamati dari eksterior. Kapasitas gardu mobil tipe pasang luar dilaporkan lebih tinggi jika dibandingkan dengan gardu mobil tipe pasang dalam..

#### e. Gardu Kios

Gardu kios merupakan jenis gardu yang dibangun menggunakan material baja, *fiberglass*, atau perpaduan keduanya, yang dapat dirakit di lokasi yang telah dialokasikan untuk pembangunan gardu distribusi. Pembangunan gardu ini dilakukan di area yang tidak memungkinkan untuk konstruksi gardu beton. Mengingat sifatnya yang bergerak atau portabel, kapasitas maksimal gardu kios ini dibatasi hingga 400 kVA, dengan kemampuan melayani empat jalur tegangan rendah. Contoh gardu kios dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Gardu Kios

### 2.2.3 Transformator

Alat listrik yang bekerja dengan induksi elektromagnetik disebut transformator. Mereka memiliki kemampuan untuk memindahkan energi listrik dari rangkaian listrik satu ke rangkaian listrik lainnya melalui gandengan magnet. Sebuah trafo memiliki dua sisi: sisi primer dan sisi sekunder. Perbandingan tegangan antara kedua sisi berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding balik dengan besar arus.

#### a. **Transformator Distribusi**

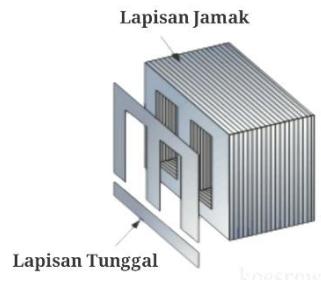
Salah satu komponen penting dalam sistem distribusi adalah transformator distribusi. Transformator distribusi, juga dikenal sebagai gardu distribusi, mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah; misalnya, transformator step-down mengubah tegangan 20kV menjadi 380V atau 220V. Namun, transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan disebut transformator *step-up*, dan fungsinya menaikkan tegangan agar jika tenaga listrik ditambahkan ke jaringan yang panjang tidak mengalami penurunan tegangan (voltage drop)[13].

#### b. **Komponen Transformator**

Berikut jenis konstruksi sebuah transformator secara umum terdiri atas beberapa komponen utama, yang dapat dikelompokkan ke dalam bagian inti, perlengkapan bantu, sistem proteksi, serta berbagai peralatan penunjang..

##### 1. Inti Besi

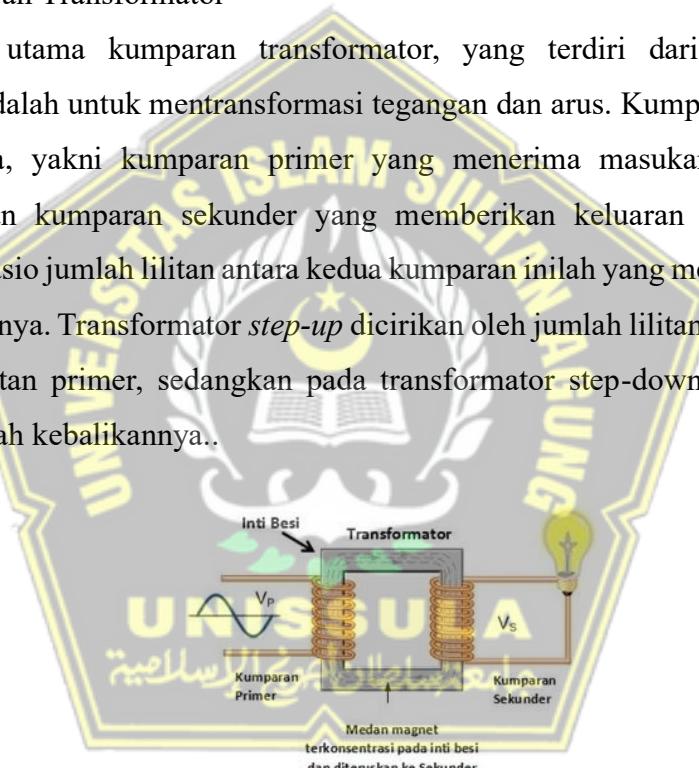
Kern atau inti besi pada transformator berfungsi sebagai jalur bagi fluks magnet dari kumparan dan dibuat dari lembaran-lembaran plat besi lunak atau baja silikon yang disatukan. Pemilihan bahan baja silikon serta konstruksinya yang berlapis-lapis bertujuan untuk menekan kerugian energi, yakni rugi-rugi histeresis dan panas yang diakibatkan oleh arus pusar (Eddy Current). Pada Gambar 2.7 dapat dilihat bahwa Inti Besi terdiri dari lapisan tunggal dan lapisan jamak.



Gambar 2. 7 Inti Besi (*Core*) pada Transformator

## 2. Kumparan Transformator

Fungsi utama kumparan transformator, yang terdiri dari lilitan kawat berisolasi, adalah untuk mentransformasi tegangan dan arus. Kumparan ini terbagi menjadi dua, yakni kumparan primer yang menerima masukan dari sumber tegangan dan kumparan sekunder yang memberikan keluaran kepada beban. Perbedaan rasio jumlah lilitan antara kedua kumparan inilah yang menentukan jenis transformasinya. Transformator *step-up* dicirikan oleh jumlah lilitan sekunder yang melebihi lilitan primer, sedangkan pada transformator *step-down*, kondisi yang berlaku adalah kebalikannya..



Gambar 2. 8 Kumparan pada Transformator

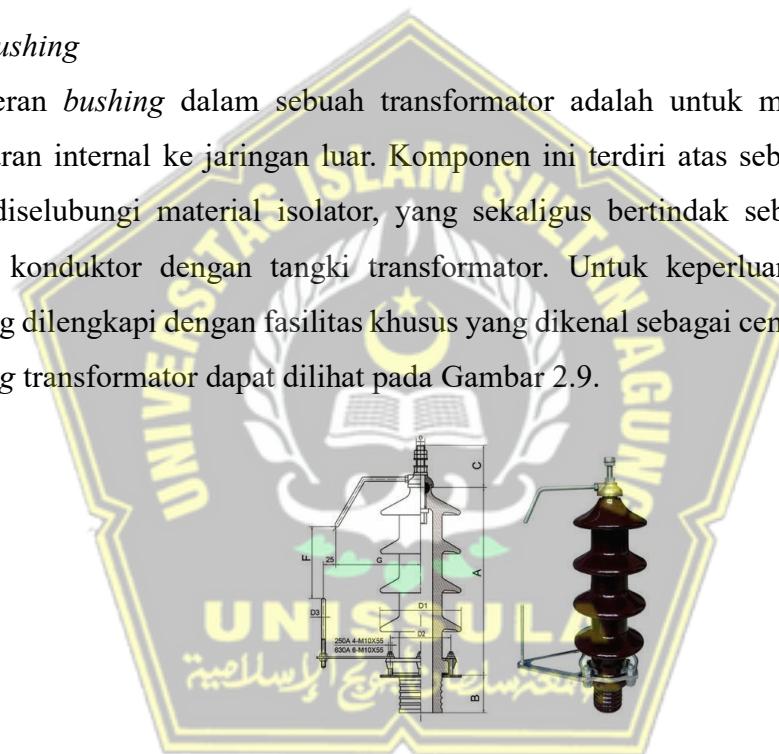
Gambar 2.8 menunjukkan skema dasar dari transformator. Dapat diamati bahwa kumparan primer menerima masukan dari sumber tegangan ( $V_p$ ) dan kumparan sekunder mengalirkan daya ke beban (lampa). Energi ditransfer dari satu kumparan ke kumparan lainnya via medan magnet yang terkonsentrasi di dalam inti besi. Rasio lilitan yang ditunjukkan, dengan lilitan primer lebih sedikit daripada sekunder, menjadi penanda bahwa transformator dalam gambar tersebut berjenis *step-up*.

### 3. Minyak Transformator

Minyak transformator berperan ganda sebagai bahan isolasi cair dan media pendingin. Dalam kapasitasnya sebagai isolator, minyak ini memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi untuk menahan tegangan tembus. Sementara sebagai pendingin, ia berfungsi menyerap dan meredam panas yang dihasilkan selama operasi transformator. Ditinjau dari komposisi kimianya, minyak ini terdiri atas senyawa *hidrokarbon*, yaitu *parafinik*, *naftenik*, dan *aromatik*, serta mengandung sejumlah kecil senyawa aditif.

### 4. *Bushing*

Peran *bushing* dalam sebuah transformator adalah untuk menghubungkan kumparan internal ke jaringan luar. Komponen ini terdiri atas sebuah konduktor yang diselubungi material isolator, yang sekaligus bertindak sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki transformator. Untuk keperluan pemantauan, bushing dilengkapi dengan fasilitas khusus yang dikenal sebagai center tap. Contoh *bushing* transformator dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 *Bushing* Transformator

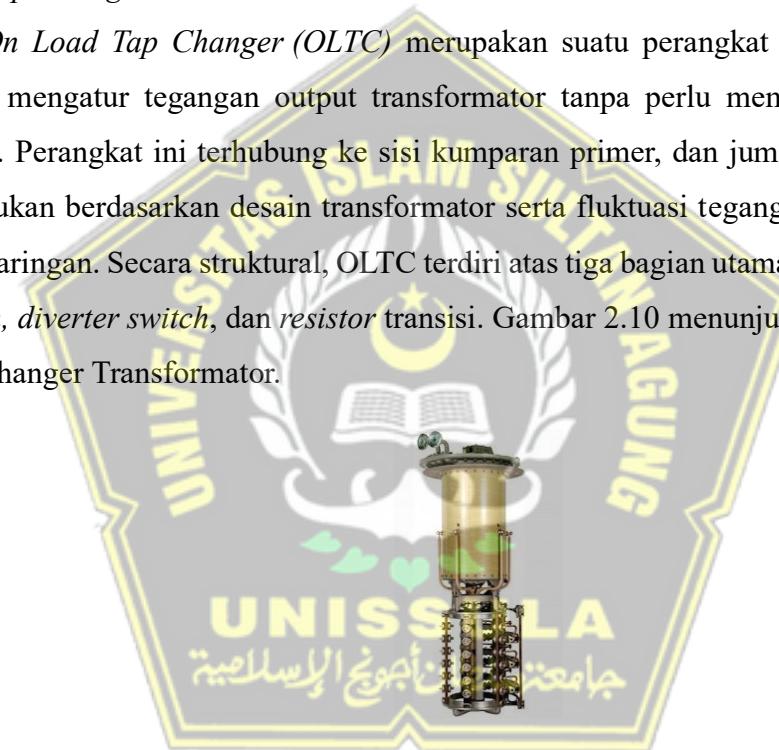
Secara struktural, *bushing* terdiri atas empat komponen utama: isolasi, konduktor, klem koneksi, dan aksesoris. Material isolasi yang digunakan umumnya terbagi dalam dua jenis. Jenis pertama adalah oil impregnated paper yang memanfaatkan kombinasi kertas isolasi dan minyak isolasi. Sementara itu, jenis kedua adalah resin impregnated paper yang menggunakan kertas isolasi yang diresapi dengan resin sebagai bahan isolasinya.

### 5. Tangki Konservator

Fungsi utama tangki konservator adalah menampung ekspansi minyak isolasi dan udara yang memuai karena pengaruh panas dari pembebahan transformator. Dalam rangkaianya, dipasang *relay Buchholz* yang berperan mendeteksi kerusakan dengan cara menyerap gas yang dihasilkan dari dekomposisi minyak. Pada sisi ventilasi, dipasang *silica gel* untuk mengeringkan udara yang masuk, guna mencegah kontaminasi uap air ke dalam minyak sekaligus memastikan udara yang dilepaskan tetap bersih.

#### 6. Tap Changer

*On Load Tap Changer (OLTC)* merupakan suatu perangkat yang berfungsi untuk mengatur tegangan output transformator tanpa perlu memutuskan aliran beban. Perangkat ini terhubung ke sisi kumparan primer, dan jumlah sadapannya ditentukan berdasarkan desain transformator serta fluktuasi tegangan yang terjadi pada jaringan. Secara struktural, OLTC terdiri atas tiga bagian utama, yaitu *selector switch*, *diverter switch*, dan *resistor transisi*. Gambar 2.10 menunjukkan contoh dari Tap Changer Transformator.



Gambar 2. 10 *Tap Changer* Transformator

#### 7. Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

*Dehydrating Breather* berperan sebagai komponen pencegah kontaminasi uap air ke dalam sistem transformator, dengan *silica gel* sebagai media penyerap kelembapan utamanya. Perangkat ini diperlukan karena fluktuasi beban operasional dan suhu lingkungan menyebabkan perubahan suhu minyak isolator. Ketika suhu minyak meningkat, minyak akan memuai dan mendorong udara di dalam tangki untuk keluar. Sebaliknya, saat suhu minyak menurun, penyusutan minyak akan

menyebabkan udara luar tertarik masuk. Siklus keluar masuk udara ini dikenal sebagai fenomena "pernapasan transformator".



Gambar 2. 11 *Dehydrating Breather Transformer*

Gambar 2.11 menampilkan variasi ukuran *dehydrating breather* yang diaplikasikan pada transformator. Komponen ini pada dasarnya berupa sebuah tabung transparan berisi *silica gel*, yang berfungsi untuk mengeringkan udara sebelum memasuki tangki transformator selama proses pernapasan berlangsung. Keunggulan dari penggunaan tabung transparan adalah memudahkan inspeksi visual; perubahan warna pada butiran *silica gel* menjadi indikator langsung untuk menentukan saat yang tepat bagi proses regenerasi atau penggantian.

### c. Prinsip Kerja

Transformator beroperasi berdasarkan induksi elektromagnetik. Saat kumparan primer diberi arus bolak-balik, terciptalah fluks magnet yang berubah-ubah di dalam inti besi, yang kemudian menginduksi GGL pada kumparan primer ( $E_p$ ). Inti besi memperkuat dan menyalurkan fluks ini ke kumparan sekunder, sehingga menginduksi GGL sekunder ( $E_s$ ). Dari segi aplikasi, transformator memiliki peran ganda. Dalam sistem tenaga, ia digunakan untuk menyesuaikan tegangan secara efisien. Dalam elektronika, ia berfungsi sebagai pencocok impedansi dan memfasilitasi transmisi daya jarak jauh. Spesifikasi teknisnya, seperti frekuensi kerja, sangat bergantung pada kebutuhan beban yang akan dilayani. Nilai besar ggl induksi kumparan primer dan sekunder dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan persamaan 2.2.

Dimana :

**Ep** : besar ggl induksi kumparan primer (Volt)

Es : besar ggl induksi kumparan sekunder (Volt)

Np : Jumlah lilitan kumparan primer

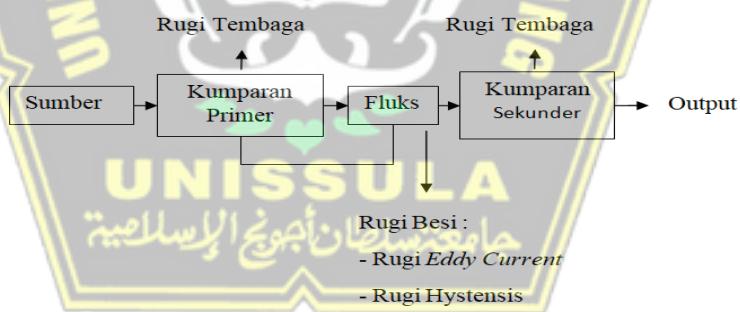
Ns : Jumlah lilitan kumparan sekunder

$d\phi$  : perubahan ggl dalam teras (Maxwell)

dt : Perubahan waktu sesaat (detik)

#### d. Rugi-rugi Transformator

Dalam praktiknya, sebuah transformator yang tidak ideal akan mengalami penurunan tegangan pada sisi keluarannya. Hal ini menyebabkan daya output yang dihasilkan menjadi lebih kecil dibandingkan daya input yang diberikan, yang mengindikasikan adanya inefisiensi dalam proses transfer daya[14]. Rugi-rugi Transformator dapat dilihat pada diagram pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Rugi-rugi transformator

### 1. Rugi Tembaga ( $P_{cu}$ )

Penyebab utama dari rugi-rugi tembaga adalah sifat resistif dari konduktor tembaga yang membentuk kumparan transformator. Kerugian daya ini ( $P_{cu}$ ) terjadi pada kedua belah sisi, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunde. Rugi-rugi tembaga dapat dilihat pada persamaan 2.3:

Dimana :

I : arus (ampere)

R : resistansi pada kumparan primer atau sekunder (ohm)

## 2. Rugi Besi (Pi)

Rugi besi atau rugi yang terletak pada inti pada transformator terdiri atas dua bagian yaitu:

Rugi *Eddy Current* merupakan rugi-rugi panas yang terjadi pada bagian inti trafo. Rugi rugi ini dapat dilihat pada persamaan 2.4:

Dimana :

$K_e$  : Konstanta arus eddy

f : Frekuensi (Hz)

$B_M$  : kerapatan fluks maksimum ( $\phi/A = \text{Maxwell/m}^2$ )

Rugi-rugi hysteresis adalah kerugian energi yang terjadi pada inti transformator akibat proses pembalikan arah magnetisasi secara berulang. Proses penataan ulang domain magnetik ini memerlukan sejumlah energi, yang kemudian berubah menjadi panas dan menyebabkan penurunan efisiensi daya pada transformator. Besarnya kerugian ini dapat dinyatakan dalam persamaan 2.5:

Dimana :

$K_h$  : konstanta hysteresis

F : frekuensi (Hz)

$B_{\text{Max}}$  : kerapatan fluk maksimum ( $\phi/A = \text{Maxwell/m}^2$ )

Jadi rugi besi (inti besi) adalah :

e. Spesifikasi Umum Tegangan dan Daya Transformator Distribusi

Berdasarkan klasifikasi yang dikemukakan oleh Daman Suswanto (2009), transformator distribusi pada umumnya dapat dikelompokkan menjadi dua jenis berdasarkan tegangan primer nominalnya, yaitu transformator distribusi 6 kV dan

20 kV. Dalam konteks sistem distribusi tiga fase empat kawat, transformator fase tunggal yang diterapkan memiliki spesifikasi tegangan tertentu, dimana untuk sistem 20 kV misalnya, tegangan pengenal per fasanya mencapai 11,54 kV. Penetapan tegangan sekunder transformator ini mengikuti standar Jaringan Tegangan Rendah (JTR) PLN, dengan sistem fase tunggal menggunakan tegangan 127/220 V dan 220/380 V, sedangkan sistem tiga fase menggunakan 133/231 V dan 231/400 V dalam kondisi tanpa beban. Berdasarkan variasi konfigurasi tegangan sekunder tersebut, dikenal empat tipe transformator distribusi, meliputi tipe dengan output tunggal 133/231 V, output tunggal 231/400 V, dual output yang dapat dioperasikan secara simultan, serta dual output yang dioperasikan secara terpisah. Mengenai kapasitas daya transformator distribusi yang umum digunakan, informasi lebih lengkap dapat dilihat pada Tabel 2.2 yang mengacu pada standar SPLN 8:1978 dan IEC 76-1 (1976).

Tabel 2. 1 Spesifikasi daya trafo

No	Daya Trafo (kVA)	No	Daya Trafo (kVA)
1	16	10	500
2	25	11	630
3	50	12	800
4	100	13	1000
5	160	14	1250
6	200	15	1600
7	250	16	2000
8	315	17	2500
9	400		Dst.

f. Keadaan Berbeban dan Tanpa Beban

## 1. Keadaan Tanpa Beban

Apabila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan sinusoidal  $V_1$ , maka akan mengalir arus primer  $I_0$  yang juga bersifat sinusoidal. Dengan asumsi belitan  $N_1$  bersifat reaktif murni, arus  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari tegangan  $V_1$ . Arus primer  $I_0$  ini kemudian menimbulkan fluks magnetik ( $\Phi$ ) yang sefasa dengannya dan memiliki bentuk gelombang sinusoidal. Gambar 2.13 memperlihatkan konfigurasi transformator dalam kondisi tanpa beban seperti yang dijelaskan tersebut. Besar fluks magnetik ( $\Phi$ ) dapat dihitung dari persamaan 2.7.

$$\phi = \phi_{\text{maks}} \sin \omega t \dots \quad (2.7)$$

Dimana :

$\Phi$  = fluks magnetik



Pada Gambar 2.13 dapat dilihat bahwa arus kecil mengalir di esensial,  $I_1$  dan cukup untuk mengikuti transisi di tengah, penurunan tegangan berikutnya di kumparan primer sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Fluksi bolak-balik juga menggabungkan kumparan sekunder sehingga membuat  $E_2$  digerakkan dalam kumparan sekunder[15]. Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi  $e_1$  yang ditampilkan pada persamaan 2.8 hingga persamaan 2.11.

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\emptyset \text{maks Sin } \omega t)}{dt} \dots \dots \dots \quad (2.9)$$

$$e_1 = -N_1 \omega \emptyset_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ) \dots \quad (2.11)$$

Dimana :

$e_1$  = gaya gerak listrik induksi

$N_1$  = jumlah belitan di sisi primer

$\omega$  = kecepatan sudut putar

$\Phi$  = fluks magnetik

Harga efektif tegangan induksi pada kumparan sekunder trafo dapat dilihat pada persamaan 2.12 dan 2.13:

Dimana :

$E_2$  = gaya gerak listrik induksi efektif

f = frekuensi

Dari persamaan diatas dapat diperoleh persamaan 2.14:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots \dots \dots (2.14)$$

Apabila,  $a < 1$ , maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan (*step-up*)

$a > 1$ , maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan (step-down)

Dengan keadaan ideal, rugi-rugi diabaikan sehingga  $E_1 = V_1$  dan  $E_2 = V_2$  kemudian didapatkan persamaan 2.15:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \quad (2.15)$$

dengan:

$V_1$  = Tegangan pada sisi primer (V)

$V_2$  = Tegangan pada sisi sekunder (V)

$E_1$  = Tegangan induksi sisi primer (V)

$E_2$  = Tegangan induksi sisi sekunder (V)

$N_1$  = Jumlah lilitan primer

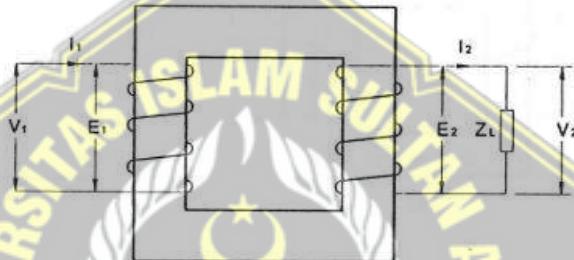
**N<sub>2</sub>** = Jumlah lilitan sekunder

I<sub>1</sub> = Arus primer (A)

$I_2$  = Arus sekunder (A)

## 2. Keadaan Berbeban

Ketika kumparan sekunder transformator dihubungkan dengan suatu beban  $Z_L$ , arus  $I_2$  akan mengalir melalui kumparan tersebut. Besar arus  $I_2$  ditentukan oleh persamaan  $I_2 = V_2 / Z_L$ , dengan  $\theta_2$  merepresentasikan sudut faktor daya beban. Konfigurasi rangkaian berbayar ini dapat diamati pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Transformator keadaan berbeban

Berdasarkan Gambar 2.14, dapat dijelaskan bahwa ketika transformator beroperasi tanpa beban, ia tetap menarik arus dari jaringan listrik. Ketika dibebani, arus  $I_2$  yang mengalir pada kumparan sekunder akan menghasilkan gaya gerak magnet (ggm) sebesar  $N_2 I_2$  yang cenderung melawan fluks bersama ( $\Phi$ ) yang telah dibangkitkan sebelumnya oleh arus magnetisasi  $I_m$ . Untuk mempertahankan nilai fluks bersama tersebut agar tetap konstan, kumparan primer harus mengalirkan arus tambahan  $I'_2$  yang besarnya setara namun berlawanan arah dengan pengaruh yang ditimbulkan oleh arus beban  $I_2$ . Dengan demikian, total arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi penjumlahan vektor dari arus magnetisasi dan arus tambahan ini dapat dilihat pada persamaan 2.16, 2.17, dan 2.18:

Bila rugi besi diabaikan ( $I_c$  diabaikan) maka  $I_0 = I_M$  ..... (2.17)

Dimana:

$I_1$  = arus pada sisi primer (ampere)

$I_o$  = arus penguat (ampere)

$I_m$  = arus pemagnetan (ampere)

$I_c$  = arus rugi-rugi tembaga (ampere)

#### 2.2.4 *Tap Changer* Transformator

Stabilitas tegangan pada suatu jaringan listrik merupakan salah satu indikator penting dalam menilai kualitas daya. Transformator diharuskan mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil, meskipun tegangan masukan yang diterimanya senantiasa berfluktuasi. Melalui pengaturan jumlah lilitan pada sisi primer, rasio lilitan antara sisi primer dan sekunder dapat diubah. Mekanisme ini memungkinkan penyesuaian tegangan keluaran pada sisi sekunder sesuai dengan kebutuhan sistem, tanpa terpengaruh oleh variasi tegangan masukan pada sisi primer. Proses penyesuaian rasio lilitan ini dikenal dengan istilah tap changer.

Proses penyaluran daya listrik menuju konsumen sangat bergantung pada peran vital transformator daya. Namun, proses transformasi daya ini tidak selalu berlangsung optimal. Terdapat sejumlah energi listrik yang tidak terdistribusikan secara sempurna ke konsumen, yang disebabkan oleh beberapa faktor kunci:

1. Variabilitas Produksi Pembangkit: Kapasitas produksi energi listrik dari pembangkit tidak selalu stabil dan dapat mengalami fluktuasi.
2. Regulasi Tegangan Sistem: Tegangan sistem yang mengalir dari pembangkit ke konsumen mengalami variasi signifikan. Berdasarkan standar [16], kisaran toleransi jatuh tegangan yang diizinkan untuk jaringan menengah adalah sebesar 5%.
3. Dinamika Beban Konsumen: Kebutuhan daya konsumen bersifat fluktuatif dan tidak dapat dibatasi, sehingga mempengaruhi stabilitas tegangan sisi sekunder transformator. Perubahan beban ini menyebabkan terjadinya drop tegangan pada sisi sekunder sebesar 3% sesuai ketentuan SPLN 72:1978.
4. Rugi-rugi Transmisi: Terdapat disipasi energi selama proses transmisi yang termanifestasi dalam bentuk panas pada konduktor jaringan.

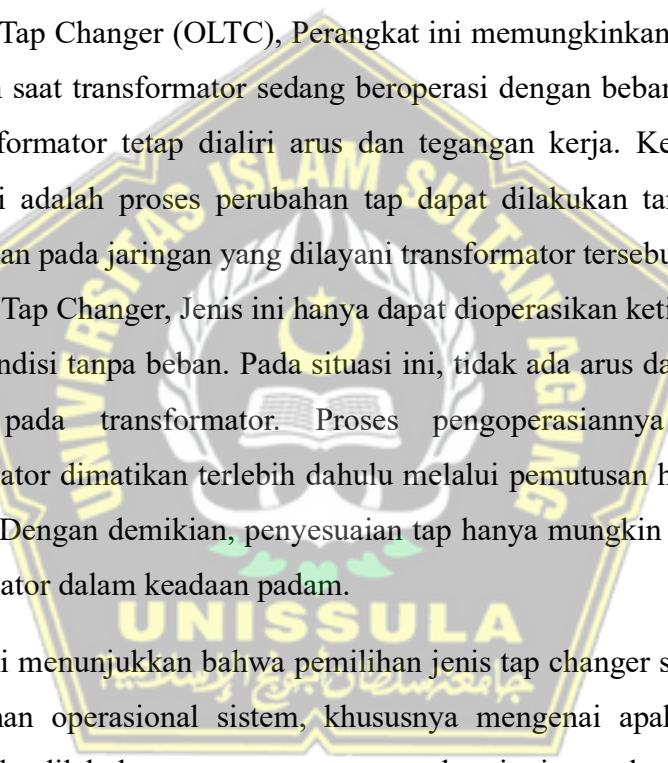
Menyikapi ketidakstabilan tegangan yang tidak terhindarkan ini, transformator dilengkapi dengan perangkat utama berupa tap changer. Alat ini berfungsi untuk mengatasi berbagai permasalahan regulasi tegangan dalam sistem tenaga listrik.

.

a. **Jenis Tap Changer Berdasarkan Ada Tidaknya Pembebatan**

Berdasarkan kondisi operasi transformator saat melakukan penyesuaian tap, tap changer dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama:

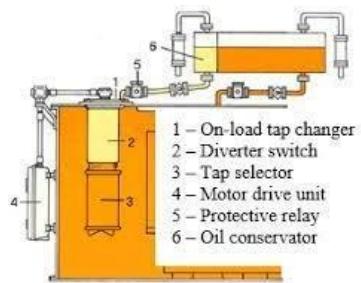
1. On Load Tap Changer (OLTC), Perangkat ini memungkinkan penyesuaian tap dilakukan saat transformator sedang beroperasi dengan beban. Dalam kondisi ini, transformator tetap dialiri arus dan tegangan kerja. Keunggulan utama sistem ini adalah proses perubahan tap dapat dilakukan tanpa memerlukan pemadaman pada jaringan yang dilayani transformator tersebut.
2. Off Load Tap Changer, Jenis ini hanya dapat dioperasikan ketika transformator dalam kondisi tanpa beban. Pada situasi ini, tidak ada arus dan tegangan yang bekerja pada transformator. Proses pengoperasianannya mengharuskan transformator dimatikan terlebih dahulu melalui pemutusan hubungan dengan jaringan. Dengan demikian, penyesuaian tap hanya mungkin dilakukan ketika transformator dalam keadaan padam.



Klasifikasi ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis tap changer sangat ditentukan oleh kebutuhan operasional sistem, khususnya mengenai apakah penyesuaian tegangan perlu dilakukan tanpa mengganggu kontinuitas pelayanan listrik atau tidak.

b. **Komponen Utama OLTC**

Komponen yang menyusun *OLTC* dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Konstruksi *OLTC* pada transformator

### 1. Kepala dan Penutup *Tap Changer*

Kepala *tap changer* berfungsi sebagai pelindung utama untuk seluruh mekanisme. Bagian ini dilengkapi dengan beberapa saluran yang memiliki fungsi spesifik. Di dalamnya terdapat Penutup Tangki Konservator yang berfungsi sebagai pelindung tangki berisi minyak isolasi. Terdapat juga Saluran Aliran Minyak yang menghubungkan tangki konservator dengan kompartemen minyak di dalam *tap changer*. Minyak isolasi ini mengalir untuk melakukan pendinginan dan isolasi pada komponen internal. Selain itu, ada Unit *Gear* dan Poros Penggerak yang berperan menghubungkan motor penggerak dengan mekanisme pemindah *tap*. Melalui unit ini, putaran motor diteruskan ke sakelar pemindah (*diverter switch*) dan selektor *tap*, sehingga posisi *tap* dapat diubah sesuai kebutuhan. Terakhir, terdapat Katup Pelepas Tekanan, yang berfungsi sebagai mekanisme pengaman. Jika terjadi tekanan berlebih di dalam kompartemen minyak, katup ini akan terbuka secara otomatis untuk melepaskan kelebihan minyak dan mencegah kerusakan pada komponen..

### 2. Kompartemen Minyak *Tap Changer*

Kompartemen minyak merupakan wadah yang berisi *diverter switch* dan terendam sepenuhnya dalam minyak isolasi. Minyak isolasi di sini memiliki dua fungsi utama, yaitu sebagai isolator yang mencegah terjadinya hubungan singkat antara komponen-komponen bertegangan, serta sebagai pendingin yang menyerap panas yang dihasilkan oleh komponen saat beroperasi.

### 3. Selektor Tap, Sakelar Pemindah Tap, dan Tahanan Transmisi

Selektor *Tap* berfungsi untuk memilih posisi *tap* yang diinginkan. Dengan mengubah posisinya, jumlah lilitan efektif pada kumparan transformator akan ikut berubah, sehingga tegangan keluaran dapat disesuaikan. Sementara itu, Sakelar Pemindah *Tap* (*Divterter Switch*) adalah komponen mekanis yang bergerak cepat untuk menghubungkan atau memutuskan koneksi listrik antara posisi *tap* yang berbeda secara sangat cepat. Proses ini harus dilakukan dengan cepat untuk meminimalkan gangguan pada sistem tenaga. Untuk mencegah loncatan bunga api yang dapat merusak kontak sakelar, Tahanan Transmisi yang terbuat dari nikelin akan digunakan sementara saat proses pemindahan *tap* untuk membatasi arus yang mengalir ketika kontak antara posisi *tap* yang lama dan baru terputus.

#### 4. Unit Penggerak Motor (*Motor Drive Unit – MDU*) dan Panel Kontrol

Unit penggerak motor (*motor drive unit* atau *MDU*) beserta panel kontrolnya berfungsi sebagai pusat kendali dari sistem *tap changer*. Di dalam unit ini, terdapat beragam komponen elektronik dan mekanik yang berkolaborasi untuk mengoperasikan mekanisme pemindah *tap* pada transformator. Komponen utama *MDU* meliputi Motor AC Tiga Fasa yang berfungsi sebagai tenaga penggerak utama. Ketika ada perintah untuk mengubah posisi *tap*, motor ini akan memutar poros yang terhubung dengan mekanisme pemindah *tap*.

Terdapat juga kontaktor, yang merupakan sakelar listrik berukuran besar untuk menghubungkan atau memutuskan aliran listrik ke motor penggerak sesuai perintah dari panel kontrol. Selain itu, MCB (*Miniature Circuit Breaker*) berfungsi sebagai pengaman terhadap beban lebih atau arus pendek. Jika terjadi gangguan, MCB akan memutus aliran listrik secara otomatis.

Untuk memantau operasi, *MDU* dilengkapi dengan *Display Mekanik* yang menampilkan informasi seperti jumlah siklus pemindahan *tap* dan posisi *tap* saat ini. Sakelar Pemilih (*Selector Switch*) memungkinkan operator untuk memilih mode pengoperasian, yaitu Pengoperasian Jarak Jauh (*Remote*) dari panel kontrol di gardu induk, atau Pengoperasian Lokal yang dilakukan secara manual di dekat transformator untuk keperluan pemeliharaan atau darurat. Terakhir, terdapat Engkol Manual sebagai cadangan jika terjadi kegagalan pada sistem penggerak motor, yang memungkinkan operator memindahkan posisi *tap* secara manual.

## 5. Relai Proteksi *Tap Changer*

Relai proteksi *tap changer* merupakan komponen keselamatan yang sangat penting. Relai ini berfungsi untuk memantau kondisi operasi *tap changer* dan memberikan perlindungan terhadap kondisi abnormal yang dapat menyebabkan kerusakan. Salah satu fungsi utama dari relai proteksi adalah untuk memantau tekanan minyak di dalam kompartemen *diverter switch*. Jika tekanan minyak melebihi batas yang diizinkan, relai proteksi akan memberikan sinyal peringatan atau langsung memutus aliran listrik ke motor penggerak untuk mencegah kerusakan pada komponen-komponen internal.

## 6. Fungsi Minyak Isolasi dalam *Tap Changer*

Minyak isolasi di dalam tangki konservator memiliki beberapa fungsi penting. Pertama, berfungsi sebagai isolator listrik yang mencegah hubungan singkat antar komponen bertegangan. Kedua, minyak ini membantu mendinginkan komponen internal *tap changer* yang menghasilkan panas selama beroperasi. Terakhir, minyak isolasi juga berperan sebagai pelumas untuk mekanisme pemindah *tap*, sehingga mengurangi gesekan dan keausan.

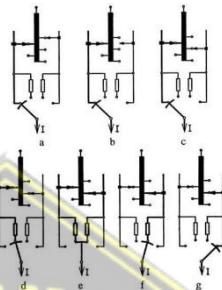
### c. Prinsip Kerja *OLTC*

Berdasarkan karakteristik operasionalnya selama proses perubahan tap, peralihan hubungan pada On Load Tap Changer (OLTC) harus tetap menjaga kontinuitas aliran arus beban tanpa menyebabkan terjadinya pemutusan rangkaian listrik. Untuk memenuhi persyaratan fundamental ini, terdapat dua konsep prinsip kerja utama dalam desain OLTC.

#### 1. Konsep *Tap Selektor-Diverter*

Berdasarkan konsep Tap Selektor-Diverter, mekanisme kerja peralihan tap berlangsung dalam dua tahap terpisah. Tahap pertama melibatkan pergerakan pada Tap Selektor, di mana kontak pemilih berpindah posisi tanpa mengalirkan arus beban. Setelah proses pemilihan tap ini selesai, tahap kedua dijalankan oleh Diverter Switch. Pada fase ini, kontak diverter yang membawa arus beban melakukan peralihan posisi. Untuk mencegah terjadinya pemutusan rangkaian

selama proses peralihan, arus beban dialirkkan melalui kontak dan resistor transisi (Transition Resistance) yang berfungsi membatasi arus hubung singkat sementara. Untuk ilustrasi visual yang lebih jelas, Gambar 2.16 menunjukkan proses perpindahan tap dari posisi 2 ke posisi 3 dengan menerapkan prinsip kerja dua tahap ini.



Gambar 2. 16 Mekanisme kerja *OLTC tap Selector-Diverter*

Proses peralihan tap pada On Load Tap Changer (OLTC) dengan konsep Tap Selektor-Diverter diawali dengan kondisi tap selektor genap pada posisi tap 2 sebagai titik operasional, sementara tap selektor ganjil berada pada tap 1 dengan aliran arus beban mengalir melalui terminal 2 menuju kontak utama diverter ke titik pentahanan. Tahap persiapan dimulai ketika tap selektor ganjil berpindah dari terminal 1 menuju tap 3, dimana selama proses ini aliran arus beban tetap stabil karena perpindahan tap selektor berlangsung tanpa membawa arus beban. Setelah tap selektor ganjil berhenti pada tap 3, kontak diverter mulai bergerak menuju kontak transisi Kt1, mengalirkan arus beban melalui resistor R1 dalam fase yang dikenal sebagai kondisi transisi melalui R1.

Proses berlanjut ke tahap superposisi dimana kontak diverter menghubungkan kedua kontak transisi Kt1 dan Kt2 secara bersamaan, menyebabkan arus beban terbagi melalui resistor R1 dan R2 secara paralel. Kontak diverter kemudian bergerak menuju kontak transisi Kt2, mengalihkan arus beban melalui resistor R2 sebelum akhirnya terkoneksi penuh dengan kontak K2, menyelesaikan perpindahan ke tap 3. Seluruh rangkaian operasi yang rumit ini dapat diselesaikan dalam rentang waktu 20-30 milidetik, tergantung pada karakteristik teknis dan tipe OLTC yang digunakan.

## 2. Konsep *Tap Selektor*

Berdasarkan konsep peralihan tap secara langsung melalui tap selektor, proses perpindahan dari satu tap ke tap adjacent dilakukan dengan tetap mengalirkan arus beban. Selama transisi ini, arus dialirkan melalui dua buah resistor transisi yang berfungsi untuk membatasi arus hubung singkat sementara. Mekanisme operasional tersebut dapat diamati secara detail pada ilustrasi Gambar 2.17 yang menunjukkan konfigurasi rangkaian dan alur perpindahan arus selama proses perubahan tap berlangsung.



Gambar 2. 17 Mekanisme kerja *OLTC tap selector*

Proses peralihan tap pada konsep tap selektor langsung diawali dengan kondisi tap selektor berada pada posisi tap 2, dimana kedua kontak transisi dalam keadaan mengambang dan arus beban mengalir dari terminal 2 melalui kontak utama diverter menuju titik netral (Langkah 1). Selanjutnya, kontak gerak mulai bergerak menuju tap 3 dengan kontak transisi K1 terhubung ke tap 2 sementara K2 masih mengambang, membentuk rangkaian transisi melalui resistor R1 (Langkah 2). Pada tahap superposisi (Langkah 3), kedua kontak transisi K1 dan K2 terhubung simultan ke tap 2 dan tap 3, menyebabkan arus beban terbagi melalui kedua resistor transisi R1 dan R2.

Proses berlanjut dengan perpindahan menuju tap 3 dimana kontak transisi K1 mulai mengambang sementara K2 tetap terhubung, membentuk rangkaian transisi melalui resistor R2 (Langkah 4). Akhirnya, tap selektor sepenuhnya berpindah ke tap 3 dengan kedua kontak transisi kembali mengambang, dan arus beban kembali mengalir melalui kontak utama diverter menuju titik netral (Langkah 5)

Posisi ini disebut *service* posisi pada *tap* 3. Kerusakan pada meter listrik, baik meter energi (kWh meter) maupun meter pengukuran lainnya, sering kali bermula dari kesalahan pengawatan (wiring), seperti sambungan yang longgar, salah polaritas, atau korsleting pada terminal. Selain itu, *overvoltage* (tegangan berlebih) atau *overcurrent* (arus berlebih) akibat gangguan sistem atau pemilihan rating meter yang tidak tepat dapat secara langsung merusak komponen internal meter. Faktor lingkungan seperti kelembaban tinggi, suhu ekstrem, atau paparan langsung sinar matahari juga dapat mempercepat degradasi komponen. Akibat dari kerusakan ini bervariasi seperti pembacaan yang tidak akurat (baik terlalu tinggi atau terlalu rendah) menyebabkan kerugian finansial bagi konsumen atau penyedia listrik, kegagalan fungsi dapat membuat pengukuran tidak akurat, dan dalam kasus ekstrem, dapat memicu panas berlebih atau kebakaran.

#### d. Fenomena-Fenomena Yang Terjadi Pada OLTC

Selama OLTC bekerja, terdapat beberapa fenomena yang akan mempengaruhi kinerja OLTC tersebut.

##### 1. Fenomena Elektrik (*Electrical Effect*)

Ekses arus dan tegangan melebihi rating yang ditetapkan dapat mengakibatkan stres elektrik pada peralatan, yang berpotensi merusak sistem isolasi. Dalam konteks operasi *On Load Tap Changer (OLTC)*, fenomena elektrik seperti *partial discharge*, *corona*, *arc*ing, dan *flashover* mampu mendekomposisi bahan isolasi padat dan cair menjadi berbagai jenis gas, termasuk gas yang mudah terbakar. Secara khusus, *arc*ing dan *flashover* sebagai akibat dari stres elektrik tidak hanya menguraikan bahan isolasi tetapi juga menyebabkan kerusakan material secara fisik. Indikasi terjadinya peristiwa semacam ini biasanya ditandai dengan aktivasi *relay* proteksi OLTC. Analisis lebih lanjut terhadap minyak pada diverter switch seringkali mengungkap keberadaan gas mudah terbakar seperti *asetilena*, *etilena*, dan *hidrogen* sebagai bukti dekomposisi termal yang terjadi.

##### 2. Fenomena Mekanik (*Mechanical Effect*)

*On Load Tap Changer* (OLTC) berperan sebagai satu-satunya komponen transformator yang memiliki pergerakan mekanis. Mekanisme peralihan tap diawali dengan putaran motor yang kemudian ditransmisikan melalui batang penggerak menuju sistem roda gigi, dilanjutkan dengan penggerakan pegas kontak dan diakhiri dengan pergeseran fisik kontak itu sendiri. Seluruh rangkaian proses ini berlangsung dalam kondisi suhu operasional OLTC, dimana suhu ekstrem yang terlalu tinggi dapat mempercepat terjadinya kelelahan material. Dampak dari fenomena mekanis ini antara lain dapat memicu deformasi seperti pembengkokan, keretakan, keausan, serta pengenduran pada komponen baut-baut penyangga.

### 3. Fenomena Panas (*Thermal Effect*)

Berdasarkan prinsip hukum pemanasan, panas akan timbul pada material konduktor yang dialiri arus listrik. Besarnya kalor yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat arus, nilai resistansi, dan durasi aliran listrik. Fenomena ini particularly tampak nyata selama periode beban puncak, ketika transformator beroperasi pada kapasitas tinggi dan OLTC bekerja secara intensif menyesuaikan fluktuasi tegangan. Kondisi ini menyebabkan kenaikan suhu signifikan pada minyak isolasi OLTC serta peningkatan tekanan dalam kompartemen diverter switch.

Titik termal tertinggi terjadi pada resistor transisi selama proses peralihan kontak dan pada hot spot di area sambungan listrik, dimana nilai suhu yang dicapai dapat melampaui batas desain yang diizinkan. Ekses panas ini memicu dekomposisi termal pada bahan isolasi, baik padat maupun cair, menghasilkan berbagai jenis gas hasil penguraian sebagai konsekuensi dari degradasi material isolasi.

### 4. Fenomena Kimia (*Chemical Effect*)

Reaksi kimia dalam OLTC muncul sebagai dampak dari fenomena elektrik, mekanik, dan termal yang telah dijelaskan sebelumnya. Material isolasi, baik berbentuk padat maupun cair, pada dasarnya tersusun dari senyawa organik yang rentan terhadap dekomposisi. Sebagaimana terjadi pada transformator, manifestasi elektrik seperti partial discharge, korona, busur api (arc), dan suhu berlebih akan

menguraikan komponen isolasi tersebut. Karakteristik khusus OLTC yang memiliki kandungan selulosa terbatas menyebabkan produksi gas yang dihasilkan didominasi oleh senyawa hasil busur api dan thermal degradation, terutama C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (asetilena), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (etilena), dan H<sub>2</sub> (hidrogen). Walaupun gas lain mungkin terbentuk, konsentrasi umumnya tidak signifikan. Akumulasi gas-gas ini hingga melebihi ambang batas yang ditetapkan dapat menimbulkan risiko operasional yang serius bagi OLTC.

### **2.2.5 Jenis Beban**

Beban yang dilayani oleh sistem distribusi terbagi menjadi tiga sektor utama, yaitu industri, residensial/rumah tangga, dan komersial. Karakteristik dari masing-masing sektor ini berbeda-beda, karena berkaitan langsung dengan pola konsumsi energi listriknya.

Pertama, sektor industri mencakup beban yang berasal dari berbagai peralatan listrik di kawasan industri. Penggunaan listrik di sektor ini umumnya untuk penerangan, penggerak motor-motor listrik, dan lain-lain.

Kedua, sektor residensial atau rumah tangga melayani beban listrik di daerah perumahan. Beban ini biasanya berasal dari perabotan elektronik rumah tangga seperti mesin cuci, televisi, kipas angin, lemari es, pompa air, komputer, dan lain-lain. Pola konsumsi di sektor ini biasanya mencapai beban puncak pada malam hari.

Ketiga, sektor komersial melayani beban listrik pada area perdagangan, hotel, toko, dan lain-lain. Kebutuhan energi listrik di sektor ini pada umumnya digunakan untuk mesin, lampu penerangan, kipas angin, dan sebagainya.

### **2.2.6 Rugi Pembebanan Transformator**

Untuk menjaga kinerja optimal, beban pada trafo distribusi harus berada dalam rentang 40% hingga 80% dari kapasitasnya. Beban yang terlalu rendah (underload) dapat menyebabkan inefisiensi, sementara beban yang terlalu tinggi (overload) dapat merusak trafo. Standar pembebanan ini telah ditetapkan oleh PT. PLN sebagai acuan dalam pengelolaan sistem distribusi listrik. Pembebanan trafo distribusi tersebut dapat diperoleh melalui persamaan 2.19:

$$\% \text{bebantrafo} = \frac{S_{\text{beban}}}{S_{\text{trafo}}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots \quad (2.19)$$

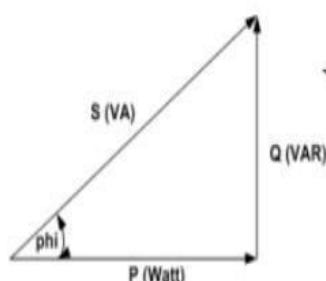
Menurut SPLN No.50 Tahun 1997, dalam keadaan beban transformator 100% dengan kapasitas trafo 25 kVA, diketahui besarnya rugi besi ( $P_{fe}$ ) 0,075 kW sedangkan rugi tembaga ( $P_{cu}$ ) sebesar 0,425 kW. Untuk mencari susut energi transformator total dapat menggunakan persamaan 2.20:

$$P_{\text{total}} = P_{fe} + P_{cu} \quad \dots \dots \dots \quad (2.20)$$

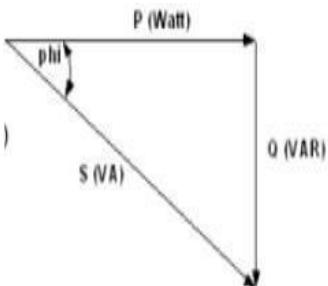
### 2.2.7 Daya

Dalam konteks sistem kelistrikan, daya didefinisikan sebagai laju perubahan energi terhadap waktu yang diwujudkan melalui besaran tegangan dan arus. Secara umum, daya listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga bentuk utama, yaitu daya nyata ( $P$ ) yang diukur dalam satuan watt (W), daya reaktif ( $Q$ ) dengan satuan volt-ampere reaktif (VAR), dan daya semu ( $S$ ) yang dinyatakan dalam volt-ampere (VA). Daya nyata merepresentasikan energi aktual yang dikonsumsi oleh peralatan listrik, sementara daya reaktif muncul akibat pembentukan medan magnet pada beban-beban induktif. Adapun daya semu merupakan resultan vektor dari kedua komponen daya tersebut.

Faktor daya ( $\cos \phi$ ) berperan sebagai indikator efisiensi dengan nilai antara 0 hingga 1, yang merepresentasikan proporsi daya nyata yang terserap oleh beban resistif terhadap total daya semu dalam sistem. Secara matematis, hubungan ketiga jenis daya ini dapat divisualisasikan melalui segitiga daya, dimana daya semu ( $S$ ) terbentuk dari komponen horizontal daya nyata ( $P$ ) dan komponen vertikal daya reaktif ( $Q$ ). Segitiga daya dan dalam bentuk vektor dapat dilihat pada Gambar 2.18 dan 2.19.



Gambar 2. 18 Segitiga daya beban listrik bersifat kapasitif



Gambar 2. 19 Segitiga daya listrik bersifat induktif

Daya aktif, daya semu, dan daya reaktif dapat dilihat pada persamaan 2.21, 2.22 dan 2.23.

Faktor daya dapat dilihat pada persamaan 2.24.

Dimana :

P = Daya nyata (Watt)

**Q = Daya reaktif (VAR)**

S = Daya Semu (VA)

Φ = Beda sudut fasa (rad/Deg)

## V = Tegangan (Volt)

$I \equiv \text{Ampere}$

### 2.2.8 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan didefinisikan sebagai selisih antara tegangan pengirim (sending end) dan tegangan penerima (receiving end) yang disebabkan oleh adanya impedansi pada konduktor. Fenomena ini merupakan kejadian yang tidak terelakkan dalam setiap jaringan kelistrikan, baik pada sisi konsumen maupun pada infrastruktur perusahaan penyedia listrik. Secara teknis, besarnya jatuh tegangan pada saluran transmisi ditentukan oleh perbedaan nilai tegangan antara titik awal pengiriman daya dan titik akhir penerimaan daya.

Besarnya rugi tegangan dapat dinyatakan dengan persamaan 2.25 dan 2.26.

## Keterangan :

$\Delta V$  = Jatuh tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir (Amper)

R = Tahanan saluran (Ohm)

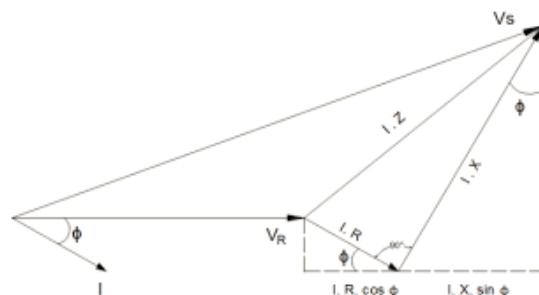
X = Reaktansi (Ohm)

$\theta$  = Sudut dari faktor daya beban

$Z = R + jX$  = impedansi saluran

Berdasarkan prinsip dasar kelistrikan, besarnya jatuh tegangan pada saluran arus bolak-balik dipengaruhi oleh tiga faktor utama: impedansi saluran, karakteristik beban, dan faktor daya sistem. Pada jarak transmisi yang relatif pendek, dampak jatuh tegangan umumnya tidak signifikan. Namun, perhitungan yang cermat terhadap fenomena ini tetap diperlukan, bukan hanya untuk keperluan desain sistem, tetapi juga untuk memastikan bahwa tingkat tegangan operasional dapat dipertahankan dalam batas-batas yang acceptable.

Untuk mencapai perhitungan yang akurat, diperlukan pemahaman mendalam mengenai hubungan fasor antara tegangan dan arus, serta kontribusi resistansi dan reaktansi dalam sistem. Sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 2.20, interaksi antara tegangan dan komponen resistif dapat divisualisasikan secara diagramatis untuk mempermudah analisis teknikal. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan sistem yang optimal dengan mempertimbangkan berbagai parameter operasional.



Gambar 2. 20 Hubungan antara tegangan dengan R dan X

Selanjutnya jatuh tegangan dan rumus tegangan pada sisi pengiriman ( $V_s$ ) dapat dilihat pada persamaan 2.27.

$$V_S = V_r + I \times R \cos \theta + I \times X \sin \theta \dots \quad (2.27)$$

$$\text{Persentase tegangan} = \frac{(Vs-Vr)}{Vr} \times 100\% \quad \dots \dots \dots \quad (2.29)$$

## Keterangan :

V<sub>s</sub> = Tegangan kirim (Volt)

$V_r$  = Tegangan terima (Volt)

I = Arus yang mengalir (Amper)

R = Tahanan saluran (Ohm)

X = Reaktansi saluran (Ohm)

### **2.2.9 Electrical Transient Analysis Program (ETAP)**

ETAP Power Station adalah perangkat lunak yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk membuat diagram satu garis (*Single Line Diagram*) dari sistem listrik dan melakukan berbagai jenis analisis, seperti aliran daya, hubung singkat, dan koordinasi proteksi. ETAP menyediakan perpustakaan komponen listrik yang dapat disesuaikan dan mengikuti standar internasional. Program ini memungkinkan mereka untuk membuat Gambar skematik dari sistem listrik dan melakukan berbagai perhitungan untuk memastikan sistem tersebut bekerja dengan aman dan efisien. ETAP menyediakan berbagai komponen listrik yang dapat dipilih dan digunakan sesuai kebutuhan[17].

Dalam pemanfaatan perangkat lunak ETAP Power Station, terdapat beberapa aspek kunci yang perlu diperhatikan, antara lain:

- a. Diagram Satu Garis (One Line Diagram), Representasi grafis yang menampilkan interkoneksi antar simbol komponen kelistrikan untuk membentuk konfigurasi sistem yang tepat.

- b. Basis Data Perpustakaan (Library), Sistem database terintegrasi yang menyimpan spesifikasi teknis seluruh peralatan listrik yang akan dimodelkan dalam simulasi sistem.
- c. Standar Teknis (Standards), Konfigurasi standar teknis yang umumnya mengacu pada norma IEC atau ANSI, termasuk penetapan parameter frekuensi sistem dan metodologi analisis yang diterapkan.
- d. Studi Kasus (Study Case), Modul analisis yang memuat parameter-parameter terkait metode studi dan evaluasi yang akan dilakukan, dilengkapi dengan fitur representasi hasil simulasi.

Sebagai ilustrasi, Gambar 2.21 menampilkan logo aplikasi ETAP yang menjadi platform untuk implementasi elemen-elemen tersebut.



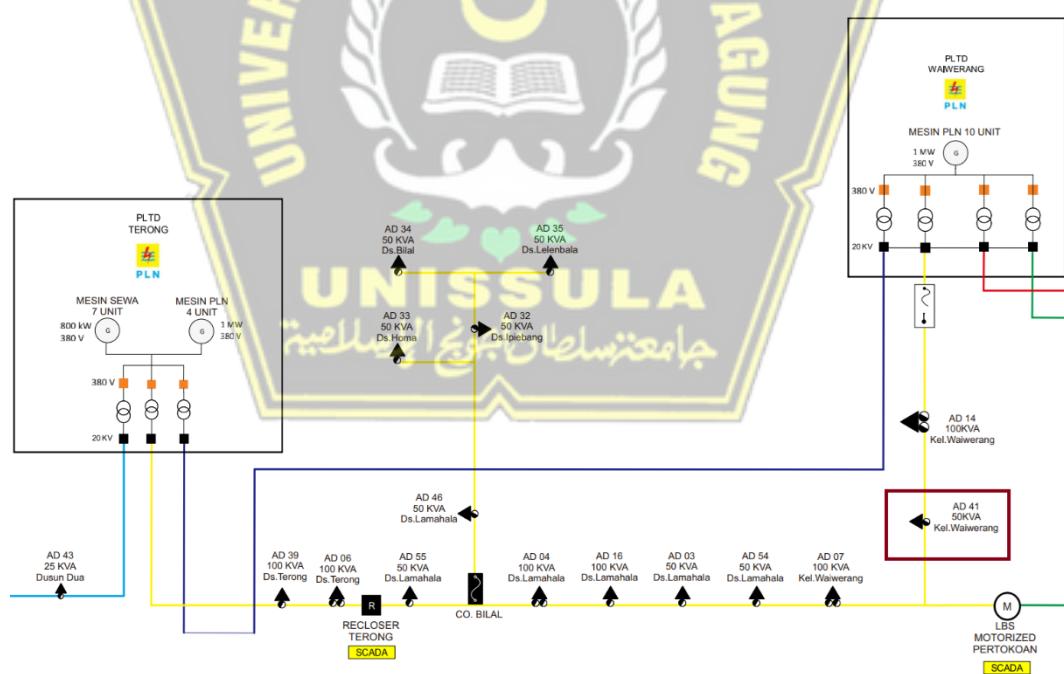
Gambar 2. 21 Tampilan Etap

## BAB III

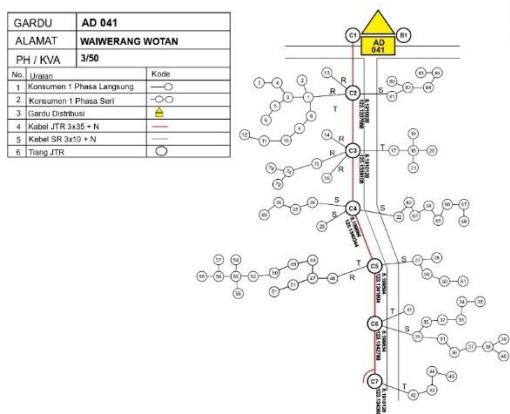
### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Model Penelitian

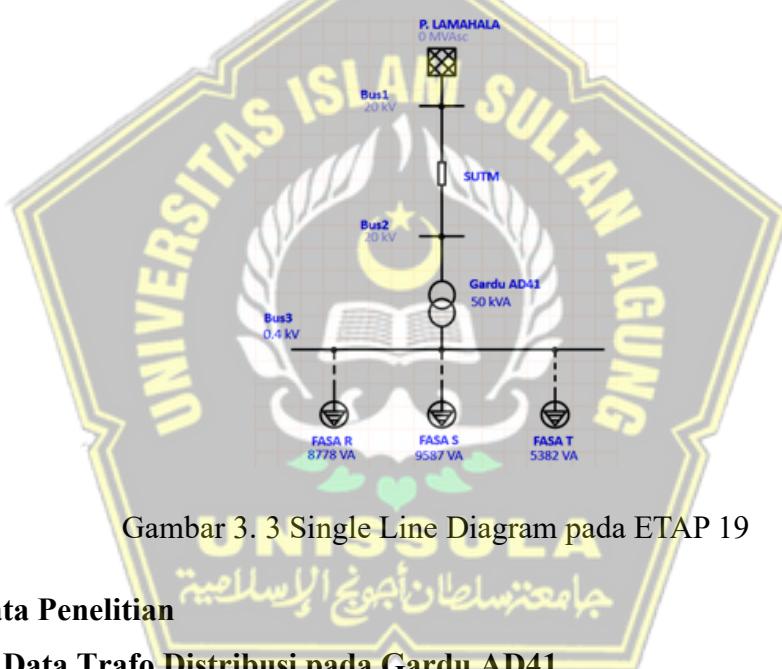
Penelitian ini dilakukan pada jaringan distribusi PT PLN (Persero) ULP Adonara, Kabupaten Flores Timur dengan fokus utama pada trafo distribusi 50 kVA. Digunakan metode simulasi dengan perangkat lunak ETAP 19. Tahapan penelitian meliputi pemodelan sistem distribusi dalam bentuk *Single Line Diagram* (SLD) pada ETAP 19, penginputan data trafo, saluran, serta beban sesuai dengan kondisi aktual lapangan. Setelah itu dilakukan analisis aliran daya (load flow analysis) untuk mengetahui profil tegangan sebelum dilakukan perubahan tap trafo. Selanjutnya, dilakukan simulasi dengan beberapa variasi perubahan tap trafo untuk melihat pengaruhnya terhadap tegangan pada sisi pelanggan. *Single Line Diagram* Gardu Distribusi AD41 ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 *Single Line Diagram* Penyulang Lamahala



Gambar 3. 2 Single Line Diagram Gardu AD41



Gambar 3. 3 Single Line Diagram pada ETAP 19

### 3.2 Data Penelitian

#### 3.2.1. Data Trafo Distribusi pada Gardu AD41

Data Trafo Distribusi pada Gardu AD41 yang dipakai dalam pembuatan tugas akhir ini memiliki kapasitas 50kVA, dengan spesifikasi :

Tabel 3. 1 Nameplate Trafo

Spesifikasi	Keterangan
Pabrikan	PT. Mega Karya Perkasa (VOLTRA)
Standar	SPLN D3.002-1:2007
Tipe	Transformator Distribusi (Hermetik)
Fasa	3 Fasa

Frekuensi	50 Hz
Nomor Seri	110204
Daya Nominal	50 kVA
Hubungan	Primer: Y / Sekunder: Zn5
Tap 1	21.000 V
Tap 2	20.500 V
Tap 3	20.000 V
Tap 4	19.500 V
Tap 5	19.000 V
Tap 6	18.500 V
Tap 7	18.000 V
Tegangan Sekunder	400 V
Arus Nominal	72.17 A
Tegangan Hubung Singkat	4.0
Rugi Besi / Rugi Belitan (Watt)	125/800
Bahan Belitan Primer dan Sekunder	CU - AL
Jenis Minyak	Mineral
Cara Pendinginan	ONAN

Pada Tabel 3. diketahui bahwa Transformator distribusi 20 kV, tipe tiga fasa, 50 Hz, memiliki rasio transformasi 20.000/400 V dan kapasitas 50 kVA. Arus beban pada sisi primer dan sekunder berturut-turut adalah 1,44 A dan 72,17 A. Transformator ini dilengkapi dengan mekanisme *tap changer* untuk mengatur tegangan sekunder guna mengkompensasi penurunan tegangan akibat beban dan panjang saluran distribusi, sehingga kualitas daya yang disalurkan ke konsumen dapat dipertahankan.

### 3.2.2. Data Pengukuran Gardu AD41

Berdasarkan dokumen Form Pengukuran Gardu AD41 di ULP Adonara yang dilaksanakan pada 5 Maret 2025 pukul 18:30:56 di Kelurahan Waiwerang Wotan (koordinat -8.387985, 123.162774), diperoleh data teknis penting mengenai kondisi

garpu distribusi. Pengukuran yang dilakukan oleh PT. Andika Energindo melalui petugas Ramadhan Markus ini mencatat garpu dengan daya terpasang 50 kVA pada penyulang Lamahala Section 1. Data Pengukuran tersebut dapat dilihat pada Gambar 3. 2.

 PT. ANDIKA ENERGINDO																																							
<b>FORM PENGUKURAN GARDU</b>																																							
<table border="1"> <tr> <td>Tanggal</td> <td>: 3/5/2025</td> <td>Alamat</td> <td colspan="2">: Kel.Waiwerang Wotan</td> </tr> <tr> <td>Bulan/Tahun</td> <td>: Mar 2025</td> <td>Koordinat</td> <td colspan="2">: -8.387985, 123.162774</td> </tr> <tr> <td>Unit Kerja</td> <td>: ULP ADONARA</td> <td>Daya</td> <td colspan="2">: 50</td> </tr> <tr> <td>No. Work Order</td> <td>:</td> <td>Waktu Pengukuran</td> <td colspan="2">: Malam - 6:30:56 PM</td> </tr> <tr> <td>Penyulang</td> <td>: LAMAHALA</td> <td>Nomer Gardu</td> <td colspan="2">ADO 41</td> </tr> <tr> <td>Section</td> <td>: 1</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>idKey</td> <td>: 08549eec8</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>					Tanggal	: 3/5/2025	Alamat	: Kel.Waiwerang Wotan		Bulan/Tahun	: Mar 2025	Koordinat	: -8.387985, 123.162774		Unit Kerja	: ULP ADONARA	Daya	: 50		No. Work Order	:	Waktu Pengukuran	: Malam - 6:30:56 PM		Penyulang	: LAMAHALA	Nomer Gardu	ADO 41		Section	: 1				idKey	: 08549eec8			
Tanggal	: 3/5/2025	Alamat	: Kel.Waiwerang Wotan																																				
Bulan/Tahun	: Mar 2025	Koordinat	: -8.387985, 123.162774																																				
Unit Kerja	: ULP ADONARA	Daya	: 50																																				
No. Work Order	:	Waktu Pengukuran	: Malam - 6:30:56 PM																																				
Penyulang	: LAMAHALA	Nomer Gardu	ADO 41																																				
Section	: 1																																						
idKey	: 08549eec8																																						
BEBAN (Amp)																																							
Total	Ø R	Ø S	Ø T	N																																			
	41.79	42.30	28.49	31.58																																			
A	1.10	1.77	1.23	0.83																																			
B	46.10	45.60	31.36	35.90																																			
C																																							
D																																							
K																																							
TEGANAN PANGKAL (VOLT)																																							
Ø R-S	370.30	Ø R-N	211.30																																				
Ø R-T	371.90	Ø S-N	208.90																																				
Ø S-T	372.10	Ø T-N	219.00																																				
TEGANAN UJUNG (VOLT)																																							
A	B	C	D	Titik Ukur (No. Meter Pelanggan)																																			
221.00	220.00			32194517481- 32203198604																																			
BEBAN JURUSAN																																							
A	B	C	D																																				
Grounding / Pentanahan			Thermovision																																				
Arrester:	Body Trafo:	LV Board:	Suhu Body Trafo:	Body Trafo:																																			
Keterangan:																																							
Pelaksana, PT. Andika Energindo  Ramadhan Markus Petugas Pengukuran Gardu																																							

Gambar 3. 4 Form Pengukuran Gardu AD41

### 3.3 Langkah Penelitian

Proses dimulai dari studi literatur, kemudian menentukan model atau objek penelitian. Selanjutnya dilakukan persiapan data nameplate trafo distribusi, pembuatan single line diagram pada perangkat lunak ETAP, serta pemasukan data berupa tegangan, daya, beban, dan posisi tap trafo.

Tahap berikutnya adalah simulasi perubahan Tap Changer menggunakan ETAP, yang kemudian diimplementasikan secara langsung di lapangan. Hasil dari implementasi tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi untuk memperoleh analisis yang lebih akurat. Akhir dari rangkaian langkah penelitian ini adalah penarikan kesimpulan.

#### 3.3.1 Studi Literatur

Pengumpulan data teoritis dari buku, jurnal ilmiah, dan penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan gardu distribusi, *tap changer* dan jatuh tegangan. Data dan teori dari studi literatur ini digunakan untuk memperkuat dasar pemikiran dalam penelitian sehingga menghasilkan kesimpulan yang lebih tepat.

#### 3.3.2 Pengumpulan Data Lapangan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data aktual yang diperoleh dari PT PLN (Persero) ULP Adonara. Proses pengambilan data dilakukan dengan meminta langsung dokumen-dokumen yang diperlukan untuk mendukung pengujian atau simulasi dalam penelitian.

#### 3.3.3 Simulasi

Proses ini diawali dengan pembuatan diagram satu garis (*Single Line Diagram*) sistem distribusi menggunakan software ETAP Power Station. Model yang telah dibuat kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan simulasi perubahan posisi *tap changer* pada trafo distribusi. Dengan mensimulasi pengaturan *tap changer* secara virtual pada perangkat lunak dengan tegangan 20 kV, diperoleh data simulasi berupa profil tegangan kondisi operasi sistem seperti Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Simulasi perubahan posisi Tap trafo dengan beban

Posisi <i>Tap</i>	Tegangan Primer	Tegangan Sekunder
1	21 kV	366 V/ 211 V
2	20.5 kV	375 V/ 217 V
3	20 kV	385 V/ 222 V
4	19.5 kV	396 V/ 229 V
5	19 kV	407 V/235 V

### 3.3.4 Analisa

Setelah proses simulasi dengan memasukkan seluruh data diselesaikan, tahap selanjutnya adalah melakukan pengolahan dan analisis terhadap hasil simulasi. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi secara spesifik pengaruh perubahan posisi *tap changer* terhadap fluktuasi tegangan sekunder pada trafo distribusi 20 kV, serta dampaknya terhadap kualitas tegangan yang disalurkan ke konsumen.

### 3.3.5 Implementasi Lapangan

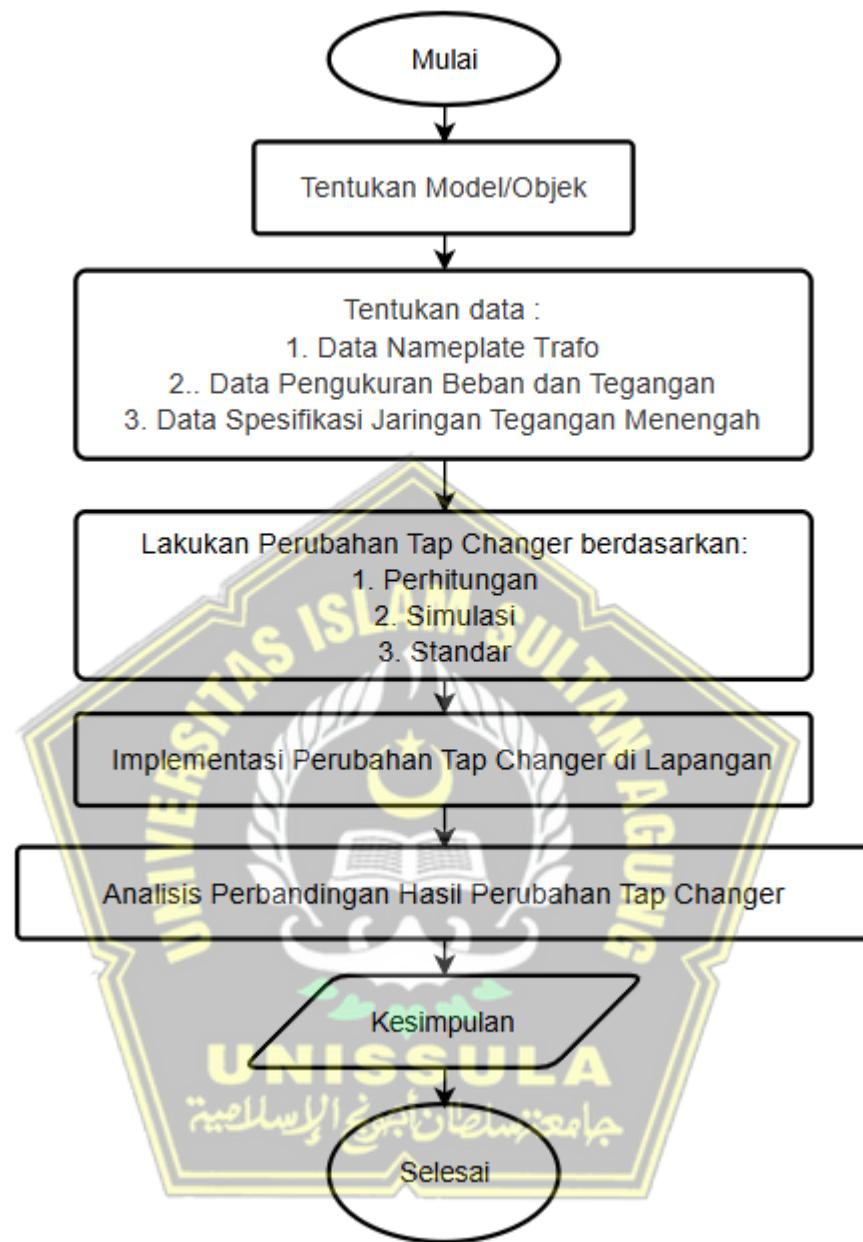
Melakukan praktik implementasi di lapangan dengan merubah *tap changer* sesuai hasil simulasi. Pekerjaan dimulai dari mengukur tegangan dan beban sebelum dilakukan pengantian. Pekerjaan dilakukan dalam keadaan bebas tegangan. Setelah *tap changer* dirubah dilakukan pengukuran tegangan dan beban kembali.

### 3.3.6 Penyusunan Laporan

Setelah seluruh data terkumpul dan analisis pengujian selesai, tahap berikutnya adalah menyusun laporan tugas akhir. Laporan ini berfungsi sebagai dokumentasi dari penelitian yang telah dilakukan. Selain itu, tujuan penyusunan laporan adalah agar temuan penelitian dapat disampaikan secara jelas dan memberikan manfaat bagi pengembangan penelitian di masa depan.

## 3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram Alir Penelitian dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 5 Diagram Alir Penelitian

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis dan pembahasan mendalam mengenai pengaruh perubahan tap trafo distribusi untuk memperbaiki tegangan drop pada Trafo Distribusi 50 kVA di Gardu Distribusi AD41 PT PLN (Persero) ULP Adonara. Pembahasan akan berfokus pada evaluasi kondisi tegangan sebelum dan sesudah perubahan tap, serta efektivitas simulasi menggunakan ETAP 19 dalam memprediksi dan memvalidasi perbaikan kualitas tegangan yang diterima konsumen.

#### **4.1 Analisis Kondisi Layanan Trafo dan Pertumbuhan Konsumen pada ULP Adonara**

##### **4.1.1 Tren Kapasitas Transformator**

Berdasarkan data inventaris trafo pada ULP Adonara selama periode 2021 hingga 2025, total kapasitas trafo menunjukkan peningkatan dari 11.460 kVA pada tahun 2021 menjadi 12.680 kVA pada tahun 2025. Kenaikan ini merepresentasikan pertumbuhan total kapasitas sebesar 10,6% dalam empat tahun terakhir, atau rata-rata sekitar 2,6% per tahun. Data Trafo bisa dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Trafo ULP Adonara

Ta hun	JUMLAH per kVA								TOTAL	
	16 kV A	25 kV A	50 kV A	100 kVA	125 kVA	160 kVA	200 kVA	250 kVA	TR AF O	KAPA SITAS
	Bh	Bh	Bh	Bh	Bh	Bh	Bh	Bh	Bh	KVA
2021	0	2	167	17	0	6	2	0	194	11,460
2022	0	2	169	18	0	7	2	0	198	11,820
2023	0	2	170	18	0	7	3	0	200	12,070
2024	0	2	171	18	0	7	3	0	201	12,120
2025	0	2	157	37	0	3	3	0	202	12,680

Peningkatan kapasitas tersebut terjadi terutama pada transformator berkapasitas 50 kVA dan 100 kVA, yang mendominasi sistem distribusi ULP Adonara. Penambahan jumlah unit trafo dengan kapasitas menengah ini menunjukkan bahwa ekspansi jaringan masih difokuskan untuk memperkuat penyulang bertegangan rendah di daerah padat pelanggan, tanpa melakukan perubahan besar terhadap konfigurasi jaringan menengah.

Meskipun demikian, laju pertumbuhan kapasitas trafo tergolong moderat. Hal ini mengindikasikan bahwa upaya peningkatan kapasitas belum sebanding dengan kecepatan pertumbuhan konsumsi listrik masyarakat dan peningkatan beban puncak pada sisi pelanggan.

#### **4.1.2 Pertumbuhan Jumlah Pelanggan**

Jumlah pelanggan pada ULP Adonara mengalami peningkatan yang cukup signifikan dari 37.659 pelanggan pada tahun 2021 menjadi 45.158 pelanggan pada tahun 2025, atau naik sebesar 19,9% dalam empat tahun. Secara rata-rata, pertumbuhan pelanggan mencapai sekitar 5% per tahun, jauh di atas laju peningkatan kapasitas transformator yang hanya 2,6% per tahun. Data Jumlah pelanggan dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data Pelanggan ULP Adonara

Tahun	Jumlah Pelanggan	Daya Tersambung (VA)
2021	37,659	38,653,300
2022	39,821	41,856,700
2023	41,376	44,910,850
2024	43,743	47,601,000
2025	45,158	49,702,150

Dari sisi daya tersambung, total beban pelanggan juga meningkat dari 38.653 kVA pada tahun 2021 menjadi 49.702 kVA pada tahun 2025. Artinya, terdapat tambahan beban sebesar 11.049 kVA dalam kurun waktu lima tahun. Kenaikan daya tersambung yang hampir sebanding dengan total kapasitas trafo menandakan bahwa sistem distribusi mulai beroperasi mendekati batas kemampuan dayanya, terutama pada gardu yang melayani kawasan pemukiman padat.

#### **4.1.3 Implikasi Terhadap Kinerja Tegangan**

Ketidakseimbangan antara pertumbuhan pelanggan dan kapasitas trafo berdampak langsung terhadap kondisi pelayanan tegangan. Ketika jumlah pelanggan bertambah lebih cepat dari peningkatan kapasitas trafo, maka arus beban yang harus ditanggung setiap transformator meningkat, sehingga menimbulkan penurunan tegangan pada sisi sekunder.

Fenomena drop voltage ini umumnya lebih besar pada gardu yang berada di ujung penyulang, karena selain menanggung rugi-rugi saluran yang lebih besar, beban total pada sisi sekunder juga lebih fluktuatif. Berdasarkan hasil survei lapangan PLN ULP Adonara, kondisi ini mulai banyak muncul pada tahun 2023–2025 seiring meningkatnya jumlah sambungan rumah tangga dan pelanggan usaha kecil menengah.

Oleh karena itu, perlu dilakukan strategi mitigasi non-infrastruktur seperti optimalisasi tap changer pada transformator, pengaturan beban antar-fasa, atau penataan ulang sambungan rumah (SR) agar profil tegangan tetap berada dalam batas standar pelayanan.

#### **4.1.4 Relevansi terhadap Kasus Gardu AD41**

Kondisi makro pada ULP Adonara tersebut sejalan dengan hasil studi kasus pada Gardu AD41 yang menjadi objek penelitian ini. Meskipun secara agregat kapasitas sistem ULP meningkat dari tahun ke tahun, namun gardu AD41 mengalami penurunan tegangan yang signifikan akibat meningkatnya jumlah pelanggan di wilayah layanan yang padat dan jarak saluran yang cukup panjang.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan sekunder sebelum pengaturan tap berada di bawah standar pelayanan PLN, yaitu hanya sekitar 217 V.

Dengan demikian, analisis pertumbuhan pelanggan dan kapasitas trafo pada tingkat ULP memberikan konteks yang kuat bahwa permasalahan pada gardu AD41 merupakan bagian dari fenomena sistemik akibat ketidakseimbangan laju pertumbuhan beban terhadap peningkatan kapasitas transformator. Strategi pengaturan tap changer dapat dijadikan solusi jangka menengah untuk menjaga kestabilan tegangan hingga dilakukan penambahan kapasitas atau penguatan

jaringan pada periode selanjutnya. Analisis ini menjadi dasar pembahasan lebih lanjut pada subbab berikutnya, yaitu perhitungan dan simulasi pengaruh perubahan tap changer terhadap tegangan sekunder transformator AD41.

## 4.2 Perhitungan Tegangan Sekunder Pada Trafo

### 4.2.1 Perhitungan ratio lilitan trafo

Menghitung jumlah ratio lilitan pada kumparan primer ( $N_1$ ) dan kumparan sekunder ( $N_2$ ), berdasarkan persamaan 2.15 tentang ratio lilitan kumparan primer dan sekunder dengan rumus pada persamaan  $2.15 \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$ , dengan nilai tegangan primer berdasarkan 5 jenis tegangan primer pada tiap tap trafo dan tegangan sekunder berdasarkan tegangan nominal didapatkan tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perhitungan ratio lilitan trafo

No	Tegangan Primer (V1)	Tegangan Sekunder (V2)	Ratio Lilitan $\frac{N_1}{N_2}$
1	21,0 kV	400 V	52,50
2	20,5 kV	400 V	51,25
3	20,0 kV	400 V	50,00
4	19,5 kV	400 V	48,75
5	19,0 kV	400 V	47,50

Tabel 4.3 memberikan gambaran yang jelas tentang hubungan antara tegangan primer, tegangan sekunder, dan rasio lilitan pada sebuah trafo, dari hasil yang didapat mengenai rasio lilitan trafo maka dapat dihitung tegangan sekunder pada putaran *tap changer* trafo.

### 4.2.2 Perhitungan tegangan sekunder pada putaran *tap changer* trafo

#### a. Tegangan Primer (V1) 19 kV

Menghitung tegangan sekunder dengan tegangan primer 19 kV pada posisi *Tap* trafo 1-5, menggunakan rumus pada persamaan  $2.15 \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$  dan berdasarkan Tabel 4.4, maka:

Tabel 4.4 Perhitungan tegangan sekunder

Posisi <i>Tap</i>	Tegangan Primer (V1)	Ratio Lilitan $\frac{N_1}{N_2}$	Tegangan Sekunder (V2)
1	21,0 kV	52,50	362 V
2	20,5 kV	51,25	371 V
3	20,0 kV	50,00	380 V
4	19,5 kV	48,75	390 V
5	19,0 kV	47,50	400 V

Berdasarkan Tabel 4.4, dapat dilihat bahwa perubahan posisi tap pada transformator dengan tegangan primer 19 kV secara langsung memengaruhi nilai rasio lilitan dan tegangan sekunder. Ketika posisi tap dinaikkan, rasio lilitan berkurang dan tegangan sekunder meningkat. Ketika tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 52,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 362 V. Kemudian tap berada pada posisi ke-2 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 51,25 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 371 V. Tap berada pada posisi ke-3 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 50 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 380 V. Tap berada pada posisi ke-4 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 48,75 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 390 V. Sehingga tap berada pada posisi ke-5 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 47,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V.

#### b. Tegangan Primer (V1) 19,5 kV

Menghitung tegangan sekunder dengan tegangan primer 19,5 kV pada posisi *Tap* trafo 1-5, menggunakan rumus pada persamaan  $2.15 \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$ , maka:

Tabel 4.5 Perhitungan tegangan sekunder

Posisi <i>Tap</i>	Tegangan Primer (V1)	Ratio Lilitan $\frac{N_1}{N_2}$	Tegangan Sekunder (V2)
1	21,0 kV	52,50	371 V
2	20,5 kV	51,25	380 V
3	20,0 kV	50,00	390 V
4	19,5 kV	48,75	400 V
5	19,0 kV	47,50	411 V

Berdasarkan Tabel 4.5, dapat dilihat bahwa perubahan posisi tap pada transformator dengan tegangan primer 19,5 kV secara langsung memengaruhi nilai rasio lilitan dan tegangan sekunder. Ketika posisi tap dinaikkan, rasio lilitan berkurang dan tegangan sekunder meningkat. Ketika tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 52,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 371 V. Kemudian tap berada pada posisi ke-2 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 51,25 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 380 V. Tap berada pada posisi ke-3 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 50 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 390 V. Tap berada pada posisi ke-4 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 48,75 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V. Sehingga tap berada pada posisi ke-5 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 47,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 411 V.

### c. Tegangan Primer (V1) 20 kV

Menghitung tegangan sekunder dengan tegangan primer 20 kV pada posisi *Tap* trafo 1-5, menggunakan rumus pada persamaan 2.15,  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$ , maka:

Tabel 4.6 Perhitungan Tegangan Sekunder

Posisi <i>Tap</i>	Tegangan Primer (V1)	Ratio Lilitan $\frac{N_1}{N_2}$	Tegangan Sekunder (V2)
1	21,0 kV	52,50	381 V
2	20,5 kV	51,25	390 V
3	20,0 kV	50,00	400 V
4	19,5 kV	48,75	410 V
5	19,0 kV	47,50	421 V

Berdasarkan Tabel 4.6, dapat dilihat bahwa perubahan posisi tap pada transformator dengan tegangan primer 20 kV secara langsung memengaruhi nilai rasio lilitan dan tegangan sekunder.

Ketika posisi tap dinaikkan, rasio lilitan berkurang dan tegangan sekunder meningkat. Ketika tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 52,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 381 V. Kemudian tap berada pada posisi ke-2 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 51,25 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 390 V. Tap berada pada posisi ke-3 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 50 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V. Tap berada pada posisi ke-4 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 48,75 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 410 V. Sehingga tap berada pada posisi ke-5 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 47,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 421 V.

#### d. Tegangan Primer (V1) 20,5 kV

Menghitung tegangan sekunder dengan tegangan primer 20,5 kV pada posisi *Tap* trafo 1-5, menggunakan rumus pada persamaan 2.15  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$  maka:

Tabel 4. 7 Perhitungan tegangan sekunder

Posisi <i>Tap</i>	Tegangan Primer (V1)	Ratio Lilitan $\frac{N_1}{N_2}$	Tegangan Sekunder (V2)
1	21,0 kV	52,50	390

Tabel 4.7 Lanjutan			
2	20,5 kV	51,25	400
3	20,0 kV	50,00	410
4	19,5 kV	48,75	421
5	19,0 kV	47,50	432

Berdasarkan Tabel 4.5, dapat dilihat bahwa perubahan posisi tap pada transformator dengan tegangan primer 20,5 kV secara langsung memengaruhi nilai rasio lilitan dan tegangan sekunder. Ketika posisi tap dinaikkan, rasio lilitan berkurang dan tegangan sekunder meningkat. Ketika tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 52,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 390 V. Kemudian tap berada pada posisi ke-2 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 51,25 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V. Tap berada pada posisi ke-3 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 50 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 410 V. Tap berada pada posisi ke-4 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 48,75 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 421 V. Sehingga tap berada pada posisi ke-5 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 47,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 432 V.

#### e. Tegangan Primer (V1) 21 kV

Menghitung tegangan sekunder dengan tegangan primer 21 kV pada posisi *Tap* trafo 1-5, menggunakan rumus pada persamaan  $2.15 \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$  maka:

Tabel 4. 8 Perhitungan tegangan sekunder

Posisi <i>Tap</i>	Tegangan Primer (V1)	Ratio Lilitan $\frac{N_1}{N_2}$	Tegangan Sekunder (V2)
1	21 kV	52,5	400
2	20,5 kV	51,25	410
3	20 kV	50	420
4	19,5 kV	48,75	431

Tabel 4.8 Lanjutan			
5	19 kV	47,5	442

Berdasarkan Tabel 4.6, dapat dilihat bahwa perubahan posisi tap pada transformator dengan tegangan primer 21 kV secara langsung memengaruhi nilai rasio lilitan dan tegangan sekunder. Ketika posisi tap dinaikkan, rasio lilitan berkurang dan tegangan sekunder meningkat. Ketika tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 52,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V. Kemudian tap berada pada posisi ke-2 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 51,25 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 410 V. Tap berada pada posisi ke-3 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 50 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 420 V. Tap berada pada posisi ke-4 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 48,75 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 431 V. Sehingga tap berada pada posisi ke-5 maka didapatkan nilai ratio lilitan sebesar 47,5 sehingga menghasilkan tegangan sekunder sebesar 442 V.

### 4.3 Analisa Perhitungan Tegangan Sekunder Pada Trafo

Hasil analisis perhitungan tegangan sekunder pada transformator dapat dilihat pada Tabel 4.7. Data-data dalam Tabel ini akan menjadi dasar untuk melakukan analisis lebih lanjut, seperti membandingkan hasil perhitungan dengan melakukan simulasi untuk berbagai kondisi beban.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan tegangan sekunder

Posisi Tap Trafo					
Keterangan	1	2	3	4	5
V1	19,0 kV				
V2	362 V	371 V	380 V	390 V	400 V
V1	19,5 kV				
V2	371 V	380 V	390 V	400 V	411 V
V1	20,0 kV				
V2	380 V	390 V	400 V	410 V	420 V

Tabel 4.9 Lanjutan					
V1	20,5 kV				
V2	390 V	400 V	410 V	420 V	432 V
V1	21,0 kV				
V2	400 V	410 V	420 V	431 V	442 V

Berdasarkan data Tabel 4.7 dapat dianalisa bahwa disaat tegangan primer 19 kV dan tap berada pada posisi ke-1 maka menghasilkan tegangan sekunder sebesar 362 V, disaat tap berada pada posisi ke-2 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 371 V, kemudian tap diubah pada posisi ke-3 dan 4 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 380 V dan 390 V dan disaat tap berada pada posisi ke-5 maka tegangan sekunder yang dihasilkan sebesar 400 V. Untuk tegangan primer 19 kV guna mendapatkan nilai tegangan sekunder yang baik maka posisi tap caharger harus berada pada posisi ke-5 (19 kV).

Disaat tegangan primer 19,5 kV dan tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai tegangan sekunder sebesar 371 V, disaat tap berada pada posisi ke-2 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 380 V, kemudian tap diubah ke posisi ke-3 dan 4 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 390 V dan 400 V dan disaat tap berada pada posisi ke-5 maka tegangan sekunder yang dihasilkan sebesar 410 V. Tap posisi ke-5 mengalami *over voltage* dari tegangan yang seharusnya (400V).

Bila tegangan primer 20 kV dan tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai tegangan sekunder sebesar 380 V, disaat tap berada pada posisi ke-2 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 390 V, kemudian tap diubah ke posisi ke-3 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V dan disaat tap berada pada posisi ke-4 dan 5 maka tegangan sekunder yang dihasilkan sebesar 410 V dan 421 V. Untuk mendapatkan tegangan sekunder yang baik maka posisi tap charger harus berada di posisi ke-3 yaitu 20kV. Apabila posisi tab diubah ke-4 dan 5 tegangan yang dihasilkan merupakan tegangan *over voltage* dari tegangan yang seharusnya (400V).

Bila tegangan primer sebesar 20,5 kV dan tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai tegangan sekunder sebesar 390,4 V, disaat tap berada pada posisi

ke-2 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V, kemudian tap diubah ke posisi ke-3 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 410 V dan disaat tap berada pada posisi ke-4 dan 5 maka tegangan sekunder yang dihasilkan sebesar 420,5 V dan 431,5 V. Untuk mendapatkan tegangan sekunder yang baik maka posisi tap charger harus berada di posisi ke-2 yaitu 20,5kV. Apabila posisi tab diubah ke-3, 4 dan 5 tegangan yang dihasilkan merupakan tegangan *over voltage* dari tegangan yang seharusnya (400V).

Bila tegangan primer sebesar 21 kV dan tap berada pada posisi ke-1 maka didapatkan nilai tegangan sekunder sebesar 400 V, disaat tap berada pada posisi ke-2 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 409,7 V, kemudian tap diubah ke posisi ke-3 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 420V dan disaat tap berada pada posisi ke-4 dan 5 maka tegangan sekunder yang dihasilkan sebesar 430,7 V dan 442,1 V. Untuk mendapatkan tegangan sekunder yang baik maka posisi tap charger harus berada di posisi ke-2 yaitu 20,5kV. Apabila posisi tab diubah ke-2, 3, 4 dan 5 tegangan yang dihasilkan merupakan tegangan *over voltage* dari tegangan yang seharusnya (400 V).

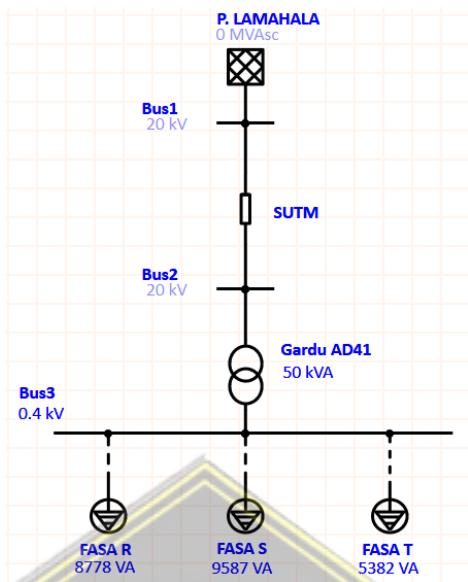
Dapat dilihat dari Tabel 4.7 bahwa tegangan primer yang sesuai dengan tap trafo telah menghasilkan tegangan sekunder sebesar 400 V yang sesuai dengan nilai nominal. Hal ini mengindikasikan bahwa trafo tersebut mampu beroperasi dengan efisien dan stabil pada kondisi beban normal, serta memenuhi persyaratan kualitas tegangan yang dibutuhkan oleh sistem distribusi. Perubahan tegangan primer pada sisi tegangan menengah secara langsung berdampak pada kualitas tegangan yang diterima oleh konsumen. Jika tegangan primer turun, tanpa adanya penyesuaian pada posisi *tap changer*, maka tegangan yang sampai ke konsumen juga akan menurun. Hal ini dapat menyebabkan kinerja peralatan listrik menjadi tidak optimal, bahkan dapat merusak peralatan elektronik yang sensitif. Untuk mengatasi masalah tersebut, perlu dilakukan penyesuaian posisi *tap changer*. Dengan mengubah rasio transformasi belitan, tegangan sekunder dapat diatur sedemikian rupa sehingga tegangan yang diterima konsumen tetap stabil dan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk menjaga stabilitas tegangan sekunder, pengaturan posisi *tap changer* pada transformator sangatlah krusial. Ketika tegangan primer mengalami perubahan, baik penurunan maupun kenaikan, tanpa adanya penyesuaian posisi tap, maka tegangan sekunder akan menyimpang dari nilai nominalnya. Jika tegangan primer turun, tegangan sekunder akan ikut turun, sedangkan jika tegangan primer naik, tegangan sekunder berpotensi mengalami *over voltage*. Fluktuasi tegangan primer yang tidak terkendali dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem kelistrikan. Jika tegangan sekunder terlalu rendah, kinerja peralatan listrik akan terganggu dan dapat menyebabkan kerusakan. Sebaliknya, jika tegangan sekunder terlalu tinggi (*over voltage*), peralatan listrik dapat mengalami kerusakan yang parah. Oleh karena itu, pengaturan *tap changer* sangat penting untuk menjaga kualitas tegangan dan keandalan sistem distribusi listrik.

#### 4.4 Simulasi Perubahan *Tap changer* Trafo Menggunakan ETAP

##### 4.4.1. Hasil Simulasi Tegangan Sebelum Pengaturan Tap Transformator

Dalam penelitian ini, tahapan awal yang akan dilakukan adalah menganalisis profil tegangan sebelum dilakukan penyesuaian tap pada transformator. Analisis ini dilaksanakan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP versi 19.0.1. Metodologi standar dalam studi aliran daya diawali dengan pembuatan diagram satu garis dari sistem yang menjadi objek penelitian. Berdasarkan hasil observasi lapangan yang telah dilakukan, diagram satu garis sistem yang diteliti divisualisasikan seperti terlihat pada gambar berikut. Gambar 4.1 merepresentasikan hasil pemodelan diagram tersebut yang dihasilkan melalui software ETAP 19.



Gambar 4.1 Diagram Satu Garis Saluran Transmisi TM 20 kV

Gambar 4.1 menjelaskan bahwa bus 1 merupakan bus 20 kV dan bus 2 merupakan bus 20 kV sedangkan bus 4 merupakan bus 400 V yang ada di Gardu AD41. Trafo 1 merupakan transformator distribusi (step-down) 20 kV/400V yang ada di Gardu AD41 yang terhubung dengan bus 2. selanjutnya dapat dilakukan analisis tegangan dengan memasukkan data jaringan yang telah didapatkan dari hasil peninjauan lapangan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan di Gardu AD41 pada periode 5 Juli hingga 1 Agustus 2025, diperoleh sejumlah data lapangan yang akan diolah lebih lanjut. Data tersebut akan dianalisis menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 untuk mengidentifikasi kondisi tegangan sistem sebelum dilakukan penyesuaian tap pada transformator.

Kesesuaian yang kuat antara hasil simulasi dan data Tabel memberikan keyakinan bahwa model simulasi yang ada dapat untuk memprediksi kinerja transformator dalam kondisi operasi yang berbeda. Hal ini sangat perlu dalam perencanaan dan pengoptimalan simulasi sistem tenaga listrik, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Data pengukuran tegangan dan beban dapat dilihat pada Tabel 4.10 & Tabel 4.11.

Tabel 4. 10 Data Pengukuran Tegangan dan Beban Gardu AD41 Siang Hari

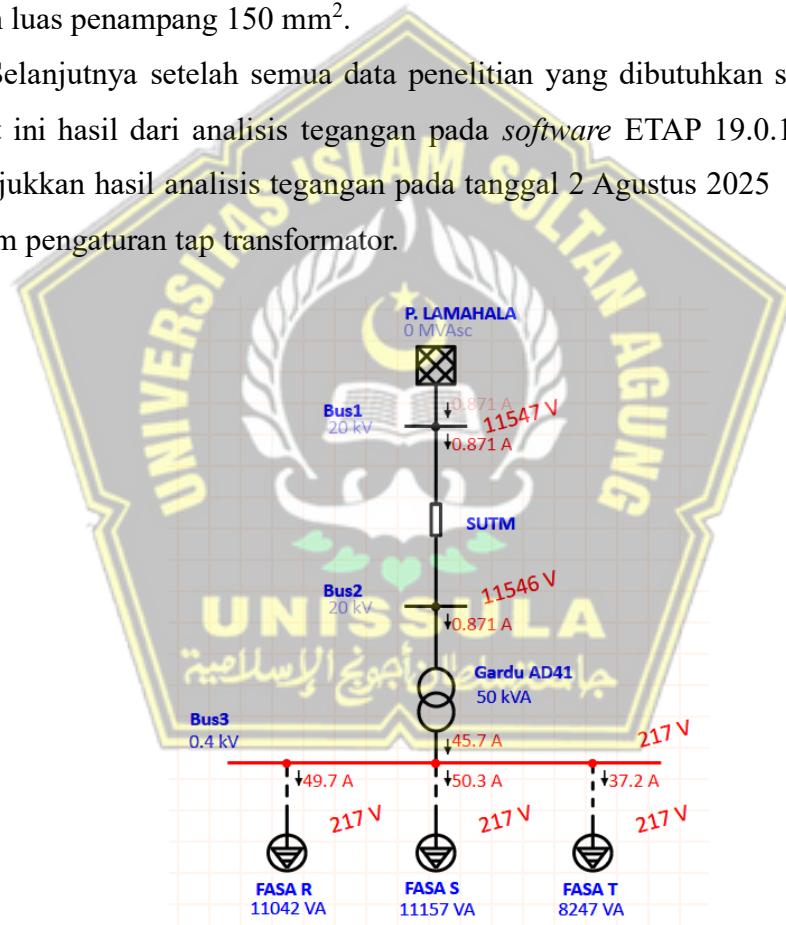
Tanggal	Tegangan (V)						Arus (A)			
	RS	RT	ST	RN	SN	TN	R	S	T	N
05/07/2025	374	375	375	215,7	215,7	216,1	46,9	43,0	23,6	19,5
06/07/2025	374	375	375	215,8	215,7	216,8	45,7	43,0	23,5	19,0
07/07/2025	373	375	375	215,0	215,0	217,0	33,9	41,8	19,3	22,7
08/07/2025	374	375	374	215,0	216,0	217,0	34,0	41,5	20,3	23,3
09/07/2025	374	375	374	215,0	217,0	217,0	33,8	41,5	20,1	23,3
10/07/2025	374	375	374	215,0	217,0	217,0	33,6	42,1	20,1	24,9
11/07/2025	374	376	374	215,0	217,0	217,0	33,4	42,4	19,2	25,1
12/07/2025	374	375	374	215,7	215,9	217,1	45,6	41,4	23,6	18,6
13/07/2025	373	375	375	215,6	215,8	216,7	45,8	42,3	23,4	18,3
14/07/2025	377	377	378	216,9	216,7	218,5	42,8	42,6	19,2	24,3
15/07/2025	377	377	378	216,8	216,8	218,5	42,6	40,7	20,5	24,2
16/07/2025	378	377	378	217,1	217,0	218,6	42,9	40,4	20,5	24,8
17/07/2025	378	377	378	217,0	217,0	218,6	42,0	42,9	25,6	24,4
18/07/2025	378	377	378	216,9	217,0	218,6	41,3	42,4	25,6	25,0
19/07/2025	373	376	375	215,4	214,6	217,0	28,3	43,3	23,6	18,4
20/07/2025	373	376	375	215,5	214,7	216,7	28,2	43,5	23,7	18,8
21/07/2025	377	371	377	217,3	216,7	217,9	34,0	41,5	26,1	14,62
22/07/2025	376	371	377	217,3	216,7	217,9	33,9	38,9	26,2	14,84
23/07/2025	378	371	377	217,2	216,8	217,8	34,0	38,5	26,8	14,4
24/07/2025	377	376	377	217,3	216,8	217,8	53,0	37,5	26,9	14,22
25/07/2025	377	376	376	217,3	216,4	218,0	53,1	37,6	27,5	14,35
26/07/2025	373	376	375	215,4	214,6	216,9	28,3	42,1	22,3	19,6
27/07/2025	373	376	375	215,5	214,7	216,8	28,0	41,3	21,4	19,0
28/07/2025	377	379	377	217,2	216,4	217,2	53,0	33,3	25,1	18,3
29/07/2025	375	378	378	217,4	215,8	217,3	31,5	33,4	25,0	18,1
30/07/2025	375	378	378	217,6	215,7	217,4	32,0	33,2	24,9	17,8
31/07/2025	379	378	377	216,3	215,9	219,1	32,1	55,8	25,7	18,2
01/08/2025	379	379	378	218,7	218,6	217,5	30,1	34,7	23,7	19,2

Tabel 4. 11 Data Pengukuran Tegangan Beban Gardu AD41 Malam Hari

Tanggal	Tegangan (V)						Arus (A)			
	R-S	R-T	S-T	R-N	S-N	T-N	R	S	T	N
05/07/2025	377	379	378	217,7	217,4	218,3	56,0	51,9	43,1	40,5
06/07/2025	377	379	378	217,7	217,4	218,3	56,0	53,5	43,0	40,2
07/07/2025	378	379	378	218,5	216,7	218,0	46,8	52,6	51,3	36,9
08/07/2025	378	379	378	218,5	216,6	218,0	46,4	52,7	51,3	36,9
09/07/2025	378	379	378	218,5	216,6	218,0	46,2	52,7	51,3	36,7
10/07/2025	379	379	378	218,2	216,8	218,0	57,5	52,7	51,1	36,7
11/07/2025	379	379	378	218,2	216,8	218,0	59,1	61,5	51,1	40,6
12/07/2025	377	379	378	217,7	217,5	218,4	56,1	53,1	43,1	41,2
13/07/2025	374	375	373	217,7	217,6	215,7	62,4	55,6	42,9	40,9
14/07/2025	377	378	376	217,6	216,7	217,8	61,6	54,7	51,6	41,0
15/07/2025	377	378	376	216,3	216,9	217,4	61,2	54,5	52,0	40,5
16/07/2025	377	378	376	216,4	216,8	217,6	59,9	54,6	59,7	40,1
17/07/2025	377	378	376	216,4	216,8	217,6	58,5	63,2	43,8	40,2
18/07/2025	377	378	376	218,1	216,6	218,1	58,2	62,7	43,7	40,2
19/07/2025	374	375	374	217,8	215,4	215,7	62,4	55,4	49,1	40,2
20/07/2025	374	375	374	217,8	215,4	215,8	62,3	55,4	49,2	40,2
21/07/2025	376	376	377	218,0	216,7	218,2	57,2	61,7	44,0	40,6
22/07/2025	376	376	377	217,9	216,8	218,3	57,1	61,7	43,2	40,6
23/07/2025	376	376	377	218,0	216,7	218,2	57,2	57,2	53,6	41,1
24/07/2025	377	379	377	217,1	206,8	217,2	57,1	57,9	54,3	40,8
25/07/2025	379	379	377	211,8	208,6	217,4	55,6	55,3	53,5	40,9
26/07/2025	374	375	374	215,7	215,5	215,7	62,4	55,6	49,2	40,9
27/07/2025	374	375	374	215,6	215,5	215,7	62,5	54,1	41,8	40,6
28/07/2025	377	379	378	214,2	209,6	217,2	55,5	54,1	41,8	40,3
29/07/2025	377	379	378	215,6	215,5	218,7	55,6	54,0	41,8	40,0
30/07/2025	377	378	377	215,7	215,4	217,1	62,4	55,6	49,1	39,7
31/07/2025	377	378	377	215,7	215,4	215,7	62,4	55,6	49,1	39,4
01/08/2025	377	378	377	215,8	215,4	215,8	62,4	55,3	49,2	39,1

Pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 di atas diketahui besaran sistem tenaga selama 30 hari yang dibutuhkan dalam melakukan analisis tegangan dengan menggunakan *software* ETAP 19.0.1. Diketahui rata-rata beban selama sebulan adalah sebagai berikut: Fasa R = 47,8 A; Fasa S = 48,3 A; Fasa T = 35,7 A. Selain data di atas, data penelitian lainnya yang digunakan dalam melakukan simulasi analisis tegangan adalah panjang saluran transmisi. Berdasarkan hasil peninjauan, panjang saluran transmisi antara PLTD – Gardu AD41 adalah 5 km, dengan menggunakan konfigurasi SUTM/ Saluran udara dan kabel aluminium dengan jenis N2XSEBY dengan luas penampang 150 mm<sup>2</sup>.

Selanjutnya setelah semua data penelitian yang dibutuhkan sudah lengkap, berikut ini hasil dari analisis tegangan pada *software* ETAP 19.0.1. Gambar 4.2 menunjukkan hasil analisis tegangan pada tanggal 2 Agustus 2025 dengan ETAP sebelum pengaturan tap transformator.



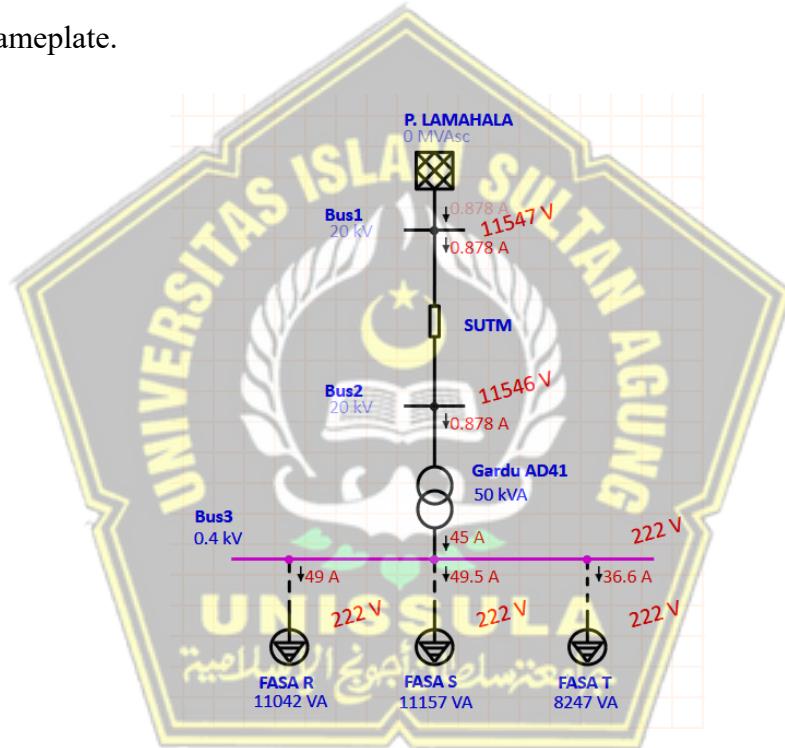
Gambar 4. 2 Hasil Analisis Tegangan dengan ETAP Sebelum

Gambar 4.2 dapat diketahui kondisi sistem sebelum dilakukannya pengaturan tap transformator. Kondisi Tegangan Primer adalah 20 kV dari PLTD dan Trafo Distribusi 20 Kv berada pada positsi tap ke-1 (21 kV).

#### 4.4.2. Simulasi perubahan *tap changer* trafo

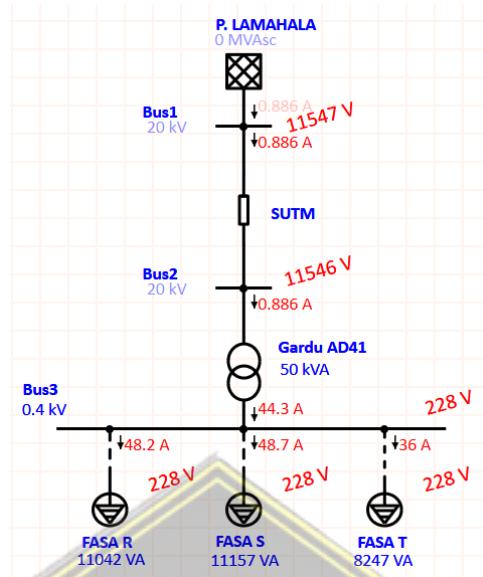
Dalam tahap ini, dilakukan pengaturan tap transformator secara bertahap untuk memperoleh nilai tegangan sekunder yang optimal. Tujuan dari pengaturan tap ini adalah agar tegangan pada sisi sekunder trafo sesuai dengan rentang toleransi tegangan yang diperkenankan, yakni sebesar  $\pm 3\%$  dari nilai nominal 220 V (untuk tegangan fasa-netral) atau 400 V (untuk tegangan fasa-fasa).

Simulasi pertama dilakukan bertujuan untuk melihat tap trafo ketika diposisikan pada posisi ke-2 dengan tegangan primer 20.5 kV seperti yang tertera pada nameplate.



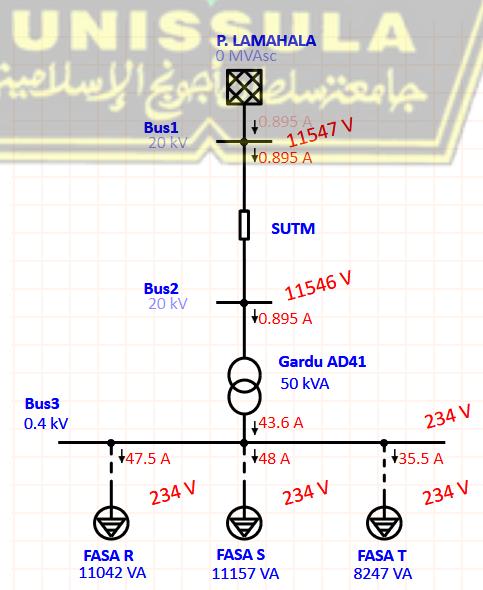
Gambar 4. 3 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-2

Pada pengaturan ini, tegangan pada sisi sekunder trafo terukur sebesar 222 V di masing-masing fasa. Meskipun terjadi peningkatan tegangan dibanding posisi awal, namun hasil simulasi ini menunjukkan bahwa tegangan pada sisi sekunder dan sepanjang penyulang masih belum mencapai kondisi optimal. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian lebih lanjut terhadap posisi tap. Simulasi berikutnya dilakukan dengan mengatur tap ke posisi ke-3 pada kondisi tegangan primer 20 kV.



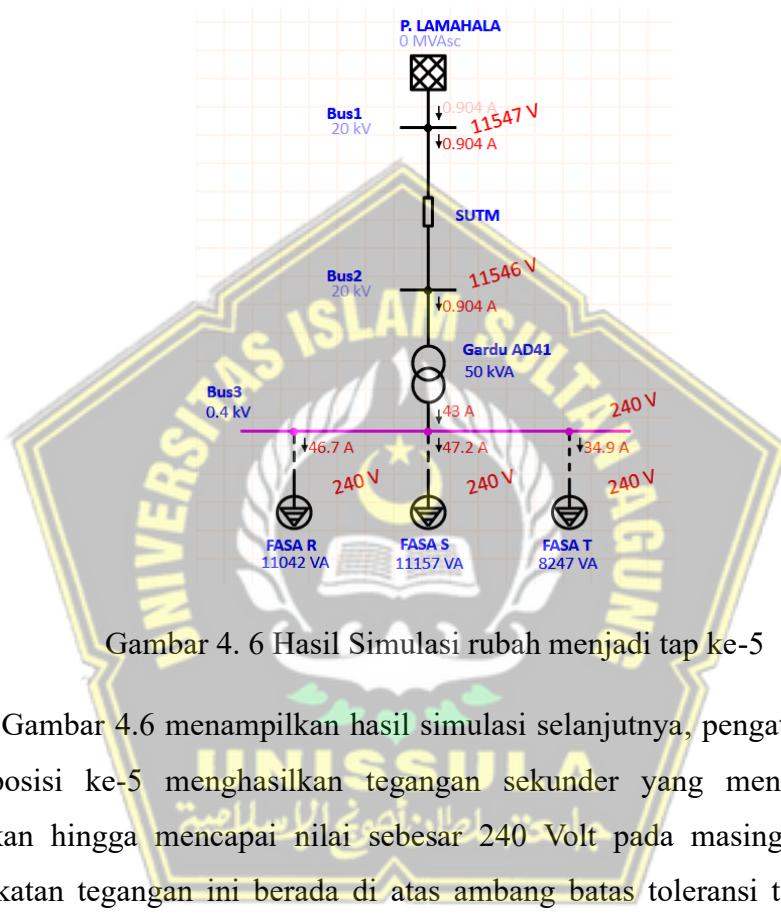
Gambar 4. 4 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-3

Gambar 4.4 memperlihatkan hasil pada posisi tap ke-3, tegangan sekunder pada ketiga fasa tercatat sebesar 228 V. Hasil ini menunjukkan bahwa tegangan pada sisi sekunder telah berada dalam rentang optimal dan mendekati batas atas toleransi standar tegangan. Kondisi ini dianggap ideal karena mampu mengatasi penurunan tegangan akibat panjang saluran dan beban yang signifikan. Selanjutnya, dilakukan simulasi dengan posisi tap ke-4.



Gambar 4. 5 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-4

Gambar 4.5 menjelaskan dengan posisi tap ke-4 dan tegangan primer 20 kV, tegangan pada sisi sekunder meningkat menjadi 234 V. Meskipun tegangan tetap dalam batas teknis, namun nilainya mendekati kondisi *over voltage* dan berpotensi membahayakan peralatan pelanggan yang sensitif. Simulasi terakhir dilakukan dengan posisi tap ke-5, dengan kondisi tegangan primer 19 kV.



Gambar 4. 6 Hasil Simulasi rubah menjadi tap ke-5

Gambar 4.6 menampilkan hasil simulasi selanjutnya, pengaturan tap trafo pada posisi ke-5 menghasilkan tegangan sekunder yang meningkat secara signifikan hingga mencapai nilai sebesar 240 Volt pada masing-masing fasa. Peningkatan tegangan ini berada di atas ambang batas toleransi tegangan yang umumnya direkomendasikan, yaitu sekitar  $\pm 5\%$  dari tegangan nominal (220 V untuk fasa-netral dan 400 V untuk fasa-fasa). Dengan demikian, nilai tegangan 240 V ini dapat dikategorikan sebagai *over voltage*, yang jika dibiarkan secara terus-menerus dapat menimbulkan berbagai konsekuensi negatif terhadap sistem distribusi tenaga listrik.

#### 4.4.3. Analisa Hasil Simulasi Perubahan Tap Changer Trafo Dengan Beban

Berdasarkan simulasi yang dilakukan pada berbagai skenario tegangan primer (19 kV, 19.5 kV, 20 kV, 20.5 kV, dan 21 kV) dengan perubahan posisi tap trafo,

dapat disimpulkan bahwa model simulasi yang dibangun mampu memprediksi secara akurat kinerja transformator distribusi dalam berbagai kondisi operasional.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa posisi tap trafo sangat berpengaruh terhadap profil tegangan sistem distribusi. Pada kondisi awal, di mana tegangan primer adalah 21 kV dan tap berada pada posisi ke-1, tegangan sekunder hanya mencapai 217 V. Setelah dilakukan perubahan ke tap ke-2, tegangan meningkat menjadi 222 V, namun belum optimal.

Perubahan ke posisi tap ke-3 menghasilkan tegangan sekunder sebesar 228 V, yang dianggap ideal karena mendekati nilai nominal dan tetap dalam batas toleransi. Sebaliknya, posisi tap ke-4 dan ke-5 menghasilkan tegangan masing-masing sebesar 234 V dan 240 V, yang dinilai terlalu tinggi dan berpotensi menyebabkan *over voltage*.

Mempertimbangkan bahwa saat ini beban pada transformator telah melebihi 50% dari kapasitas nominalnya, serta untuk mencegah kondisi overload di masa mendatang, maka diputuskan bahwa posisi tap ke-3 merupakan pengaturan paling optimal dan aman. Hasil simulasi menunjukkan pentingnya pengaturan posisi tap trafo dalam menjaga kualitas tegangan pada sistem distribusi. Dengan menyesuaikan posisi tap trafo, dapat diperoleh profil tegangan yang lebih stabil dan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Namun, perlu diingat bahwa pengaturan tap trafo harus dilakukan dengan hati-hati dan mempertimbangkan kondisi sistem yang sebenarnya, termasuk variasi beban dan karakteristik jaringan.

#### **4.5 Penyeimbangan Beban dan Perbaikan Sambungan Rumah (SR) Deret**

Setelah dilakukan serangkaian simulasi serta penentuan posisi tap transformator yang dianggap paling optimal berdasarkan hasil analisis teknis menggunakan perangkat lunak ETAP, terdapat tahapan penting lain yang dilakukan sebelum penerapan praktik langsung perubahan tap trafo di lapangan. Tahapan tersebut meliputi upaya penyeimbangan beban antar fasa dan perbaikan sistem rangkaian deret (SR deret) pada sistem distribusi.

Kedua metode ini diterapkan sebagai langkah preventif dan korektif dalam meningkatkan kualitas tegangan, khususnya pada sisi sekunder transformator serta

jaringan pelanggan dengan tegangan rendah. Penyeimbangan beban bertujuan untuk mengurangi ketidakseimbangan arus antar fasa yang dapat memicu ketidakteraturan tegangan, sedangkan perbaikan SR deret ditujukan untuk mengurangi resistansi dan impedansi jalur distribusi yang secara langsung dapat mempengaruhi penurunan tegangan (*voltage drop*).

Dengan melakukan kedua langkah tersebut secara sistematis sebelum praktik pengaturan tap trafo, diharapkan profil tegangan di sisi pelanggan menjadi lebih stabil dan berada dalam rentang standar pelayanan yang telah ditentukan. Langkah ini juga mendukung efisiensi kerja trafo distribusi dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

#### **4.4.1 Sebelum Penyeimbangan beban dan Perbaikan SR deret**

Hasil pengukuran rata-rata beban bulanan menunjukkan adanya ketidakseimbangan pada fasa T. Fasa R memiliki beban sebesar 47,8 A, fasa S sebesar 48,3 A, dan fasa T hanya 35,7 A. Untuk mengatasi ketidakseimbangan ini, beban pada fasa T perlu diseimbangkan. Sesuai standar PLN untuk jaringan tegangan rendah, jarak antar titik tarikan sambungan rumah (SR) harus kurang dari 30 meter. Selain itu, setiap tarikan SR tidak boleh melayani lebih dari 10 rumah. Aturan ini sangat penting untuk mencegah penurunan tegangan yang berlebihan. Penurunan tegangan yang diizinkan sesuai SPLN No 1: 1995 dan SNI adalah maksimal 10% dari tegangan nominal 220 V.



Gambar 4. 7 Peta Pelanggan per Tiang Sebelum Perbaikan

Gambar 4.7 menampilkan Peta lokasi gardu distribusi AD 041 dan sebaran pelanggan sebelum perbaikan sambungan rumah (SR) seri dan penyeimbangan beban dilakukan. Terlihat jelas bahwa beberapa pelanggan terhubung dalam satu tarikan kabel (SR seri). Penataan ini dapat menyebabkan penurunan tegangan, terutama di ujung jaringan, akibat penumpukan beban di beberapa titik, seperti yang terlihat pada Tabel 4.12 “Data Beban per Tiang Sebelum Dilakukan Perbaikan SR Deret”.

Tabel 4. 12 Tabel Data Beban Per Tiang Sebelum Dilakukan Perbaikan Sr Deret

No.	Nomor Tiang	Tarikan	Jumlah Pelanggan	Fase Tersambung	Daya Terpasang (VA)
1	C1	0	0		0
2		1	1	R	900
3	C2	2	12	R	8900
4		3	6	S	4450
5		1	1	R	900
6	C3	2	4	R	2250

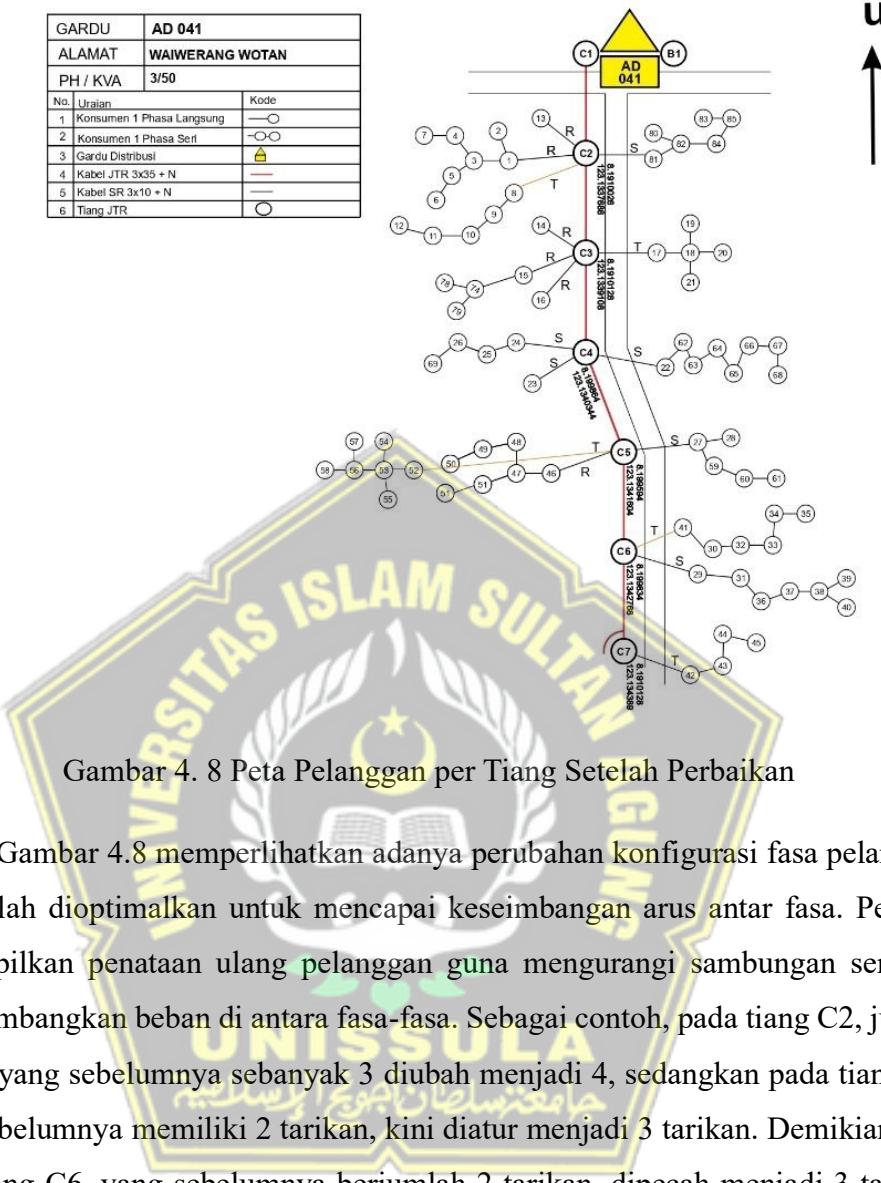
Tabel 4.10 Lanjutan

7	C3	3	1	R	450
8		4	5	T	2250
9	C4	1	4	S	3150
10		2	1	S	450
11		3	8	S	3600
12	C5	1	14	R	9800
13		2	5	S	2700
14	C6	1	1	T	450
15		2	12	S	6750
16	C7	1	4	T	2250

Dari Tabel 4.12 diketahui bahwa sebaran total daya terpasang (VA) di setiap tiang menunjukkan adanya konsentrasi beban pada titik-titik tertentu. Misalnya, tiang C2 memiliki total daya terpasang sebesar 8.900 VA dan 4.450 VA pada kedua tarikannya, sementara tiang C5 tercatat dengan total daya terpasang sebesar 9.800 VA dan 2.700 VA, dan tiang C6 memiliki total daya terpasang sebesar 6.750 VA. Secara keseluruhan, daya terpasang pada fase R mencapai 23.200 VA, fase S sebesar 21.100 VA, dan fase T sebesar 4.950 VA. Kondisi ini berpotensi menyebabkan penurunan tegangan (*voltage drop*) yang cukup signifikan akibat resistansi dan impedansi jalur distribusi yang belum dioptimalkan.

#### 4.4.2 Setelah Penyeimbangan beban dan Perbaikan SR deret

Setelah dilakukan penyeimbangan beban antar fasa dan perbaikan sistem rangkaian deret, upaya ini dilakukan untuk mengurangi resistansi dan impedansi jalur distribusi.



Gambar 4.8 memperlihatkan adanya perubahan konfigurasi fasa pelanggan yang telah dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan arus antar fasa. Peta ini menampilkan penataan ulang pelanggan guna mengurangi sambungan seri dan menyeimbangkan beban di antara fasa-fasa. Sebagai contoh, pada tiang C2, jumlah tarikan yang sebelumnya sebanyak 3 diubah menjadi 4, sedangkan pada tiang C5, yang sebelumnya memiliki 2 tarikan, kini diatur menjadi 3 tarikan. Demikian pula pada tiang C6, yang sebelumnya berjumlah 2 tarikan, dipecah menjadi 3 tarikan. Detail lengkap dari perubahan tersebut dapat dilihat pada Tabel di bawah ini.

Tabel 4.13 Tabel Data Beban Per Tiang Setelah Dilakukan Perbaikan SR Deret

No.	Nomor Tiang	Tarikan	Jumlah Pelanggan	Fase Tersambung	Daya Terpasang (VA)
1	C1	0	0		0
2	C2	1	1	R	900
3		2	7	R	4900
4		3	5	T	3550

Tabel 4. 11 Lanjutan					
5	C2	4	6	S	4450
6	C3	1	1	R	900
7		2	4	R	2250
8		3	1	R	450
9		4	5	T	2250
10	C4	1	4	S	3150
11		2	1	S	450
12		3	8	S	3600
13	C5	1	7	R	5750
14		2	7	T	4050
15		3	5	S	2700
17	C6	1	5	T	3600
18		2	7	S	3600
19	C7	1	4	T	2250

Berdasarkan Tabel 4.13, dapat dilihat bahwa penyesuaian beban berhasil dilakukan pada beberapa tiang. Sebagai contoh, di tiang C2, daya terpasang (VA) sekarang terbagi menjadi empat tarikan (900 VA, 4900 VA, 3550 VA, dan 4450 VA). Tarikan baru dengan total daya 3.550 VA kini disambungkan pada fasa T, sehingga distribusi beban menjadi lebih merata. Hal serupa juga terjadi di tiang C5 dan C6. Pada tiang C5, beban diatur ulang menjadi 5750 VA, 4050 VA, dan 2700 VA, di mana tarikan baru 4050 VA disambungkan ke fasa T. Sementara itu, di tiang C6, beban diatur ulang menjadi dua tarikan dengan masing-masing 3600 VA, dan tarikan baru 3600 VA juga disambungkan ke fasa T.

Perubahan ini bertujuan untuk mengurangi ketidakseimbangan arus dan meminimalkan penurunan tegangan (*voltage drop*). Hasilnya, sistem distribusi menjadi lebih efisien, keandalan meningkat, dan kualitas tegangan di jaringan pelanggan menjadi lebih stabil dan sesuai dengan standar pelayanan.

#### 4.6 Praktik perubahan *tap changer* pada Trafo Distribusi Gardu AD41

Dalam rangka membuktikan validitas serta keakuratan hasil simulasi yang telah dilakukan sebelumnya menggunakan perangkat lunak ETAP, maka dilakukan penerapan secara langsung berupa praktik pengaturan *tap changer* pada

transformator distribusi yang berada di Gardu AD41. Langkah ini menjadi bagian penting dari tahapan verifikasi, di mana data hasil simulasi yang bersifat teoritis perlu dibandingkan dengan kondisi nyata di lapangan untuk mengetahui tingkat kesesuaianya.

Sebelum dilakukan perubahan tap trafo, Langkah pertama yang dilakukan petugas adalah Melaksanakan Safety Briefing, cek kesiapan peralatan, material, dan Memasang rambu pengaman di Lokasi pekerjaan. Selanjutnya Melaksanakan pengukuran dan pencatatan tegangan dan beban. Data pengukuran tegangan beban dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Tabel Data Pengukuran Tegangan dan Beban Sebelum Dilakukan

*Perubahan Tap Changer*

Kondisi	Tegangan (V)						Arus (A)			
	R-S	R-T	S-T	R-N	S-N	T-N	R	S	T	N
Berbeban	368	367	367	217,6	217,7	217,1	43,3	35,9	28,8	19,5
Tanpa Beban	384	382	383	221,7	221,6	220,3	0	0	0	0

Setelah beban terukur baik dalam keadaan berbeban dan tanpa beban, langkah selanjutnya adalah Mengeluarkan beban dan tegangan secara bertahap mulai dari NH fuse per jurusan, *main switch*, dan FCO. Petugas kemudian Memasang tangga fiber dan Menaiki tangga ke titik pekerjaan. Tap diketahui berada pada tap ke -1 sebelum dilakukan perubahan. Posisi awal Tap dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Posisi Awal Tap ke-1

Sesuai dengan hasil kesimpulan saat dilakukan simulasi, tap rencananya akan dirubah ke tap ke-3. Setelah tap berhasil dirubah ke Tap-3, petugas memeriksa kembali hasil pekerjaan sesuai standar konstruksi. Posisi Tap setelah dilakukan perubahan dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Posisi Akhir Tap ke-3

Petugas kemudian Memasukkan tegangan dari FCO dan Memastikan tegangan di lokasi pekerjaan pada rel PHB normal. Petugas kemudian Memeriksa dan mengukur tegangan akhir setelah perubahan tap trafo. Hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 4. 15.

Tabel 4. 15 Tabel Data Pengukuran Tegangan dan Beban Setelah Dilakukan Perubahan *Tap Changer*

Kondisi	Tegangan (V)						Arus (A)			
	R-S	R-T	S-T	R-N	S-N	T-N	R	S	T	N
Berbeban	396	396	393	227,4	226,9	227,2	22,7	24,3	29,6	19,5
Tanpa Beban	397	396	397	229,5	229,1	228,3	0	0	0	0

Berdasarkan Tabel 4. 15 pengukuran tegangan akhir setelah perubahan *tap trafo*, terlihat hasil yang signifikan. Perubahan dari *tap -1* ke *tap 3*, sesuai dengan hasil simulasi, terbukti efektif. Data yang didapat setelah perubahan *tap* menunjukkan adanya perbaikan pada tegangan, baik saat berbeban maupun tanpa beban, dan juga pada arus. Hal ini memvalidasi hasil simulasi ETAP dan menunjukkan kesesuaian antara teori dan praktik di lapangan. Dengan demikian, praktik ini berhasil membuktikan bahwa penyesuaian *tap changer* adalah solusi yang tepat untuk meningkatkan kualitas tegangan dan efisiensi sistem distribusi.

#### 4.7 Pengaruh Perubahan pada Pelanggan

Selain pengukuran pada gardu distribusi, pengukuran dilakukan juga pada kWh Meter milik pelanggan tegangan rendah (TR). Survey dilakukan pada 5 pelanggan berbeda untuk melihat bagaimana pengaruh sebelum dan setelah dilakukannya perubahan tap pada trafo distribusi pada pelanggan TR. Data pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Data Pengukuran Pelanggan TR

No. Meter	Nama Gardu	Daya (VA)	Tegangan Sebelum (V)	Tegangan Sesudah (V)
45118500011	AD41	1300	213	224
32206648597	AD41	900	204	218
45031196947	AD41	900	209	221
32206432356	AD41	450	212	223
14262087423	AD41	900	217	227

Tabel 4.16 menampilkan hasil pengukuran tegangan pada lima pelanggan tegangan rendah (TR) dengan daya yang bervariasi antara 450 VA hingga 1300 VA. Dari data terlihat bahwa secara umum terjadi peningkatan nilai tegangan pada seluruh pelanggan setelah dilakukan penyesuaian tap. Sebagai contoh, pelanggan dengan daya 1300 VA mengalami kenaikan tegangan dari 213 V menjadi 224 V, sedangkan pelanggan dengan daya 450 VA mengalami kenaikan dari 212 V menjadi 223 V.

Berdasarkan hasil pengukuran pada pelanggan TR, dapat disimpulkan bahwa perubahan tap pada trafo distribusi memberikan dampak positif terhadap kualitas tegangan yang diterima pelanggan. Seluruh pelanggan yang diukur menunjukkan adanya kenaikan tegangan mendekati standar tegangan nominal, sehingga kualitas pelayanan tenaga listrik menjadi lebih baik dan lebih stabil.

#### **4.8 Perbandingan Hasil Simulasi dan Praktik Lapangan**

Setelah dilakukan simulasi analisis tegangan menggunakan perangkat lunak ETAP serta dilanjutkan dengan praktik langsung pengaturan *tap changer* pada transformator distribusi di Gardu AD41, tahap selanjutnya adalah melakukan evaluasi berupa perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil pengamatan langsung di lapangan. Perbandingan ini bertujuan untuk menilai tingkat kesesuaian dan akurasi dari model simulasi yang telah dibangun, sekaligus mengidentifikasi sejauh mana hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi riil sistem distribusi tenaga listrik.

Berdasarkan perbandingan komprehensif antara hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP dan data praktik langsung di lapangan, dapat disimpulkan bahwa keduanya menunjukkan kesesuaian yang sangat kuat dan saling memvalidasi. Praktik perubahan *tap* dari posisi -1 ke posisi ke-3, yang didasarkan pada hasil simulasi, terbukti efektif dalam memperbaiki kualitas tegangan.

Sebelum perubahan dilakukan, hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan pada sisi sekunder berada pada 217 V, yang tidak optimal. Setelah simulasi perubahan *tap* ke posisi ke-3, tegangan sekunder meningkat menjadi 228 V, yang

diangap ideal karena berada dalam rentang toleransi standar tegangan. Di sisi lain, simulasi untuk posisi *tap* ke-4 dan ke-5 menghasilkan tegangan yang terlalu tinggi (234 V dan 240 V), yang berpotensi menyebabkan *over voltage* dan membahayakan peralatan pelanggan.

Hasil ini didukung penuh oleh data praktik lapangan. Sebelum perubahan *tap*, pengukuran menunjukkan tegangan pada kondisi berbeban sebesar 217,6 V pada fasa R-N, 217,7 V pada fasa S-N, dan 217,1 V pada fasa T-N. Setelah *tap changer* diubah dari -1 ke 3, tegangan pada kondisi berbeban meningkat secara signifikan menjadi 227,4 V (fase R-N), 226,9 V (fase S-N), dan 227,2 V (fase T-N). Peningkatan ini selaras dengan hasil simulasi yang memprediksi tegangan sebesar 228 V.

Kesesuaian yang kuat antara hasil simulasi dan data lapangan ini membuktikan bahwa model simulasi ETAP dapat diandalkan untuk memprediksi kinerja transformator dalam berbagai kondisi operasional. Hal ini sangat penting dalam perencanaan dan optimalisasi sistem tenaga listrik, karena memungkinkan para perencana untuk mengidentifikasi dan menyelesaikan masalah seperti penurunan tegangan tanpa harus melakukan intervensi fisik yang berisiko. Dengan demikian, praktik penyesuaian *tap changer* ini berhasil membuktikan diri sebagai solusi yang tepat untuk meningkatkan kualitas tegangan, efisiensi, dan keandalan sistem distribusi secara keseluruhan.

## BAB V

### PENUTUP

Bab ini memuat ringkasan dan kesimpulan menyeluruh dari penelitian yang telah dilakukan, serta memberikan beberapa rekomendasi dan saran yang diharapkan dapat menjadi masukan berharga bagi PT PLN (Persero) ULP Adonara dan penelitian selanjutnya.

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian analisis yang komprehensif, baik melalui simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 19 maupun implementasi langsung di lapangan, penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

1. Kondisi Awal Sistem Distribusi: Sebelum dilakukannya perbaikan, Trafo Distribusi 50 kVA di Gardu Distribusi AD41 menghadapi masalah penurunan tegangan (*voltage drop*) yang signifikan. Hal ini ditunjukkan oleh pengukuran awal di lapangan saat kondisi berbeban, di mana tegangan terukur pada fasa R-N, S-N, dan T-N masing-masing sebesar 217,6 V, 217,7 V, dan 217,1 V. Nilai ini berada di bawah tegangan nominal 220 V dan berpotensi menyebabkan ketidaknyamanan bagi pelanggan.
2. Validitas Hasil Simulasi ETAP 19: Simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP 19 terbukti memiliki validitas yang tinggi. Dari hasil simulasi, ditemukan bahwa posisi *tap changer* trafo yang paling optimal adalah pada posisi ke-3. Simulasi ini memprediksi bahwa perubahan ke posisi tersebut dapat menaikkan tegangan sekunder di ketiga fasa hingga 228 V. Nilai ini dianggap ideal karena berhasil mengatasi *voltage drop* tanpa menimbulkan risiko *over voltage* yang dapat membahayakan peralatan pelanggan.
3. Verifikasi dengan Praktik Lapangan: Hasil praktik langsung di lapangan secara kuat memvalidasi hasil simulasi. Setelah *tap changer* diubah dari posisi -1 ke posisi ke-3, pengukuran tegangan di lokasi pekerjaan menunjukkan peningkatan yang signifikan. Data tegangan sekunder yang terukur saat

berbeban adalah 227,4 V (fasa R-N), 226,9 V (fasa S-N), dan 227,2 V (fasa T-N). Peningkatan ini sangat konsisten dengan prediksi simulasi (228 V) dan berhasil membawa tegangan kembali ke dalam rentang standar pelayanan.

4. Efektivitas Solusi: Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa penyesuaian *tap changer* pada trafo distribusi merupakan solusi yang sangat efektif dan efisien dari segi biaya untuk memperbaiki *voltage drop*. Dengan langkah ini, kualitas tegangan di sisi pelanggan dapat kembali stabil dan sesuai dengan standar yang ditetapkan. Keberhasilan ini juga menunjukkan bahwa metode penelitian yang memadukan simulasi dan verifikasi lapangan adalah pendekatan yang andal dan dapat diimplementasikan untuk permasalahan serupa.

## 5.2 Saran

Sebagai tindak lanjut dari temuan-temuan dalam penelitian ini, berikut adalah beberapa saran yang dapat diajukan:

1. Peningkatan Standarisasi Prosedur: Disarankan kepada PT PLN (Persero) ULP Adonara untuk mengintegrasikan penggunaan perangkat lunak simulasi seperti ETAP 19 ke dalam prosedur standar operasional mereka. Hal ini dapat membantu dalam menganalisis dan merencanakan perbaikan pada gardu distribusi lainnya secara lebih terukur dan akurat, sehingga meminimalisasi trial-and-error di lapangan.
2. Implementasi Penyeimbangan Beban Berkelanjutan: Meskipun perubahan *tap* trafo efektif, perlu dilakukan pemantauan beban dan tegangan secara rutin dan berkala. Hal ini penting untuk memastikan keseimbangan beban, terutama pada fasa-fasa yang memiliki beban tertinggi, seperti yang ditunjukkan oleh data awal (Fasa R = 47,8 A dan Fasa S = 48,3 A).
3. Pengembangan Kompetensi Teknis: PT PLN (Persero) ULP Adonara disarankan untuk mengadakan pelatihan khusus bagi personel teknisnya. Pelatihan ini dapat berfokus pada penggunaan perangkat lunak simulasi ETAP 19 dan interpretasi data lapangan untuk pengambilan keputusan teknis yang lebih cepat dan tepat.

4. Riset Lanjutan: Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan mempertimbangkan faktor-faktor lain yang memengaruhi kualitas tegangan, seperti:
  - a. Analisis dampak penyeimbangan beban yang lebih detail.
  - b. Studi kelayakan penambahan kapasitor bank untuk perbaikan faktor daya.
  - c. Analisis perbandingan biaya dan manfaat antara solusi perubahan *tap changer* dengan solusi infrastruktur lainnya.
  - d. Studi tentang dampak harmonisa pada sistem distribusi dan cara penanggulangannya.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. I Made Agus Mahardiananta, Putu Aries Ridhana Arimbawa, and Dewa Ayu Sri Santiari, “Perhitungan Drop Tegangan Sistem Distribusi Menggunakan Metode Aliran Daya,” *LPPM STMIK STIKOM Indonesia*, Apr. 2020.
- [2]. D. Adin Maulana, D. Nugroho, I. H. Budi Sukoco, and J. K. Raya Kaligawe, “Analisa Susut Daya Dan Drop Tegangan Terhadap Jaringan Tegangan Menengah 20kv Pada Gardu Induk Pandean Lamper Semarang,” 2019.
- [3]. T. A. Pratiwi, “Analysis Of Voltage Quality And Losses Improvement Using Tap Changer Transformer,” 2017, Accessed: Aug. 23, 2025. [Online].. Available: <http://repository.upi.edu/32678/>
- [4]. S. Nurhadi, D. Dhesah Kharisma, and I. Artikel ABSTRAK, “Pengaruh Optimalisasi Maintenance Terhadap On Load Tap Changer Transformator Daya 50 MVA 150/20 kV,” vol. 20, no. 2, 2022, doi: 10.33795/eltek.
- [5]. R. N. Sumarno *et al.*, “Volume 4 Pengaruh Setting Tap Transformator Terhadap Profil Tegangan Pada Jaringan IEEE 14 Bus,” *Universitas Muhammadiyah Semarang*, 2022.
- [6]. F. Silitonga, R. Perangkat, and N. Abstrak, “Rancangan Perubah Sadapan (Tap Changer) Transformator Distribusi,” *Jurnal PRIMA*, vol. 3, no. 5, 2006.
- [7]. R. Harahap and J. A. Pakpahan, *Analisa Pengukuran Ratio Transformator Daya Yang Menggunakan On Load Tap Changer (Aplikasi Pada Transformator Daya Paya Geli Pln Medan)*, vol. 13, no. 3. Online, 2018.
- [8]. S. Anisah and Z. Tharo, “Analisis Perbaikan Tegangan Ujung Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 Kv Dengan Simulasi ETAP (Studi

Kasus PT PLN (Persero) Rayon Kuala,” *Universitas Pembangunan Panca Budi*, 2016.

- [9]. Afif Faniza, “Pengaruh Perubahan Tap Charger Pada Trafo Distribusi 20 Kv Terhadap Nilai Tegangan Sekunder Dan Susut Energi Transformator (Losses) Di Gardu Induk Pandean Lamper,” *UNIVERSITAS SEMARANG*, 2023.
- [10]. Suhadi and Wrahatnolo Tri, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008.
- [11]. DAMAN SUSWANTO, “Sistem Distribusi Tenaga Listrik Untuk Mahasiswa Teknik Elektro,” *UNIVERSITAS NEGERI PADANG*, 2009.
- [12]. R. Wibowo *et al.*, *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi Dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. PT PLN (Persero), 2010.
- [13]. H. Fania Valentina, “JEPIN (Jurnal Edukasi dan Penelitian Informatika) Sistem Informasi Perawatan Transformator PT. PLN (Persero) Area Pontianak,” *Universitas Tanjungpura*, 2019.
- [14]. P.T. PLN (PERSERO), “SPLN 50:1997 Spesifikasi Transformator Distribusi,” *P.T. PLN (PERSERO)*, 1997.
- [15]. J. Siburian, *Karakteristik Transformator*, no. 10. Universitas Darma Agung, 2019.
- [16]. PT PLN (PERSERO), “SPLN 72:1987 Spesifikasi Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah,” *PT PLN (PERSERO)*, 1987.
- [17]. Inc. Operation Technology, “ETAP,” [www.etap.com](http://www.etap.com)., 2016