

**OPTIMASI PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI PY094
TRANSFORMATOR 160KVA SEBAGAI UPAYA REDUKSI SUSUT
ENERGI PLN ULP PRINGGABAYA**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Penelitian ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Strata Satu (S1) pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang



DISUSUN OLEH:

Salma Ashila Firdaus

NIM 30602200248

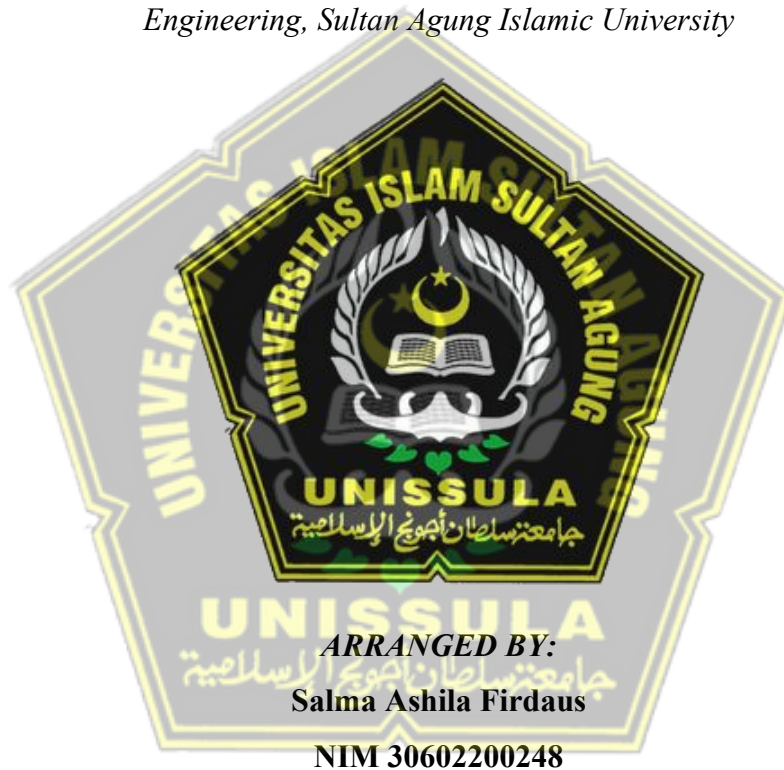
**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

JUNI 2025

***OPTIMIZATION OF LOAD BALANCING ON DISTRIBUTION
SUBSTATION PY094 WITH 160 KVA TRANSFORMER AS AN EFFORT TO
REDUCE ENERGY LOSS AT PLN ULP PRINGGABAYA***

FINAL PROJECT

*Researched to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1)
at Departement of Electrical Engineering, Faculty of Industrial
Engineering, Sultan Agung Islamic University*



ARRANGED BY:
Salma Ashila Firdaus
NIM 30602200248

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

JUNE 2025

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Salma Ashila Firdaus
NIM : 30602200248
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“OPTIMASI PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI PY094 TRANSFORMATOR 160KVA SEBAGAI UPAYA REDUKSI SUSUT ENERGI PLN ULP PRINGGABAYA”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 29 Agustus 2025

Yang Menyatakan



Salma Ashila Firdaus

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**OPTIMASI PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI PY094 TRANSFORMATOR 160KVA SEBAGAI UPAYA REDUKSI SUSUT ENERGI PLN ULP PRINGGABAYA**” ini disusun oleh:

Nama : Salma Ashila Firdaus
NIM : 30602200248
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Jumat
Tanggal : 29 Agustus 2025

Pembimbing I


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

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**OPTIMASI PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI PY094 TRANSFORMATOR 160KVA SEBAGAI UPAYA REDUKSI SUSUT ENERGI PLN ULP PRINGGABAYA**” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jumat
Tanggal : 15 Agustus 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

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

NIDN : 0618066301

Ketua

Dr. Ir. H. Sukarno Budi Utomo, M.T.

NIDN : 0619076401

Penguji I

Dr. Eka Nuryanto Budisusila, S.T., M.T.

NIDN : 0619107301

Penguji II

HALAMAN PERSEMBAHAN

Penelitian ini saya persembahkan untuk:

Salma Ashila Firdaus

Diri saya sendiri atas usahanya menyelesaikan salah satu tanggung jawab melalui Tugas Akhir ini meski butuh waktu lama dan sambil bekerja di tempat yang jauh dari keluarga tercinta.

Kedua Orang Tua saya,

Atas kepercayaan, keikhlasan dan doa yang memberikan saya banyak kemudahan dan kasih sayang.

Keluarga besar,

Yang selalu mendukung tiap langkah dalam hidup saya terutama adik-adik saya

S-1 Teknik Elektro 2022 Unissulla

Tidak semua orang disini aku kenal tapi terima kasih kebersamaannya. Tanpa kalian tidak ada namanya tugas kelompok.

Pak Dr. Eka Nuryanto Budisusila, ST., MT.

Dosen panutan saya dan juga pembimbing TA saya. Pengajar bukan penghajar. Pengarah bukan pemarah. Bapak dengan sikap *keep calm* tapi professional. Terima kasih pak.

Keluarga dan Rekan Kerja PLN Persero

Terima kasih rekan-rekan yang selalu menemani dan membantu saat penempatan mulai dari awal kuliah di Soreang dan mengakhiri kuliah di Pringgabaya, walau jauh tapi disinilah pengabdian sebenarnya, seperti mottonya Muda Berkelana Tua Bercerita.

D-III Teknik Elektro 2018 Universitas Diponegoro

Terima kasih teman-teman yang dulu turut bergaul dan memberi kesempatan saya untuk lebih berinteraksi dan bereksplorasi lebih jauh diranah kelistrikan.

Persembahan ini hanya Sebagian kecil dari pesan terima kasih yang ingin saya sampaikan. Lebih dari itu doa baik akan saya sertakan untuk semua orang yang tidak bisa saya ingat untuk disebutkan. Tuhan selalu mengetahui dan pasti akan memberkahi, InsyaAllah.

HALAMAN MOTTO

وَلَنَبْلُوَنَّكُمْ بِشَيْءٍ مِّنَ الْخَوْفِ وَالْجُوعِ وَنَقْصٍ مِّنَ الْأَمْوَالِ
وَالْأَنْفُسِ وَالثَّمَرَاتِ ۗ وَبَشِّرِ الصَّابِرِينَ

Artinya:

“Dan Kami pasti akan menguji kamu dengan sedikit ketakutan, kelaparan, kekurangan harta, jiwa, dan buah-buahan. Dan sampaikanlah kabar gembira kepada orang-orang yang sabar”

(QS Al Baqarah ayat 155)



KATA PENGANTAR

السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

Puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan Hidayat, Taufik, dan Rahmat-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“OPTIMASI PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI PY094 TRANSFORMATOR 160KVA SEBAGAI UPAYA REDUKSI SUSUT ENERGI PLN ULP PRINGGABAYA”**.

Penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Strata-I (S1) Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Penulis menyadari bahwa banyak pihak yang memberikan dukungan dan pendampingan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya dan semoga Allah SWT memberikan balasan terbaik kepada:

1. Prof. Dr. H. Gunarto, S.H., M.H. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang
2. Dr. Ir. Novi Mariyana, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan agung Semarang.
4. Dr. Eka Nuryanto Budisusila, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan serta dukungan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh Dosen dan Karyawan Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang atas ilmu, bimbingan dan bantuannya dalam penulisan Tugas Akhir ini.

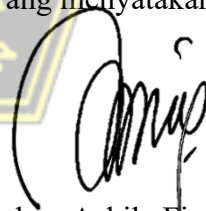
6. Kedua orangtua dan keluarga yang selalu memberikan do'a, semangat, dukungan, dan kasih sayang yang tiada hentinya kepada penulis dalam menyusun Tugas Akhir ini.
7. Kepada rekan-rekan Teknik Elektro UNISSULA angkatan 2022 atas dukungannya dalam penulisan laporan Tugas Akhir Ini.
8. Rekan kerja dan kerabat di ULP Pringgabaya

Penulis menyadari dalam menyusun laporan Tugas Akhir ini ada kekurangan, baik dari segi materi maupun penyajiannya. Penulis meminta maaf dan menerima seluruh kritik maupun saran yang membangun, sehingga kedepannya Tugas Akhir ini menjadi lebih sempurna lagi. Penulis berharap Tugas Akhir ini memberi manfaat dan dapat dijadikan referensi agar dapat dikembangkan menjadi lebih baik lagi. Semoga Allah SWT., senantiasa melimpahkan rahmat dan ridha-Nya kepada kita semua. Aamiin.

وَالسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

Pringgabaya, 8 Agustus 2025

Yang menyatakan,



Salma Ashila Firdaus

NIM 30602200248

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
HALAMAN MOTTO	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
ABSTRAK.....	xvi
<i>ABSTRACT</i>	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Landasan Teori.....	9
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik	9
2.2.2 Gardu Distribusi	9
2.2.3 Tenaga Listrik Tiga Phase.....	11
2.2.4 Ketidakseimbangan Beban.....	12
2.2.5 Susut Energi (Energi Losses).....	14
2.2.6 Transformator.....	14

2.2.7	ETAP (Electrical Transient and Analysis Program)	16
BAB III METODE PENELITIAN.....		18
3.1	Objek Penelitian	18
3.2	Data – Data Penelitian.....	19
3.3	Blok Diagram Penelitian	21
3.4	Flowchart Penelitian.....	22
BAB IV HASIL DATA DAN ANALISA		24
4.1	Pengukuran dan Pengamatan Beban	25
4.1.1	Pengukuran Jurusan B (Timur)	25
4.1.2	Pengukuran Jurusan D (Barat)	25
4.1.3	Pengukuran Beban Sisi Sekunder Trafo	26
4.2	Analisa Data Pengukuran dan Pengamatan Beban	26
4.2.1	Analisa Data Tegangan dan Arus.....	27
4.2.2	Analisa Data Beban Sekunder Trafo.....	28
4.3	Analisa Ketidakseimbangan Beban.....	28
4.3.1	Analisa Ketidakseimbangan beban Jurusan B	29
4.3.2	Analisa Ketidakseimbangan beban Jurusan D	29
4.4	Analisa Susut Energi.....	30
4.5	Analisa Ketidakseimbangan Arus Menggunakan Simulasi ETAP	31
4.5.1	Pembuatan Model Sistem.....	31
4.5.2	Analisa ketidakseimbangan Arus	32
4.6	Analisa Penyeimbangan Arus	33
4.6.1	Simulasi penyeimbangan dengan ETAP	35
4.6.2	Perhitungan Penyeimbangan Beban.....	37
4.7	Analisa Dalam Keadaan Beban Seimbang.....	38

4.7.1	Analisa Nilai Persentase Ketidakseimbangan.....	38
4.7.2	Analisa Nilai Arus Netral.....	39
4.7.3	Analisa Susut Energi.....	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		42
5.1	Kesimpulan	42
5.2	Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA		45
LAMPIRAN.....		47



DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Pengukuran Tegangan dan Arus Jurusan B	25
Tabel 4. 2 Pengukuran Tegangan dan Arus Jurusan D	25
Tabel 4. 3 Pengukuran Tegangan dan Arus Sisi Sekunder Trafo	26
Tabel 4. 4 Tabel Perbandingan Hasil Data Analisa Penyeimbangan Beban.....	36
Tabel 4.5 Perencanaan Pembagian Beban Setiap Fasa	37



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	9
Gambar 2.2 Gardu Trafo Tiang Penyulang Anjani.....	10
Gambar 2.3 Grafik Perbandingan Umur Peralatan Antara Dilakukan Pemeliharaan dan Tidak Dilakukan Pemeliharaan	11
Gambar 2.4 Diagram Vektor Beban Tidak Seimbang	13
Gambar 2.5 Simbol Transformator	15
Gambar 2.6 Prinsip Kerja Transformator.....	15
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian.....	18
Gambar 3.2 Single Line Diagram Penyulang Anjan.....	19
Gambar 3.3 Single Line Diagram Gardu PY094	19
Gambar 3.4 Nameplat Transformator	20
Gambar 3. 5 Blok Diagram Penelitian	21
Gambar 3.6 Flowchart Penelitian.....	22
Gambar 4.1 Model sistem gardu pada ETAP.....	32

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Lembar RevisiError! Bookmark not defined.



ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi merupakan permasalahan yang sering terjadi dalam sistem tenaga listrik, terutama pada jaringan distribusi tegangan rendah. Ketidakseimbangan ini terjadi ketika arus yang mengalir pada masing-masing fasa tidak merata, sehingga dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan susut energi listrik. Jika tidak dikendalikan, kondisi ini dapat menurunkan efisiensi transformator serta berdampak pada kestabilan tegangan dalam jaringan distribusi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban pada Gardu Distribusi PY094 PLN, ULP Pringgabaya, Penyulang Anjani, serta mengevaluasi dampaknya terhadap rugi-rugi daya dan susut energi listrik, baik dalam kondisi beban tidak seimbang maupun setelah dilakukan penyeimbangan beban.

Penelitian ini dilakukan dengan metode pengukuran langsung dan analisis kuantitatif. Data arus, tegangan, dan parameter operasional transformator diukur pada kondisi aktual di lapangan. Perhitungan rugi-rugi daya dilakukan menggunakan persamaan rugi-rugi tembaga serta rugi-rugi total transformator. Selain itu, analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi beban tidak seimbang dengan kondisi beban yang telah disimulasikan dalam keadaan seimbang, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap susut energi dan biaya operasional.

Hasil penelitian menunjukkan nilai rata-rata arus fasa **103,8 A** untuk fasa R, **130,2 A** untuk fasa S, dan **90,4 A** untuk fasa T di jurusan B dan rata-rata arus fasa sebesar **47,4 A** untuk fasa R, **18 A** untuk fasa S, dan **20,4 A** untuk fasa T di jurusan D. Hal ini mengakibatkan rugi daya pada sistem distribusi, dengan estimasi susut energi harian mencapai 28,94 kWh/hari, jika diasumsikan sistem beroperasi selama 12 jam per hari.

Kata Kunci: Gardu PY094, Ketidakseimbangan Beban, Rugi-Rugi Daya, Trafo Distribusi.

ABSTRACT

Load imbalance in distribution transformers is a common issue in electrical power systems, especially in low-voltage distribution networks. This imbalance occurs when the current flowing through each phase is uneven, leading to an increase in power losses and electrical energy losses. If not properly managed, this condition can reduce transformer efficiency and affect voltage stability in the distribution network. Therefore, this study aims to analyze the level of load imbalance in the PY094 PLN distribution transformer at ULP Pringgabaya, Penyulang Anjani, and evaluate its impact on power losses and energy losses, both under unbalanced load conditions and after load balancing adjustments.

This research employs a direct measurement and quantitative analysis method. Data on current, voltage, and transformer operational parameters were measured under actual field conditions. Power loss calculations were conducted using the copper loss equation and the total transformer loss formula. Additionally, an analysis was performed by comparing unbalanced load conditions with a simulated balanced load condition to assess its effect on energy losses and operational costs.

The results showed an average phase current of 103.8 A for the R phase, 130.2 A for the S phase, and 90.4 A for the T phase in the B direction, and an average phase current of 47.4 A for the R phase, 18 A for the S phase, and 20.4 A for the T phase in the D direction. This resulted in power losses in the distribution system, with an estimated daily energy loss of 28.94 kWh/day, assuming the system operates for 12 hours per day.

Keywords: *Distribution Transformer, Load Imbalance, Power Losses, PY094 Substation.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gardu distribusi merupakan salah satu elemen penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara sistem Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan konsumen. Keberadaan gardu distribusi memungkinkan pengaliran energi listrik dengan tegangan yang sesuai kebutuhan pelanggan, sekaligus menjaga kualitas pasokan listrik agar stabil dan andal. Namun, dalam operasionalnya, gardu distribusi sering menghadapi berbagai tantangan teknis maupun non-teknis yang dapat memengaruhi efisiensi dan umur pakai peralatannya.

Salah satu tantangan utama adalah tingginya tingkat susut energi (*energy losses*), yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor. Susut teknis biasanya terjadi akibat arus bocor pada isolator, panas berlebih pada transformator, penurunan kualitas komponen seperti kabel, *switchgear*, dan proteksi lainnya, serta ketidakseimbangan beban. Di sisi lain, susut non-teknis dapat disebabkan oleh faktor eksternal seperti pencurian listrik atau kesalahan pengukuran. Selain itu, keandalan gardu distribusi juga dipengaruhi oleh usia peralatan, kondisi lingkungan sekitar, dan pola pemeliharaan yang diterapkan.

Gardu distribusi PY094 PLN, yang dikelola oleh Unit Layanan Pelanggan (ULP) Pringgabaya yang terdapat pada penyulang Anjani, merupakan salah satu gardu distribusi yang memegang peranan strategis dalam menyuplai listrik ke wilayah Bagik Papan. Namun, gardu PY094 ini dihadapkan dengan tantangan beban operasional yg pincang pada setiap fasanya. Hal ini disebabkan kawasan tersebut yang masih berkembang sehingga masih berkembang sehingga masih memungkinkan penambahan pelanggan pada gardu PY094. Ketidakseimbangan beban pada setiap fasanya terjadi karena petugas penyambungan tidak memperhatikan fasa mana yang

disambung. Ketidakseimbangan beban ini dapat meningkatkan risiko susut energi (*energy losses*) dan rusaknya peralatan pada gardu distribusi tersebut.

Dalam penelitian ini, penulis berencana untuk melakukan optimasi penyeimbangan beban gardu distribusi PY094 sebagai upaya reduksi susut energi pada PLN ULP Pringgabaya yang erat kaitannya dengan susut distribusi dengan analisa data hasil pengukuran beban puncak gardu distribusi. Data tersebut juga meliputi pengukuran parameter listrik seperti arus dan tegangan. Melalui penelitian ini, diharapkan penyeimbangan beban dapat dilakukan secara efisien dan tepat sasaran, tanpa harus menunggu terjadinya kerugian perusahaan yang secara berkelanjutan, kerusakan fisik dan pengaduan dari masyarakat mengenai kualitas listrik yang disalurkan.

Oleh karena itu, penulis tertarik untuk merancang penelitian dengan judul **“OPTIMASI PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI PY094 TRANSFORMATOR 160KVA SEBAGAI UPAYA REDUKSI SUSUT ENERGI PLN ULP PRINGGABAYA”**, dengan harapan tidak hanya menghasilkan solusi teknis untuk gardu distribusi PY094, tetapi juga dapat menjadi referensi bagi pengelola gardu distribusi lainnya dalam merancang strategi penyeimbangan beban yang lebih terukur dan berbasis data.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana gambaran ketidakseimbangan beban antar fasa pada gardu distribusi PY094 dan seberapa besar susut energi (*losses*) dan arus netral berdasarkan data pengukuran lapangan yang selanjutnya dimodelkan di ETAP?
2. Apa Metode atau skenario yang paling efektif untuk menurunkan ketidakseimbangan beban dan losses pada gardu PY094 pada ETAP?
3. Bagaimana penerapan hasil simulasi ETAP ke dalam rekomendasi praktis penyeimbangan beban di lapangan dan pengaruhnya terhadap nilai susut arus netral?

1.3 Pembatasan Masalah

1. Penelitian difokuskan pada gardu distribusi PY094 Penyulang Anjani ULP Pringgabaya tanpa melibatkan gardu distribusi lain di luar lokasi ini.
2. Penelitian membahas dampak ketidakseimbangan beban terhadap nilai susut teknis pada gardu distribusi PY094.
3. Penyeimbangan beban dilakukan berdasarkan data hasil pengukuran beban puncak gardu PY094.
4. Melibatkan data teknis terkait susut energi Penyulang Anjani pada bulan yang sama yang saat dilakukan pengukuran gardu dan data historis pengukuran gardu PY094.
5. Terbatas pada analisis dan rekomendasi strategi Penyeimbangan Beban dengan metode pengukuran beban puncak tanpa implementasi penuh di lapangan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam pembuatan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang strategi penyeimbangan beban menggunakan metode pengukuran waktu beban puncak guna mengurangi nilai susut energi dan memperpanjang umur pakai gardu distribusi secara efektif.
2. Untuk menguji efisiensi penyeimbangan beban pada gardu distribusi PY094 terhadap nilai susut energi gardu distribusi.
3. Mengetahui dampak dilakukannya penyeimbangan beban gardu distribusi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penulisan dan pembuatan Tugas Akhir ini adalah :

a. Bagi Penulis

Memberikan kesempatan bagi penulis untuk memperdalam pemahaman mengenai strategi penyeimbangan beban menggunakan metode pengukuran beban puncak.

b. Bagi Masyarakat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung peningkatan keandalan dan efisiensi pasokan listrik di wilayah penyulang Anjani. Dengan gardu distribusi yang beroperasi secara optimal, masyarakat dapat menikmati pasokan listrik yang lebih stabil, berkualitas, dan ekonomis, yang pada akhirnya mendukung aktivitas sehari-hari.

c. Bagi Mahasiswa dan Pembaca

Penelitian ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang ingin mendalami bidang pemeliharaan sistem kelistrikan, khususnya terkait penerapan penyeimbangan beban gardu distribusi.

1.6 Sistematika Penulisan

HALAMAN JUDUL

Berisi judul penelitian dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris, serta identitas penulis, program studi, instansi, dan tahun penyusunan.

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING DAN PENGUJI

Berisi tanda tangan pembimbing dan penguji yang menyatakan bahwa skripsi telah disetujui dan diuji secara akademik.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Merupakan pernyataan resmi dari penulis bahwa penelitian ini asli dan tidak mengandung plagiarisme.

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Dokumen yang menyatakan bahwa penulis mengizinkan publikasi skripsi ini sesuai dengan ketentuan akademik.

HALAMAN PERSEMBAHAN DAN HALAMAN MOTTO

Berisi dedikasi dari penulis kepada pihak tertentu serta motto atau kutipan inspiratif yang berhubungan dengan penelitian ini.

KATA PENGANTAR

Bagian ini berisi ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan skripsi ini.

DAFTAR ISI, DAFTAR TABEL, DAFTAR GAMBAR, DAFTAR LAMPIRAN

Bagian ini memuat daftar isi skripsi, daftar tabel yang digunakan, daftar gambar yang ditampilkan, serta daftar lampiran yang berisi data pendukung penelitian.

ABSTRAK

Bagian abstrak berisi ringkasan penelitian, yang mencakup latar belakang, metode penelitian, hasil utama, dan kesimpulan dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Menjelaskan latar belakang penelitian dan alasan disusunnya penelitian ini.

1.2. Perumusan Masalah

Menyatakan permasalahan utama yang akan dianalisis

1.3. Pembatasan Masalah

Menjelaskan batasan penelitian agar lebih fokus dan spesifik.

1.4. Tujuan

Menguraikan hasil yang ingin dicapai dari penelitian ini.

1.5. Manfaat

Menjelaskan kontribusi penelitian ini bagi penulis, masyarakat, dan mahasiswa.

1.6. Sistematika Penulisan

Memberikan gambaran umum tentang struktur penyusunan laporan ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Membahas penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik ini.

2.2. Landasan Teori

Menjelaskan teori-teori utama yang digunakan sebagai dasar analisis dalam penelitian ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, termasuk prosedur pengumpulan data, alat dan bahan, flowchart, serta teknik analisis data yang digunakan.

BAB IV DATA DAN ANALISA

Bab ini menyajikan hasil penelitian yang diperoleh dari pengukuran dan perhitungan, serta analisis data untuk menjawab perumusan masalah yang telah disusun.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir berisi kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini serta saran yang dapat diterapkan untuk pengembangan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat daftar referensi yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini, disusun sesuai dengan standar sitasi yang digunakan dalam penelitian ini

LAMPIRAN

Berisi data tambahan yang mendukung hasil penelitian, seperti tabel pengukuran, perhitungan rinci, atau dokumen pendukung lainnya.

LEMBAR REVISI DAN SEMINAR KEMAJUAN (TELAH DISETUJUI PENGUJI)

Bagian ini berisi catatan revisi dari dosen pembimbing atau penguji serta dokumen seminar kemajuan yang telah disetujui.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

No.	Judul	Keterangan
1.	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan <i>Losses</i> Pada Transformator Distribusi di PT PLN (Persero) Area Sorong[1]	Menyimpulkan bahwa terjadinya ketidakseimbangan beban menyebabkan tingginya nilai arus netral yang akan mengakibatkan besarnya susut.
2.	Optimasi Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi Terhadap Penurunan Rugi Energi dengan Metode Seimbang Beban Seharian[2]	Pada jurnal ini dibahas mengenai penyeimbangan beban dengan metode pengukuran beban seharian setiap 30 menit. Menyimpulkan bahwa besar kecilnya persentase ketidakseimbangan akan berpengaruh terhadap nilai rugi-rugi dan juga <i>losses</i> .
3.	Pengaruh Pemakaian Beban Tidak Seimbang Terhadap Umur Peralatan Listrik[3]	Menyimpulkan bahwa pembebanan yang tidak seimbang pada trafo distribusi akan menyebabkan munculnya arus netral. Arus ini menjadi <i>losses</i> karena sepanjang hantaran netral timbul resistansi.

		Penyeimbangan beban dengan cara <i>re-wiring</i> sambungan rumah pelanggan dapat menurunkan <i>losses</i> dan juga dapat memperpanjangan umur perataan listrik.
4.	Optimalisasi Pembebanan Transformator Distribusi 20 KV dengan Penyeimbangan Beban pada Penyulang Hertasning	Persentase pembebanan pada suatu transformator dikatakan layak yakni 60%-80%. Nilai arus netral berbanding lurus dengan persentase ketidakseimbangan. Maka untuk memperkecilnya dilakukan penyeimbangan beban dengan membagi beban pada fasa yang bebannya berlebih ke fasa yang lebih kecil bebannya berdasarkan hasil pengukuran.
5.	Optimasi Jaringan Distribusi Sekunder Untuk Mengurangi Rugi Daya Menggunakan Algoritma Genetika[4]	Metode Algoritma Genetika telah banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi tak linier. Metode Algoritma Genetika kode non-biner yang digunakan pada penelitian ini karena kesederhanaan dan kemampuannya untuk memasukkan informasi lebih

		dari bilangan biner. Optimasi beban pada jaringan distribusi sekunder menggunakan metode ini dapat mengurangi rugi daya pada distribusi jaringan tegangan rendah (JTR) sebesar 5.3%
--	--	---

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terintegrasi dan terdiri dari tiga komponen utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi.[2], [3] Komponen distribusi berperan sebagai penghubung antara sistem transmisi dan konsumen akhir, dengan fungsi utama mendistribusikan energi listrik pada tegangan yang sesuai dengan kebutuhan pengguna.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

(Sumber : <https://www.omazaki.co.id> telah diolah kembali)

Keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik sangat bergantung pada integritas setiap komponen dalam sistem tersebut, termasuk gardu distribusi yang menjadi titik vital dalam proses distribusi.

2.2.2 Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah fasilitas yang digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi primer ke tegangan distribusi

sekunder, baik itu tegangan menengah (TM) maupun pelanggan tegangan rendah (TR).[5], [6] Jaringan distribusi tegangan rendah dimulai dari sumber yang disebut gardu distribusi mulai dari panel hubung bagi TR (Rak TR) keluar didistribusikan. Untuk setiap sirkit keluar melalui pengaman arus disebut “penyulang/ *feeder*”.

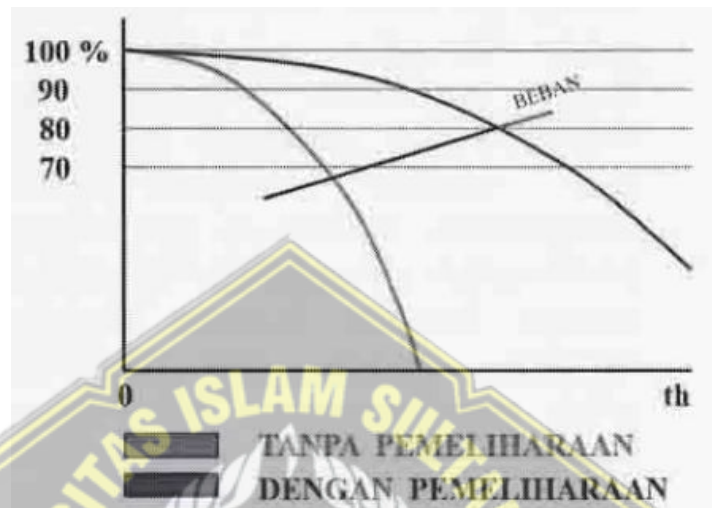


Gambar 2.2 Gardu Trafo Tiang Penyulang Anjani

Komponen utama gardu distribusi meliputi transformator, *switchgear*, isolator, perangkat proteksi, dan pengukur daya. Dalam operasionalnya, gardu distribusi harus memastikan kontinuitas pasokan listrik, kestabilan tegangan, dan efisiensi sistem. Namun, gardu sering menghadapi tantangan teknis seperti peningkatan susut energi dan penurunan kinerja komponen.[5], [2]

Pemeliharaan gardu distribusi atau biasa disebut revisi yaitu kegiatan pemeliharaan yang dilakukan terhadap gardu distribusi, baik bagian sipil gardu (bangunan gardu) dan bagian elektris gardu (komponen gardu sebagai peralatan pernyaluran distribusi tenaga listrik). Tujuan dari pemeliharaan gardu distribusi yaitu agar instalasi jaringan distribusi beroperasi dengan aman (*safe*) bagi manusia dan lingkungannya, andal (*reliable*), kesiapan (*availability*) tinggi, unjuk kerja (*performance*) baik, umur (*life time*) sesuai

desain, waktu pemeliharaan (*down time*) efektif dan biaya pemeliharaan (*cost*) efisien. Selain factor diluar teknis, tujuan pemeliharaan gardu distribusi adalah mendapatkan simpati serta kepuasan pelanggan dalam pelayanan tenaga listrik.



Gambar 2.3 Grafik Perbandingan Umur Peralatan Antara Dilakukan Pemeliharaan dan Tidak Dilakukan Pemeliharaan

Grafik pada gambar 2.3 menunjukkan bahwa *life time* peralatan yang dilakukan pemeliharaan cenderung lebih lama dibandingkan peralatan yang tidak dilakukan pemeliharaan.

2.2.3 Tenaga Listrik Tiga Phase

Tenaga listrik tiga fase (disingkat 3 ϕ) adalah bentuk arus bolak-balik (AC) yang paling banyak digunakan untuk pembangkitan, transmisi, dan distribusi listrik. Ini adalah jenis sistem polifase yang menggunakan tiga kabel (atau empat, jika pengembalian netral disertakan) dan merupakan metode standar yang digunakan jaringan listrik untuk menyalurkan listrik ke seluruh dunia.[7]

Dalam sistem tiga fase, masing-masing tegangan diimbangi oleh pergeseran fase sebesar 120 derajat relatif terhadap tegangan lainnya. Pengaturan ini menghasilkan aliran daya yang lebih konstan dibandingkan dengan sistem fase tunggal, sehingga sangat efisien untuk mentransmisikan listrik jarak

jauh dan untuk memberi daya pada beban berat seperti mesin industri. Karena merupakan sistem AC, tegangan dapat dengan mudah dinaikkan atau diturunkan menggunakan transformator, memungkinkan transmisi tegangan tinggi dan distribusi tegangan rendah dengan rugi-rugi minimal.

2.2.4 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban adalah kondisi di mana distribusi beban listrik di antara ketiga fase pada sistem tenaga listrik tidak merata. Dalam sistem tenaga listrik tiga fase, idealnya beban pada setiap fase harus memiliki arus atau daya yang sama agar sistem dapat beroperasi secara efisien dan stabil. Namun, dalam praktiknya, beban yang tidak merata sering terjadi karena berbagai faktor, seperti perbedaan jenis peralatan listrik yang terhubung ke setiap fase, distribusi pelanggan, atau ketidaksesuaian dalam perencanaan dan pemasangan sistem.[8], [1], [9]

Ketidakseimbangan beban dapat memberikan dampak negatif pada kinerja sistem tenaga listrik, antara lain:

- a. Arus Netral yang Tinggi
- b. Efisiensi Sistem yang Menurun
- c. Kinerja Transformator Menurun
- d. Penurunan Kualitas Tegangan

Ketidakseimbangan beban merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam pengelolaan sistem distribusi listrik. Dengan pengelolaan yang baik, ketidakseimbangan beban dapat diminimalkan, sehingga efisiensi sistem meningkat dan susut energi dapat dikurangi. Pada penelitian ini, dikatakan terjadi ketidakseimbangan beban ketika arus yang masuk tidak sama dengan arus yang keluar (didistribusikan) karena adanya penyusutan. Jika ($I_{rata-rata}$) adalah rata-rata arus keadaan tidak seimbang dan (X) adalah koefisien rasio antara arus fasa beban tidak seimbang, atau bisa dituliskan dalam persamaan:

$$I_{fasa} = x \cdot I_{rata-rata} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan,

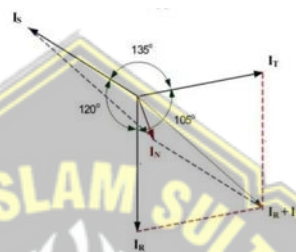
I_{fasa} = Nilai arus terukur

$I_{\text{rata-rata}}$ = Nilai rata-rata arus per fasa

X = koefisien arus antar fasa

Dari persamaan diatas, dibandingkan dengan nilai beban yang seimbang, maka koefisien x bernilai 1 atau sama dan rumus ketidakseimbangan beban menjadi:

$$Unbalance (\%) = \frac{\{|X_R - 1| + |X_S - 1| + |X_T - 1|\}}{3} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.8)$$



Gambar 2.4 Diagram Vektor Beban Tidak Seimbang

(Sumber: <https://www.researchgate.net/>)

Pada diagram vektor beban tidak seimbang, terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga sebuah besaran yang disebut arus netral (I_N) yang nilainya dipengaruhi oleh factor ketidakseimbangan beban.[10] Berdasarkan pernyataan tersebut, arus netral dapat dicari menggunakan rumus:

$$\begin{aligned} I_R &= I \angle 0^\circ & \alpha &= 1 \angle 120^\circ = 1 \cos 120^\circ + j 1 \sin 120^\circ \\ I_S &= I \angle 120^\circ & \alpha &= -0,5 + j0,866 \\ I_T &= I \angle 240^\circ & \alpha^2 &= 1 \angle 240^\circ = 1 \cos 240^\circ + j 1 \sin 240^\circ \\ & & \alpha^2 &= -0,5 - j0,866 \\ I_N &= I_R \angle 0^\circ + I_S \angle 120^\circ + I_T \angle 240^\circ \\ I_N &= I_R + I_S \cdot \alpha + I_T \cdot \alpha^2 \\ I_N &= I_R + I_S (-0,5 + j0,866) + I_T (-0,5 - j0,866) \\ I_N &= I_R - 0,5 (I_S) + j0,866 (I_S) - 0,5 (I_T) - j0,866 (I_T) \end{aligned}$$

2.2.5 Susut Energi (Energi Losses)

Susut energi merupakan kerugian yang terjadi sebagai akibat adanya selisih antara energi yang dikirimkan dengan energi yang diterima atau dapat juga dikatakan dari sisi transfer energi sebagai adanya selisih antara energi yang di salurkan ke pelanggan dengan total energi yang di bayarkan pelanggan.[11], [9] Susut energi dalam sistem distribusi dapat dibagi menjadi 2 (dua), yaitu:

- a. **Susut Teknis:** Kerugian energi yang terjadi akibat sifat fisik peralatan, seperti rugi-rugi pada transformator, kabel penghantar, dan isolator.
- b. **Susut Non-Teknis:** Kehilangan daya yang disebabkan oleh faktor eksternal, seperti pencurian listrik, koneksi ilegal, dan kesalahan pengukuran.

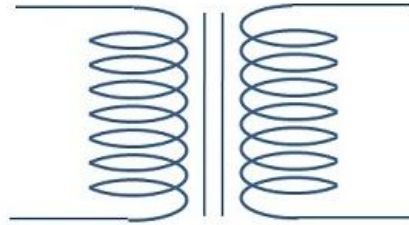
Pada penelitian ini untuk menghitung biaya susut energy (*losses*) dan total energi yang hilang dilakukan analisa perhitungan menggunakan hasil dari ketidakseimbangan beban yang berdampak pada rugi-rugi trafo. Ketidakseimbangan beban terjadi ketika arus di masing-masing fasa pada sisi sekunder transformator tidak sama. Hal ini menyebabkan beberapa dampak yang berkontribusi pada kerugian energi. Karena rugi-rugi pada kumparan (*copper loss*) sebanding dengan kuadrat arus ($I^2 \cdot R$), maka arus yang lebih tinggi di salah satu fasa akan menyebabkan rugi-rugi yang lebih besar dibandingkan dengan arus yang lebih rendah. Untuk rumus perhitungan susut energi akibat dari rugi-rugi trafo sebagai berikut:

$$Energy Loss Cost = 24 jam \times P_{rugi-rugi total} \dots\dots\dots (2.8)$$

2.2.6 Transformator

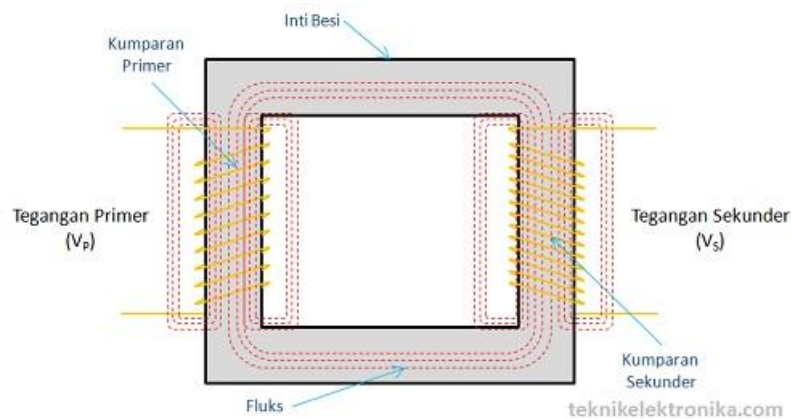
Transformator atau trafo adalah alat listrik statis yang digunakan untuk mengubah tingkat tegangan listrik (menaikkan atau menurunkan) pada sistem tenaga listrik tanpa mengubah frekuensinya. Transformator

bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yaitu memindahkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain melalui medan magnet.



Gambar 2.5 Simbol Transformator

Sebuah Transformator yang sederhana pada dasarnya terdiri dari 2 lilitan atau kumparan kawat yang terisolasi yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan kawat terisolasi ini dililitkan pada sebuah besi yang dinamakan dengan Inti Besi (Core). Ketika kumparan primer dialiri arus AC (bolak-balik) maka akan menimbulkan medan magnet atau fluks magnetik disekitarnya. Kekuatan Medan magnet (densitas Fluks Magnet) tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang dialirinya. Semakin besar arus listriknya semakin besar pula medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumparan pertama (primer) akan menginduksi GGL (Gaya Gerak Listrik) dalam kumparan kedua (sekunder) dan akan terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Dengan demikian, terjadilah pengubahan taraf tegangan listrik baik dari tegangan rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi maupun dari tegangan tinggi menjadi tegangan yang rendah.



Gambar 2.6 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip dasar kerja transformator adalah:

- a. Ketika arus bolak-balik mengalir di kumparan primer, akan menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah.
- b. Medan magnet ini akan menginduksi tegangan di kumparan sekunder, sesuai dengan jumlah lilitan pada masing-masing kumparan.
- c. Jika jumlah lilitan sekunder lebih besar dari primer, maka trafo menaikkan tegangan (step-up). Sebaliknya, jika lilitan sekunder lebih sedikit, maka trafo menurunkan tegangan (step-down).

Gulungan transformator yang terhubung "delta" (Δ) terhubung di antara fase-fase sistem tiga fase. Transformator "wye" (Y) menghubungkan setiap gulungan dari kawat fase ke titik netral bersama. Dalam sistem "delta terbuka" atau "V", hanya dua transformator yang digunakan. Delta tertutup yang terdiri dari tiga transformator fase tunggal dapat beroperasi sebagai delta terbuka jika salah satu transformator mengalami kegagalan atau perlu dilepas. Dalam delta terbuka, setiap transformator harus mengalirkan arus untuk masing-masing fasenya serta arus untuk fase ketiga, sehingga kapasitasnya berkurang menjadi 87%. Dengan satu dari tiga transformator hilang dan dua sisanya pada efisiensi 87%, kapasitasnya adalah 58% ($2/3$ dari 87%). Jika sistem delta-fed harus dibumikan untuk mendeteksi arus liar ke tanah atau melindungi dari tegangan lonjakan, transformator pentanahan (biasanya transformator zigzag) dapat dihubungkan untuk memungkinkan arus gangguan tanah kembali dari fasa mana pun ke tanah. Variasi lain adalah sistem delta "pentanahan sudut", yaitu delta tertutup yang dibumikan di salah satu sambungan transformator.[7]

2.2.7 ETAP (Electrical Transient and Analysis Program)

ETAP adalah perangkat lunak simulasi sistem tenaga listrik yang digunakan untuk analisis, desain, pemodelan, optimasi, dan pengoperasian sistem tenaga. ETAP banyak digunakan oleh insinyur, peneliti, dan praktisi di bidang kelistrikan baik di industri, perusahaan utilitas, hingga sektor pendidikan.[12]

ETAP memungkinkan pengguna untuk membuat representasi satu garis (single line diagram) dari sistem kelistrikan, lalu menjalankan berbagai studi analisis seperti:

- Load Flow (aliran daya)
- Short Circuit (hubung singkat)
- Harmonic Analysis (analisis harmonik)
- Transient Stability (stabilitas transien)
- Motor Starting
- Relay Coordination
- Arc Flash
- dan banyak lagi.

ETAP memiliki berbagai macam fungsi. Berikut merupakan fungsi utama ETAP:

a. **Perancangan Sistem Tenaga Listrik**

Membantu pengguna dalam membangun sistem jaringan listrik berdasarkan komponen nyata seperti trafo, busbar, pemutus, dan beban.

b. **Analisis Operasional dan Perencanaan**

ETAP memberikan simulasi untuk kondisi normal, overload, gangguan, serta analisis pengaruh ekspansi sistem atau perencanaan keandalan.

c. **Simulasi Ketidakseimbangan Beban (Unbalanced Load Flow)**

Digunakan untuk melihat pengaruh ketidakseimbangan arus antar fasa terhadap rugi-rugi daya (losses), tegangan netral, dan efisiensi sistem distribusi. Ini sangat berguna dalam studi seperti yang Anda lakukan.

d. **Visualisasi Sistem Satu Garis**

ETAP menyajikan antarmuka diagram satu garis interaktif yang memperlihatkan arus, tegangan, dan daya secara real-time berdasarkan simulasi.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode analisis data kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada gardu distribusi PY094 PLN ULP Pringgabaya, penyulang Anjani.

3.1 Objek Penelitian

Tempat : Desa Bagik Papan, Kecamatan Pringgabaya,
Kabupaten Lombok Timur

Waktu Penelitian : 3 Bulan (Mei - Juli)

Detil Lokasi :

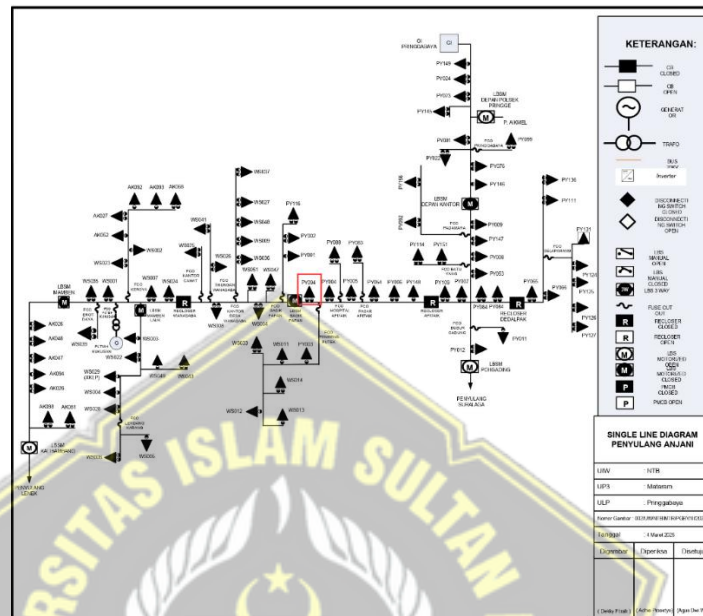


Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada salah gardu distribusi dalam wilayah kerja PLN ULP Pringgabaya yaitu Gardu PY094 yang terletak di Desa Bagik Papan, Kecamatan Pringgabaya, Kabupaten Lombok Timur. Gardu ini terletak pada sebelah timur SPBU Bagik Papan. Gardu distribusi ini menyuplai Desa Bagik Papan sekitar gardu tersebut. Pelanggan yang disuplai oleh gardu ini didominasi oleh pelanggan rumah tangga atau umkm dengan besar daya kontrak 450 VA – 5500 VA.

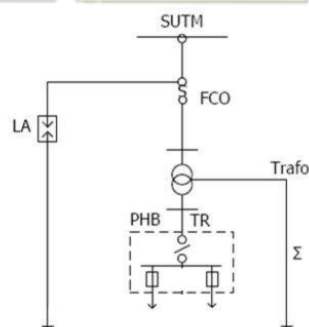
3.2 Data – Data Penelitian

A. Single Line Diagram



Gambar 3.2 Single Line Diagram Penyulang Anjani

Single Line Diagram (SLD) merupakan representasi satu garis dari sistem distribusi tenaga listrik, di mana semua tiga fasa (R, S, T) direpresentasikan dengan satu garis untuk menyederhanakan tampilan. Diagram ini menggambarkan arus daya dari sumber (gardu induk atau trafo) hingga ke beban-beban akhir pada penyulang PY094 di wilayah kerja PLN ULP Pringgabaya.



Gambar 3.3 Single Line Diagram Gardu PY094

PHBTR pada gardu distribusi PY094 terdiri dari dua jurusan yang masing-masing jurusannya terdiri dari 3 fasa yaitu fasa R, S, dan T yang menyuplai ke arah barat dan ke arah timur.

B. Detil Gardu

Nama Gardu : Gardu PY094
 Penyulang : Penyulang Anjani
 Section : Recloser Apitaik – Recloser Wanasaba

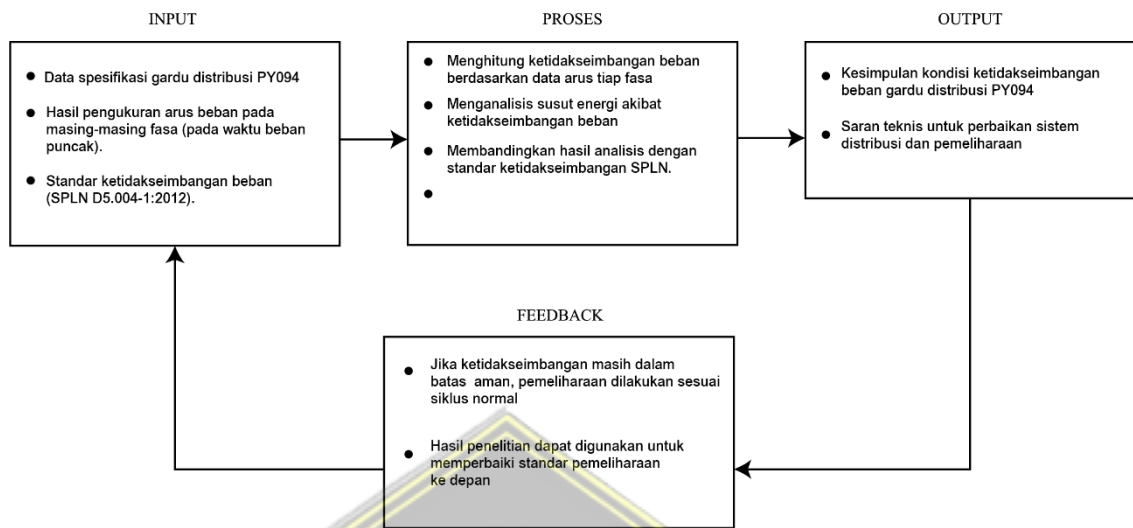
Spesifikasi Transformator

Tipe : Hermetik
 Nomor Standar : SPLN D3.002-1:2007
 Daya Pengenal : 160 kVA
 Tipe Pendinginan : ONAN
 Frekuensi Pengenal : 50 Hz
 Jumlah Fasa : 3
 Tegangan / Arus Primer : 2000 Volt / 4.62 A
 Tegangan / Arus Sekunder : 400 Volt / 230.94 A
 Tegangan Impedansi : 4.0%
 Rugi Tanpa Beban : 300 W
 Rugi Berbeban : 2000 W



Gambar 3.4 Nameplat Transformator

3.3 Blok Diagram Penelitian



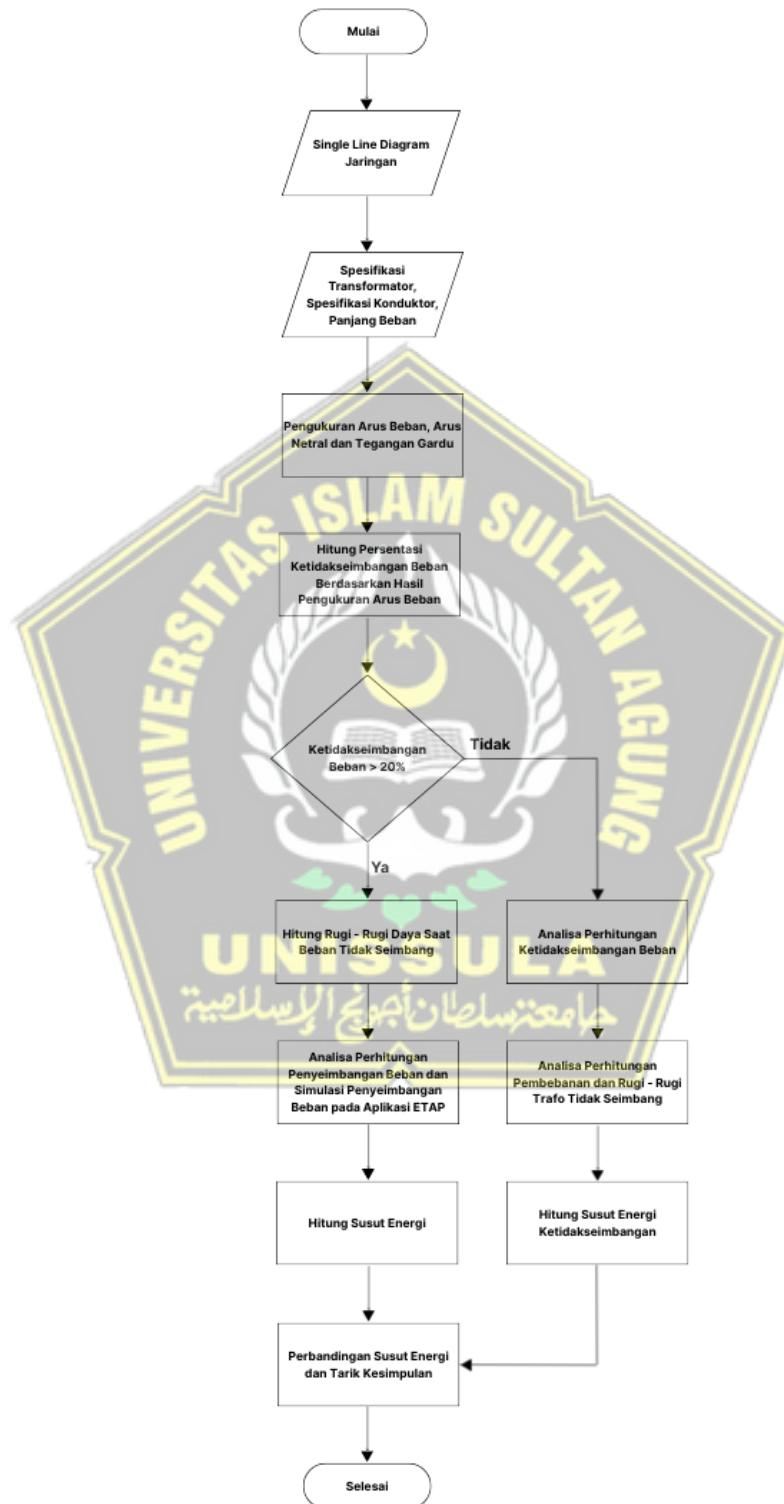
Gambar 3. 5 Blok Diagram Penelitian

Penelitian ini menggunakan data hasil pengukuran arus beban, arus netral dan juga tegangan pada setiap fasa di kedua jurusan. Data lain yang digunakan adalah spesifikasi gardu mulai dari spesifikasi transformator yang digunakan, spesifikasi penghantar yang digunakan serta spesifikasi pembatas yang digunakan. Standar persentase *unbalance* yang digunakan adalah berdasarkan SPLN D5.004-1:2012 tentang Standar Ketidakseimbangan Beban.

Semua data yang telah dikumpulkan, kemudian diolah. Hal yang pertama dilakukan adalah menghitung persentase *unbalance* dan dibandingkan dengan standar menurut SPLN D5.004-1:2012 sehingga dapat diketahui apakah perlu dilakukan penyeimbangan beban atau ketidakseimbangan beban pada gardu tersebut masih dalam kategori aman. Data pengukuran arus netral dapat digunakan untuk mencari perkiraan nilai susut kwh pada gardu tersebut.

Skema pembagian beban pada setiap fasanya juga dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan kondisi di lapangan dan perbedaan persentase pembebanan pada kedua jurusan. Hasil penelitian ini dapat digunakan dalam perbaikan atau penyeimbangan beban yang akan datang di lapangan.

3.4 Flowchart Penelitian



Gambar 3.6 Flowchart Penelitian

Penjelasan flowchart berdasarkan langkah-langkah secara bertahap dari awal hingga selesai sebagai berikut:

1. Melakukan observasi terhadap Single Line Diagram penyulang Anjani dan Gardu distribusi PY094 untuk menentukan skema penyeimbangan beban berdasarkan pembagian jurusan.
2. Mengumpulkan data – data yang dibutuhkan antara lain spesifikasi transformator, spesifikasi konduktor yang digunakan, panjang konduktor serta riwayat pengukuran yang pernah dilakukan.
3. Lakukan pengukuran langsung pada gardu distribusi PY094. Pengukuran meliputi pengukuran arus beban, arus netral dan tegangan. Hasil pengukuran yang digunakan yaitu pengukuran terbaru yang akan dirata - rata dengan empat pengukuran sebelumnya. Nilai rata – rata tersebut yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan.
4. Hitung persentase ketidakseimbangan beban pada setiap jurusannya untuk menentukan skema penyeimbangan beban. Apabila ditemukan bahwa persentase ketidakseimbangan beban melebihi 20% maka akan dilanjutkan dengan perhitungan penyeimbangan beban. Apabila nilai persentase ketidakseimbangan beban dibawah 20% maka tidak perlu dilakukan penyeimbangan beban.
5. Menghitung rugi – rugi energi (*losses*) dalam keadaan beban tidak seimbang. Setelah itu lakukan penyeimbangan beban menggunakan aplikasi ETAP pada setiap jurusan dengan memperhatikan berbagai kendala di lapangan.
6. Hitung rugi – rugi energi setelah dilakukan penyeimbangan beban. Bandingkan nilai rugi – rugi energi sebelum dilakukan penyeimbangan beban dengan setelah dilakukan penyeimbangan beban lalu tarik kesimpulan.

BAB IV

HASIL DATA DAN ANALISA

Pada bab ini, menyajikan hasil-hasil penelitian yang diperoleh dari pengukuran dan pengamatan pada gardu distribusi PY094 PLN, ULP Pringgabaya, penyulang Anjani selama periode penelitian. Pengukuran dan pengamatan beban dilakukan untuk mengetahui kondisi aktual distribusi arus dan tegangan pada masing-masing jurusan yang terhubung dengan gardu distribusi. Data ini penting sebagai dasar untuk melakukan analisis ketidakseimbangan beban dan perhitungan susut energi.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran arus dan tegangan pada sisi sekunder trafo serta pada masing-masing jurusan beban, yaitu Jurusan B (Timur) dan Jurusan D (Barat). Pengukuran dilakukan sebanyak lima kali pada periode waktu yang berbeda, mencerminkan kondisi beban yang bervariasi berdasarkan aktivitas pelanggan dan jam beban puncak.

Data pengukuran yang diperoleh kemudian diolah dengan cara mengambil nilai rata-rata dari masing-masing parameter (arus dan tegangan tiap fasa), sebagai gambaran nilai umum dari beban dalam jangka waktu tertentu. Meskipun terdapat selisih waktu antar pengukuran, rata-rata dianggap relevan untuk memberikan gambaran umum kondisi beban secara menyeluruh. Selain itu, analisis terhadap hasil pengukuran tegangan dan arus dilakukan untuk mengidentifikasi apakah ketidakseimbangan beban pada ULP Pringgabaya masih dalam standar PLN atau tidak. Apabila masih dalam standar, penulis tetap akan menganalisa lebih lanjut mengenai dampak dari ketidakseimbangan beban terhadap susut energi. Berikut adalah alat yang digunakan untuk melakukan pengukuran dan pengamatan pada gardu distribusi PY094 PLN, ULP Pringgabaya, penyulang Anjani

- a. *Voltmeter*
- b. *Ampere meter*

4.1 Pengukuran dan Pengamatan Beban

4.1.1 Pengukuran Jurusan B (Timur)

Tabel 4. 1 Pengukuran Tegangan dan Arus Jurusan B

Tanggal	Arus Fasa R (Ampere)	Arus Fasa S (Ampere)	Arus Fasa T (Ampere)	Teg. Ujung R (Volt)	Teg. Ujung S (Volt)	Teg. Ujung T (Volt)	Arus Netral (Ampere)
12 Mar 2025	163	78	123	211	205	204	70
2 Mar 2025	121	123	95	211	205	204	52
29 Juli 2024	121	123	95	211	205	204	52
25 Dec 2024	94	185	59	211	205	204	87
18 Agust 2023	20	142	80	211	205	204	56
Average	103,8	130,2	90,4	211	205	204	63,4

Tabel 4.1 ini menunjukkan hasil pengukuran arus dan tegangan pada Jurusan B (Timur) dari Gardu Distribusi PY094, yang dilakukan pada beberapa tanggal berbeda, yaitu antara tahun 2023–2025.

Berdasarkan tabel tersebut terlihat fasa S membawa beban lebih besar dibanding fasa lain. Hal ini diperkuat oleh tingginya arus netral (63,4 A) yang biasanya muncul akibat distribusi arus tidak merata.

4.1.2 Pengukuran Jurusan D (Barat)

Tabel 4. 2 Pengukuran Tegangan dan Arus Jurusan D

Tanggal	Arus Fasa R (Ampere)	Arus Fasa S (Ampere)	Arus Fasa T (Ampere)	Teg. Ujung R (Volt)	Teg. Ujung S (Volt)	Teg. Ujung T (Volt)	Arus Netral (Ampere)
12 Mar 2025	51	23	25	210	212	213	27
2 Mar 2025	33	18	13	210	212	213	23
29 Juli 2024	33	18	13	210	212	213	23
25 Dec 2024	25	22	21	210	212	213	7
18 Agust 2023	95	9	30	210	212	213	56
Average	47,4	18	20,4	210	212	213	27,2

Tabel 4.2 berisi data hasil pengukuran arus dan tegangan pada Jurusan D (Barat) gardu distribusi, dengan pengamatan yang dilakukan pada lima tanggal berbeda. Berdasarkan tabel terlihat adanya ketidakseimbangan antara arus tiap fasa:

- Arus Fasa R cukup tinggi (47,4 A)
- Fasa S dan T jauh lebih kecil (masing-masing 18 A dan 20,4 A)

Ketidakseimbangan arus antar fasa ini berkontribusi pada arus netral yang tinggi, yaitu 27,2 A. Dalam sistem 3 fasa yang ideal dan seimbang, arus netral seharusnya mendekati nol.

Selain itu dari tabel dapat dilihat bahwa tegangan pada ketiga fasa relatif seimbang (210–213 V), menunjukkan tidak ada masalah signifikan pada sisi tegangan, sehingga ketidakseimbangan yang terjadi lebih banyak disebabkan oleh distribusi beban arus yang tidak merata.

4.1.3 Pengukuran Beban Sisi Sekunder Trafo

Tabel 4. 3 Pengukuran Tegangan dan Arus Sisi Sekunder Trafo

Tanggal	Arus Fasa R (Ampere)	Arus Fasa S (Ampere)	Arus Fasa T (Ampere)	Tegangan R-S (Volt)	Tegangan R-T (Volt)	Tegangan S-T (Volt)	Tegangan R-N (Volt)	Tegangan S-N (Volt)	Tegangan T-N (Volt)	Arus Netral (Ampere)
12 Mar 2025	223	149	113	407	404	404	229	230	230	89
2 Mar 2025	158	141	106	409	407	409	232	230	231	63
29 Juli 2024	146	141	122	409	407	409	232	230	231	52
25 Dec 2024	124	220	81	409	412	410	233	230	234	103
18 Agust 2023	113	153	112	414	411	414	235	233	234	53
Average	152,8	160,8	106,8	409,6	408,2	409,2	232,2	230,6	232	72

Tabel ini menyajikan hasil pengukuran arus dan tegangan pada sisi sekunder transformator gardu distribusi. Berdasarkan tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa terjadi ketidakseimbangan yang cukup signifikan antara ketiga fasa, terutama karena arus fasa T jauh lebih rendah dibanding fasa R dan S. Selain itu dapat dilihat bahwa nilai tegangan antar fasa relatif seimbang, yang berarti sistem distribusi tidak mengalami masalah signifikan dari sisi tegangan.

4.2 Analisa Data Pengukuran dan Pengamatan Beban

Setelah dilakukan observasi pengukuran dan pengamatan yang terkait dengan nilai tegangan dan arus pada titik sambung, selanjutnya dilakukan

analisa perhitungan ketidakseimbangan beban untuk mengidentifikasi penyebab susut energi.

4.2.1 Analisa Data Tegangan dan Arus

a. Tegangan Jurusan B dan D

Tegangan ujung (R, S, T) relatif konstan sekitar **204–213 V**

b. Arus Jurusan B

Berdasarkan hasil pengukuran arus pada Jurusan B (Timur), diperoleh rata-rata arus fasa sebesar **103,8 A** untuk fasa R, **130,2 A** untuk fasa S, dan **90,4 A** untuk fasa T. Nilai rata-rata arus netral tercatat sebesar **63,4 A**, yang menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban antar fasa. Hal ini dapat dilihat dari perbedaan signifikan antara arus maksimum dan minimum antar fasa, di mana fasa S memiliki beban paling tinggi, sementara fasa T merupakan yang paling rendah. Ketidakseimbangan ini menyebabkan arus mengalir pada penghantar netral, yang berdampak pada peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi sistem distribusi.

c. Arus jurusan D

Berdasarkan hasil pengukuran arus pada Jurusan D (Barat), diperoleh rata-rata arus fasa sebesar **47,4 A** untuk fasa R, **18 A** untuk fasa S, dan **20,4 A** untuk fasa T. Sementara itu, arus netral tercatat rata-rata **27,2 A**, menunjukkan ketidakseimbangan beban yang cukup signifikan di antara ketiga fasa. Ketimpangan ini diperkuat oleh dominasi beban pada fasa R, yang secara konsisten menunjukkan nilai arus tertinggi dibanding fasa lainnya. Meskipun tegangan antar fasa relatif stabil dengan rata-rata **210 V – 213 V**, distribusi arus yang tidak merata menyebabkan arus netral cukup tinggi. Ketidakseimbangan ini dapat menimbulkan rugi-rugi energi dan berdampak negatif terhadap efisiensi trafo distribusi.

4.2.2 Analisa Data Beban Sekunder Trafo

Pengukuran pada sisi sekunder trafo dilakukan untuk mengetahui karakteristik beban total yang ditanggung oleh transformator distribusi. Parameter yang diamati mencakup arus tiap fasa (R, S, T), arus netral, serta tegangan antar fasa dan tegangan fasa terhadap netral. Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.4, dapat disimpulkan bahwa terdapat variasi nilai arus antar fasa yang cukup signifikan. Rata-rata arus fasa yang diperoleh adalah:

- Arus fasa R: 152,8 A
- Arus fasa S: 160,8 A
- Arus fasa T: 106,8 A
- Arus netral: 72 A

Perbedaan signifikan pada arus ketiga fasa menunjukkan adanya beban tidak seimbang yang cukup tinggi. Arus fasa S lebih besar dibandingkan fasa R dan T, sementara fasa T memiliki arus paling kecil. Hal ini menyebabkan arus netral cukup besar, yakni 72 A, yang seharusnya mendekati nol apabila sistem benar-benar seimbang.

4.3 Analisa Ketidakseimbangan Beban

Dari data Tabel pengukuran dan pengamatan tegangan arus, perlu dilakukan analisa perhitungan ketidakseimbangan beban guna mengetahui total rugi-rugi. Definisi dari ketidakseimbangan adalah ketika arus yang masuk tidak sama dengan arus yang keluar (didistribusikan) karena adanya penyusutan. Analisis ketidakseimbangan arus beban pada Jurusan B dilakukan dengan menggunakan nilai rata-rata dari lima kali pengukuran yang dilakukan pada waktu yang berbeda. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran umum mengenai pola distribusi beban antar fasa dalam jangka waktu tertentu, tanpa terpengaruh oleh fluktuasi beban. Nilai rata-rata arus untuk fasa R, S, dan T kemudian dijadikan dasar dalam perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban menggunakan metode deviasi

terhadap rata-rata arus. Untuk menghitung persentase ketidakseimbangan bisa dicari menggunakan persamaan berikut:

$$Unbalance\ total\ (\%) = \frac{I_{max} - I_{rata-rata}}{I_{rata-rata}} \times 100\%$$

4.3.1 Analisa Ketidakseimbangan beban Jurusan B

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan B:

$$Unbalance\ (\%) = \frac{I_{Bmax} - I_{B\text{rata-rata}}}{I_{B\text{rata-rata}}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{rata-rata} = \frac{103,8 + 130,2 + 90,4}{3} = 108,13\ A$$

Unbalance :

$$Unbalance\ (\%) = \frac{130,2 - 108,13}{108,13} \times 100 = \mathbf{20,41\ \%}$$

Ketidakseimbangan sebesar 20,4% tergolong tinggi dan dapat menimbulkan dampak teknis, seperti meningkatnya arus netral, kerugian daya tambahan, serta pemanasan berlebih pada kabel dan transformator.

4.3.2 Analisa Ketidakseimbangan beban Jurusan D

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan D:

$$Unbalance\ (\%) = \frac{I_{Dmax} - I_{D\text{rata-rata}}}{I_{D\text{rata-rata}}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{rata-rata} = \frac{47,4 + 18 + 20,4}{3} = 28,6\ A$$

Unbalance :

$$Unbalance\ (\%) = \frac{47,4 - 28,6}{28,6} \times 100 = \mathbf{65,7\ \%}$$

Nilai ini menunjukkan ketidakseimbangan arus beban yang sangat tinggi, bahkan lebih besar dibandingkan jurusan B yang hanya mencapai 20,4%. Ketimpangan distribusi beban ini berpotensi menyebabkan peningkatan

arus netral, rugi daya, serta mempercepat kerusakan peralatan distribusi, khususnya pada jalur-jalur yang terbebani berat.

4.4 Analisa Susut Energi

Ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan arus netral yang cukup besar, yang pada akhirnya akan menimbulkan rugi-rugi daya (*power loss*) pada penghantar. Rugi daya ini dapat dihitung dengan rumus:

$$E_B = I_{N(B)}^2 \times R \times t$$

Dimana,

E_B = Susut energi per hari

P_{loss} = rugi daya (watt)

R = resistansi penghantar

t = waktu

a. Susut Jurusan B

- Rata-rata arus netral : 63,4 A
- R = asumsikan 0,6 ohm
- Waktu : 12 jam beban puncak

Substitusi,

$$E_B = I_{N(B)}^2 \times R \times t$$

$$E_B = 63,4^2 \times 0,6 \times 12$$

$$E_B = 28.940,8 \text{ Wh} = \mathbf{28,94 \text{ kWh/hari}}$$

b. Susut Jurusan D

- Rata-rata arus netral : 27,2 A
- R = asumsikan 0,6 ohm
- Waktu : 12 jam beban puncak

Substitusi,

$$E_B = I_{N(D)}^2 \times R \times t$$

$$E_B = 27,2^2 \times 0,6 \times 12$$

$$E_B = 5.326,8 \text{ Wh} = \mathbf{5,32 \text{ kWh/hari}}$$

Untuk Jurusan B, arus netral sebesar 63,4 A menghasilkan rugi energi sebesar 28,94 kWh per hari, sedangkan untuk Jurusan D dengan arus netral 27,2 A menghasilkan rugi energi sebesar 5,32 kWh per hari. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban berkontribusi signifikan terhadap susut energi harian pada gardu distribusi.

4.5 Analisa Ketidakseimbangan Arus Menggunakan Simulasi ETAP

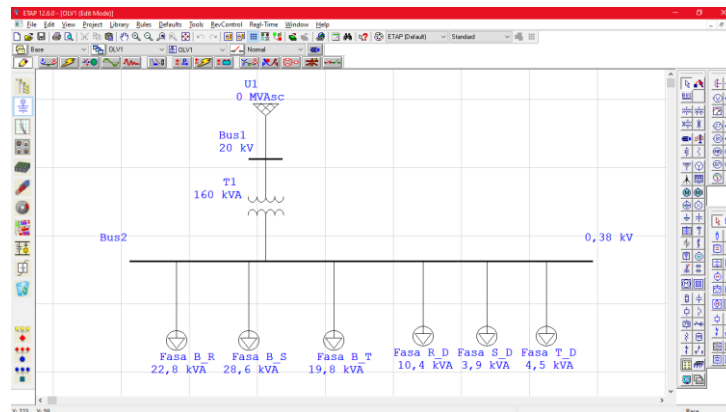
Penyeimbangan arus fasa pada dasarnya bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi pada saluran penghantar khususnya rugi-rugi pada saluran penghantar netral, dan menyeimbangkan pembebanan pada masing-masing fasa agar tidak terjadi salah satu fasa dibebani oleh beban yang lebih tinggi dibandingkan fasa yang lainnya. Upaya penyeimbangan beban pada Gardu Distribusi PY094 dilakukan melalui pendekatan simulasi menggunakan perangkat lunak **ETAP versi 12.6**. Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengevaluasi dampak pembagian beban antar fasa terhadap penurunan ketidakseimbangan arus, arus netral, dan susut energi sistem distribusi.

4.5.1 Pembuatan Model Sistem

Model sistem dibangun berdasarkan konfigurasi aktual gardu distribusi, yang terdiri dari:

- Satu unit transformator kapasitas 160kV
- Jurusan utama beban: Jurusan B (Timur) dan Jurusan D (Barat)
- *Lumped load* (tiga untuk tiap jurusan) yang mewakili beban masing-masing fasa
- Koneksi fasa yang disesuaikan dengan hasil pengukuran lapangan

Berikut model / tampilan sistem yang telah dibuat



Gambar 4.1 Model sistem gardu pada ETAP

4.5.2 Analisa ketidakseimbangan Arus

Nilai ketidakseimbangan arus yang diperoleh dari simulasi ETAP tidak sepenuhnya identik dengan hasil pengukuran lapangan. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kondisi *real-time* di lapangan yang melibatkan variasi beban seperti sambungan tidak merata antar fasa, serta macam-macam karakteristik beban yang tidak seluruhnya dimodelkan dalam simulasi. Meskipun demikian, pola ketidakseimbangan beban tetap terlihat konsisten, sehingga model simulasi masih relevan untuk menggambarkan kecenderungan distribusi arus dan mendukung pengambilan keputusan teknis.

a. Jurusan B

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan B:

$$Unbalance (\%) = \frac{I_{Bmax} - I_{Brata-rata}}{I_{Brata-rata}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{rata-rata} = \frac{105,8 + 132,6 + 91,6}{3} = 110 \text{ A}$$

Unbalance :

$$Unbalance (\%) = \frac{132,6 - 110}{110} \times 100 = 20,55\%$$

b. Jurusan D

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan D:

$$Unbalance (\%) = \frac{I_{Dmax} - I_{Drata-rata}}{I_{Drata-rata}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{rata-rata} = \frac{48,3 + 18,3 + 20,7}{3} = 29,1A$$

Unbalance :

$$Unbalance (\%) = \frac{48,3 - 29,1}{29,1} \times 100 = 65,9 \%$$

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan, nilai ketidakseimbangan arus pada Jurusan B sebesar 20,41% dan Jurusan D sebesar 65,7%, yang dihitung dari selisih arus antar fasa terhadap rata-rata arus total. Nilai ini mencerminkan kondisi aktual ketidakseimbangan distribusi beban antar fasa pada sistem distribusi Gardu PY094. Sementara itu, hasil simulasi *unbalanced load flow* menggunakan perangkat lunak ETAP menunjukkan bahwa arus masing-masing fasa di Bus2 adalah 105,8 A (fase A), 132,6 A (fase B), dan 91,6 A (fase C), dengan rata-rata sebesar 110 A. Dari perhitungan, diperoleh nilai ketidakseimbangan arus simulasi sebesar 37,27% di Jurusan B dan 65,9% di Jurusan D.

Perbedaan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran terjadi akibat model ETAP yang tidak sepenuhnya mencerminkan seluruh spesifikasi beban di lapangan, seperti faktor daya tiap fasa, sifat beban non-linear, dan koneksi aktual pelanggan. Namun demikian, kecenderungan ketidakseimbangan tetap terlihat konsisten, dengan fasa B sebagai fasa terberat dan fasa C sebagai fasa teringan, baik dalam pengukuran maupun simulasi.

4.6 Analisa Penyeimbangan Arus

Penyeimbangan arus antar fasa merupakan langkah penting dalam sistem distribusi tenaga listrik untuk menjaga kestabilan operasi jaringan dan meminimalkan rugi-rugi daya. Berdasarkan hasil analisa ketidakseimbangan

beban sebelumnya, diketahui bahwa distribusi beban pada Gardu PY094 mengalami ketimpangan yang cukup signifikan, terutama pada jurusan D yang menunjukkan nilai ketidakseimbangan arus mencapai 65,7%. Kondisi ini berkontribusi terhadap tingginya arus netral dan meningkatnya susut energi harian.

- **Penyeimbangan Jurusan B**

- a. Arus beban penuh

$$I_{s(FL)} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{160.000}{\sqrt{3} \times 400} = 230,9$$

- b. Arus Seimbang sisi Sekunder

$$I_{sec} = \frac{103,8 + 130,2 + 90,4}{3} = 108,13 \text{ A}$$

- c. Persentase pembebanan tiap fasa

$$\%I_R = \frac{I_{sec}}{I_{s(FL)}} \times 100\%$$

$$\%I_{sec} = \frac{108,3}{230,9} \times 100\% = 46,82\%$$

- **Penyeimbangan Jurusan D**

- a. Arus beban penuh

$$I_{s(FL)} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{160.000}{\sqrt{3} \times 400} = 230,9$$

- b. Arus Seimbang sisi Sekunder

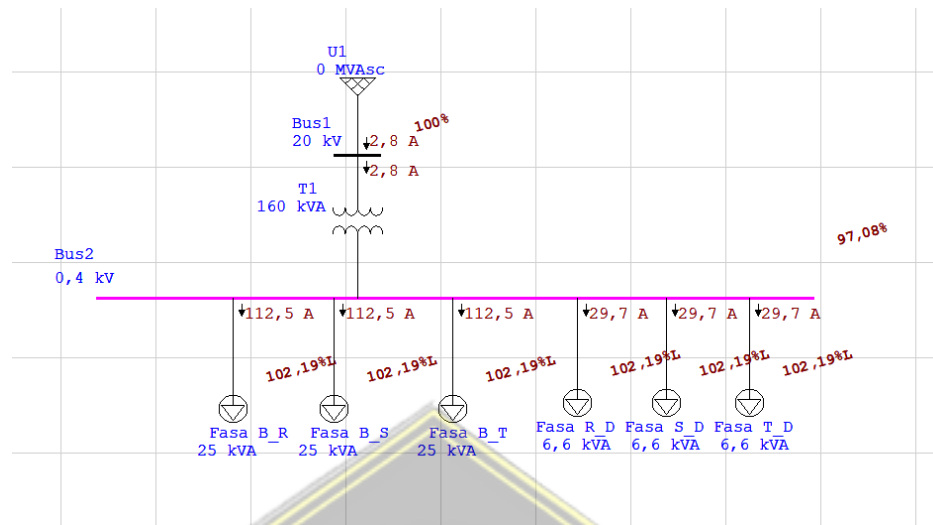
$$I_{sec} = \frac{47,4 + 18 + 20,4}{3} = 28,6 \text{ A}$$

- c. Persentase pembebanan tiap fasa

$$\%I_R = \frac{I_{sec}}{I_{s(FL)}} \times 100\%$$

$$\%I_{sec} = \frac{28,6}{230,9} \times 100\% = 12,38\%$$

4.6.1 Simulasi penyeimbangan dengan ETAP



Gambar 4.2 Simulasi Penyeimbangan Beban pada ETAP

Hitung daya total yang mengalir di tiap fase dengan rumus:

Daya Beban (kVA) = %Pembebanan x Daya Trafo

$$\text{Daya Beban (kVA)} = \frac{\% \text{Pembebanan} \times \text{Daya Trafo}}{100}$$

- Jurusan B

$$\text{Daya Beban (kVA)} = \frac{46,82 \times 160}{100} = 74,91 \text{ kVA}$$

$$\text{Daya Beban tiap fasa (kVA)} = \frac{74,91}{3} = 24,97 \approx 25 \text{ kVA}$$

- Jurusan D

$$\text{Daya Beban (kVA)} = \frac{12,38 \times 160}{100} = 19,81 \text{ kVA}$$

$$\text{Daya Beban tiap fasa (kVA)} = \frac{19,81}{3} = 6,6 \text{ kVA}$$

Berdasarkan hasil simulasi penyeimbangan arus menggunakan perangkat lunak ETAP, dilakukan pengaturan ulang nilai beban pada masing-masing fasa untuk dua jurusan utama, yaitu Jurusan B dan Jurusan D, sesuai dengan persentase pembebanan aktual hasil perhitungan. Jurusan B disimulasikan dengan pembebanan sebesar 46,82%, sementara Jurusan D disimulasikan dengan 12,38% dari kapasitas penuh transformator (160

kVA). Dari hasil penyeimbangan diatas bisa dirangkum pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4 Tabel Perbandingan Hasil Data Analisa Penyeimbangan Beban

Jurusan	B	D
Arus Fasa R (A)	103,8	47,4
Arus Fasa S (A)	130,2	18
Arus Fasa T (A)	90,4	20,4
Rata-rata Arus Netral (A)	63,4	27,2
Tingkat Ketidakseimbangan (%)	20,4%	65,7%
Susut Energi (kWh/hari)	28,94	5,32
Setelah Penyeimbangan (R-S-T) (A)	112,5 – 112,5 – 112,5	29,7 - 29,7 - 29,7
Daya Setelah Penyeimbangan (kVA)	24,97	6,6

Sebelum penyeimbangan, beban antar fasa pada jurusan B dan D sangat tidak merata. Khususnya jurusan D memiliki ketidakseimbangan arus sebesar 65,7%, jauh di atas batas aman. Ini menghasilkan arus netral tinggi dan susut energi besar.

Setelah penyeimbangan (simulasi), simulasi di ETAP dilakukan dengan mengatur ulang persentase pembebanan tiap fasa. Jurusan B disimulasikan dengan beban 46,82% dan jurusan D sebesar 12,38% dari trafo 160 kVA dan mendapatkan nilai arus yang seimbang yaitu 112,5 A pada jurusan B dan 29,7 pada jurusan D dengan masing-masing nilai beban daya 24,97 kVA dan 6,6 kVA.

4.6.2 Perhitungan Penyeimbangan Beban

- **Jurusan B**

$$\text{Daya Beban Tiap Fasa (kVA)} = \frac{V \times I}{1000}$$

$$25 = \frac{230 \times I}{1000}$$

$$25000 = 230 \times I$$

$$I = 108,7 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan, beban seimbang pada jurusan B idealnya yaitu 108,7 A pada setiap fasanya.

- **Jurusan D**

$$\text{Daya Beban Tiap Fasa (kVA)} = \frac{V \times I}{1000}$$

$$6,6 = \frac{230 \times I}{1000}$$

$$6600 = 230 \times I$$

$$I = 28,7 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan, beban seimbang pada jurusan D idealnya sebesar 28,7 A pada setiap fasanya. Dengan didapatkan nilai arus beban ideal pada setiap fasanya, maka dapat dilakukan perencanaan pembagian beban pada setiap fasa dikedua jurusannya. Perencanaan pembagian beban dapat dilihat pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Perencanaan Pembagian Beban Setiap Fasa

Parameter Penyeimbangan Beban	Jurusan B			Jurusan D		
	Fasa R (A)	Fasa S (A)	Fasa T (A)	Fasa R (A)	Fasa S (A)	Fasa T (A)
Sebelum	103,8	130,2	90,4	47,4	18	20,4
Setelah	107,8	108,2	108,4	29,4	28	28,4

Berdasarkan Tabel 4.5, pada jurusan B dilakukan pembagian beban dengan mengurangi arus beban pada fasa S dan dilimpahkan kepada fasa R dan fasa T dengan mempertimbangkan nilai ideal beban. Pada fasa S

jurusan B dikurangi beban sebesar 22 Ampere. Arus beban 22 Ampere tersebut dibagikan sebesar 4 A ke fasa R dan 18 A ke fasa T untuk mendapatkan arus beban yang mendekati nilai arus beban ideal.

Pada jurusan D, dilakukan pengurangan nilai arus beban pada fasa R dan dibagikan kepada fasa S dan fasa T. Arus beban fasa R dikurangi sebesar 18 A untuk dibagikan 10 A ke fasa S dan 8 A ke fasa T. Dengan pembagian beban demikian, didapatkan nilai arus beban yang mendekati nilai arus beban ideal setiap fasanya. Nilai pembagian arus beban ini mempertimbangkan daya yang disediakan oleh PLN dimana PLN hanya menyediakan daya dengan arus beban bernilai genap mulai dari 2A, 4A, 6A, dst.

4.7 Analisa Dalam Keadaan Beban Seimbang

Setelah dilakukan perencanaan pembagian arus beban, dilakukan analisa terhadap perubahan nilai persentase *unbalance* dan juga nilai susut energi. Selanjutnya dapat dilakukan perbandingan nilai persentase *unbalance* dan juga nilai susut energi pada kondisi sebelum dilakukan penyeimbangan beban dan setelah dilakukan penyeimbangan beban untuk mengetahui efektivitas dari penyeimbangan yang dilakukan.

4.7.1 Analisa Nilai Persentase Ketidakseimbangan

- **Jurusan B**

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan B

$$Unbalance (\%) = \frac{I_{B_{max}} - I_{B_{rata-rata}}}{I_{B_{rata-rata}}} \times 100$$

Rata – rata arus

$$I_{rata-rata} = \frac{107,8+108,2+108,4}{3} = 108,13 \text{ A}$$

Nilai persentase *unbalance*

$$Unbalance (\%) = \frac{108,4 - 108,13}{108,13} \times 100 = \mathbf{0,25 \%}$$

Persentase ketidakseimbangan beban pada jurusan B setelah dilakukan perencanaan pembagian beban yaitu sebesar 0,25%. Nilai tersebut tentu sangat jauh dari persentase ketidakseimbangan pada saat belum dilakukan pembagian beban.

- **Jurusan D**

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada jurusan D

$$Unbalance (\%) = \frac{I_{Bmax} - I_{Brata-rata}}{I_{Brata-rata}} \times 100$$

Rata-rata arus:

$$I_{rata-rata} = \frac{29,4 + 28 + 28,4}{3} = 28,6 \text{ A}$$

Unbalance :

$$Unbalance (\%) = \frac{29,4 - 28,6}{28,6} \times 100 = 2,79 \%$$

Persentase ketidakseimbangan beban pada jurusan D setelah dilakukan perencanaan pembagian beban yaitu sebesar 2,79%. Nilai tersebut tentu sangat jauh dari persentase ketidakseimbangan pada saat belum dilakukan pembagian beban.

4.7.2 Analisa Nilai Arus Netral

- **Jurusan B**

Berikut analisa nilai arus netral pada jurusan B setelah dilakukan perencanaan pembagian beban

$$I_N = I_R \angle 0^\circ + I_S \angle 120^\circ + I_T \angle 240^\circ$$

$$I_N = I_R + \alpha \cdot I_S + \alpha^2 \cdot I_T$$

$$I_N = I_R + I_S (-0,5 + j0,866) + I_T (-0,5 - j0,866)$$

$$I_N = I_R - 0,5 (I_S) + j0,866 (I_S) - 0,5 (I_T) - j0,866 (I_T)$$

$$I_N = 107,8 - 0,5 (108,2) + j0,866 (108,2) - 0,5 (108,4) - j0,866 (108,4)$$

$$I_N = 107,8 - 54,1 + j93,7 - 54,2 - j93,87$$

$$I_N = -0,8 - j0,17 \text{ A}$$

$$I_N = \sqrt{(-0,8)^2 + (-0,17)^2}$$

$$I_N = \sqrt{0,47}$$

$$I_N = 0,82 \text{ A}$$

Nilai arus netral pada jurusan B yang didapatkan berdasarkan perhitungan tersebut sebesar 0,82 A dengan nilai sudut diabaikan.

- **Jurusan D**

$$I_N = I_R \angle 0^\circ + I_S \angle 120^\circ + I_T \angle 240^\circ$$

$$I_N = I_R + \alpha \cdot I_S + \alpha^2 \cdot I_T$$

$$I_N = I_R + I_S (-0,5 + j0,866) + I_T (-0,5 - j0,866)$$

$$I_N = I_R - 0,5 (I_S) + j0,866 (I_S) - 0,5 (I_T) - j0,866 (I_T)$$

$$I_N = 29,4 - 0,5 (28) + j0,866 (28) - 0,5 (28,4) - j0,866 (28,4)$$

$$I_N = 29,4 - 14 + j24,248 - 14,2 - j24,594$$

$$I_N = 1,2 - j0,346 \text{ A}$$

$$I_N = \sqrt{(1,2)^2 + (-0,346)^2}$$

$$I_N = \sqrt{1,56}$$

$$I_N = 1,25 \text{ A}$$

Nilai arus netral pada jurusan B yang didapatkan berdasarkan perhitungan tersebut sebesar 1,25 A dengan nilai sudut diabaikan.

4.7.3 Analisa Susut Energi

Rugi daya ini dapat dihitung dengan rumus:

$$E_B = I_{N(B)}^2 \times R \times t$$

Dimana,

E_B = Susut energi per hari

P_{loss} = rugi daya (watt)

R = resistansi penghantar

t = waktu

- **Susut Jurusan B**

Arus netral : 0,82 A

R = asumsikan 0,6 ohm

Waktu : 12 jam beban puncak

Substitusi,

$$E_B = I_{N(B)}^2 \times R \times t$$

$$E_B = 0,82^2 \times 0,6 \times 12$$

$$E_B = 4,84 \text{ Wh} = \mathbf{0,0048 \text{ kWh/hari}}$$

- **Susut Jurusan D**

Arus netral : 1,25 A

R = asumsikan 0,6 ohm

Waktu : 12 jam beban puncak

Substitusi,

$$E_B = I_{N(B)}^2 \times R \times t$$

$$E_B = 1,25^2 \times 0,6 \times 12$$

$$E_B = 11,25 \text{ Wh} = \mathbf{0,01125 \text{ kWh/hari}}$$

Untuk Jurusan B, arus netral sebesar 0,82 A menghasilkan rugi-rugi energi sebesar 0,0048 kWh per hari, sedangkan untuk Jurusan D dengan arus netral 1,25 A menghasilkan rugi energi sebesar 0,01125 kWh per hari. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban berkontribusi signifikan terhadap susut energi harian pada gardu distribusi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengukuran, analisa data, dan simulasi yang telah dilakukan pada gardu distribusi PY094 sebagai objek penelitian, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Ketidakseimbangan Beban Teridentifikasi Signifikan

Berdasarkan 5 (lima) data pengukuran arus dan tegangan pada sisi sekunder trafo dengan waktu berbeda, diperoleh nilai rata-rata arus fasa **103,8 A** untuk fasa R, **130,2 A** untuk fasa S, dan **90,4 A** untuk fasa T di jurusan B dan rata-rata arus fasa sebesar **47,4 A** untuk fasa R, **18 A** untuk fasa S, dan **20,4 A** untuk fasa T di jurusan D. Sedangkan nilai rata-rata arus netral tercatat sebesar **63,4 A** di jurusan B dan **27,2 A** di jurusan D. Ketidakseimbangan arus yang dihitung dari data tersebut menunjukkan nilai unbalance sebesar 20,41% untuk Jurusan B dan 65,7% untuk Jurusan D, yang termasuk dalam kategori tidak seimbang secara operasional.

2. Tingginya Arus Netral dan Rugi Energi

Ketidakseimbangan arus ini menyebabkan arus netral yang secara teknis menunjukkan aliran arus kembali akibat distribusi beban yang tidak merata. Hal ini mengakibatkan rugi daya pada sistem distribusi, dengan estimasi susut energi harian mencapai 28,94 kWh/hari, jika diasumsikan sistem beroperasi selama 12 jam per hari.

3. Simulasi ETAP Menggambarkan Kondisi Aktual Sistem

Model jaringan distribusi yang disimulasikan menggunakan ETAP 12.6 berhasil menampilkan kondisi unbalance secara visual dan numerik. Dari simulasi diperoleh data arus masing-masing fasa pada Bus2 yaitu 105,8 A (a), 132,6 A (b), dan 91,6 A (c), yang menunjukkan kecenderungan beban lebih tinggi pada fasa B, konsisten dengan hasil pengukuran lapangan.

4. Dilakukan perencanaan penyeimbangan beban dengan cara pembagian beban pada masing-masing fasa guna mendapatkan nilai arus beban

mendekati nilai ideal yaitu 108,7 A setiap fasanya pada jurusan B dan 28,7 A setiap fasa pada jurusan D. Perencanaan penyeimbangan beban pada jurusan B menjadi 107,8 A pada fasa R, 108,2 A pada fasa S dan 108,4 A pada fasa T. Perencanaan penyeimbangan beban pada jurusan D yaitu 29,4 A pada fasa R, 28 A pada S dan 28,4 pada fasa T. Penyeimbangan beban ini dilakukan hanya berfokus pada perencanaan tanpa memperhatikan aspek lapangan.

5. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, nilai arus netal pada jurusan B sebesar 0,82 A dan 1,25 A pada jurusan D. Dengan nilai arus netral tersebut, susut energi pada jurusan B yaitu sebesar 0,0048 kWh/hari dan pada jurusan D sebesar 0,01125 kWh/hari. Hal ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban mempengaruhi nilai arus netral dan rugi – rugi energi (*losses*).

5.2 Saran

Untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasi trafo distribusi, disarankan langkah-langkah berikut:

1. Saran Teknis untuk Pihak PLN

Upaya penyeimbangan beban ini dapat menjadi strategi preventif untuk mengurangi susut energi dan memperpanjang usia peralatan (trafo dan jaringan distribusi). Oleh karena itu, monitoring beban per fasa secara berkala dan penyesuaian beban pelanggan pada tiap jurusan perlu dilakukan secara aktif oleh pihak PLN.

2. Peningkatan Efisiensi

Evaluasi rugi-rugi daya secara berkala untuk memastikan performa trafo tetap optimal seperti seperti pengecekan isolasi, kabel, atau sambungan.

3. Pemerataan beban

Melakukan pemerataan beban pada setiap fasa agar ketidakseimbangan beban tetap berada pada batas toleransi atau bahkan lebih kecil dari standar maksimal 20%

4. Sosialisasi pelanggan

Mengadakan sosialisasi atau diskusi terbuka kepada pelanggan terkait manajemen penggunaan daya yang efisien, sehingga dapat membantu menjaga stabilitas sistem distribusi secara keseluruhan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. D. T. Sogen, “Analisis Pengaruh Ketidak-seimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi di PT PLN (Persero) Area Sorong,” Jul 2018.
- [2] Muh. H. Haris dan A. R. Sultan, “Optimasi Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi Terhadap Penurunan Rugi Energi dengan Metode Seimbang Beban Sehari,” 2020.
- [3] Z. Tharo, A. D. Tarigan, dan R. Pulungan, “Pengaruh Pemakaian Beban Tidak Seimbang Terhadap Umur Peralatan Listrik,” 2018.
- [4] N. Budiastara, O. Penangsang, D. Mauridhi, dan H. Purnomo, “OPTIMASI JARINGAN DISTRIBUSI SEKUNDER UNTUK MENGURANGI RUGI DAYA MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA,” *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi*, 2006.
- [5] D. F. Ashari, “Analisis Gangguan Gardu Distribusi di PT PLN (Persero) ULP Watang Sawitto,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika*, vol. 1, no. 1, hlm. 2–3, 2021.
- [6] N. I. Hamma, “Perencanaan Gardu Distribusi PT. Maccon Indonesia,” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI)*, no. September, hlm. 136–141, 2021.
- [7] J. J. Heckman, R. Pinto, dan P. A. Savelyev, “Dasar Teori Arus Listrik,” *Angewandte Chemie International*, hlm. 5–30, 1967.
- [8] Anang Dasa Novfowan, Mochammad Mieftah, dan Wijaya Kusuma, “Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi,” *Jurnal Teknik Ilmu Dan Aplikasi*, vol. 9, no. 1, hlm. 83–90, 2021, doi: 10.33795/jtia.v9i1.17.
- [9] A. E. Ulinuha, “Analisis Susut Energi Listrik pada Trafo Distribusi 160 KVA di Gardu Distribusi SP022 PLN ULP Sape Penyulang Sari Akibat Ketidakseimbangan Beban,” *Jurnal Elektronika dan Teknik Informatika Terapan*, vol. 3, no. 1, hlm. 23–40, 2024.

- [10] A. Y. Dewi, A. Effendi, dan F. M. Syafar, “Analisis Terjadinya Arus Netral Pada Trafo Distribusi 160 kVA,” *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)*, vol. 4, no. 1, hlm. 1, Jun 2021, doi: 10.33087/jepca.v4i1.45.
- [11] P. A. Yuntyansyah, U. Wibawa, dan T. Utomo, “Studi Perkiraan Susut Teknis dan Alternatif Perbaikan Pada Penyulang Kayoman Gardu Induk Sukorejo,” *Program Studi Teknik Elektro, Universitas Brawijaya*, hlm. 1–8, 2015.
- [12] B. T. Aribowo, S. Setiawidayat, dan M. Muksin, “Simulasi dan Analisis Load Flow Sistem Interkoneksi Kalimantan Timur Menggunakan Software ETAP 12.6,” *Jurnal Ilmiah Giga*, vol. 8, no. 1, hlm. 114–121, 2018.

