ANALISIS SUSUT ENERGI LISTRIK PADA TRAFO DISTRIBUSI 160 KVA DI GARDU DISTRIBUSI SP022 PLN ULP SAPE PENYULANG SARI AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN

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:

Alfan Ediyasa Ulinnuha

NIM 30602200106

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG

SEMARANG

2025

ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY LOSS IN A 160 KVA DISTRIBUTION TRANSFORMER AT THE SP022 DISTRIBUTION SUBSTATION PLN ULP SAPE SARI FEEDER DUE TO LOAD UNBALANCED

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:

Alfan Ediyasa Ulinnuha

NIM 30602200106

MAJORING OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY

SULTAN AGUNG ISLAMIC UNIVERSITY

SEMARANG

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul "**ANALISIS SUSUT ENERGI LISTRIK PADA TRAFO DISTRIBUSI 160 KVA DI GARDU DISTRIBUSI SP022 PLN ULP SAPE PENYULANG SARI AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN**" ini disusun oleh:

Nama	:	Alfan Ediyasa Ulinnuha
NIM	:	30602200106
Program Studi	:	Teknik Elektro

Telah disahkan oleh Dosen Pembimbing pada:

Hari	:	Minggu
Tanggal	:	9 Maret 2025

Pembimbing

Dedi Nugroho, ST., MT.
NIDN. 0617126602

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektro

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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "**ANALISIS SUSUT ENERGI LISTRIK PADA TRAFO DISTRIBUSI 160 KVA DI GARDU DISTRIBUSI SP022 PLN ULP SAPE PENYULANG SARI AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN**" ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis

Tanggal : 27 Februari 2025

TIM PENGUJI

Ketua Penguji

Ir. Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D. IPM

NIDN. 0628097501

Penguji 1	Penguji 2
Ir. Ida Widihastuti, M.T.	**Munaf Ismail, S.T., M.T.**
NIDN. 0005036501	NIDN. 0613127302

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	:	Alfan Ediyasa Ulinnuha
NIM	:	30602200106
Program Studi	:	S1 Teknik Elektro
Fakultas	:	Teknologi Industri

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul "Analisis Susut Energi Listrik pada Trafo Distribusi 160 kVA di Gardu Distribusi SP022 PLN ULP Sape Penyulang Sari Akibat Ketidakseimbangan Beban", adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan 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.

Bima, 25 Februari 2025

Yang menyatakan,

Alfan Ediyasa Ulinnuha

NIM 30602200106

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	:	Alfan Ediyasa Ulinnuha
NIM	:	30602200106
Program Studi	:	S1 Teknik Elektro
Fakultas	:	Teknologi Industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas akhir dengan Judul **"ANALISIS SUSUT ENERGI LISTRIK PADA TRAFO DISTRIBUSI 160 KVA DI GARDU DISTRIBUSI SP022 PLN ULP SAPE PENYULANG SARI AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN"** 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 pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan Agung.

Bima, 25 Februari 2025

Yang menyatakan,

Alfan Ediyasa Ulinnuha

NIM 30602200106

HALAMAN PERSEMBAHAN

Penelitian ini saya persembahkan untuk:

Alfan Ediyasa Ulinnuha

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 Dedi Nugroho

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 PLN UP3 Bima, ULP Sape

Terima kasih rekan-rekan yang selalu menemani dan membantu saat penempatan di sini, 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 bereksploarasi 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

إِنَّ الَّذِينَ آمَنُوا وَعَمِلُوا الصَّالِحَاتِ يَهْدِيهِمْ رَبُّهُمْ بِإِيمَانِهِمْ ۖ تَجْرِي مِن تَحْتِهِمُ الْأَنْهَارُ فِي جَنَّاتِ النَّعِيمِ ﴿٩﴾

Artinya:

"Sesungguhnya orang-orang yang beriman dan beramal saleh, niscaya mereka diberi petunjuk oleh Tuhan karena keimanannya. (Mereka berada) di dalam surga yang penuh kenikmatan yang mengalir di bawahnya sungai-sungai."

(QS Yunus · Ayat 9)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan Hidayat, Taufik, dan Rahmat-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "**ANALISIS SUSUT ENERGI LISTRIK PADA TRAFO DISTRIBUSI 160 KVA DI GARDU DISTRIBUSI SP022 PLN ULP SAPE PENYULANG SARI AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN**".

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, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan agung Semarang.
4. Dedi Nugroho, 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.

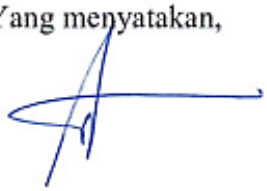
7. Kepada rekan-rekan Teknik Elektro UNISSULA angkatan 2022 atas dukungannya dalam penulisan laporan Tugas Akhir Ini.
8. Rekan kerja dan kerabat di ULP Sape, Nusa Tenggara

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.

وَلسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللهِ وَبَرَكَاتُهُ

Bima, 25 Februari 2025

Yang menyatakan,



Alfan Ediyasa Ulinnuha

NIM 30602200106

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH vi
HALAMAN PERSEMBAHAN vii
HALAMAN MOTTO viii
KATA PENGANTAR ix
DAFTAR ISI xi
DAFTAR TABEL xiv
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR LAMPIRAN xvi
ABSTRAK xvii
ABSTRACT xviii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Pembatasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 4
1.6 Sistematika Penulisan 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 7
2.1 Tinjauan Pustaka 7

2.2 Landasan Teori 8
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik 8
2.2.2 Gardu Distribusi 8
2.2.3 Gardu Portal 9
2.2.4 Transformator Distribusi 11
2.2.5 Rugi-Rugi Trafo 13
2.2.6 Ketidakseimbangan Beban 15
2.2.7 Susut Energi (*Energi Losses*) 16
BAB III METODE PENELITIAN 17
3.1 Objek Penelitian 17
3.2 Data-data Penelitian 18
3.3 Tahapan Penelitian .....**Error! Bookmark not defined.**
3.4 Flowchart 23
BAB IV HASIL DATA DAN ANALISA 25
4.1 Pengukuran dan Pengamatan 25
4.1.1 Pengukuran Tegangan dan Arus 25
4.2 Analisa Data Pengukuran dan Pengamatan 26
4.2.1 Analisa Data Tegangan dan Arus 26
4.3 Analisa Ketidakseimbangan Beban 26
4.3.1 Analisa Ketidakseimbangan beban Siang Hari 27
4.3.2 Analisa Ketidakseimbangan beban Malam Hari 28
4.4 Analisa Pembebanan dan Rugi-Rugi Trafo 29
4.4.1 Perhitungan Impedansi Trafo 30
4.4.2 Perhitungan Resistansi Trafo 30
4.4.3 Perhitungan Reaktansi Trafo 31

4.4.4 Perhitungan Pembebanan Trafo 31
4.4.5 Perhitungan Rugi-Rugi Daya 33
4.2 Analisa Susut Energi 34
4.3 Analisa Penyeimbangan Arus..... 35
4.6.1 Penyeimbangan Arus 35
4.6.2 Perhitungan Rugi-rugi Daya Beban Seimbang 36
4.6.3 Perhitungan Susut Energi 37
4.6.4 Perhitungan Biaya Susut Energi 37
4.6.5 Analisa Penghematan Energi Beban Seimbang dengan Tidak Seimbang..... 38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 39
5.1 Kesimpulan..... 39
5.2 Saran 40
DAFTAR PUSTAKA 42
LAMPIRAN..... 44

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Data pemeliharaan SP22 Tegangan dan Arus 2
Tabel 4. 1 Pengukuran Tegangan dan Arus siang hari 25
Tabel 4. 2 Pengukuran Tegangan dan Arus malam hari 25
Tabel 4. 3 Hasil Analisa Rugi-rugi Trafo 38
Tabel 4. 4 Hasil Analisa Rugi Energi dan Biaya Susut Energi 38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik 8
Gambar 2. 2 Gardu Trafo Tiang Penyulang Sari 9
Gambar 2. 3 Gardu Distribusi 10
Gambar 2. 4 Transformator Distribusi 11
Gambar 2. 5 Nameplate Trafo 11
Gambar 2. 6 Rugi-rugi trafo 13
Gambar 2. 7 *No Load Loss* 14
Gambar 3. 1 Blok Diagram Penelitian 17
Gambar 3. 2 Peta lokasi penelitian 18
Gambar 3. 3 Nameplate Trafo 19
Gambar 3. 4 Single Line Diagram feeder Sari 21
Gambar 3. 5 Flowchart 23
Gambar 4. 1 Nameplate Trafo Distribusi 29

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data pemeliharaan SP022..... 44

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 transformator distribusi SP022 PLN, ULP Sape, Penyulang Sari, 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 bahwa ketidakseimbangan beban berdampak pada peningkatan rugi-rugi daya dan susut energi listrik. Pada kondisi beban tidak seimbang, rugi-rugi daya pada transformator mencapai 526,041 Watt pada siang hari dan 770,359 Watt pada malam hari, sementara dalam kondisi beban seimbang, rugi-rugi daya 522,415 Watt pada siang hari dan 758,205 Watt pada malam hari. Susut energi dalam kondisi tidak seimbang tercatat sebesar 466,704 kWh/bulan, sedangkan dalam kondisi beban seimbang menjadi 461,023 kWh/bulan. Dari segi finansial, biaya susut energi akibat ketidakseimbangan beban mencapai Rp 674.247,26/bulan, sedangkan dalam kondisi seimbang biaya menjadi Rp 666.039,9/bulan.

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa meskipun ketidakseimbangan beban masih dalam batas standar yang diizinkan oleh SPLN D5.004-1:2012, yaitu maksimum 20% untuk ketidakseimbangan arus dan 2% untuk ketidakseimbangan tegangan, tetap diperlukan upaya penyeimbangan beban untuk meningkatkan efisiensi transformator dan mengurangi susut energi. Penerapan strategi penyeimbangan beban dapat membantu mengoptimalkan performa transformator, meningkatkan stabilitas tegangan, serta mengurangi biaya operasional dalam jangka panjang.

Kata Kunci: Gardu SP022, 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 SP022 PLN distribution transformer at ULP Sape, Penyulang Sari, 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 indicate that load imbalance contributes to an increase in power losses and energy losses. Under unbalanced load conditions, transformer power losses reached 526.041 Watts during the daytime and 770.359 Watts at night, whereas under balanced load conditions, power losses slightly decreased to 522.415 Watts during the daytime and 758.205 Watts at night. Energy losses under unbalanced conditions were recorded at 466.704 kWh per month, while in balanced conditions, losses slightly reduced to 461.023 kWh per month. In financial terms, the cost of energy losses due to load imbalance amounted to Rp 674,247.26 per month, while in balanced conditions, the cost decreased to Rp 666,039.9 per month.

The study concludes that although the load imbalance remains within the permissible limits set by SPLN D5.004-1:2012, which allows a maximum current imbalance of 20% and a voltage imbalance of 2%, load balancing efforts are still necessary to improve transformer efficiency and reduce energy losses. Implementing load balancing strategies can optimize transformer performance, enhance voltage stability, and reduce operational costs in the long term.

Keywords: Distribution Transformer, Load Imbalance, Power Losses, SP022 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 transmisi dan konsumen.[1] 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 mempengaruhi efisiensi dan umur pakai peralatannya.

Pertumbuhan beban listrik, terutama pada beban satu fasa, semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah pelanggan dan perubahan pola konsumsi listrik. Hal ini berdampak langsung pada pembebanan transformator distribusi, di mana sering terjadi ketidakseimbangan beban antar fasa[1], [2]. Ketidakseimbangan beban terjadi ketika salah satu fasa memiliki arus yang lebih besar atau lebih kecil dibandingkan fasa lainnya, sehingga menimbulkan peningkatan rugi-rugi daya pada transformator. Rugi-rugi ini terjadi karena distribusi arus yang tidak merata menyebabkan kenaikan rugi-rugi tembaga pada transformator, yang berujung pada hilangnya energi dalam bentuk panas dan menurunkan efisiensi transformator[2]. Selain itu, ketidakseimbangan beban juga berpengaruh terhadap kestabilan tegangan sistem distribusi. Tegangan pada fasa yang memiliki beban lebih besar cenderung mengalami penurunan, sedangkan fasa dengan beban lebih kecil mengalami kenaikan tegangan[3]. PLN memiliki batas ketidakseimbangan arus yang diizinkan, yaitu maksimum 20% sedangkan untuk ketidakseimbangan tegangan, maksimum kurang lebih 2% berdasarkan SPLN D5.004-1:2012[4]. Jika nilai ketidakseimbangan tegangan melebihi batas ini, maka kualitas daya listrik akan terganggu dan dapat

mempengaruhi performa peralatan listrik pelanggan serta meningkatkan risiko gangguan pada sistem distribusi[5], [6].

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi serta mengevaluasi dampaknya terhadap rugi-rugi daya dan susut energi listrik. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh rekomendasi strategi untuk mengurangi ketidakseimbangan beban guna meningkatkan efisiensi transformator distribusi serta menjaga kestabilan tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik.

Gardu distribusi SP022 PLN, yang dikelola oleh Unit Layanan Pelanggan (ULP) Sape dan melayani penyulang Sari, merupakan salah satu gardu distribusi yang memegang peranan strategis dalam menyuplai listrik ke wilayah tersebut. Dengan semakin meningkatnya permintaan energi listrik dari konsumen, gardu ini dihadapkan pada tantangan berupa beban operasional yang semakin berat, kondisi peralatan yang mengalami penurunan performa, serta risiko meningkatnya tingkat susut energi (*energy losses)*. Berdasarkan data teknis pemeliharaan tanggal 17 Desember 2024, ditemukan adanya pengukuran tegangan dan arus yang berpotensi dapat mengakibatkan ketidakseimbangan beban.

Tabel 1. 1 Data pemeliharaan SP22 Tegangan dan Arus

VII. PENGUKURAN TEGANGAN DAN BEBAN										
SEBELUM PEMELIHARAAN						SETELAH PEMELIHARAAN				
COS Φ		TEGANGAN				COS Φ	TEGANGAN			
R		R-N =	232	V		R =	R-N =	232	V	
S		S-N =	230	V		S =	S-N =	230	V	
T		T-N =	232	V		T =	T-N =	232	V	
		R-S =	401	V		N =	R-S =	401	V	
		R-T =	404	V			R-T =	404	V	
		S-T =	401	V			S-T =	401	V	
BEBAN (A)						BEBAN (A)				
	UTAMA	JUR. A	JUR. B	JUR. C	JUR. K	UTAMA	JUR. A	JUR.B	JUR. C	JUR. K
R	96	0			96	96	0			96
S	107	0			107	107	0			107
T	84	0			84	84	0			84
N	28	0			27	28	0			27

Oleh karena itu, penulis tertarik untuk merancang penelitian dengan judul "**ANALISIS SUSUT ENERGI LISTRIK PADA TRAFO**

DISTRIBUSI 160 KVA DI GARDU DISTRIBUSI SP022 PLN ULP SAPE PENYULANG SARI AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN", dengan harapan tidak hanya menghasilkan solusi teknis untuk gardu distribusi SP022, tetapi juga dapat menjadi referensi bagi pengelola gardu distribusi lainnya dalam merancang strategi pemeliharaan yang lebih terukur dan berbasis data.

1.2 Perumusan Masalah

1. Apakah sistem ketidakseimbangan pembebanan pada trafo distribusi SP022 PLN, ULP Sapa Penyulang Sari masih dalam batas yang diizinkan?
2. Bagaimana dampak ketidakseimbangan pembebanan pada trafo terhadap rugi-rugi daya dan susut energi listrik pada trafo disrtibusi?
3. Bagaimana dampak penyeimbangan pembebanan pada trafo distribusi terhadap rugi-rugi daya dan susut energi listrik pada trafo disrtibusi?

1.3 Pembatasan Masalah

1. Penelitian difokuskan pada gardu distribusi SP022 PLN, ULP Sape, penyulang Sari, tanpa melibatkan gardu distribusi lain di luar lokasi ini.
2. Penelitian membahas analisa pengamatan dan pengukuran tegangan arus dari trafo gardu distribusi SP022 PLN.
3. Pengukuran hanya diambil dari sisi sekunder trafo.
4. Pengambilan data pengukuran diambil pada tanggal 17 Desember 2024 diambil dua kali yaitu pada siang hari dan malam hari.
5. Melibatkan data teknis terkait spesifikasi dan data pengukuran trafo gardu SP022.

1.4 Tujuan Penelitian

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

1. Mengidentifikasi faktor-faktor penyebab susut energi (*energy losses)* pada gardu distribusi SP022 PLN, ULP Sape
2. Mengidentifikasi nilai ketidakseimbangan beban, rugi-rugi trafo, serta kerugian akibat susut energi.

3. Memberikan gambaran dan pengembangan untuk gardu distribusi lain terkait dengan tindakan pemeliharaan serta pencegahan terhadap akibat ketidakseimbangan beban.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penulisan dan pembuatan Tugas Akhir ini adalah :

a. Bagi Penulis

Memberikan kesempatan bagi penulis untuk memperdalam pemahaman mengenai dampak ketidakseimbangan beban terhadap susut energi dan implementasinya dalam sistem kelistrikan.

b. Bagi Masyarakat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung peningkatan keandalan dan efisiensi pasokan listrik di wilayah penyulang Sari. 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 dengan permasalahan ketidakseimbangan beban.

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

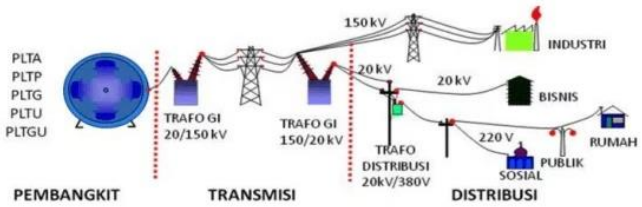
2.1 Tinjauan Pustaka

No.	Judul	Keterangan
1.	Analisis Susut Daya (*Losses*) Pada Penyulang Rayap PT PLN (Persero) UID Lampung Berbasis Aplikasi ETAP 19.0.1	Menyimpulkan bahwa terjadinya susut energi optimalnya dibawah 5% untuk Jaringan Tegangan Menengah
2.	Analisis Pembebanan Transformator Daya 300 Kva Di Instalasi Pengolahan Air Limbah PT. Sier	Menyimpulkan pemeliharaan preventif dilakukan untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan listrik yang dapat mengakibatkan terganggunya aliran listrik.
3.	Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di Penyulang Pangsuma PT. Pln (Persero) Rayon Mempawah	Mentimpulkan cara pengoptimalkan pemeliharaan pada sebuah gardu distribusi guna memperpanjang umur pakai komponen dan guna untuk mengurangi adanya risiko gangguan, antara lain : 1. Membuat jadwal pemeliharaan 2 kali dalam sebulan 2. Melakukan inspeksi rutin pada sepanjang jalur kelistrikan khususnya jalur distribusi

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. Komponen distribusi berperan sebagai penghubung antara sistem transmisi dan konsumen akhir, dengan fungsi utama mendistribusikan energi listrik pada tegangan yang sesuai dengan kebutuhan pengguna[7], [8]

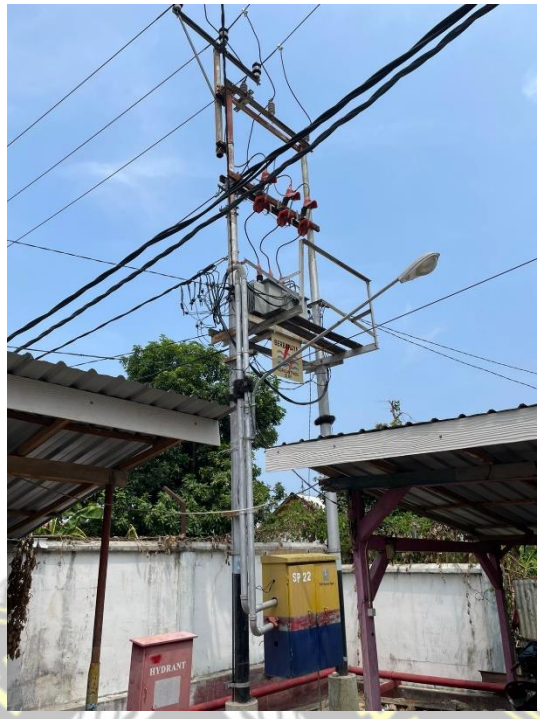


Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik
(Sumber: https://www.warriornux.com/ telah diolah kembali)

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)[8], [9]. 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*”.

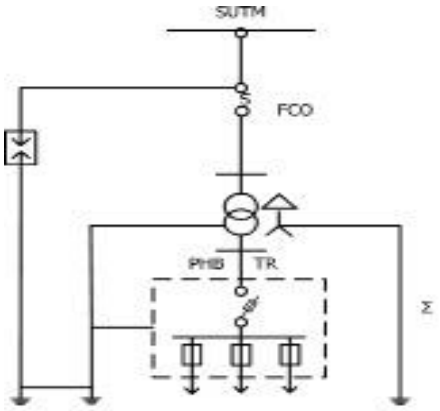


Gambar 2. 2 Gardu Trafo Tiang Penyulang Sari
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

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.

2.2.3 Gardu Portal

Gardu Portal adalah salah satu jenis gardu distribusi yang berfungsi menurunkan tegangan menengah (20 kV atau 11 kV) menjadi tegangan rendah (400 V atau 230 V) untuk didistribusikan ke konsumen[9]. Gardu ini biasanya digunakan di jaringan distribusi listrik pada kawasan dengan kebutuhan listrik menengah hingga besar, seperti kawasan perumahan, industri kecil, atau area komersial. Gardu portal disebut demikian karena konstruksinya menggunakan tiang portal yang menopang transformator dan perangkat distribusi lainnya.



Gambar 2. 3 Gardu Distribusi
(Sumber: SLD ULP PLN Sape)

Beberapa komponen penting pada gardu distribusi meliputi:

a. Transformator distribusi

   Digunakan untuk menurunkan tegangan menengah ke tegangan rendah.

b. *Lightning Arrester* (LA) untuk melindungi dari lonjakan tegangan akibat petir

c. *Fuse Cut Out* (FCO) untuk perlindungan dari arus lebih dan hubungan singkat.

d. Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR)

   Digunakan untuk mendistribusikan tegangan rendah ke pelanggan melalui jaringan tegangan rendah (JTR) yang dilengkapi dengan pemutus sirkuit untuk mengatur dan melindungi aliran listrik ke masing-masing jalur.

e. Grounding

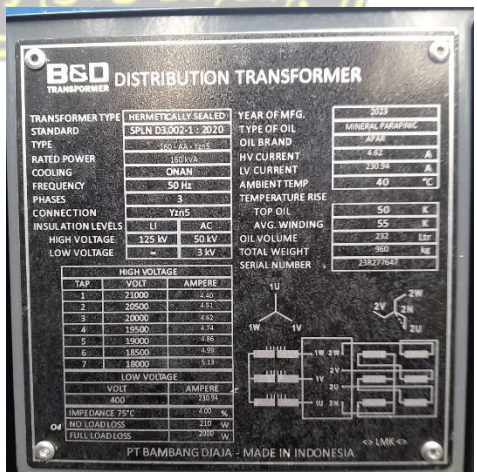
   Untuk memastikan keamanan dan stabilitas dengan menyalurkan arus bocor atau lonjakan arus ke tanah. Grounding juga mengurangi risiko kerusakan akibat sambaran petir atau gangguan listrik lainnya.

2.2.4 Transformator Distribusi

Gambar 2. 4 Transformator Distribusi
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya/tenaga dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya[10]. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi *Faraday* dan *Hukum Lorentz* dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial.

Berdasarkan fungsinya, transformator tenaga dapat dibedakan menjadi 3 (tiga) yaitu Transformator pembangkit, Transformator gardu induk / penyaluran, dan Transformator distribusi. Pada penelitian ini, spesifikasi transformator yang akan diinspeksi seperti pada gambar berikut:



Gambar 2. 5 Nameplate Trafo
(sumber: Dokumentasi pribadi)

Sering sekali dilapangan ditemukan kasus trafo-trafo yang bermasalah, baik dari awal perencanaan, prosedur pemeliharaan bahkan pemeliharaan yang kurang baik sehingga kinerja trafo sendiri tidak bisa optimal. Perencanaan dan prosedur kinerja transformator harus diperhatikan dan yang lebih penting lagi, sebelum transformator beroperasi sebaiknya diuji terlebih dahulu supaya dapat memastikan bahwa transformator yang akan digunakan betul-betul baik dan tepat nilai transformasinya.

Transformator memiliki impedansi, resistansi, dan reaktansi yang saling berkaitan serta berpengaruh langsung terhadap pembebanan.

a. Impedansi Trafo (Z)

Impedansi trafo adalah hambatan total yang dihadapi oleh arus listrik dalam kumparan transformator. Impedansi terdiri dari dua (2) komponen utama, yaitu

$$Z = \frac{Z_{trafo} \times V^2{}_{primer/sekunder}}{100 \times S_{nominal}} \quad \text{..... (2.1)}$$

Dimana,

Z = Nilai actual impedansi trafo primer/sekunder

Z_{trafo} = Persentase Impedansi trafo

$S_{nominal}$ = Kapasitas trafo

Nilai impedansi sering dinyatakan dalam persen impedansi (%Z) pada nameplate trafo. Nilai ini menunjukkan tegangan yang diperlukan untuk menghasilkan arus hubung singkat sebesar arus nominalnya.

b. Resistansi Trafo

Resistansi trafo merupakan bagian dari impedansi yang menyebabkan rugi-rugi daya dalam bentuk panas akibat aliran arus listrik. Resistansi ini terdapat pada kumparan primer dan sekunder. Rumus dasar resistansi dalam hubungan dengan rugi-rugi tembaga:

$$P_{cu} = I^2 R \quad \text{..... (2.2)}$$

Dimana,

P_{cu} = Rugi-rugi tembaga (watt)

I = Arus listrik (A)

R = Resistansi (ohm)

Resistansi trafo lebih besar pada kumparan primer dibandingkan dengan kumparan sekunder, karena jumlah lilitan lebih banyak pada sisi primer. Semakin tinggi resistansi, semakin besar rugi-rugi tembaga yang terjadi.

c. Reaktansi Trafo

Reaktansi trafo adalah bagian dari impedansi yang disebabkan oleh induktansi kebocoran (*leakage inductance*) dari lilitan trafo. Reaktansi ini tidak menghasilkan panas secara langsung, tetapi menyebabkan menurunnya tegangan dan mempengaruhi faktor daya. Rumus dasar reaktansi:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad \text{..... (2.3)}$$

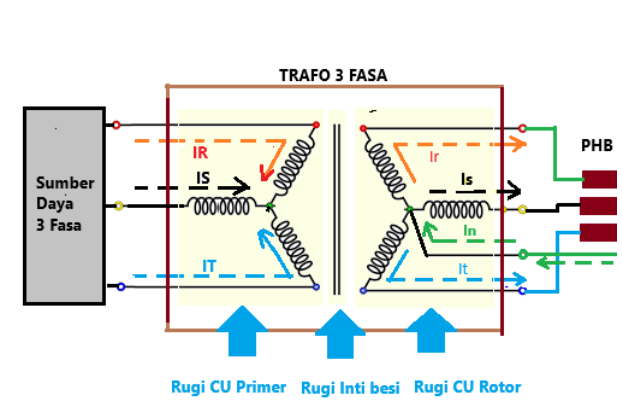
Dimana,

Z = Impedansi total (ohm)

R = Resistansi trafo

X = Reaktansi trafo

2.2.5 Rugi-Rugi Trafo



Gambar 2. 6 Rugi-rugi trafo
(sumber: https://dalamcangkang.blogspot.com/)

Rugi-rugi trafo adalah energi yang hilang selama proses transformasi energi listrik di dalam transformator. Energi ini tidak sepenuhnya dikonversi dari sisi primer ke sisi sekunder, melainkan sebagian hilang dalam bentuk panas atau energi magnetik. Berdasarkan parameter komponen, salah satu penyebab susut energi yang memiliki dampak yang cukup pengaruh adalah rugi-rugi kumparan (*copper loss*) pada

transformator. Pada umumnya untuk menghitung rugi-rugi kumparan dapat menggunakan rumus:

$$P_{total} = P_{primer} + P_{inti} + P_{sekunder} \quad \text{.....} \quad (2.4)$$

Dengan syarat nilai rugi-rugi (P) setiap bagian trafo diketahui melalui perhitungan

$$P_n = I^2 \times R_n \quad \text{.....} \quad (2.5)$$

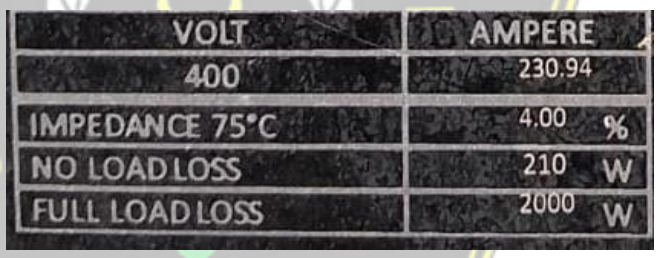
Dimana,

P_n = Rugi-rugi

I = Nilai arus terbebani

R = Resistansi

Rugi – rugi trafo dipengaruhi oleh arus – arus fasa yang mengalir pada masing-masing kumparan primer, arus rugi inti (arus beban nol) dan arus – arus fasa yang mengalir pada masing-masing kumparan sekunder. Rugi-rugi pada trafo sendiri ada dua jenis:



Gambar 2. 7 *No Load Loss*
(sumber: Dokumentasi pribadi)

a. Rugi Tanpa Beban (*No Load Loss*)

Rugi tanpa beban adalah rugi-rugi yang terjadi saat transformator terhubung ke sumber tegangan tanpa ada beban terhubung di sisi sekunder. Rugi-rugi ini terutama terjadi di inti besi transformator dan bersifat konstan, tidak tergantung pada beban. No load loss biasanya dinyatakan dalam watt (W) pada nameplate trafo.

b. Rugi Terbebani (*Full Load)*

Rugi beban adalah rugi-rugi yang terjadi ketika trafo mengalirkan arus karena adanya beban di sisi sekunder. Rugi beban meningkat seiring

dengan bertambahnya arus beban dan dihitung berdasarkan resistansi kumparan trafo.

2.2.6 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban adalah kondisi di mana distribusi beban listrik di antara ketiga fase pada sistem tenaga listrik tidak merata[11]. 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.

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 ($I_{rata\text{-}rata}$) adalah rata-rata arus keadaan tidak seimbang dan (X) adalah koefisien rasio antara arus fasa beban tidak seimbang, atau bisa dituliskan dalam persamaan:

$$I_{fasa} = x.I_{rata-rata} \quad \text{.....} \quad (2.7)$$

Dengan,

I_{fasa} = Nilai arus terukur

$I_{rata\text{-}rata}$ = 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:

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

2.2.7 Susut Energi (*Energi Losses*)

Susut energi merupakan kerugian yang terjadi sebagai akibat adanya selisih antara energi yang kirimkan 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. 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.

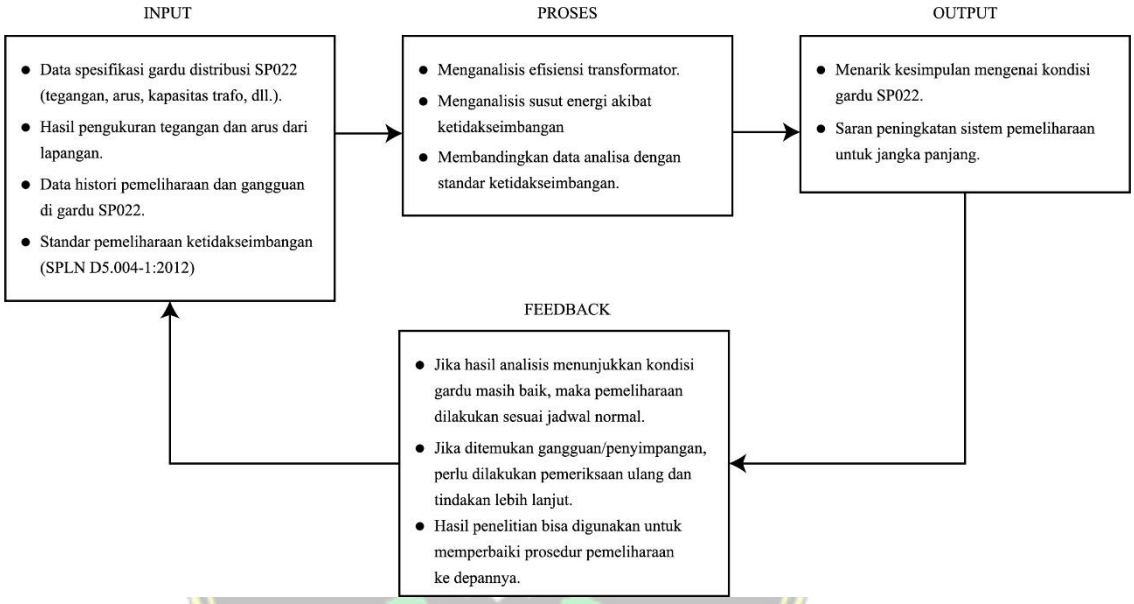
Pada penelitian ini untuk menghitung biaya susut energy (*losess*) dan total energy yang hilang dilakukan analisa perhitungan menggunakan hasil dari ketidakseimbangan beban yang berdampak pada rugi-rugi trafo. Ketidakseimbangan beban terjadi ketika arus di masing-masing fasa pada sisi sekunder transformator tidak sama. Hal ini menyebabkan beberapa dampak yang berkontribusi pada kerugian energi.. Karena rugi-rugi pada kumparan (*copper loss*) sebanding dengan kuadrat arus ($I^2.R$), 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:

$$Energy\ Loss\ Cost = 24\ jam \times P_{eugi-rugi\ total} \quad \text{.....} \quad (2.8)$$

BAB III
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode analisis data kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada gardu distribusi SP022 PLN, ULP Sape, penyulang Sari.

3.1 Blok Diagram Penelitian



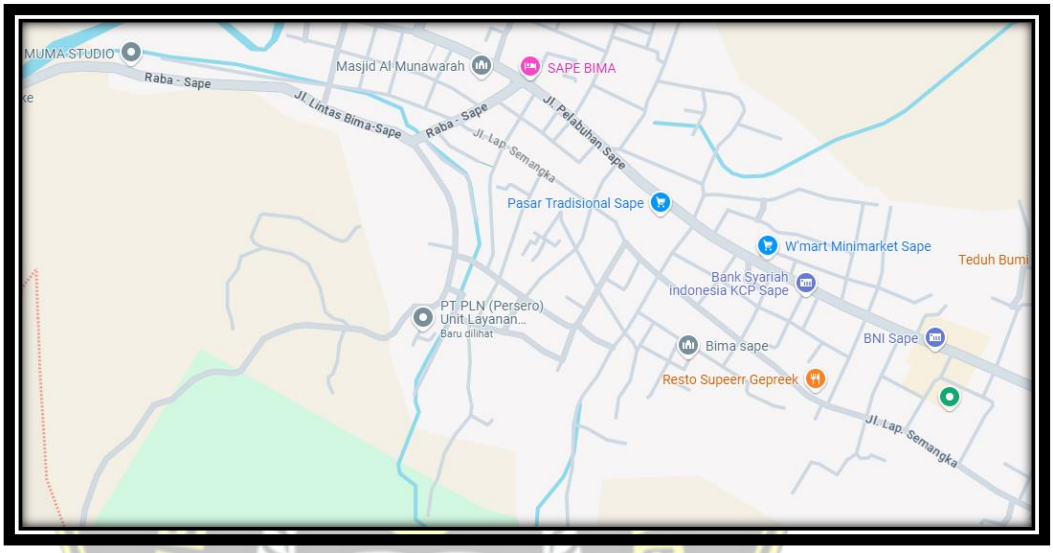
Gambar 3. 1 Blok Diagram Penelitian
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

3.2 Objek Penelitian

Tempat : Kecamatan Sape, Kabupaten Bima, Nusa Tenggara Barat

Waktu Penelitian : 2 bulan (November – Desember)

Detail Lokasi :



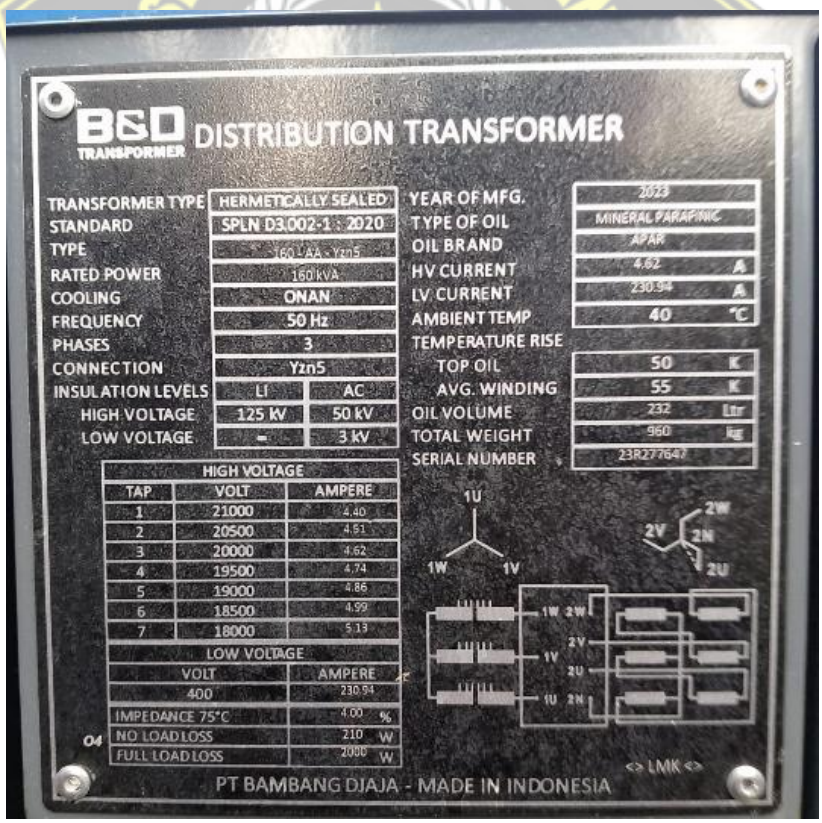
Gambar 3. 2 Peta lokasi penelitian

3.3 Data-data Penelitian

A. Detail Gardu : Nomor Gardu SP22 UP3 Bima, ULP Sape, Feeder Sari
Section 1 (PLTD Sape – LBS Mot Masjid Raya – Recloser Serbaguna)

B. Spesifikasi Trafo

Type	:	Hermetically Sealed
Standart	:	SPLN D3.002 – 1 : 2020
Rated Power	:	160kVA
Cooling	:	ONAN
Frequency	:	50Hz
Phase	:	3
High Voltage	:	20.000 volt / 4,62 A
Low voltage	:	400 volt / 230,94
Impedance	:	4,00%
No Load Loss	:	210W
Full Load Loss	:	2000W

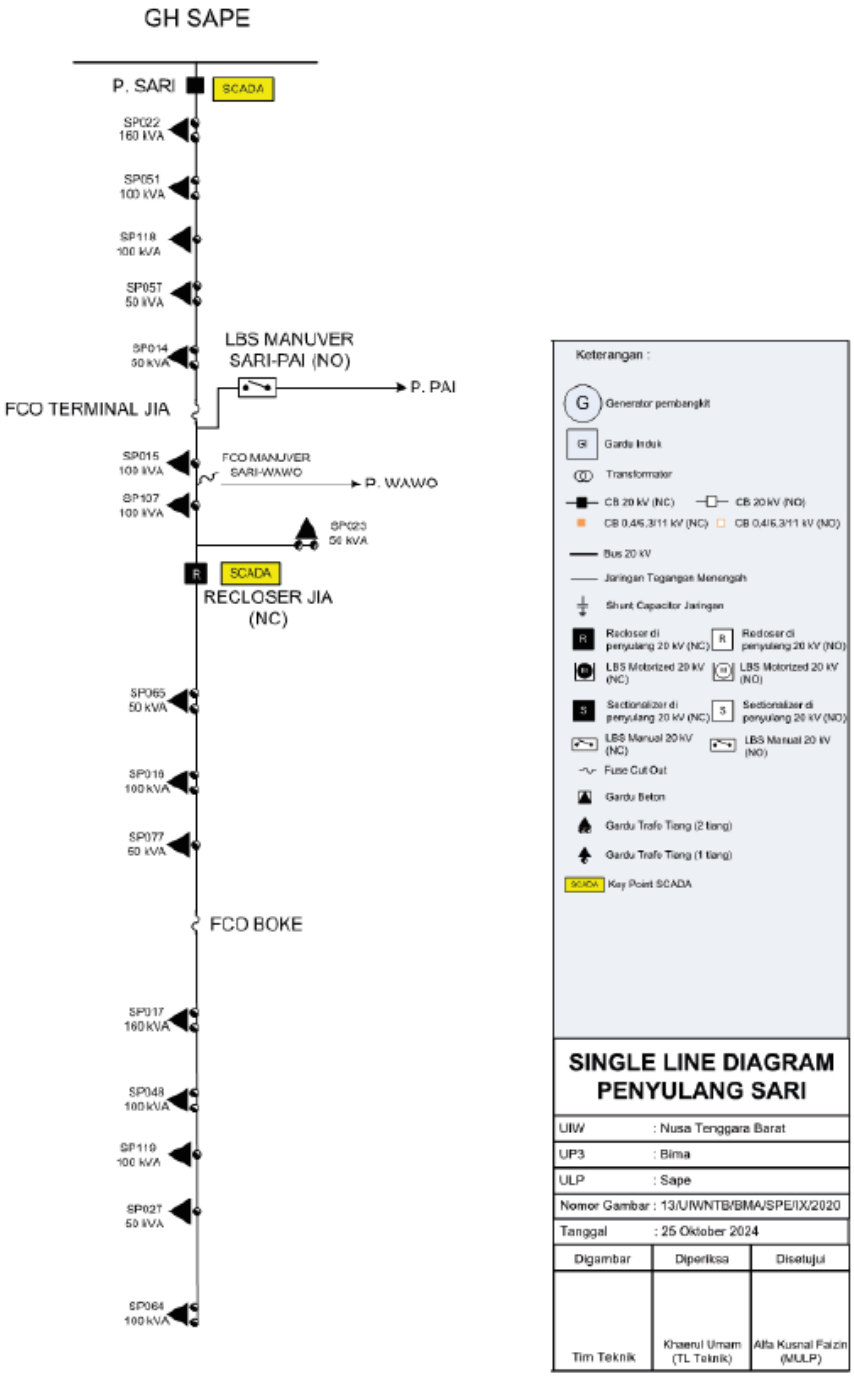


Gambar 3. 3 Nameplate Trafo
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

Transformator tersebut merupakan spesifikasi trafo distribusi 160 kVA, dengan tegangan input 20 kV (dapat diatur antara 18-21 kV dengan *tap changer*) dan output 400 V. Menggunakan sistem pendinginan ONAN (*Oil Natural Air Natural*) dengan menggunakan minyak sebagai media pendingin utama yang bersirkulasi secara alami dan melepas panas ke udara sekitar tanpa bantuan kipas atau alat tambahan lainnya. Trafo ini dirancang untuk beroperasi pada sistem tenaga listrik 3 fasa, dengan konfigurasi belitan Yzn5 yang berarti berarti trafo memiliki belitan primer berbentuk Y (bintang), belitan sekunder berbentuk *zigzag* dengan titik netral, serta memiliki pergeseran fasa 150° antara sisi primer dan sekunder, dan memenuhi standar SPLN D3.002-3:2020 yang digunakan di Indonesia.

C. Single Line Diagram

Gambar ini merupakan Single Line Diagram (SLD) dari Penyulang Sari yang berada di bawah Unit Layanan Pelanggan (ULP) Sape, UP3 Bima, di wilayah kerja Unit Induk Wilayah (UIW) Nusa Tenggara Barat.

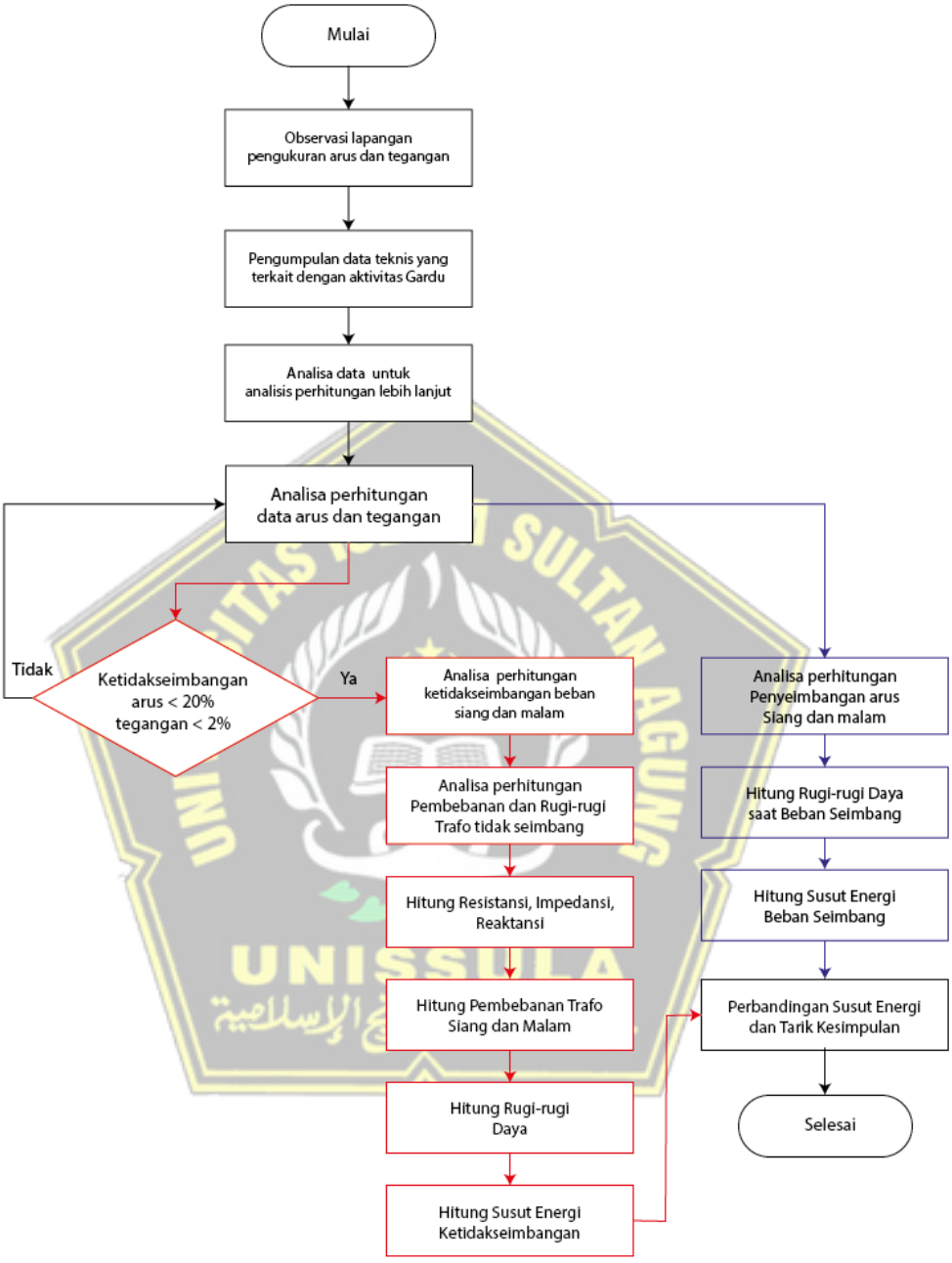


Gambar 3. 4 Single Line Diagram feeder Sari
(Sumber: SLD ULP PLN Sape)

Keterangan :

- GH Sape: Gardu Induk yang menjadi sumber utama tegangan menengah.
- Trafo Distribusi: Simbol-simbol yang menandakan lokasi dan kapasitas berbagai trafo distribusi di sepanjang jaringan penyulang Sari.
- FCO (*Fuse Cut Out*): Digunakan sebagai proteksi jaringan terhadap gangguan atau beban lebih.
- LBS (*Load Break Switch*): Saklar pemutus beban yang digunakan untuk operasi manuver jaringan.
- *Recloser*: Proteksi otomatis yang dapat membuka dan menutup kembali saat terjadi gangguan sementara.
- SCADA: Indikasi bahwa titik tertentu telah dipantau dan dikendalikan melalui sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA).

3.4 Flowchart



Gambar 3. 5 Flowchart
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

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

1. Observasi langsung pada gardu distribusi SP022 untuk mengetahui pengukuran tegangan dan arus pada transformator.
2. Wawancara dengan petugas lapangan terkait aktivitas pemeliharaan yang dilakukan serta masalah operasional yang pernah dihadapi.
3. Melakukan analisis dokumen teknis dan laporan historis operasi gardu distribusi, termasuk data beban, *Single Line Diagram*, dan riwayat gangguan yang sudah ada sebelumnya.
4. Melakukan analisa perhitungan tegangan dan arus terkait dengan rugi-rugi trafo pada saat siang dan malam yang mengakibatkan adanya ketidakseimbangan beban dan susut energi.
5. Membandingkan hasil data rugi-rugi trafo ketika beban tidak seimbang dengan beban seimbang.
6. Menghitung rugi-rugi energi dan menghitung selisihnya dibandingkan dengan beban ketika seimbang.

BAB IV
HASIL DATA DAN ANALISA

Pada bab ini, menyajikan hasil-hasil penelitian yang diperoleh dari pengukuran dan pengamatan pada gardu distribusi SP022 PLN, ULP Sape, penyulang Sari selama periode penelitian. Data yang disajikan meliputi nilai pengukuran tegangan dan arus beban pada saluran distribusi pada waktu siang dan malam.

Selain itu, analisis terhadap hasil pengukuran tegangan dan arus dilakukan untuk mengidentifikasi apakah ketidakseimbangan beban pada ULP Sape 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 SP022 PLN, ULP Sape, penyulang Sari

a. *Voltmeter*
b. *Ampere meter*

4.1 Pengukuran dan Pengamatan

4.1.1 Pengukuran Tegangan dan Arus

- Pengukuran siang hari

Tabel 4. 1 Pengukuran Tegangan dan Arus siang hari

No	Pengukuran	Tegangan (volt)						Arus (Ampere)			
		R-N	**S-N**	**T-N**	**R-S**	**R-T**	**S-T**	**R**	**S**	**T**	**N**
1.	Jurusan A	237	236	236	412	410	409	87,8	105,1	80,8	30,8
2.	Jurusan C	237	236	236	412	411	409	-	-	0,7	0,7
Arus Total								87,8	105,1	81,5	31,5

- Pengukuran malam hari

Tabel 4. 2 Pengukuran Tegangan dan Arus malam hari

No	**Pengukuran**	Tegangan (volt)						Arus (Ampere)			
		R-N	**S-N**	**T-N**	**R-S**	**R-T**	**S-T**	**R**	**S**	**T**	**N**
1.	Jurusan A	239	238	236	415	412	411	100,1	144,1	111,7	59,6
3.	Jurusan C	239	238	236	415	412	411	-	-	7,6	7,9
Arus Total								100,1	144,1	119,3	67,5

4.2 Analisa Data Pengukuran dan Pengamatan

Setelah dilakukan observasi pengukuran dan pengamatan yang terkait dengan nilai tegangan dan arus pada titik sambung, selanjutnya dilakukan analisa perhitungan ketidakseimbangan beban dan rugi-tugi trafo untuk mengindentifikasi penyebab susut energi.

4.2.1 Analisa Data Tegangan dan Arus

a. Tegangan antar fasa

Tegangan antar fase (R-T, S-T, R-S) tidak sepenuhnya simetris, yang bisa menjadi indikasi beban tidak seimbang.

b. Arus

Jurusan A memiliki arus netral sebesar **59,6 A**. Jurusan C memiliki arus netral sebesar **7,9 A**.Nilai ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban atau gangguan di sistem distribusi.

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. Jika ($I_{rata\text{-}rata}$) adalah rata-rata arus keadaan tidak seimbang dan (X) adalah koefisien rasio antara arus fasa beban tidak seimbang, maka dapat ditulis dalam persamaan:

$$I_{fasa} = x.I_{rata-rata}$$

Dengan,

I_{fasa} = Nilai arus terukur

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

X = koefisien arus antar fasa

Kemudian, untuk menghitung persentase ketidakseimbangan bisa dicari menggunakan persamaan tersebut apabia koefisien X nilainya sama. Persamaannya sebagai berikut:

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

Dimana,

X_R = Ketidakseimbangan fasa R

X_S = Ketidakseimbangan fasa R

X_T = Ketidakseimbangan fasa R

4.3.1 Analisa Ketidakseimbangan beban Siang Hari

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada siang hari:

$$Unbalance\ per\ fasa\ (X) = \frac{I_{terukur}}{I_{rata-rata}}$$

Arus fase pada siang hari:

- I_R = 87,8 A
- I_S = 105,1 A
- I_T = 81,5 A

Hitung nilai rata-rata arus,

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_{rata-rata} = \frac{87{,}8 + 105{,}1 + 81{,}5}{3} = \mathbf{91{,}46\ Ampere}$$

Subtitusi ke rumus *Unbalance*,

$$Unbalance\ (R) = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{87{,}8}{91{,}46} = \mathbf{0{,}959\ A}$$

$$Unbalance\ (S) = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{105{,}1}{91{,}46} = \mathbf{1{,}149\ A}$$

$$Unbalance\ (T) = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{81{,}5}{91{,}46} = \mathbf{0{,}891\ A}$$

Maka, ketika pada beban seimbang dapat dihitung dengan persamaan 2.2

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

$$Unbalance\ total\ (\%) = \frac{\{|0{,}959 - 1| + |1{,}149 - 1| + |0{,}891 - 1|\}}{3} \times 100\%$$

$$Unbalance\ total = 0{,}09967 = \mathbf{9{,}967}\ \%$$

Persentase ketidakseimbangan beban $\mathbf{9,967}$ % merupakan nilai yang cukup baik, namun masih perlu untuk diperhatikan lagi untuk kedepannya

4.3.2 Analisa Ketidakseimbangan beban Malam Hari

Berikut adalah analisa perhitungan untuk ketidakseimbangan beban pada siang hari:

$$Unbalance\ per\ fasa\ (X) = \frac{I_{terukur}}{I_{rata-rata}}$$

Arus fase pada siang hari:

- I_R = 100,1 A
- I_S = 144,1 A
- I_T = 119,3 A

Hitung nilai rata-rata arus,

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_{rata-rata} = \frac{100,1 + 144,1 + 119,3}{3} = \mathbf{121,16\ Ampere}$$

Subtitusi ke rumus *Unbalance*,

$$Unbalance\ \ (R) = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{100,1}{121,16} = \mathbf{0,826\ A}$$

$$Unbalance\ \ (S) = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{144,1}{121,16} = \mathbf{1,189\ A}$$

$$Unbalance\ \ (T) = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{119,3}{121,16} = \mathbf{0,984\ A}$$

Maka, ketika pada beban seimbang dapat dihitung dengan persamaan 4.1

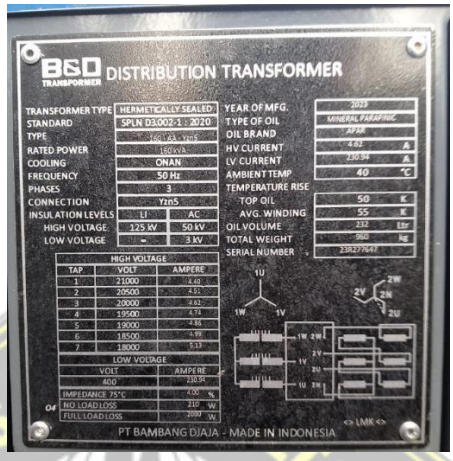
$$Unbalance\ total\ (\%) = \frac{\{|X_R - 1| + |X_S - 1| + |X_T - 1|\}}{3} \times 100\%$$

$$Unbalance\ total\ (\%) = \frac{\{|0,826 - 1| + |1,189 - 1| + |0,984 - 1|\}}{3} \times 100\%$$

$$Unbalance\ total = 0,1263 = \mathbf{12,63}\%$$

Persentase ketidakseimbangan beban $\mathbf{12,63}$ % merupakan nilai yang baik dan masih dalam nilai toleransi sesuai standar SPLN, namun masih perlu untuk diperhatikan lagi untuk kedepannya

4.4 Analisa Pembebanan dan Rugi-Rugi Trafo

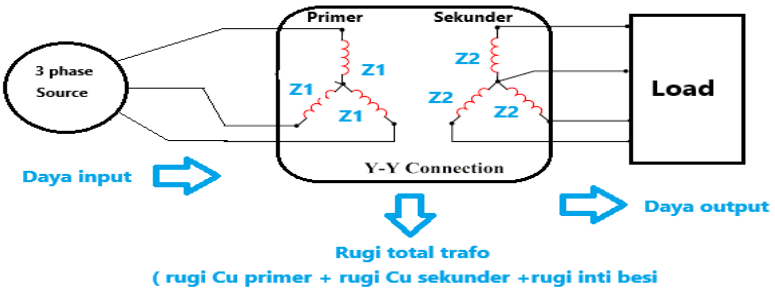


Gambar 4. 1 Nameplate Trafo Distribusi
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

Dari *nameplate* trafo yang tertera, dapat diketahui data-data pada trafo sebagai berikut:

- Kapasitas Trafo (Rated Power) =160 kVA
- Rugi-rugi Beban (*No Load Loss*) = 210 W
- Rugi-rugi pada Beban Penuh (*Full Load Loss*) = 2000 W
- Impedansi Trafo = 4.00%
- Tegangan Primer = 20kV
- Tegangan Sekunder = 400 V
- Arus Beban Penuh HV = 4,62 A
- Arus Beban Penuh LV = 230,94 A
- Hubungan kumparan = Y-Y
- Nilai arus diambil dari pengukuran malam hari karena memiliki persentasi ketidak seimbangan yang lebih tinggi.

Untuk menghitung total rugi-rugi trafo dapat digambarkan seperti skema berikut:



4.4.1 Perhitungan Impedansi Trafo

A. Kumparan Primer

$$Z_{primer(dasar)} = \frac{V_{primer}^2}{S_{nominal}}$$

$$Z_{primer(dasar)} = \frac{(20/\sqrt{3})^2}{0{,}16} = 833{,}333\ ohm$$

$$Z_{primer(actual)} = Z_{primer(dasar)} \times Z_{pu}$$

$$Z_{primer(actual)} = 833{,}333 \times 0{,}04 = 33{,}333\ ohm$$

B. Kumparan Sekunder

$$Z_{sekunder(dasar)} = \frac{V_{primer}^2}{S_{nominal}}$$

$$Z_{sekunder(dasar)} = \frac{(0{,}4/\sqrt{3})^2}{0{,}16} = 0{,}333\ ohm$$

$$Z_{sekunder(actual)} = Z_{sekunder(dasar)} \times Z_{pu}$$

$$Z_{sekunder(actual)} = 0{,}333 \times 0{,}04 = 0{,}01333\ ohm$$

4.4.2 Perhitungan Resistansi Trafo

Untuk menghitung nilai resistansi trafo, telah diketahui sebelumnya adalah total dari rugi-rugi beban penuh sama dengan total rugi-rugi tembaga beban penuh. Maka didapatkan persamaan sebagai berikut

$$P_{tembaga} = P_{CU,primer} + P_{CU,sekunder} = 2000\ watt$$

Anggaplah kedua kumparan memiliki rugi-rugi tembaga yang seimbang yaitu 1000 watt, maka bisa disubtitusikan ke perhitungan resistansi trafo:

$$P_{cu\ primer} = 3\ I_p^2\ R_p \rightarrow\ \ R_p = \frac{P_{cu\ primer}}{3I_{p(FL)}^2}$$

a. Resistansi Sisi Primer

$R_{Primer} = \frac{P_{cu\ primer}}{3I_{p(FL)}^2}$

Subtitusi nilai ke rumus,

$R_{Primer} = \frac{1000}{3(4{,}62)^2} = 15{,}61\ ohm$

b. Resistansi sisi Sekunder

$R_{Sec} = \frac{P_{cu\ Sec}}{3I_{p(FL)}^2}$

Subtitusi nilai ke rumus,

$R_{Sec} = \frac{1000}{3(230{,}94)^2} =$ 0,0062 ohm

4.4.3 Perhitungan Reaktansi Trafo

a. Reaktansi Primer

$X_{primer} = \sqrt{Z_{primer}^2 - R_{primer}^2}$

Subtitusi nilai Impedansi dan Resistansi,

$X_{primer} = \sqrt{33{,}33^2 - 15{,}61^2} =$ **29,44**

b. Reaktansi Sekunder

$X_{sekunder} = \sqrt{Z_{sekunder}^2 - R_{sekunder}^2}$

Subtitusi nilai Impedansi dan Resistansi,

$X_{sekunder} = \sqrt{0{,}013^2 - 0{,}0062^2} = \mathbf{0,0118}$

4.4.4 Perhitungan Pembebanan Trafo

a. Beban siang hari

Arus fase pada siang hari:

- $I_{R,sec}$ = 87,8 A
- $I_{S,sec}$ = 105,1 A
- $I_{T,sec}$ = 81,5 A

Persentase pembebanan trafo sisi sekunder :

$$\%I_R = \frac{I_R}{I_{sec(FL)}} = \frac{87,8}{230,9} = 38,025\ \%$$

$$\%I_S = \frac{I_S}{I_{sec(FL)}} = \frac{105,1}{230,9} = 45,517\ \%$$

$$\%I_T = \frac{I_T}{I_{sec(FL)}} = \frac{81,5}{230,9} = 35,296\ \%$$

Arus sisi Primer :

$$I_R = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_R}{100} = \frac{4,62 \times 38,025}{100} = 1,756\ A$$

$$I_S = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_s}{100} = \frac{4,62 \times 45,517}{100} = 2,102\ A$$

$$I_T = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_T}{100} = \frac{4,62 \times 35,296}{100} = 1,630\ A$$

b. Beban malam hari

Arus fase pada siang hari:

- I_R = 100,1 A
- I_S = 144,1 A
- I_T = 119,3 A

Persentase pembebanan trafo :

$$\%I_R = \frac{I_R}{I_{sec(FL)}} = \frac{100,1}{230,9} = 43,352\ \%$$

$$\%I_S = \frac{I_S}{I_{sec(FL)}} = \frac{144,1}{230,9} = 62,407\ \%$$

$$\%I_T = \frac{I_T}{I_{sec(FL)}} = \frac{119{,}3}{230{,}9} = 51{,}667\ \%$$

Arus Primer :

$$I_R = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_R}{100} = \frac{4{,}62 \times 43{,}352}{100} = 2{,}002\ A$$

$$I_S = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_s}{100} = \frac{4{,}62 \times 62{,}407}{100} = 2{,}883\ A$$

$$I_T = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_T}{100} = \frac{4{,}62 \times 51{,}667}{100} = 2{,}387\ A$$

4.4.5 Perhitungan Rugi-Rugi Daya

Dari perhitungan rugi-rugi tembaga trafo pada sisi primer dan sekunder serta diketahui juga rugi-rugi inti trafo pada nameplate, maka dapat dilakukan perhitungan total rugi-rugi trafo yaitu

a. Siang hari

- Rugi tembaga sekunder:

$$P_{Cu,Sec} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Sec}$$

Subtitusi,

$$P_{Cu,Sec} = (87{,}8^2 + 105{,}1^2 + 81{,}5^2) \times 0{,}0062$$

$$P_{Cu,Sec} = \mathbf{157{,}462\ Watt}$$

- Rugi tembaga primer:

$$P_{Cu,Primer} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Primer}$$

Subtitusi,

$$P_{Cu,Primer} = (1{,}756^2 + 2{,}102^2 + 1{,}630^2) \times 15{,}61$$

$$P_{Cu,Primer} = \mathbf{158{,}579\ Watt}$$

- Rugi-rugi Total:

$$P_{loss\ (siang)} = P_{cu\ sekunder} + rugi\ inti + P_{cu\ primer}$$

$$P_{loss\ (siang)} = 157{,}462 + 210 + 158{,}579$$

$$P_{loss\ (siang)} = \mathbf{526{,}041\ Watt}$$

b. Malam hari

- Rugi tembaga sekunder:

$$P_{Cu,Sec} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Sec}$$

Subtitusi,

$$P_{Cu,Sec} = (100{,}1^2 + 144{,}1^2 + 119{,}3^2) \times 0{,}0062$$

$$P_{Cu,Sec} = \mathbf{279{,}107\ Watt}$$

- Rugi tembaga primer:

$$P_{Cu,Primer} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_{Primer}$$

Subtitusi,

$$P_{Cu,Primer} = (2{,}002^{\ 2} + 2{,}883 + 2{,}387^2) \times 15{,}61$$

$$P_{Cu,Primer} = \mathbf{281{,}252\ Watt}$$

- Rugi-rugi Total:

$$P_{loss\ (malam)} = P_{cu\ sekunder} + rugi\ inti + P_{cu\ primer}$$

$$P_{loss\ (malam)} = 279{,}107 + 210 + 281{,}252$$

$$P_{loss\ (malam)} = \mathbf{770{,}359\ Watt}$$

4.2 Analisa Susut Energi

a. Susut Energi Siang

$E_{siang} = P_{loss\ (siang)}\ x\ 12\ jam$

$E_{siang} = 526{,}041\ x\ 12\ jam = \mathbf{6312{,}49\ Watt \approx 6{,}312\ kWh}$

b. Susut Energi Malam

$E_{malam} = P_{loss\ (malam)}\ x\ 12\ jam$

$E_{malam} = 770{,}359\ x\ 12\ jam = \mathbf{9244{,}30\ Watt \approx 9{,}244\ kWh}$

c. Susut Energi Perhari

$E_{hari} = E_{siang} + E_{malam} = 6{,}312 + 9{,}244 = \mathbf{15{,}556\ kWh}$

d. Susut Energi perbulan

$$E_{bulan} = 30\ x\ E_{hari} = 30 \times 15{,}556 = \mathbf{466{,}704\ kWh}$$

e. Perhitungan Biaya Susut Energi perhari

$$Biaya\ susut\ energi\ perhari = 1444{,}70\ x\ E_{hari}$$

$$Biaya\ susut\ energi\ perhari = Rp.\ 1444{,}70\ x\ 15{,}556$$

$$= \mathbf{Rp.\ 22.473{,}7} -$$

f. Perhitungan Biaya Susut Energi perbulan

$$Biaya\ susut\ energi\ perbulan = 1444{,}70\ x\ E_{bulan}$$

$$Biaya\ susut\ energi\ perbulan = 1444{,}70\ x\ 466{,}704$$

$$= \boldsymbol{Rp.674.247,26,-}$$

4.3 Analisa Penyeimbangan Arus

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. Penyeimbangan arus fasa juga berdampak pada rugi-rugi pada transformator, oleh karena itu dalam penelitian ini akan dianalisa dampak penyeimbangan arus fasa terhadap nilai rugi-rugi trafo, dan biaya susut daya transformator.

4.6.1 Penyeimbangan Arus

- **Siang Hari**

a. Arus Seimbang sisi Sekunder (Siang)

$$I_{sec} = \frac{87{,}8 + 105{,}1 + 81{,}5}{3} = 91{,}46\ A$$

b. Persentase pembebanan

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

$$\%I_{sec} = \frac{91{,}46}{230{,}9}\ x\ 100\% = 39{,}610\ \%$$

c. Arus beban primer

$$I_{pr} = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_{sec}}{100}$$

$$I_{pr} = \frac{4{,}62\ x\ 39{,}610}{100} = 1{,}829\ A$$

- **Malam Hari**

a. Arus Seimbang sisi Sekunder

$$I_{sec} = \frac{100{,}1 + 144{,}1 + 119{,}3}{3} = 121{,}16\ A$$

b. Persentase pembebanan (Malam)

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

$$\%I_{sec} = \frac{121{,}16}{230{,}9}\ x\ 100\% = 52{,}472\ \%$$

c. Arus beban primer

$$I_{pr} = \frac{I_{p(FL)}\ x\ \%\ I_{sec}}{100}$$

$$I_{pr} = \frac{4{,}62\ x\ 52{,}472}{100} = 2{,}424\ A$$

4.6.2 Perhitungan Rugi-rugi Daya Beban Seimbang

- Siang hari

a. Rugi tembaga Sekunder

$$P_{cu\ sekunder} = 3I_{sec}^2\ R_s$$

$$P_{cu\ sekunder} = 3 \times 91{,}46^2 \times 0{,}0062 = 155{,}587\ watt$$

b. Rugi tembaga primer

$$P_{cu\ primer} = 3I_{pr}^2\ R_p$$

$$P_{cu\ primer} = 3 \times 1{,}829^{\ 2} \times 15{,}61 = 156{,}827\ watt$$

c. Rugi Inti = 210 Watt

d. Rugi total Siang hari

$$P_{loss\ (siang)} = P_{cu\ sekunder} + rugi\ inti + P_{cu\ primer}$$

$$P_{loss\ (siang)} = 155{,}587 + 210 + 156{,}827 = \mathbf{522{,}415\ watt}$$

- Malam hari

a. Rugi tembaga Sekunder

$$P_{cu\ sekunder} = 3I_{sec}^2\ R_s$$

$$P_{cu\ sekunder} = 3 \times 121{,}16^{\ 2} \times 0{,}0062 = 273{,}043\ watt$$

b. Rugi tembaga primer

$$P_{cu\ primer} = 3I_{pr}^2\ R_p$$

$$P_{cu\ primer} = 3 \times 2{,}424^2 \times 15{,}61 = 275{,}162\ watt$$

c. Rugi Inti = 210 Watt

d. Rugi total Malam hari

$$P_{loss\ (malam)} = P_{cu\ sekunder} + rugi\ inti + P_{cu\ primer}$$

$$P_{loss\ (malam)} = 273{,}043 + 210 + 275{,}162 = \mathbf{758{,}205\ watt}$$

4.6.3 Perhitungan Susut Energi

- Susut energi siang hari

  $E_{siang} = P_{loss\ (siang)}\ x\ 12\ jam$
  $E_{siang} = 522{,}415\ x\ 12 = \mathbf{6268{,}98\ Wh \approx 6{,}268\ kWh}$
- Susut energi malam hari

  $E_{malam} = P_{loss\ (malam)}\ x\ 12\ jam$
  $E_{malam} = 758{,}205\ x\ 12 = \mathbf{9098{,}47\ Wh \approx 9{,}098\ kWh}$
- Susut energi per hari

  $E_{hari} = E_{siang} + E_{malam}$

  $E_{hari} = 6{,}268 + 9{,}098 = \mathbf{15{,}367\ kWh}$
- Susut energi per bulan

  $E_{bulan} = 30\ x\ E_{hari}$
  $E_{bulan} = 30\ x\ 15{,}367 = \mathbf{461{,}023\ kWh}$

4.6.4 Perhitungan Biaya Susut Energi

- Biaya pemakaian energi listrik = 1444,70 / kWh
- Biaya susut energi perhari

  $Biaya\ susut\ energi\ perhari = 1444{,}70\ x\ E_{hari}$

  $Biaya\ susut\ energi\ perhari = 1444{,}70\ x\ 15{,}367 = \mathbf{Rp.22.200{,}7}$
- Biaya susut energi perbulan

  $Biaya\ susut\ energi\ perbulan = 1444{,}70\ x\ E_{bulan}$

$Biaya\ susut\ energi\ perbulan = 1444{,}70\ x\ 461{,}023\ = \mathbf{Rp.666.039{,}9}$

4.6.5 Analisa Penghematan Energi Beban Seimbang dengan Tidak Seimbang

Dari hasil perhitungan rugi-rugi trafo dan ketidak seimbangan arus dengan perbandingan biaya susut energi, didapatkan hasil data sebagai berikut

Tabel 4. 3 Hasil Analisa Rugi-rugi Trafo

Kondisi Beban	Rugi-rugi trafo	
	Siang hari (Watt)	Malam hari (Watt)
Tidak Seimbang	526,041	770,359
Seimbang	522,415	758,205
Selisih	3,626	12,154

Tabel 4. 4 Hasil Analisa Rugi Energi dan Biaya Susut Energi

Kondisi Beban	Rugi Energi		Biaya Susut Energi	
	(kWh/hari)	kWh/bulan)	Per hari	Per bulan
Tidak Seimbang	15,556	466,704	Rp.22.473,7	Rp.674.247,26
Seimbang	15,367	461,023	Rp.22.200,7	Rp.666.039,9
Selisih	0,189	5,681	Rp.273	Rp.8.207,36

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil analisis analisis data pada trafo distribusi, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa **ketidakseimbangan pembebanan pada transformator distribusi SP022 PLN, ULP Sape, Penyulang Sari masih dalam batas yang diizinkan** oleh PLN. Berdasarkan **SPLN D5.004-1:2012**, batas maksimum ketidakseimbangan tegangan yang diperbolehkan adalah **kuang lebih 2%**, sedangkan batas maksimum ketidakseimbangan arus yang diperbolehkan adalah **hingga 20%**. Dari hasil perhitungan, persentase ketidakseimbangan beban pada transformator ini masih berada dalam rentang standar yang diizinkan, sehingga meskipun terdapat ketidakseimbangan, sistem masih dapat beroperasi dengan aman tanpa menyebabkan gangguan tegangan yang signifikan.
2. Ketidakseimbangan pembebanan memberikan dampak langsung terhadap peningkatan rugi-rugi daya dan susut energi listrik pada transformator distribusi. Pada kondisi beban tidak seimbang, rugi-rugi daya pada trafo meningkat menjadi **526,041 Watt pada siang hari** dan **770,359 Watt pada malam hari**. Hal ini menyebabkan total susut energi dalam kondisi tidak seimbang mencapai **466,704 kWh/bulan**, yang berdampak pada peningkatan biaya susut energi hingga **Rp 674.247,26/bulan**. Ketidakseimbangan ini menyebabkan distribusi arus yang tidak merata, yang berdampak pada peningkatan rugi-rugi tembaga akibat kenaikan arus pada salah satu atau lebih fasa, serta berpotensi menurunkan efisiensi operasional transformator dalam jangka panjang.
3. Jika dilakukan **Penyeimbangan Beban**, rugi-rugi daya dan susut energi mengalami sedikit penurunan dibandingkan kondisi tidak seimbang. Pada kondisi beban seimbang, rugi-rugi daya trafo berkurang menjadi **522,415**

Watt pada siang hari dan **758,205 Watt pada malam hari**. Total susut energi dalam kondisi seimbang mencapai **461,023 kWh/bulan**, yang berdampak pada sedikit penurunan biaya susut energi menjadi **Rp 666.039,9/bulan**. Meskipun selisih antara kondisi beban seimbang dan tidak seimbang relatif kecil, penyeimbangan beban tetap penting untuk menjaga stabilitas tegangan, mengoptimalkan efisiensi transformator, serta mengurangi potensi gangguan yang dapat terjadi akibat ketidakseimbangan beban dalam jangka panjang.

Dengan demikian, meskipun sistem ketidakseimbangan pembebanan pada transformator masih dalam batas standar yang diizinkan oleh PLN, tetap diperlukan pemantauan dan upaya penyeimbangan beban secara berkala guna meminimalkan rugi-rugi daya dan menjaga kualitas pasokan listrik bagi pelanggan.

5.2 Saran

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

1. **Optimasi Ketidakseimbangan Beban**

   Disarankan untuk melakukan pemerataan beban pada setiap fasa agar ketidakseimbangan beban tetap berada pada batas toleransi atau bahkan lebih kecil dari standar maksimal 20%. Langkah ini dapat dilakukan dengan mengidentifikasi beban-beban tertentu yang menyebabkan ketidakseimbangan dan memindahkan sebagian beban dari fasa yang lebih tinggi ke fasa yang lebih rendah.

2. **Peningkatan Efisiensi Operasional**

   Evaluasi rugi-rugi daya secara berkala untuk memastikan performa trafo tetap optimal. Jika rugi-rugi cenderung meningkat, dapat dilakukan pemeriksaan teknis pada trafo, seperti pengecekan isolasi, kabel, atau sambungan.

3. **Manajemen Beban pada Malam Hari**

   Mengingat ketidakseimbangan beban dan rugi-rugi lebih tinggi pada malam hari, disarankan untuk meninjau distribusi beban pelanggan yang

aktif pada waktu tersebut, terutama beban rumah tangga atau industri yang menggunakan daya besar.

4. **Sosialisasi Kesadaran Pelanggan**

   Edukasi kepada pelanggan terkait pentingnya manajemen penggunaan daya yang efisien dan berimbang, sehingga dapat membantu menjaga stabilitas sistem distribusi secara keseluruhan.

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
UNISSULA
جامعة سلطان أجونج الإسلامية

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Leonardo Latupeirissa dan G. Valentino Titaley, "ANALYSIS OF THE EFFECT OF LOAD IMBALANCE ON NEUTRAL CURRENT AND POWER LOSSES IN DISTRIBUTION TRANSFORMER," vol. 3, no. 4, Jan 2023.

[2] A. D. Wirawan, Junaidi, dan M. I. Arsyad, "ANALISA PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL DAN LOSSES PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PENYULANG PANGSUMA PT. PLN (PERSERO) RAYON MEMPAWAH," 2021.

[3] O. A. Osahenvemwen dan Okhumeode, "The Effects of Unbalanced Load in Power Distribution Sub-Station Network," vol. 3, no. 5, hlm. 1–11, Jul 2020, [Daring]. Tersedia pada: www.iarjournals.com

[4] J. Trunojoyo Blok M-, K. Baru, dan L. K. Direksi, "POWER QUALITY (REGULASI HARMONISA, FLICKER DAN KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN) PT PLN (Persero)."

[5] M. Ridwan, Y. Ridal, dan R. Rauf, "ANALISA PENGARUH PEMELIHARAAN PREVENTIF PADA PENYULANG GASAN DI PT. PLN (PERSERO) ULP PARIAMAN," *E-Mail Teknik Jurnal*, vol. 4, hlm. 33–37, Mei 2024.

[6] N. Soedjarwanto, K. E. Kines, dan S. A. Aulia, "ANALISIS SUSUT DAYA (LOSSES) PADA PENYULANG RAYAP PT PLN (PERSERO) UID LAMPUNG BERBASIS APLIKASI ETAP 19.0.1," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 2, Apr 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i2.4072.

[7] R. Tambara Ginting, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP," *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri)*, vol. 6, no. 2, hlm. 81–89, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9734.

[8] A. Yuana Dewi Rachman, D. Teknik Elektro, dan M. Teknik Elektro, "PERENCANAAN SALURAN UDARA TEGANGAN MENENGAH

(SUTM) 20 kV PADA KOMLEK PERKEBUNAN AMP (Agra Masang Perkasa) Bawan Lubuk Basung Oleh," vol. 1, no. 2, 2012, [Daring]. Tersedia pada: http://www.novapdf.com/

[9] A. Spencer Deeng, G. M. Ch Mangindaan, dan L. S. Patras, "STUDI KELAYAKAN OPERASI PERENCANAAN UPRATING SUTM PADA PENYULANG SK 2 & SK 4 DI GARDU INDUK KAWANGKOAN DENGAN METODE SIMULASI ETAP 12.6.0," Jan 2022.

[10] M. Avif, A. H. Andriawan, dan G. Dimas Prenata, "ANALISIS PEMBEBANAN TRANSFORMATOR DAYA 300 KVA DI INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH PT. SIER," 2022.

[11] K. Rohmat dan M. Riyadi, "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PT. PLN (PERSERO) UPDL PANDAAN," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 25, no. 4, hlm. 186–192, Des 2023, doi: 10.14710/transmisi.25.4.186-192.