

**ANALISIS PENYIMBANGAN BEBAN SECARA
MANUAL PADA TRAFO 50 KVA PNIAI007
PENYULANG CEMARA DI PT PLN (PERSERO) ULP
ENAROTALI**

LAPORAN TUGAS AKHIR

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



OLEH :

RANGGA BISMANTARA

NIM. 30602200227

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

2025

**ANALYSIS OF MANUAL LOAD BALANCING ON 50
KVA PNIAI007 DISTRIBUTION TRANSFORMER OF
CEMARA FEEDER AT PT PLN (PERSERO) ULP
ENAROTALI**

FINAL PROJECT

Proposed To Complete The Requirement To Obtain A Bachelor'S Degree (S1) At
Departement Of Industrial Engineering, Faculty Of Industrial Technology,
Universitas Islam Sultan Agung Semarang



Arranged By :

RANGGA BISMANTARA

NIM. 30602200227

**ELECTRICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rangga Bismantara
NIM : 30602200227
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang dengan judul **“ANALISIS PENYIMBANGAN BEBAN SECARA MANUAL PADA TRAFO 50 KVA PNIAI007 PENYULANG CEMARA DI PT PLN (PERSERO) ULP ENAROTALI”**, adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

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

Semarang, 10 Juli 2025

Yang Menyatakan



Rangga Bismantara

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENYIMBANGAN BEBAN SECARA MANUAL PADA TRAFO 50 KVA PNIAI007 PENYULANG CEMARA DI PT PLN (PERSERO) ULP ENAROTALI” ini disusun oleh:

Nama : RANGGA BISMANTARA
NIM : 30602200227
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 10 Juli 2025

Pembimbing I



Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D.
NIDN : 0628097501

Mengetahui,
Ka. Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, ST., MT.
NIDN : 0607018501



LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENYIMBANGAN BEBAN SECARA MANUAL PADA TRAFO 50 KVA PNIAI007 PENYULANG CEMARA DI PT PLN (PERSERO) ULP ENAROTALI” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 10 Juli 2025

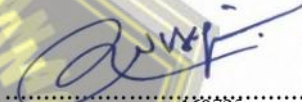
Tim Penguji

Tanda Tangan

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

NIDN : 0614117701

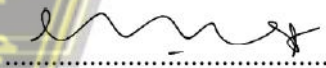
Ketua Penguji


.....
160725

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

NIDN : 0618066301

Penguji I


.....

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

NIDN : 0628097501

Penguji II


.....

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rangga Bismantara
NIM : 30602200227
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS PENYIMBANGAN BEBAN SECARA MANUAL PADA TRAFO 50 KVA PNIAI007 PENYULANG CEMARA DI PT PLN (PERSERO) ULP ENAROTALI”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, 10 Juli 2025

Yang Menyatakan



Rangga Bismantara

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah rabbil ‘alamin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta’ala atas segala rahmat, hidayah, dan inayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul: “Analisis Penyeimbangan Beban Secara Manual Pada Trafo 50 KVA PNIAI007 Penyulang Cemara Di PT PLN (Persero) ULP Enarotali”.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST., MT., IPU., ASEAN, Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Bapak Arief Marwanto, ST., M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran dan kebijaksanaan telah memberikan arahan, bimbingan, serta motivasi selama proses penyusunan tugas akhir ini.
5. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan motivasi selama masa perkuliahan. Tak lupa kepada seluruh staf Teknik Elektro yang senantiasa membantu dalam urusan administratif dan teknis.
6. Ayah, Ibu, serta saudari penulis tercinta yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dan dukungan moril selama penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Adelia Hazrati Subiagto, pasangan yang senantiasa mendampingi dan memberi semangat. Terima kasih atas dukungan, doa, dan ketulusan yang menjadi sumber motivasi selama proses ini.

8. Pegawai ULP Enarotali dan teman-teman yang turut memberikan bantuan dan semangat selama proses penyusunan laporan ini.

Penulis berharap laporan ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi pihak-pihak yang membutuhkan. Penulis juga menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang.

Semarang, 10 Juli 2025

Yang Menyatakan



Rangga Bismantara



Daftar Isi

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH.....	iv
KATA PENGANTAR	v
Daftar Isi.....	vii
Daftar Gambar.....	xi
Daftar Tabel	xii
ABSTRAK	xiii
BAB I: Latar Belakang	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II: Tinjauan Pustaka Dan Dasar Teori	6
2.1 Tinjauan Pustaka	6
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik.....	7
2.2.2 Sistem Jaringan Distribusi Primer	8
2.2.2.1 Sistem Saluran Distribusi Radial.....	9
2.2.2.2 Sistem Saluran Distribusi Loop.....	9
2.2.2.3 Sistem Saluran Distribusi Spindel.....	10
2.2.3 Sistem Jaringan Distribusi Sekunder	11
2.2.4 Transformator Distribusi	11

2.2.4.1	Prinsip Kerja Transformator	12
2.2.4.2	Transformator Berdasarkan Fungsi.....	12
2.2.4.3	Bagian-bagian Trafo.....	13
2.2.4.3.1	Kumparan.....	14
2.2.4.3.2	Pusat Inti	14
2.2.4.3.3	Minyak Trafo	14
2.2.4.3.4	Bushing Trafo	15
2.2.4.3.5	Jenis Pendinginan Trafo.....	15
2.2.5	Transformator 3 Fasa.....	16
2.2.5.1	Hubungan Bintang	16
2.2.5.2	Hubungan Segitiga.....	17
2.2.5.3	Hubungan Delta Terbuka (<i>Open-Delta Connection</i>).....	18
2.2.5.4	Hubungan Zig Zag	18
2.2.5.5	Belitan Terbuka (<i>Open Windings</i>)	19
2.2.6	Kelompok Vektor (<i>Vector Group</i>) Transformator Tenaga	19
2.2.7	Daya	19
2.2.8	Konsep Segitiga Daya	20
2.8.1	Daya Aktif (P).....	20
2.8.2	Daya Reaktif (Q).....	20
2.8.3	Daya Kompleks (S).....	21
2.2.9	Faktor Daya (ϕ).....	21
2.2.10	Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator	22
2.2.11	Pembebanan Transformator	23
2.2.12	Ketidakseimbangan Beban.....	23
2.2.13	Perhitungan Ketidakseimbangan Beban	24
2.2.14	Arus Netral	26
2.2.15	Metode Penyeimbangan Berdasarkan Dua Titik Waktu	27
BAB III: Metodologi Penelitian.....		29
3.1	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	29

3.2	Objek Penelitian	29
3.3	Jenis dan Metode Penelitian	30
3.4	Metode Pengambilan Data	31
3.4.1	Studi Literatur	31
3.4.2	Observasi	31
3.4.3	Wawancara	32
3.5	Langkah Penelitian	32
3.6	Diagram Alir Penelitian	33
3.7	Data Pengukuran Gardu PNIAI007	34
3.8	Upaya Penyeimbangan Beban	37
3.8.1	Pertimbangan Pemindahan Beban dan Pelaksanaan Penyeimbangan Beban	37
BAB IV: Hasil Dan Pembahasan		40
4.1	Gambaran Umum Objek Penelitian	40
4.2	Analisis Ketidakseimbangan Beban Sebelum Penyeimbangan	41
4.2.1	Perhitungan Persentase Pembebanan Trafo Sebelum Penyeimbangan	41
4.2.2	Perhitungan Tingkat Ketidakseimbangan Beban Sebelum Penyeimbangan Beban	44
4.2.3	Rugi – Rugi Netral Dan Persentase <i>Loss</i> Netral Akibat Arus Pada Penghantar Netral Sebelum Penyeimbangan Beban	45
4.3	Analisis Hasil Penyeimbangan Beban	47
4.3.1	Perhitungan Persentase Pembebanan Trafo Setelah Penyeimbangan	48
4.3.2	Perhitungan Tingkat Ketidakseimbangan Beban Setelah Penyeimbangan Beban	50
4.3.3	Rugi – Rugi Netral Dan Persentase <i>Loss</i> Netral Akibat Arus Pada Penghantar Netral Setelah Penyeimbangan Beban	52
4.4	Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan Beban	54
4.4.1	Persentase Pembebanan Gardu Distribusi PNIAI007	54

4.4.2	Tingkat Ketidakseimbangan Arus Gardu Distribusi PNIAI007	55
4.4.3	Arus Netral Gardu Distribusi PNIAI007.....	56
4.4.4	Rugi-Rugi Daya dan %Loss Pada Penghantar Netral Gardu Distribusi PNIAI007	56
BAB V: Penutup		58
5.1	Kesimpulan.....	58
5.2	Saran.....	59
Daftar Pustaka		60



Daftar Gambar

Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik (Rihi, 2023)	8
Gambar 2.2 Sistem saluran distribusi radial (Rihi, 2023).....	9
Gambar 2.3 Sistem saluran distribusi loop (Rihi, 2023).....	10
Gambar 2. 4 Sistem saluran distribusi spindel (Rihi, 2023)	10
Gambar 2.5 Sistem jaringan distribusi sekunder	11
Gambar 2.6 Teori Dasar Transformator (Ermawanto, 2013).....	12
Gambar 2.7 Bagian Inti pada Trafo (Iftiar, 2024).....	14
Gambar 2.8 Hubungan Star (Gonen, 2008)	17
Gambar 2.9 Hubungan Segitiga (Gonen, 2008).....	18
Gambar 2.10 Rangkaian Zig zag sekunder (Gonen, 2008).....	19
Gambar 2.11 Segitiga Daya (Okriyanto, 2019)	20
Gambar 2.12 Gelombang Leading (Soetiadi, 2023)	22
Gambar 2.13 Gelombang Lagging (Soetiadi, 2023)	22
Gambar 2.14 (a) Vektor Diagram Arus dalam keadaan seimbang (b) Vektor diagram arus yang tidak seimbang (PT. PLN (persero) UBSP3BJB, 1985).....	24
Gambar 2.15 Diagram pengawatan pengukuran beban dan tegangan gardu distribusi (Ardhianto dkk., 2023).....	28
Gambar 3.1 Name Plate Trafo PNIAI007 Merek Trafindo (PT. PLN (Persero) ULP Enarotali, 2025).....	29
Gambar 3.2 Gambar SLD Gardu Distribusi PNIAI 007	30
Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 3.4 Pelaksanaan Penyeimbangan Beban di Lapangan	38
Gambar 4.1 Grafik Persentase Pembebanan Gardu Distribusi PNIAI007.....	54
Gambar 4.2 Grafik Tingkat Ketidakseimbangan Arus Gardu Distribusi PNIAI007	55
Gambar 4.3 Grafik Arus Netral Gardu Distribusi PNIAI007	56
Gambar 4.4 Grafik Rugi-rugi Daya Netral	56
Gambar 4.5 Grafik Loss pada Penghantar Netral	57

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Standar persentase ketidakseimbangan beban menurut SE No:17:14 ...	25
Tabel 3.1 Pengukuran Arus Gardu PNIAI007	35
Tabel 3. 2 Pelanggan Yang Rencana Akan Dipindahkan Dari Fasa R ke S dan T	39
Tabel 4.1 Data Pengukuran Gardu PNIAI007 Sebelum Penyeimbangan Beban...	41
Tabel 4.2 Data Pengukuran Gardu PNIAI007 Setelah Penyeimbangan Beban.....	47



ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi tiga fasa dapat menyebabkan peningkatan arus netral dan rugi daya, yang berdampak pada menurunnya efisiensi serta keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan beban, besarnya rugi daya akibat arus netral, serta mengevaluasi efektivitas penyeimbangan beban menggunakan pendekatan manual melalui metode dua titik waktu (WBP dan LWBP) pada trafo PNIAI007 di PT PLN (Persero) ULP Enarotali.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan studi kasus. Data diperoleh melalui pengukuran langsung arus beban dan arus netral, yang selanjutnya dianalisis untuk menghitung tingkat ketidakseimbangan serta rugi daya sebelum dan sesudah penyeimbangan. Hasil perhitungan manual digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi efektivitas redistribusi beban secara teknis.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode penyeimbangan dua titik waktu secara manual mampu mengurangi ketidakseimbangan beban secara signifikan. Ketidakseimbangan yang awalnya di atas 29% menurun menjadi 2,47% (siang) dan 1,21% (malam). Arus netral juga menurun dari 37,81 A menjadi 14,58 A pada siang hari, serta dari 51,76 A menjadi 19,83 A pada malam hari. Rugi daya akibat arus netral berkurang lebih dari 85%, yang menunjukkan peningkatan efisiensi distribusi secara nyata.

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan manual menggunakan metode penyeimbangan dua titik waktu efektif dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan transformator distribusi.

Kata kunci: Ketidakseimbangan Beban, Arus Netral, Rugi Daya, Penyeimbangan Dua Titik Waktu

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem distribusi merupakan bagian yang sangat penting dalam jaringan tenaga listrik karena berhubungan langsung dengan konsumen akhir. Seiring dengan meningkatnya pembangunan di berbagai sektor, PT PLN (Persero) dituntut untuk menyediakan pasokan listrik yang andal, stabil, dan berkelanjutan sesuai kebutuhan pelanggan. Keberlangsungan suplai listrik menjadi syarat utama dalam menunjang aktivitas masyarakat. Namun, dalam pelaksanaannya, sering terjadi pembagian beban yang tidak merata, sehingga menyebabkan ketidakseimbangan beban yang bisa merugikan PLN baik secara teknis maupun secara ekonomi (Sutikno, 2018).

Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi umumnya disebabkan oleh pola penyambungan Sambungan Rumah (SR) satu fasa yang tidak memperhatikan pembagian beban yang seimbang antar fasa pada trafo distribusi. Hal ini juga terjadi pada Trafo PNIAI007 di Penyulang Cemara, di mana hasil pengamatan dan pengukuran lapangan menunjukkan bahwa sebagian besar pelanggan SR terkonsentrasi pada fasa R, dengan arus mencapai 80,4 A, jauh lebih besar dibandingkan fasa S (38,53 A) dan fasa T (48,08 A) pada jam puncak (19.00 WIT). Ketimpangan distribusi beban ini diperparah oleh pertumbuhan pelanggan baru yang tidak diimbangi dengan redistribusi beban antar fasa secara berkala. Apabila ketidakseimbangan ini tidak segera ditangani, maka akan menyebabkan peningkatan arus netral, rugi-rugi daya (losses), serta penurunan kemampuan transformator dalam melayani beban secara optimal. Arus netral yang tinggi juga menyebabkan pemanasan berlebih pada penghantar netral dan berpotensi memperpendek umur transformator (Sutikno, 2018).

Ketidakseimbangan beban antar fasa (R, S, dan T) dapat mengakibatkan arus mengalir pada konduktor netral transformator. Kondisi ini memicu peningkatan rugi daya pada saluran distribusi dan berdampak pada menurunnya efisiensi sistem secara keseluruhan. Apabila dibiarkan berlangsung dalam jangka waktu lama, hal ini bisa mengganggu keandalan sistem distribusi listrik dan menurunkan tingkat kepuasan pelanggan (Novfowan dkk., 2023).

PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Enarotali merupakan unit pelayanan distribusi tenaga listrik yang berada di bawah naungan Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Nabire. Wilayah kerja ULP Enarotali disuplai oleh Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Deiyai melalui tiga penyulang, salah satunya adalah Penyulang Cemara. Penyulang ini memiliki panjang saluran sekitar 63,08 kilometer sirkit (kms) dan menyuplai 38 unit trafo distribusi (PT. PLN (Persero) ULP Enarotali, 2025).

Berdasarkan hasil analisis awal di lapangan, penyebab dominan ketidakseimbangan beban pada trafo PNIAI007 adalah distribusi Sambungan Rumah (SR) satu fasa yang terkonsentrasi pada fasa R. Ketidakseimbangan ini tidak hanya disebabkan oleh penyambungan awal yang tidak proporsional, tetapi juga diperparah oleh pertumbuhan beban pelanggan baru yang tidak diikuti dengan evaluasi ulang terhadap penyebaran beban tiap fasa. Tidak dilakukannya redistribusi beban secara berkala menyebabkan penumpukan beban pada salah satu fasa, yang kemudian meningkatkan arus netral dan menurunkan efisiensi kerja transformator.

Berdasarkan hasil perhitungan arus pada trafo PNIAI007 di Penyulang Cemara, ditemukan tingkat ketidakseimbangan beban yang cukup tinggi, yaitu sebesar 30,26% pada pukul 10.00 dan 29,61% pada pukul 19.00. Nilai ini melebihi batas toleransi maksimal ketidakseimbangan arus sebesar 10% yang telah ditetapkan dalam Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014. Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk melakukan tindakan penyeimbangan beban guna menjaga kinerja transformator tetap optimal, meminimalkan rugi daya, serta meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik di wilayah tersebut.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyeimbangkan beban adalah metode dua titik waktu, di mana beban pada masing-masing fasa jurusan penyulang tegangan rendah diukur pada saat kondisi beban puncak dan luar puncak. Data hasil pengukuran ini kemudian dijadikan acuan dalam menentukan jumlah beban yang akan dialihkan dari fasa yang kelebihan beban ke fasa yang bebannya lebih ringan. Metode ini telah terbukti efektif melalui berbagai studi dalam meratakan distribusi beban antar fasa, menurunkan arus netral, serta mengurangi rugi daya pada sistem (Pranoto dkk., 2020).

Selain memberikan manfaat praktis bagi pihak PLN, penelitian ini juga memiliki nilai tambah dalam pengembangan metode distribusi energi yang lebih efisien di ranah akademik. Berdasarkan hal tersebut, penulis terdorong untuk mengangkat topik penelitian dengan judul *"Penyimbangan Beban Secara Manual Pada Trafo 50 KVA PNIAI007 Penyulang Cemara Di PT PLN (Persero) ULP Enarotali"*. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan sumbangsih terhadap peningkatan efisiensi penyaluran tenaga listrik serta mendukung keandalan pelayanan distribusi di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Enarotali.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka dirumuskan beberapa pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi ketidakseimbangan beban pada transformator PNIAI007 di PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Enarotali?
2. Bagaimana pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya akibat arus netral pada transformator PNIAI007?
3. Bagaimana dampak penerapan metode penyeimbangan dua titik waktu dalam mengurangi ketidakseimbangan beban pada trafo PNIAI007?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan yang terlalu luas, maka penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Penelitian ini hanya dilakukan pada satu unit trafo distribusi, yaitu PNIAI007 yang berada di penyulang Cemara ULP Enarotali. Data yang dianalisis meliputi arus beban pada masing-masing fasa (R, S, T), tegangan, dan faktor daya, yang diperoleh melalui pengukuran saat waktu beban puncak (WBP) dan luar beban puncak (LWBP). Penelitian ini tidak mencakup analisis harmonisa, total rugi daya jaringan, atau pengaruh suhu lingkungan terhadap kinerja trafo.
2. Rugi-rugi daya yang dihitung dalam penelitian ini hanya terbatas pada rugi daya akibat arus netral, dan tidak mencakup rugi daya lainnya seperti rugi inti (core loss) maupun rugi tembaga (copper loss).

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui kondisi ketidakseimbangan beban pada transformator PNIAI007 di PT PLN (Persero) ULP Enarotali.
2. Mengetahui besar rugi daya yang ditimbulkan akibat arus netral pada transformator PNIAI007.
3. Menganalisis dampak penerapan metode penyeimbangan dua titik waktu dalam upaya pengurangan ketidakseimbangan beban.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

- Bagi PT PLN (Persero): Memberikan masukan teknis dalam pengelolaan distribusi beban agar lebih seimbang, sehingga dapat meningkatkan efisiensi transformator, mengurangi rugi-rugi daya, serta menjadi acuan awal dalam evaluasi operasional transformator distribusi.
- Bagi Konsumen: Meningkatkan keandalan pasokan listrik dan mengurangi potensi gangguan akibat ketidakseimbangan beban, sehingga kualitas daya listrik yang diterima menjadi lebih stabil dan andal.
- Bagi Peneliti dan Akademisi: Menjadi bahan referensi dan dasar pengembangan penelitian lebih lanjut terkait optimasi distribusi tenaga listrik serta evaluasi teknis pada sistem distribusi secara manual berdasarkan data lapangan.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan. Bagian ini menjadi kerangka dasar yang menjelaskan alasan dan arah dari penelitian yang dilakukan.

BAB II : KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini memuat kajian literatur dan teori-teori dasar yang mendukung penelitian, seperti teori mengenai transformator

distribusi, ketidakseimbangan beban, arus netral, rugi daya, serta metode penyeimbangan beban dua titik waktu. Selain itu, dijelaskan pula standar teknis yang dijadikan acuan dalam analisis.

BAB III : METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, mulai dari lokasi dan waktu penelitian, teknik pengumpulan data, instrumen yang digunakan, hingga langkah-langkah pelaksanaan penyeimbangan beban berdasarkan metode dua titik waktu (WBP–LWBP).

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data hasil pengukuran arus beban pada masing-masing fasa, perhitungan nilai ketidakseimbangan, arus netral, dan rugi daya sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan. Pembahasan dilakukan secara kuantitatif berdasarkan hasil perhitungan dan pengamatan di lapangan.

BAB V : KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, serta saran-saran untuk pihak terkait sebagai bahan pertimbangan dalam meningkatkan efisiensi distribusi tenaga listrik melalui metode manual berbasis data lapangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian oleh Yuda Iftiar (2024) yang berjudul “Analisis Pembebanan Trafo Distribusi 200 kVA 20kV/400V Wilayah Ronggowarsito dari Penyulang 5 Tambak Lorok Milik PT. PLN (Persero) UP3 Semarang”, membahas tentang analisis beban pada transformator distribusi tiga fasa. Penelitian ini mencakup pengukuran arus per fasa dan peninjauan beban pelanggan yang terhubung pada penyulang. Hasilnya menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban antar fasa yang menyebabkan peningkatan arus netral dan kerugian energi. Hal ini menggarisbawahi pentingnya evaluasi pembebanan trafo secara berkala sebagai dasar untuk strategi penyeimbangan.

Sejalan dengan itu, Danang Ariq Wijaya (2019) dalam penelitiannya yang berjudul “Analisa Ketidakseimbangan Beban terhadap Arus Netral pada Transformator 2500 kVA Departemen Spinning 4 di PT. Asia Pacific Fiber, Tbk.”, menekankan keterkaitan langsung antara ketidakseimbangan beban dan besarnya arus netral. Penelitian ini menunjukkan bahwa beban yang tidak merata pada ketiga fasa mengakibatkan arus netral yang signifikan, yang berpotensi menyebabkan pemanasan kabel netral dan penurunan efisiensi sistem distribusi. Penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam pemahaman pentingnya monitoring arus netral dalam sistem kelistrikan industri.

Lebih lanjut, Rizky Dwi Putra Soetiadi (2023) dalam penelitiannya berjudul “Analisis Ketidakseimbangan Pembebanan Transformator Distribusi Tiga Fasa Wilayah Semarang Barat di Daerah Dworowati” mengkaji kondisi nyata ketidakseimbangan di lapangan dengan fokus pada variasi beban pelanggan yang tidak merata. Ia menunjukkan bahwa distribusi beban yang tidak proporsional antar fasa menyebabkan deviasi arus yang cukup besar, yang berdampak pada kinerja transformator dan peningkatan rugi-rugi daya. Penelitian ini menyarankan pengukuran langsung dan pemetaan ulang beban sebagai langkah awal menuju sistem distribusi yang lebih seimbang.

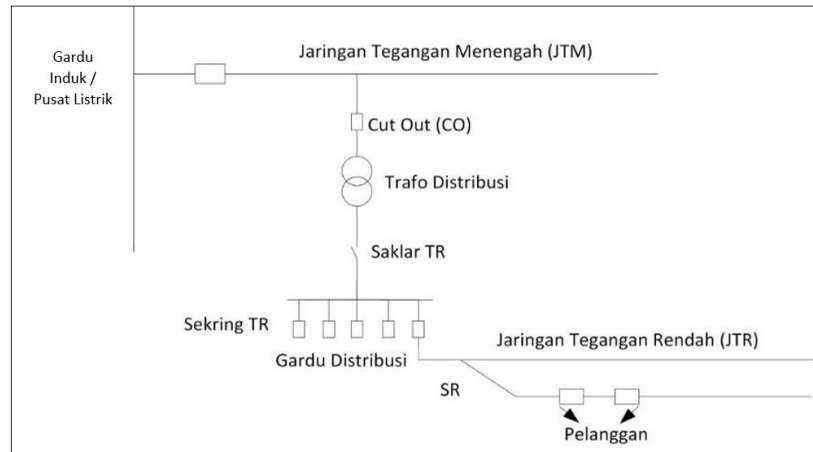
Sementara itu, pendekatan penyelesaian terhadap ketidakseimbangan beban diusulkan oleh Dhian Ardhianto, Budi Utama, dan Mohammad Arsyad (2020) dalam karya mereka “Penyeimbangan Beban Trafo Distribusi 3 Fasa pada Jaringan Tegangan Rendah (Studi Kasus PT. PLN (Persero) ULP Purwokerto Kota)”. Penelitian ini menerapkan metode pengukuran langsung saat beban puncak untuk mengidentifikasi beban fasa yang tidak seimbang, lalu dilakukan pemindahan beban secara manual ke fasa lain yang lebih ringan. Hasilnya menunjukkan perbaikan signifikan terhadap nilai arus netral dan peningkatan efisiensi distribusi listrik.

Metode praktis penyeimbangan beban juga diangkat oleh Sarwo Pranoto, Sofyan, dan Nadya Natasya Rusli (2020) dalam penelitian berjudul “Penyeimbangan Beban pada Trafo Distribusi Penyulang Akkarena di Unit Layanan Pelanggan Mattoanging PT. PLN (Persero)”. Mereka menggunakan metode dua titik waktu, yaitu saat beban puncak (WBP) dan luar beban puncak (LWBP), untuk menentukan beban aktual pada setiap fasa. Berdasarkan data ini, dilakukan redistribusi beban dengan tujuan menyeimbangkan arus antar fasa secara lebih optimal. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan dua titik waktu lebih adaptif terhadap variasi harian beban pelanggan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga yang berfungsi mengalirkan energi listrik dari pembangkit hingga ke konsumen akhir. Dalam sistem ini, terdapat dua jenis saluran utama, yaitu saluran distribusi primer (tegangan menengah) dan saluran distribusi sekunder (tegangan rendah). Energi listrik yang telah melewati jaringan distribusi primer akan mengalami penurunan tegangan di gardu distribusi, kemudian dialirkan melalui jaringan tegangan rendah untuk akhirnya disalurkan ke rumah-rumah pelanggan melalui sambungan rumah (SR). (Latupeirissa, Muskita, & Leihitu, 2018).



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik (Rihi, 2023)

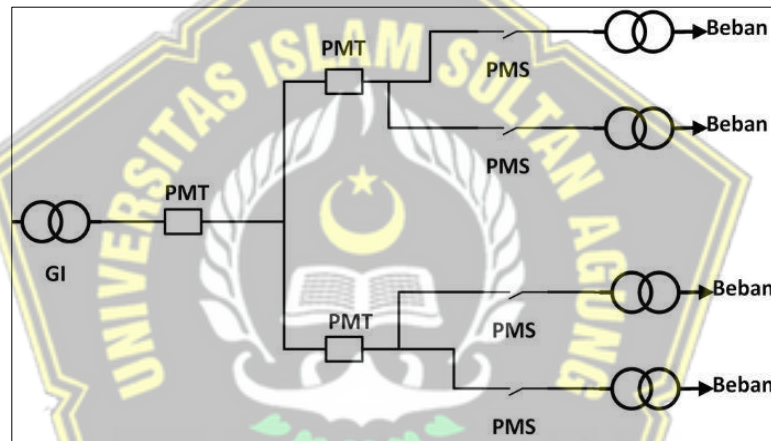
Tegangan listrik yang digunakan dalam proses distribusi ke konsumen bervariasi, menyesuaikan dengan jenis dan kebutuhan masing-masing pengguna. Konsumen dari sektor industri umumnya menerima suplai melalui tegangan menengah sebesar 20 kV, sedangkan pelanggan rumah tangga dilayani menggunakan tegangan rendah 220/380 V (Latupeirissa, Muskita, & Leihitu, 2018).

2.2.2 Sistem Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer berperan sebagai tahap awal dalam penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit langsung ke konsumen pada sistem distribusi langsung. Sementara itu, pada sistem distribusi tak langsung, jaringan ini berfungsi sebagai lanjutan dari jaringan transmisi sebelum energi listrik sampai ke pengguna akhir. Jaringan distribusi primer, yang juga dikenal sebagai Jaringan Distribusi Tegangan Tinggi (JDTT), umumnya beroperasi pada tegangan 20 kV. Di wilayah perkotaan, penggunaan tegangan di atas 20 kV tidak dianjurkan karena pada tegangan 30 kV dapat muncul efek korona yang berpotensi mengganggu perangkat komunikasi seperti radio, televisi, telepon, maupun sistem telekomunikasi lainnya (Suswanto, 2009). Terdapat tiga konfigurasi utama jaringan distribusi primer yang lazim digunakan dalam penyaluran energi listrik, yaitu:

2.2.2.1 Sistem Saluran Distribusi Radial

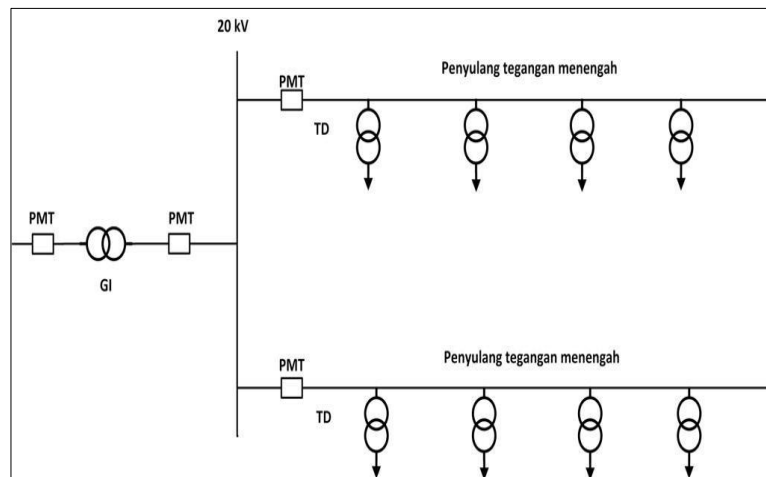
Saluran radial merupakan jenis sistem distribusi yang hanya memiliki satu jalur aliran daya menuju beban. Umumnya, sistem ini digunakan untuk melayani wilayah dengan kepadatan beban rendah hingga sedang. Dalam sistem radial, setiap feeder bekerja secara terpisah dan tidak saling terhubung satu sama lain dalam menyalurkan energi listrik. Sistem ini terdiri dari satu saluran utama yang berasal dari sumber atau gardu induk, lalu bercabang untuk menyuplai daya ke beban-beban yang ada. Suatu jaringan distribusi primer dikategorikan sebagai sistem radial apabila penyaluran energinya hanya berasal dari satu arah dan tidak memungkinkan menerima suplai dari sumber lainnya. Meskipun begitu, umumnya feeder utama memiliki percabangan menuju wilayah beban yang dilayaninya.



Gambar 2.2 Sistem saluran distribusi radial (Rihi, 2023)

2.2.2.2 Sistem Saluran Distribusi Loop

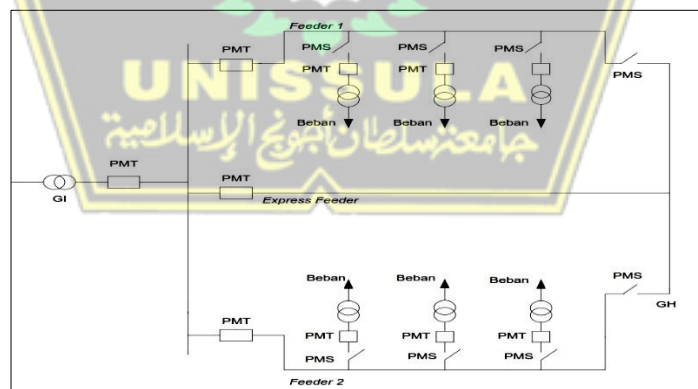
Konfigurasi loop merupakan sistem interkoneksi antara gardu distribusi yang membentuk jalur tertutup menyerupai lingkaran. Dalam konfigurasi ini, biasanya terdapat lebih dari satu busbar pada Gardu Induk (GI), dan masing-masing penyulangannya saling terhubung membentuk satu kesatuan rangkaian tertutup dengan GI. Salah satu keunggulan utama dari sistem ini adalah keandalan pasokan listrik yang lebih tinggi. Jika terjadi gangguan pada salah satu GI, penyulang tetap dapat menerima suplai energi dari GI lainnya yang masih beroperasi normal. Dengan demikian, perbaikan pada GI yang mengalami gangguan dapat dilakukan tanpa memutus pasokan listrik ke gardu distribusi.



Gambar 2.3 Sistem saluran distribusi loop (Rihi, 2023)

2.2.2.3 Sistem Saluran Distribusi Spindel

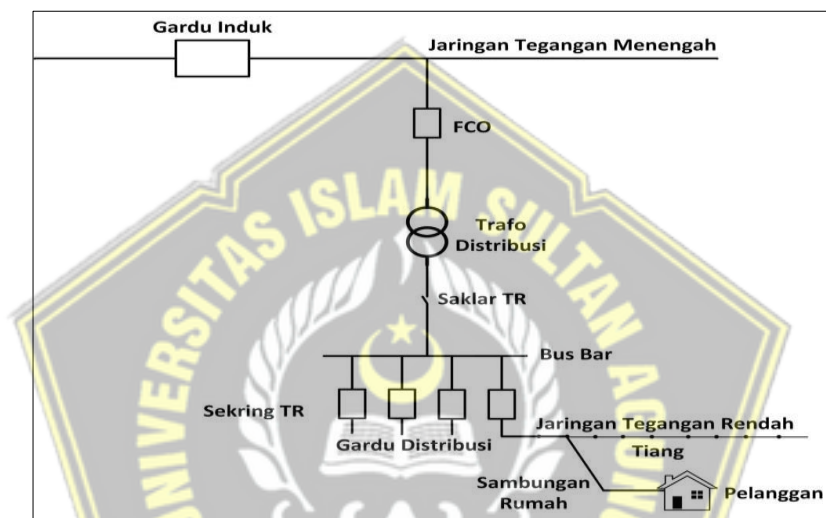
Sistem distribusi spindel merupakan pengembangan dari sistem distribusi tipe loop, dengan penambahan saluran utama yang semuanya terhubung ke satu titik pusat, yaitu gardu hubung (GH). Perbedaan utama antara sistem loop dan spindel terletak pada perhitungan ukuran penampang penghantar. Pada sistem loop, penghantar utama harus memiliki penampang yang cukup besar untuk menanggung seluruh beban jaringan. Sementara itu, dalam sistem spindel, ukuran penampang penghantar disesuaikan dengan beban tertinggi yang terdapat pada masing-masing saluran utama, bukan total keseluruhan beban.



Gambar 2. 4 Sistem saluran distribusi spindel (Rihi, 2023)

2.2.3 Sistem Jaringan Distribusi Sekunder

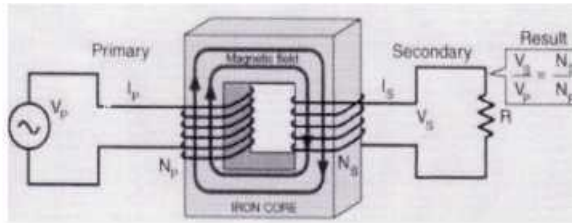
Jaringan distribusi sekunder beroperasi pada tegangan rendah. Sama seperti pada distribusi primer, dalam sistem ini juga diperlukan pertimbangan terkait kualitas pelayanan dan pengaturan tegangan. Distribusi sekunder merujuk pada jaringan yang mengalirkan energi listrik dari gardu distribusi menuju konsumen atau beban. Karena bertegangan rendah, sistem ini kerap disebut sebagai jaringan tegangan rendah. Penyaluran daya listrik pada sistem ini umumnya menggunakan konfigurasi radial, yang langsung menghubungkan gardu distribusi dengan pelanggan sebagai pengguna akhir energi listrik (Eri & Sofyan Putra, 2017).



Gambar 2.5 Sistem jaringan distribusi sekunder

2.2.4 Transformator Distribusi

Transformator adalah perangkat listrik yang digunakan untuk mengubah tingkat tegangan arus bolak-balik (AC) dari satu level ke level lainnya dengan memanfaatkan kopling magnetik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Perbandingan tegangan antara sisi primer dan sekunder sebanding dengan jumlah lilitan pada masing-masing kumparan, sementara arusnya berbanding terbalik. Komponen utama transformator terdiri dari inti besi berlapis dan dua kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder (Sentosa dkk., 2006)



Gambar 2.6 Teori Dasar Transformator (Ermawanto, 2013)

2.2.4.1 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip dasar kerja transformator mengacu pada hukum Ampere dan Faraday, yang menyatakan bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet, dan sebaliknya medan magnet yang berubah-ubah dapat menimbulkan arus listrik. Ketika kumparan primer dialiri arus listrik, akan terbentuk medan magnet yang bervariasi seiring waktu. Medan magnet ini kemudian menginduksi kumparan sekunder, sehingga menghasilkan tegangan akibat adanya perbedaan potensial pada kedua ujung kumparan. Fluks magnet yang mengalir dari kumparan primer menuju kumparan sekunder memiliki jumlah yang sama, sehingga terjadi proses induksi elektromagnetik pada kumparan sekunder (Sulasno, 2009).

2.2.4.2 Transformator Berdasarkan Fungsi

Berdasarkan fungsinya, transformator dibedakan menjadi beberapa jenis, di antaranya adalah transformator daya, transformator distribusi, transformator pengukuran, dan transformator elektronik.

a) Transformator Daya

Transformator daya digunakan sebagai peralatan utama dalam proses penyaluran energi listrik. Trafo jenis ini memiliki dua fungsi utama, yaitu untuk menaikkan tegangan listrik (*step-up*) dan menurunkan tegangan listrik (*step-down*). Transformator daya tidak dirancang untuk langsung mengalirkan listrik ke beban, karena pada sisi tegangan rendahnya masih memiliki tegangan yang lebih tinggi dari kebutuhan beban, sementara sisi tegangan tingginya digunakan dalam sistem transmisi. Sebagai *step-up transformer*, trafo ini digunakan untuk meningkatkan tegangan keluaran melebihi tegangan masukan, misalnya pada proses transmisi daya jarak jauh. Sebaliknya, jika digunakan sebagai *step-down*, trafo akan menurunkan tegangan keluaran agar sesuai dengan kebutuhan sistem distribusi atau konsumsi daya (Sulasno, 2009).

b) Transformator Distribusi

Transformator distribusi pada dasarnya memiliki prinsip kerja yang serupa dengan transformator daya, namun perbedaannya terletak pada tingkat tegangannya. Tegangan rendah pada transformator daya umumnya masih lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan tinggi pada transformator distribusi. Kedua sisi tegangan pada trafo distribusi merupakan tegangan distribusi, yakni terdiri dari tegangan menengah (TM) dan tegangan rendah (TR). Transformator jenis ini digunakan untuk menyalurkan energi listrik secara langsung kepada pelanggan (Sulasno, 2009). Jenis transformator distribusi yang paling umum digunakan adalah trafo step-down dengan spesifikasi 20/0,4 kV. Tegangan antar fasa pada sistem Jaringan Tegangan Rendah (JTR) adalah sebesar 380 Volt. Karena adanya penurunan tegangan (*voltage drop*) selama penyaluran, maka tegangan pada sisi keluaran trafo biasanya disetting sedikit lebih tinggi dari 380 Volt, agar tegangan yang diterima di titik beban tetap berada pada level 380 Volt (Kawihing dkk., 2013).

c) Transformator Ukur

Transformator jenis ini dirancang khusus untuk keperluan pengukuran arus (I) dan tegangan (V). Penggunaan transformator pengukuran diperlukan karena besarnya arus atau tegangan yang diukur tidak memungkinkan untuk diukur secara langsung menggunakan alat ukur seperti amperemeter atau voltmeter konvensional (Sulasno, 2009).

d) Transformator Elektronik

Transformator elektronik bekerja dengan prinsip yang sama seperti transformator daya, namun memiliki kapasitas daya reaktif yang jauh lebih kecil, yakni di bawah 300 VA. Transformator ini biasanya digunakan dalam rangkaian elektronik untuk kebutuhan daya skala kecil (Sulasno, 2009).

2.2.4.3 Bagian-bagian Trafo

Penggunaan transformator distribusi bertujuan untuk menurunkan tegangan tinggi dari sistem transmisi menjadi tegangan yang sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Trafo ini berperan penting dalam memastikan energi listrik dapat digunakan secara aman dan efisien oleh konsumen akhir. Secara umum, komponen utama dari transformator distribusi meliputi: kumparan (coil), inti trafo (core),

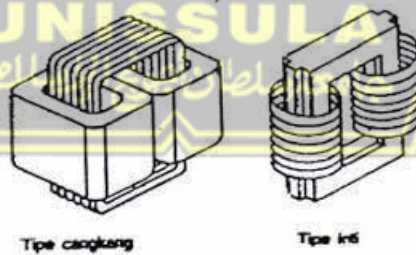
minyak isolasi (oli trafo), terminal sambungan atau bushing, serta sistem pendingin untuk menjaga suhu operasi trafo tetap stabil. (Khoirunisa, 2023).

2.2.4.3.1 Kumparan

Transformator terdiri dari dua kumparan utama, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Ketika arus dialirkan ke salah satu kumparan, dalam hal ini kumparan primer, maka akan terjadi perubahan gaya gerak listrik (GGL) yang diinduksi. Perubahan tersebut mengakibatkan timbulnya tegangan pada kumparan sekunder. Kumparan primer berfungsi sebagai sisi utama yang menghasilkan fluks magnetik, yang selanjutnya menginduksi kumparan sekunder sebagai sisi bantu, sehingga terjadi perbedaan tegangan pada kedua ujung kumparan sekunder (Khoirunisa, 2023).

2.2.4.3.2 Pusat Inti

Secara umum, inti transformator terbagi menjadi dua jenis, yaitu tipe inti (core type) dan tipe cangkang (shell type). Pada tipe inti, struktur utamanya terdiri dari lapisan pelindung berbentuk persegi panjang, dan kumparan dililitkan pada kedua sisi inti tersebut. Sementara itu, pada tipe cangkang, kumparan dililitkan pada bagian tengah inti yang dilapisi oleh struktur pelindung di sekelilingnya. Transformator dengan tipe cangkang umumnya memiliki ketahanan mekanik yang lebih tinggi dibandingkan tipe inti, terutama saat menghadapi gaya-gaya akibat gangguan seperti hubung singkat (Siregar, 2013)



Gambar 2.7 Bagian Inti pada Trafo (Iftiar, 2024)

2.2.4.3.3 Minyak Trafo

Di dalam transformator terdapat minyak isolasi yang berfungsi penting sebagai media pendingin untuk mengurangi panas yang timbul akibat gangguan pada sistem kontrol transformator, sekaligus berperan sebagai media isolasi atau pelindung internal. Minyak transformator umumnya mengandung senyawa

naftalen, parafin, dan aromatik. Beberapa keunggulan minyak transformator sebagai media isolasi cair antara lain:

1. Media isolasi cair memiliki ketebalan sekitar 1000 kali lebih besar dibandingkan media gas, sehingga mampu memberikan kekuatan dielektrik yang lebih tinggi.
2. Isolator cair mampu mengisi celah atau ruang di dalam transformator yang perlu diputuskan dari arus, dan secara bersamaan juga berperan dalam menghantarkan panas keluar akibat gangguan sistem.
3. Media cair memiliki sifat memperbaiki diri sendiri (*self-healing*) ketika terjadi pelepasan sebagian, sehingga meningkatkan keandalan sistem isolasi secara keseluruhan.(Nas, I, 2017).

2.2.4.3.4 Bushing Trafo

Untuk alasan keselamatan, konduktor bertegangan tinggi dialirkan melalui bagian yang dibumikan dengan celah terbuka seminimal mungkin, dan umumnya dilengkapi dengan pengait isolasi yang kuat yang disebut *bushing* (Khoirunisa, 2023). Sebagian besar bushing terdiri dari konduktor pusat dan bahan isolator (dielektrik) yang biasanya berbahan logam. Konduktor pusat berfungsi menyalurkan arus dari bagian dalam peralatan ke terminal luar dan dirancang untuk bekerja pada tegangan tinggi. Dengan bantuan sistem pengikat seperti *Zans*, penutup bushing dihubungkan dengan bodi peralatan listrik yang telah diarde. Kualitas dielektrik suatu bahan dinyatakan sebagai tegangan maksimum yang dapat diterima sebelum terjadi kerusakan isolasi, yang biasanya diukur dalam satuan Volt per meter (V/m). Nilai ini menunjukkan kemampuan suatu bahan dalam bertindak sebagai isolator listrik.

2.2.4.3.5 Jenis Pendinginan Trafo

Terdapat beberapa jenis sistem pendingin yang digunakan pada transformator, antara lain:

1) ONAN (*Oil Natural Air Natural*)

Sistem pendingin ini memanfaatkan sirkulasi alami oli dan udara. Pergerakan oli terjadi secara alami akibat perbedaan massa jenis antara oli panas dan oli dingin, sehingga menghasilkan sirkulasi tanpa bantuan alat tambahan. Pendinginan

berlangsung melalui perpindahan panas dari oli ke permukaan trafo, lalu diteruskan ke udara bebas.

2) ONAF (*Oil Natural Air Force*)

Pada sistem ini, oli tetap bersirkulasi secara alami seperti pada ONAN, namun proses pelepasan panas ke udara dibantu oleh kipas angin yang digerakkan oleh motor listrik. Umumnya, trafo akan beroperasi dengan sistem ONAN pada kondisi normal, dan beralih ke ONAF saat suhu meningkat. Jika suhu terus naik, kipas pendingin tambahan akan aktif secara otomatis untuk menjaga suhu tetap stabil.

3) OFAF (*Oil Force Air Force*)

Sistem OFAF menggunakan pompa untuk mengalirkan oli secara paksa melalui sistem pendingin. Di sisi lain, udara pendingin juga dialirkan secara paksa menggunakan kipas. Sistem ini lebih efektif digunakan pada transformator berkapasitas besar yang memerlukan pendinginan optimal secara terus-menerus. (Siregar, 2013)

2.2.5 Transformator 3 Fasa

Transformator tiga fasa umumnya digunakan dalam sistem tenaga listrik tiga fasa arus bolak-balik untuk mentransmisikan daya. Pada sisi primer dan sekunder, trafo ini memiliki lilitan yang secara fungsional setara dengan tiga buah transformator satu fasa. Ujung-ujung dari kumparan primer dan sekunder tersebut dapat dikonfigurasi dalam bentuk sambungan bintang (Y) atau segitiga (Δ), tergantung pada kebutuhan sistem.

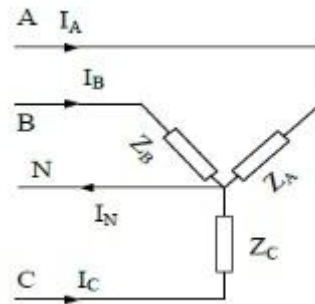
Berdasarkan jenis sambungannya, transformator tiga fasa dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu:

1. Transformator Hubung Bintang
2. Transformator Hubung *Delta*
3. Transformator hubung *Zig-Zag*

2.2.5.1 Hubungan Bintang

Hubungan bintang (Y) adalah konfigurasi sambungan di mana salah satu ujung dari setiap belitan transformator tiga fasa, atau dari masing-masing transformator satu fasa yang tergabung dalam sistem tiga fasa dengan tegangan nominal yang sama, dihubungkan ke satu titik pusat yang disebut titik netral. Sementara itu, ujung belitan lainnya dihubungkan ke terminal-terminal fasa sebagai

jalur keluaran daya listrik (SPLN 8-1:1991 / 4.10.1, IEC 60076-1: 3.10.1). Pada transformator 3 fasa hubungan Y, sudut pergeseran antar fasa IA – IB – IC adalah 120° (gambar 2.13)



Gambar 2.8 Hubungan Star (Gonen, 2008)

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad \text{atau} \quad I_{LL} = I_A + I_B + I_C \quad (2.1)$$

$$I_{LL} = I_{LN} \quad (2.2)$$

$$V_{LL} = V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} \quad (2.3)$$

$$V_{LL} = \sqrt{3} \cdot V_{LN} \quad (2.4)$$

Dimana,

V_{LL} = tegangan *line-to-line*

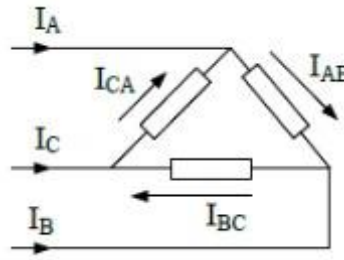
V_{LN} = tegangan *line-to-neutral*

I_{LL} = arus *line-to-line*

I_{LN} = arus *line-to-neutral*

2.2.5.2 Hubungan Segitiga

Hubungan segitiga (delta) merupakan konfigurasi sambungan di mana setiap belitan fasa transformator tiga fasa, atau belitan dari transformator satu fasa yang memiliki tegangan nominal sama dalam satu grup tiga fasa, dihubungkan secara seri satu dengan yang lain sehingga membentuk suatu rangkaian tertutup. Dalam sambungan ini, ujung akhir dari satu belitan dihubungkan langsung dengan awal belitan berikutnya, membentuk jalur sirkuit berbentuk segitiga tanpa titik netral. (SPLN 8-1:1991 / 4.10.2, IEC 60076-1:2000 / 3.10.2). Pada transformator 3 fasa hubungan Δ , sudut pergeseran antar fasa sama dengan hubungan Y (120°)



Gambar 2.9 Hubungan Segitiga (Gonen, 2008)

$$I_{LL} = I_A = I_B = I_C \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_{LL} = \sqrt{3} \cdot I_{LN} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$V_{LL} = V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$V_{LL} = V_{LN} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana,

V_{LL} = tegangan *line-to-line*

V_{LN} = tegangan *line-to-neutral*

I_{LL} = arus *line-to-line*

I_{LN} = arus *line-to-neutral*

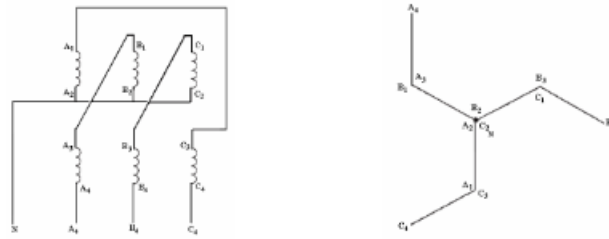
2.2.5.3 Hubungan Delta Terbuka (*Open-Delta Connection*)

Hubungan delta terbuka adalah konfigurasi sambungan pada transformator tiga fasa, atau pada tiga buah transformator satu fasa dengan tegangan nominal yang sama dalam sistem tiga fasa, di mana dua dari tiga belitan fasa dihubungkan secara seri membentuk sebagian dari rangkaian delta. Namun, salah satu sisi dari bentuk segitiga tersebut dibiarkan terbuka atau tidak dihubungkan, sehingga membentuk sistem dua fasa aktif dalam konfigurasi tiga fasa. (SPLN 8-1:1991 / 4.10.3, IEC 60076-1:2000 / 3.10.3)

2.2.5.4 Hubungan Zig Zag

Hubungan zig-zag (Z) adalah konfigurasi sambungan pada transformator tiga fasa di mana salah satu ujung dari setiap belitan fasa dihubungkan ke satu titik pusat yang disebut titik netral. Setiap belitan fasa dalam sistem ini dibagi menjadi dua bagian yang masing-masing menghasilkan tegangan induksi dengan sudut fasa yang berbeda. Umumnya, kedua bagian belitan tersebut memiliki jumlah lilitan yang sama, sehingga tetap seimbang dalam menghasilkan tegangan (SPLN 8-1:1991 / 4.10.4, IEC 60076-1:2000 / 3.10.4). Hubungan Z / zigzag merupakan

pengembangan dari hubungan Y, dimana hubungan ini diterapkan guna mengantisipasi kemungkinan beban fasa tidak seimbang pada hubungan Y.



Gambar 2.10 Rangkaian Zig zag sekunder (Gonen, 2008)

2.2.5.5 Belitan Terbuka (*Open Windings*)

Belitan terbuka merupakan, belitan – belitan fasa transformator 3 fasa yang tidak saling berhubungan di dalam transformator (SPLN 8-1:1991 / 4.10.5, IEC 60076-1:2000 / 3.10.5).

2.2.6 Kelompok Vektor (*Vector Group*) Transformator Tenaga

Konfigurasi sambungan belitan pada transformator tenaga dalam sistem tiga fasa dikenal dengan istilah kelompok vektor (*vector group*). Istilah ini mengacu pada perbedaan sudut fasa antara tegangan sisi primer dan sekunder yang dihasilkan oleh konfigurasi sambungan tertentu. Dalam praktiknya, terdapat berbagai jenis *vector group* yang digunakan untuk menyesuaikan kebutuhan sistem tenaga listrik. Di Indonesia, umumnya digunakan empat jenis *vector group* transformator tiga fasa, yaitu Yzn5, Dyn5, YNyn0, dan YNd5 (SPLN D3.002-1:2007 dan SPLN 50:1997).

2.2.7 Daya

Daya adalah ukuran seberapa cepat energi diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam konteks kelistrikan, daya listrik menggambarkan seberapa besar energi yang digunakan atau dikonsumsi dalam suatu rangkaian listrik dalam satuan waktu. Secara umum, besarnya daya listrik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = V \cdot I \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

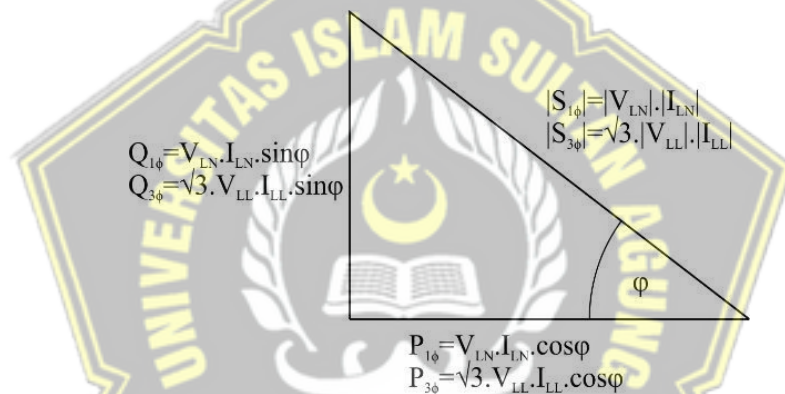
P = daya (*Watt*)

V= tegangan (*Volt*)

I = arus (*Ampere*)

2.2.8 Konsep Segitiga Daya

Dalam sistem kelistrikan arus bolak-balik (AC), terdapat tiga komponen utama daya yang muncul terutama pada beban yang memiliki impedansi (Z), yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). Ketiga jenis daya ini saling berhubungan dan dapat digambarkan dalam bentuk segitiga daya yang mengikuti prinsip dasar trigonometri. Hubungan ini menunjukkan bagaimana daya aktif dan daya reaktif membentuk daya total (kompleks) dalam suatu sistem.



Gambar 2.11 Segitiga Daya (Okriyanto, 2019)

2.8.1 Daya Aktif (P)

Daya aktif (P) merupakan komponen daya listrik yang benar-benar digunakan oleh beban, khususnya pada beban yang bersifat resistif, untuk melakukan kerja nyata seperti menghasilkan panas, cahaya, atau gerakan mekanik. Daya ini dinyatakan dalam satuan Watt (W) dan mewakili konsumsi energi yang efektif dalam suatu sistem. Persamaan umum untuk menghitung daya aktif adalah sebagai berikut:

$$P_{1\phi} = V_{LN} \cdot I_{LN} \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.10)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_{LL} \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.11)$$

2.8.2 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif (Q) adalah jenis daya listrik yang muncul akibat adanya induksi elektromagnetik dari beban yang memiliki sifat induktif atau kapasitif. Meskipun

daya ini tidak secara langsung digunakan untuk melakukan kerja nyata, namun keberadaannya tetap penting dalam mendukung proses pembentukan dan pemeliharaan medan listrik atau medan magnet dalam sistem tenaga listrik. Satuan yang digunakan untuk menyatakan daya reaktif adalah Volt Ampere Reaktif (VAr). Rumus umum yang digunakan untuk menghitung daya reaktif adalah:

$$Q_{1\phi} = V_{LN} \cdot I_{LN} \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.12)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_{LL} \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(2.13)$$

2.8.3 Daya Kompleks (S)

Daya kompleks (S) merupakan total daya dalam suatu sistem kelistrikan, yang diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu rangkaian arus bolak-balik. Daya ini mencakup komponen daya aktif dan daya reaktif secara keseluruhan. Satuan dari daya kompleks adalah Volt Ampere (VA). Adapun persamaan umum untuk menghitung daya kompleks adalah:

$$|S_{1\phi}| = |V_{LN}| \cdot |I_{LN}| \dots\dots\dots(2.14)$$

$$|S_{3\phi}| = \sqrt{3} \cdot |V_{LL}| \cdot |I_{LL}| \dots\dots\dots(2.15)$$

2.2.9 Faktor Daya (φ)

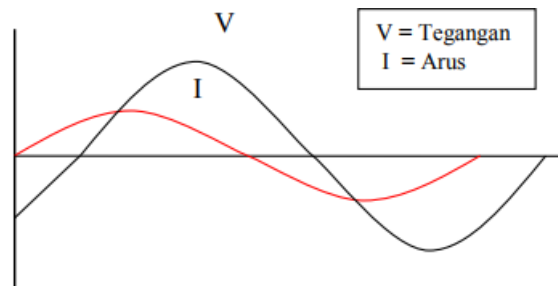
Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif terhadap daya semu dalam suatu sistem kelistrikan. Perbandingan ini menggambarkan efisiensi penggunaan daya dan berkaitan langsung dengan sudut fasa antara arus dan tegangan, yang divisualisasikan dalam bentuk segitiga daya (gambar 2.11). Besarnya faktor daya dinyatakan sebagai nilai cosinus sudut fasa ($\cos \varphi$) untuk daya aktif, sedangkan $\sin \varphi$ mewakili komponen daya reaktif. Adapun persamaan umum untuk menghitung faktor daya adalah:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{dan} \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dalam sistem tenaga listrik, terdapat dua jenis faktor daya, yaitu faktor daya mendahului (*leading*) dan faktor daya tertinggal (*lagging*).

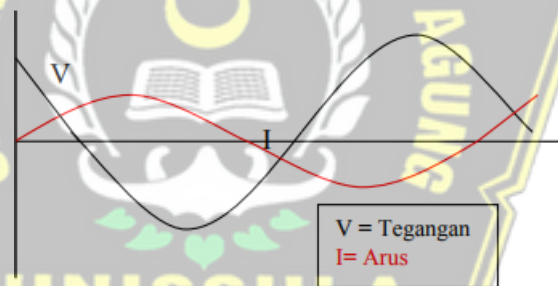
1. Faktor daya mendahului (*leading*) adalah kondisi ketika beban pada sistem bersifat kapasitif, sehingga arus listrik mendahului tegangan. Dalam kondisi ini, beban memberikan daya reaktif kembali ke jaringan. Nilai $\cos \varphi$ pada faktor daya mendahului bersifat negatif. Gambar 2.12 memperlihatkan

bentuk gelombang sinus di mana arus (I) lebih dulu dibandingkan tegangan (V), atau dengan kata lain, tegangan tertinggal dari arus sebesar sudut ϕ .



Gambar 2.12 Gelombang Leading (Soetiadi, 2023)

2. Faktor daya tertinggal (lagging) merupakan kondisi di mana beban bersifat induktif dan membutuhkan daya reaktif dari jaringan untuk mempertahankan operasi sistem. Pada kondisi ini, arus listrik tertinggal dari tegangan. Nilai $\cos \phi$ pada faktor daya tertinggal bernilai positif. Gambar 2.13 menunjukkan bentuk gelombang sinusoidal di mana arus (I) tertinggal dari tegangan (V), atau dengan kata lain, tegangan mendahului arus sebesar sudut ϕ .



Gambar 2.13 Gelombang Lagging (Soetiadi, 2023)

2.2.10 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Besarnya daya transformator jika ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Mulyadi, 2011):

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I \dots \dots \dots (2.17)$$

dimana,

- | | |
|----------|----------------------------|
| S | : Daya transformator (kVA) |
| V_{LL} | : Tegangan fasa-fasa (kV) |
| I | : Arus jala-jala (A) |

Dengan demikian, untuk menghitung arus pada kondisi beban penuh (*full load*)

current), dapat digunakan rumus berikut:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots\dots\dots(2.18)$$

dimana, I_{FL} : Arus beban penuh (A)

S : Daya transformator (kVA)

V : Tegangan sisi sekunder trafo (kV)

2.2.11 Pembebanan Transformator

Pengoperasian transformator pada beban nominal memungkinkan perangkat tersebut bekerja secara optimal. Namun, apabila beban yang ditanggung mendekati atau bahkan melebihi 100% dalam jangka waktu yang cukup lama, maka dapat terjadi peningkatan suhu berlebih pada transformator. Kondisi ini dapat menyebabkan kerugian daya, penurunan umur isolasi, serta berdampak pada penurunan kualitas daya listrik dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik (Prasetya dkk., 2020). Besarnya persentase pembebanan transformator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.19)$$

Untuk menghitung persentase pembebanan pada masing-masing fasa transformator distribusi, dapat digunakan rumus berikut:

$$\% \text{ Pembebanan fasa} = \frac{I_{\text{fasa}}}{I_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.20)$$

Berikut merupakan perhitungan persentase besar arus netral terhadap arus pembebanan transformator:

$$\% \text{ Besar Arus Netral} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_N} \times 100\% \dots\dots\dots(2.21)$$

2.2.12 Ketidakseimbangan Beban

Keadaan seimbang pada sistem listrik terjadi apabila dua syarat terpenuhi, yaitu:

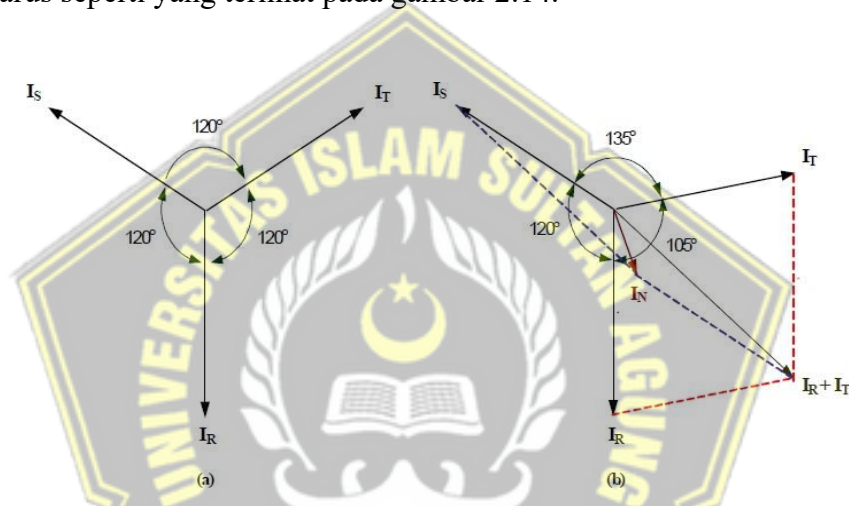
- Ketiga vektor arus atau tegangan saling membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor atau tegangan memiliki besaran yang sama.

Sebaliknya, keadaan tidak seimbang adalah kondisi ketika salah satu atau kedua

syarat tersebut tidak dipenuhi. Terdapat tiga kemungkinan kondisi ketidakseimbangan, yaitu:

1. Ketiga vektor tidak memiliki besaran yang sama, namun membentuk sudut 120° antar vektor.
2. Ketiga vektor memiliki besaran yang sama, tetapi sudut antar vektor tidak sebesar 120° .
3. Ketiga vektor berbeda besaran dan sudut antar vektor juga tidak sama dengan 120° .

Untuk mempermudah pemahaman, keadaan ini dapat dijelaskan melalui diagram vektor arus seperti yang terlihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 (a) Vektor Diagram Arus dalam keadaan seimbang (b) Vektor diagram arus yang tidak seimbang (PT. PLN (persero) UBSP3BJB, 1985)

Gambar 2.14 (a) memperlihatkan diagram vektor arus pada kondisi seimbang, di mana jumlah ketiga vektor arus (I_R , I_S , dan I_T) adalah nol sehingga tidak terbentuk arus netral (I_N). Sebaliknya, pada gambar 2.14 (b) ditunjukkan diagram vektor arus dalam keadaan tidak seimbang. Pada kondisi ini, jumlah ketiga vektor arus tidak sama dengan nol, sehingga muncul arus netral (I_N) dengan besaran yang bergantung pada tingkat ketidakseimbangan beban.

2.2.13 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Transformator dapat dikatakan mengalami kondisi tidak seimbang apabila tingkat ketidakseimbangan bebannya melebihi batas toleransi 10%.

Rumus tingkat ketidakseimbangan beban (Mulyadi, 2011):

$$(\%) \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\% \dots\dots\dots(2.22)$$

keterangan :

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots(2.25)$$

Koefisien a, b, dan c masing-masing menunjukkan perbandingan nilai arus fasa R, arus fasa S, dan arus fasa T terhadap nilai arus fasa rata-rata. Dalam situasi seimbang, koefisien a, b, dan c adalah 1, dan nilai arus fasa rata-rata sama dengan nilai arus setiap fasa.

Arus rata-rata dapat dihitung dengan rumus:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.26)$$

I_R : arus pada fasa R

I_S : arus pada fasa S

I_T : arus pada fasa T

Ketidakseimbangan beban perlu menjadi perhatian khusus karena dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dalam sistem distribusi. Secara umum, tingkat ketidakseimbangan beban dianggap masih dalam kategori baik apabila berada di bawah 10%. Ketentuan ini mengacu pada Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) Nomor: 0017.E/DIR/2014 mengenai Metode Pemeliharaan Transformator Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset. (PT PLN (Persero), 2014).

Tabel 2.1 Standar persentase ketidakseimbangan beban menurut SE No:17:14

Characteristic Group	Characteristic	Health Index			
		Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Load Reading and Profilling	Ketidakseimbangan Arus Antar Fasa	3<10%	10% <20%	20%-<25%	≥ 25%
	Besar arus netral TR (% Terhadap arus beban trafo)	<10%	10% <15%	15%-<20%	≥ 20%
	Pembebanan Trafo (% terhadap kapasitas)	<60%	60%-<80%	80%-<100%	≥ 100%

2.2.14 Arus Netral

Tahanan netral pada transformator merupakan nilai resistansi listrik yang terukur antara titik netral trafo dan tanah (ground). Titik netral ini umumnya berada di tengah lilitan transformator dan terhubung langsung dengan sistem pentanahan. Pengukuran nilai tahanan netral penting dilakukan untuk memastikan sistem pentanahan bekerja secara optimal dan tidak mengalami resistansi yang melebihi batas normal. Nilai tahanan yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan adanya gangguan pada sambungan atau kerusakan pada bagian isolasi, yang dapat mengganggu kinerja sistem distribusi listrik atau bahkan menyebabkan kerusakan peralatan.

Untuk melakukan pengukuran tahanan, digunakan alat seperti ohmmeter atau multimeter dengan fungsi pengukuran resistansi. Pengukuran dilakukan saat trafo dalam kondisi tidak bertegangan (off) untuk menghindari risiko kecelakaan dan kerusakan alat. Probe alat ukur ditempatkan pada terminal netral transformator, biasanya terletak di bagian lilitan netral. Nilai resistansi yang ditunjukkan dalam satuan ohm (Ω) akan memberikan gambaran kondisi sistem pentanahan. Nilai resistansi yang sesuai dengan standar menandakan sistem netral berfungsi dengan baik, sedangkan nilai yang terlalu tinggi atau fluktuatif dapat mengindikasikan adanya permasalahan teknis.

Dalam praktiknya, PT PLN (Persero) menggunakan kabel penghantar netral berpenampang 50 mm² dengan nilai resistansi sebesar 0,6842 Ω /km. Sedangkan untuk penghantar fasa digunakan kabel berpenampang 70 mm² dengan resistansi sebesar 0,5049 Ω /km.

Arus yang mengalir melalui penghantar netral pada transformator dengan konfigurasi hubungan bintang tiga fasa empat kawat disebut arus netral. Arus ini muncul sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban serta adanya harmonisa yang timbul dari beban nonlinier. Besar kecilnya arus netral berbanding lurus dengan tingkat ketidakseimbangan arus pada masing-masing fasa. Arus netral dapat dihitung menggunakan hukum Kirchhoff, dan nilainya akan meningkat seiring dengan meningkatnya ketidakseimbangan beban. Arus ini menimbulkan rugi-rugi daya sepanjang penghantar netral, yang dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Mulyadi, 2011):

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots (2.27)$$

Keterangan :

P_N = Rugi-rugi daya akibat arus mengalir di netral (W);

I_N = Arus pada netral transformator (A);

R_N = Resistansi pada penghantar netral (Ω).

Perhitungan berikut ini menunjukkan persentase rugi daya pada penghantar netral terhadap total daya pembebanan transformator:

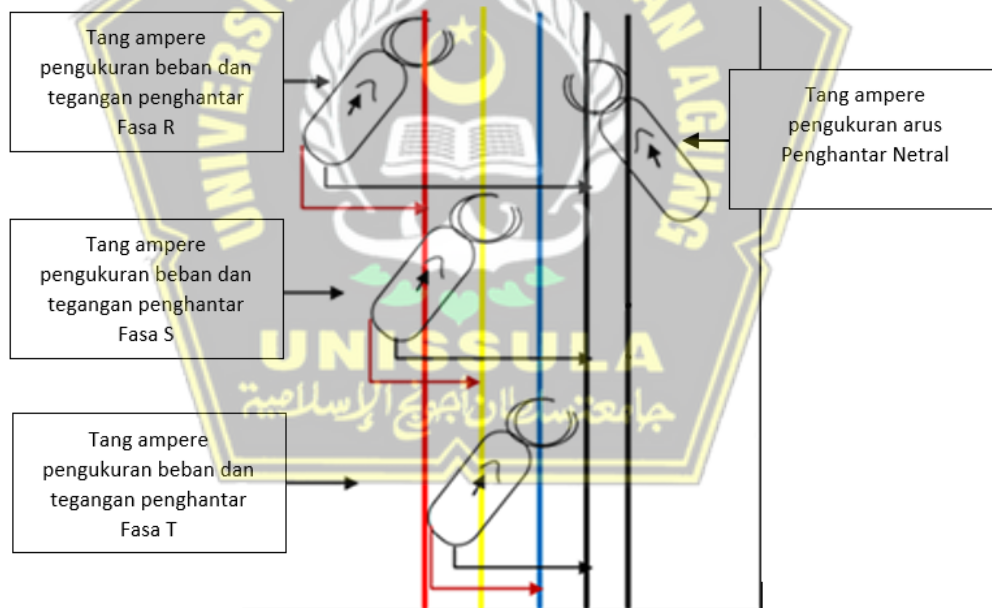
$$\%Loss_{siang} = \frac{P_n}{P} \times 100\% \dots\dots\dots (2.28)$$

2.2.15 Metode Penyeimbangan Berdasarkan Dua Titik Waktu

Metode yang diterapkan dalam proses penyeimbangan beban pada trafo distribusi adalah pendekatan berdasarkan dua titik waktu, yaitu saat beban puncak dan saat luar beban puncak. Metode ini dikenal sebagai metode WBP (Waktu Beban Puncak) dan LWBP (Luar Waktu Beban Puncak), yang merupakan pendekatan umum dalam proses penyeimbangan beban. Pada metode ini, dilakukan pengukuran arus tiap fasa pada sisi penyulang tegangan rendah saat kondisi beban puncak dan luar beban puncak. Data hasil pengukuran tersebut menjadi dasar dalam menentukan besarnya beban yang perlu dialihkan dari fasa dengan beban lebih tinggi ke fasa dengan beban lebih ringan (Ardhianto dkk., 2023). Prosedur penyeimbangan beban di lapangan menggunakan metode WBP dan LWBP dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

1. Melakukan pengukuran terhadap nilai arus beban per fasa pada saat beban puncak di Panel Hubung Bagi (PHB) trafo distribusi. Parameter yang diukur meliputi arus beban, tegangan, arus ground, faktor daya, serta tahanan pentanahan. Diagram pengawatan untuk pengukuran beban dan tegangan pada gardu distribusi dapat dilihat pada Gambar 2.15.
2. Menghitung rata-rata nilai arus beban puncak dari ketiga fasa (R, S, dan T) sebagai acuan nilai ideal untuk kondisi sistem yang seimbang.
3. Berdasarkan nilai rata-rata yang diperoleh pada langkah sebelumnya, ditentukan fasa mana yang bebannya perlu dikurangi atau ditambahkan, termasuk jumlah arus (ampere) yang harus dialihkan antar fasa.

4. Menentukan nilai kesetaraan antara daya tersambung pelanggan dengan arus yang digunakan saat beban puncak. Nilai ini bersifat estimatif dan ditentukan berdasarkan pertimbangan teknis petugas lapangan.
5. Berdasarkan jumlah ampere yang perlu dialihkan (langkah 3) dan nilai kesetaraan pelanggan (langkah 4), dilakukan identifikasi pelanggan mana saja yang dapat dipindahkan agar perpindahan tersebut mencerminkan nilai arus yang diinginkan.
6. Melaksanakan pemindahan pelanggan atau manuver arus untuk mengalihkan beban antar fasa.
7. Melakukan pengukuran kembali untuk mengetahui hasil penyeimbangan beban saat WBP. Jika nilai yang diperoleh telah sesuai atau mendekati kondisi seimbang, maka proses penyeimbangan dianggap selesai. Namun, jika belum memenuhi target, maka langkah-langkah di atas akan diulangi dari awal hingga diperoleh hasil yang memuaskan.



Gambar 2.15 Diagram pengawatan pengukuran beban dan tegangan gardu distribusi (Ardhianto dkk., 2023)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Enarotali yang terletak di Kabupaten Paniai, Provinsi Papua Tengah. Pelaksanaan penelitian berlangsung sejak bulan Desember 2024 hingga Juni 2025.

3.2 Objek Penelitian

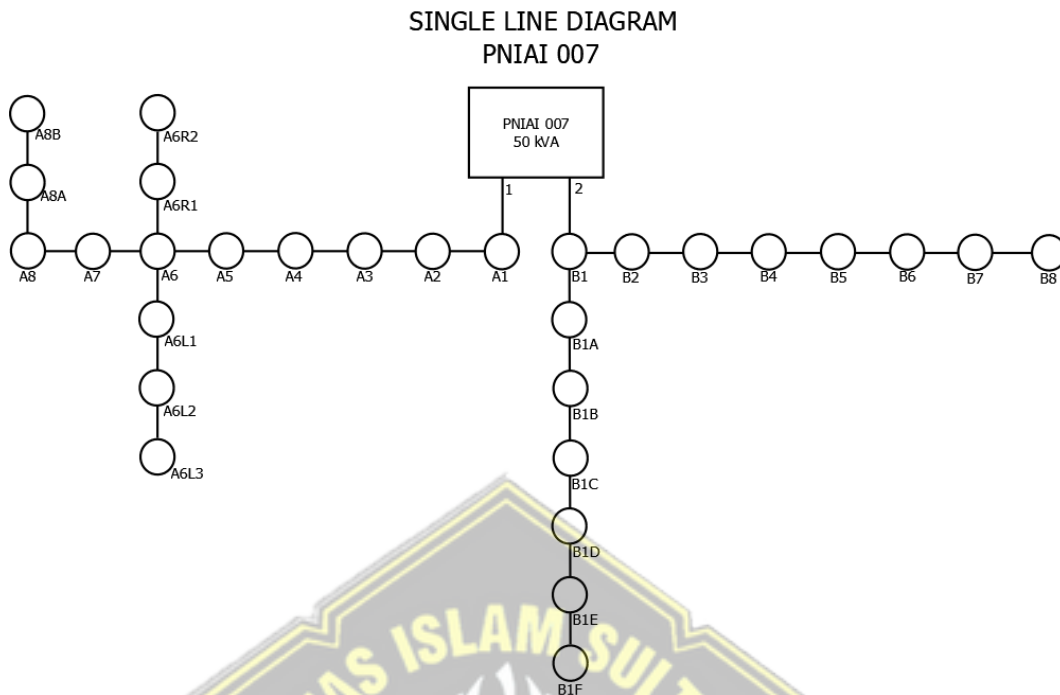
Objek penelitian ini adalah Transformator Distribusi PNIAI007 yang berada pada penyulang Cemara di wilayah kerja ULP Enarotali. Fokus penelitian adalah pada arus beban masing-masing fasa (R, S, T) dan ketidakseimbangan yang terjadi pada saat beban puncak dan non-puncak, dengan spesifikasi:



Gambar 3.1 Name Plate Trafo PNIAI007 Merek Trafindo (PT. PLN (Persero) ULP Enarotali, 2025)

Sumber: *Data – Data Internal Dan Lapangan*, PT. PLN (Persero) ULP Enarotali

Berikut adalah SLD dari Gardu Distribusi PNIAI 007 :



Gambar 3.2 Gambar SLD Gardu Distribusi PNIAI 007

Gambar 3.2 menyajikan diagram satu garis (Single Line Diagram Gardu PNIAI007). Diagram ini menggambarkan susunan tiang-tiang pada sisi tegangan rendah yang terhubung ke trafo distribusi. SLD ini berfungsi untuk memberikan gambaran visual posisi dan susunan titik beban di sepanjang jaringan, serta untuk memudahkan analisis ketidakseimbangan beban antar fasa. Informasi dalam diagram ini menjadi dasar dalam proses identifikasi ketidakseimbangan dan perencanaan penyesuaian beban untuk mencapai distribusi yang lebih merata dan efisien setelah dilakukan penyeimbangan.

3.3 Jenis dan Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif deskriptif dengan pendekatan studi kasus. Proses penelitian dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap kondisi pembebanan trafo distribusi PNIAI007, disertai pengukuran arus tiap fasa dan arus netral guna mengetahui tingkat ketidakseimbangan beban yang terjadi.

Data hasil pengukuran kemudian dianalisis menggunakan metode penyeimbangan dua titik waktu (WBP dan LWBP) untuk menyusun strategi redistribusi beban secara manual. Pendekatan ini bertujuan untuk menurunkan ketidakseimbangan arus, mengurangi arus netral, serta meminimalkan rugi daya pada transformator, sehingga sistem distribusi dapat bekerja lebih efisien dan andal.

3.4 Metode Pengambilan Data

Dalam penyusunan laporan akhir ini, tahapan kegiatan dilakukan secara terstruktur dan sistematis dengan tujuan untuk menemukan keterkaitan antara data yang diperoleh dengan hasil yang ingin dicapai. Oleh karena itu, proses pengumpulan data dilaksanakan melalui beberapa metode, di antaranya sebagai berikut:

3.4.1 Studi Literatur

Metode studi literatur dilakukan dengan menelaah berbagai sumber yang relevan sebagai referensi dalam mendukung topik permasalahan yang dibahas, sekaligus memperluas wawasan penulis mengenai materi penelitian. Teknik ini dilakukan melalui pengumpulan data, informasi, serta keterangan yang diperoleh dari penelaahan secara mendalam terhadap berbagai dokumen, arsip, buku ilmiah, jurnal, serta laporan teknis yang tersedia di PT PLN (Persero) ULP Enarotali. Beberapa sumber referensi yang digunakan dalam studi literatur antara lain:

1. Buku-buku literatur yang relevan
2. Jurnal-jurnal ilmiah terkait
3. Standar-standar teknis yang mengacu pada IEC (International Electrotechnical Commission)
4. Standar-standar dari SPLN (Standar PLN)

3.4.2 Observasi

Observasi dilakukan melalui kegiatan survei langsung ke lapangan guna memperoleh data yang dibutuhkan untuk keperluan analisis. Pengamatan ini dilakukan secara langsung terhadap objek penelitian, yaitu peralatan dan sistem distribusi yang digunakan. Data dikumpulkan dalam bentuk dokumentasi visual seperti foto atau gambar kondisi fisik peralatan, serta pencatatan spesifikasi teknis dari peralatan tersebut. Selain itu, observasi juga mencakup pengambilan data operasional secara langsung dari alat ukur atau perangkat monitoring yang

terpasang, sehingga informasi yang dikumpulkan lebih akurat dan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

3.4.3 Wawancara

Metode wawancara digunakan untuk memperoleh data dan informasi pendukung melalui proses tanya jawab secara langsung dengan narasumber yang memahami topik penelitian. Wawancara dilakukan secara terstruktur dengan pertanyaan-pertanyaan yang telah disiapkan sebelumnya agar informasi yang diperoleh relevan dan mendalam. Kegiatan ini dilakukan bersama Staf dan Supervisor Teknik di PT PLN (Persero) ULP Enarotali, yang memiliki kompetensi dan pemahaman teknis terkait sistem distribusi serta data yang dibutuhkan dalam penelitian ini.

3.5 Langkah Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang dirancang secara sistematis agar tujuan penelitian dapat tercapai dengan baik. Adapun langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan studi literatur mengenai transformator distribusi dan pengaruh ketidakseimbangan beban antar fasa, serta menggali informasi melalui wawancara dengan staf dan supervisor teknik di PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Enarotali.
2. Menentukan lokasi transformator distribusi yang akan menjadi objek penelitian untuk dilakukan proses penyeimbangan beban.
3. Mengumpulkan data primer dari PT PLN (Persero) ULP Enarotali, khususnya data pengukuran langsung di lapangan. Pengukuran dilakukan menggunakan alat Tang Ampere untuk memperoleh informasi mengenai besarnya arus tiap fasa dan arus netral pada trafo distribusi.
4. Menghitung nilai persentase ketidakseimbangan beban berdasarkan data pengukuran menggunakan rumus yang telah ditentukan (mengacu pada Persamaan 2.22).
5. Melakukan penyeimbangan beban menggunakan metode dua titik waktu, yaitu saat beban puncak dan luar beban puncak.
6. Mengukur ulang nilai arus tiap fasa dan arus netral setelah proses penyeimbangan dilakukan, serta menganalisis hasil pengukuran tersebut.

7. Menganalisis data hasil pengukuran sebelum dan sesudah penyeimbangan, yang meliputi:

- Perhitungan persentase pembebanan transformator.
- Perhitungan nilai ketidakseimbangan beban.
- Perhitungan arus netral dan rugi daya akibat arus netral.

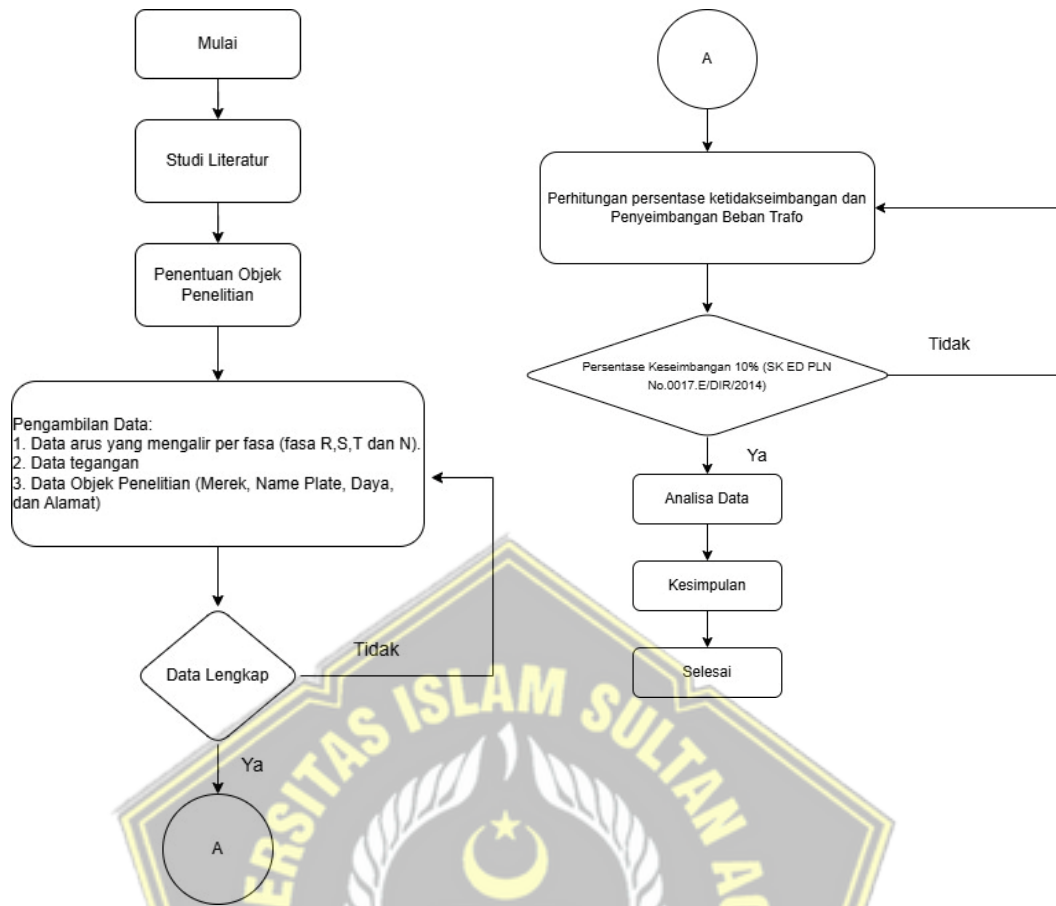
Analisis ini bertujuan untuk memahami dampak dari tindakan penyeimbangan yang dilakukan.

8. Menarik kesimpulan dari hasil analisis dan evaluasi, guna menjawab rumusan masalah serta memastikan bahwa tujuan penelitian telah tercapai.

3.6 Diagram Alir Penelitian

Untuk menjelaskan alur pelaksanaan penelitian ini secara sistematis, digunakan diagram alir (*flowchart*) yang menggambarkan tahapan-tahapan kegiatan mulai dari studi literatur hingga penarikan kesimpulan. Diagram ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum mengenai proses penelitian yang dilakukan, khususnya dalam pengumpulan data arus dan tegangan, analisis tingkat ketidakseimbangan beban, serta pelaksanaan penyeimbangan beban berdasarkan metode dua titik waktu (WBP dan LWBP).

Penilaian terhadap tingkat ketidakseimbangan beban dilakukan mengacu pada SK Direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014, yang menetapkan bahwa batas toleransi ketidakseimbangan arus maksimum adalah 10% dianggap masih dalam kondisi baik. Apabila nilai ketidakseimbangan melebihi ambang tersebut, maka dilakukan redistribusi beban untukurunkannya ke tingkat yang lebih seimbang. Berikut merupakan diagram alir dari penelitian ini:



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

3.7 Data Pengukuran Gardu PNIAI007

Pengukuran arus beban pada transformator tiga fasa oleh petugas teknis PLN umumnya dilakukan dengan menempatkan alat ukur pada masing-masing penghantar fasa, yaitu fasa R, S, T, serta penghantar netral (N). Kabel-kabel tersebut berfungsi sebagai jalur keluaran arus dari transformator menuju beban atau peralatan listrik lainnya. Pengukuran tegangan meliputi tegangan antar fasa maupun tegangan kerja masing-masing fasa pada trafo.

Proses ini umumnya menggunakan alat ukur seperti tang ampere atau multimeter yang telah dilengkapi dengan fitur pengukuran arus. Kabel yang menjadi objek pengukuran merupakan penghantar sisi keluaran (output) transformator yang membawa arus ke beban. Alat ukur tersebut telah dikalibrasi sebelumnya untuk memastikan keakuratan hasil pembacaan. Nilai arus yang ditampilkan pada layar merupakan besar arus aktual saat pengukuran dilakukan.

Selain fungsi utamanya sebagai pengukur arus, clamp meter juga dapat digunakan untuk mengukur resistansi, tegangan arus bolak-balik (AC), maupun tegangan arus searah (DC) menggunakan dua buah probe tambahan.

Berdasarkan hasil pengukuran beban gardu oleh Bidang Teknik PT PLN (Persero) ULP Enarotali, berikut merupakan data hasil pengukuran arus pada Gardu PNIAI007 yang dilakukan pada tanggal 5 Desember 2024:

Tabel 3.1 Pengukuran Arus Gardu PNIAI007

Trafo	Waktu	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)
PNIAI007	10.00	54,11	26,25	31,29	37,81
	19.00	80,40	38,53	48,08	51,76

Perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban pada trafo PNIAI007 adalah sebagai berikut:



- Jam 10.00

$$\text{Arus R} = 54,11, \text{ Arus S} = 26,25, \text{ Arus T} = 31,29$$

$$\text{Arus rata-rata} = \frac{54,11 + 26,25 + 31,29}{3} = 37,21$$

$$\text{Nilai a} = \frac{54,1}{37,21} = 1,453$$

$$\text{Nilai b} = \frac{26,25}{37,21} = 0,705$$

$$\text{Nilai c} = \frac{31,29}{37,21} = 0,84$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|1,453-1|+|0,705-1|+|0,84-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{0,453+0,295+0,16}{3} \times 100\% = 30,26\%$$

- Jam 19.00

$$\text{Arus R} = 80,4, \text{ Arus S} = 38,53, \text{ Arus T} = 48,08$$

$$\text{Arus rata-rata} = \frac{80,4 + 38,53 + 48,08}{3} = 55,34$$

$$\text{Nilai a} = \frac{80,4}{55,34} = 1,454$$

$$\text{Nilai b} = \frac{38,53}{55,34} = 0,696$$

$$\text{Nilai c} = \frac{48,08}{55,34} = 0,869$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|1,454-1|+|0,696-1|+|0,869-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{0,454+0,304+0,131}{3} \times 100\% = 29,61\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, tingkat ketidakseimbangan arus pada kedua waktu tersebut masing-masing mencapai 30.26% dan 29,61%. Nilai ini melebihi batas toleransi ketidakseimbangan arus maksimal yang ditetapkan oleh PLN, yaitu 10% sesuai dengan ketentuan Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014. Hal ini menunjukkan bahwa diperlukan tindakan penyeimbangan beban untuk menjaga kinerja trafo tetap optimal dan menghindari kerugian daya yang berlebihan.

3.8 Upaya Penyeimbangan Beban

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, tingkat ketidakseimbangan arus pada Gardu Distribusi PNIAI007 menunjukkan nilai sebesar 30,26% pada pukul 10.00 WIT dan 29,61% pada pukul 19.00 WIT. Nilai ini melebihi batas toleransi maksimum ketidakseimbangan arus yang diperbolehkan menurut Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0017.E/DIR/2014, yaitu 10%.

Kondisi ketidakseimbangan beban ini menyebabkan timbulnya arus netral yang tinggi, dan hal tersebut berdampak langsung terhadap meningkatnya rugi-rugi daya pada penghantar netral, penurunan efisiensi distribusi energi, serta mempercepat keausan komponen trafo, khususnya pada bagian belitan dan isolasi. Ketidakseimbangan yang terjadi secara terus-menerus dapat mengurangi umur teknis transformator dan menambah beban sistem distribusi secara keseluruhan.

Merujuk pada Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) tersebut, penyeimbangan beban wajib dilakukan apabila pembebanan trafo berada pada rentang 80–100%. Namun, berdasarkan kebijakan teknis di PT PLN (Persero) ULP Enarotali, penyeimbangan beban sudah direkomendasikan untuk dilakukan apabila pembebanan telah mencapai $\geq 70\%$ sebagai langkah preventif guna menjaga keandalan dan usia pakai aset. Dengan rata-rata pembebanan transformator sebesar 77%, serta tingkat ketidakseimbangan yang tinggi, maka transformator PNIAI007 dinyatakan memenuhi kriteria untuk dilakukan upaya penyeimbangan beban.

Oleh karena itu, pada bagian ini akan dijelaskan pertimbangan dan pelaksanaan penyeimbangan beban yang dilakukan sebagai solusi untuk mengurangi dampak teknis yang ditimbulkan oleh ketidakseimbangan, serta untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan distribusi tenaga listrik.

3.8.1 Pertimbangan Pemindahan Beban dan Pelaksanaan Penyeimbangan Beban

Dari data pengukuran pukul 19.00 WIT yang merupakan beban puncak, diketahui bahwa:

- Fasa R = 80,40 A
- Fasa S = 38,53 A
- Fasa T = 48,08 A

Dari ketiga nilai tersebut, dihitung nilai arus rata-rata sebagai dasar perencanaan penyeimbangan beban:

- Arus rata-rata = $\frac{(80,40 + 38,53 + 48,08)}{3} = 55,67 \text{ A}$

Agar pembebanan tiap fasa mendekati nilai ideal (rata-rata), maka perlu dilakukan penyesuaian arus sebagai berikut:

- Fasa R dikurangi: $80,40 - 55,67 = 24,73 \text{ A}$
- Fasa S ditambah: $55,67 - 38,53 = 17,14 \text{ A}$
- Fasa T ditambah: $55,67 - 48,08 = 7,59 \text{ A}$

Dengan demikian, total beban sebesar 24,73 A dari fasa R akan dipindahkan ke fasa S dan T, masing-masing sebesar 17,14 A dan 7,59 A, untuk menciptakan kondisi beban yang lebih seimbang antar fasa.

Penyeimbangan ini dilaksanakan oleh tim teknik PT PLN (Persero) ULP Enarotali yang terdiri dari Tim Yantek (Pelayanan Teknik) dan Staf Teknik ULP Enarotali pada tanggal 6 Desember 2024, berdasarkan hasil evaluasi pembebanan gardu serta analisis ketidakseimbangan antar fasa. Pelaksanaan penyeimbangan dilakukan dengan memindahkan enam sambungan rumah (SR) dari jurusan A yang sebelumnya terhubung ke fasa R. Enam SR ini masing-masing diasumsikan memiliki beban sebesar 4 A. Dari jumlah tersebut, empat SR dengan total beban 16 A akan dipindahkan ke fasa S, sedangkan dua SR dengan total beban 8 A akan dialihkan ke fasa T. Dengan demikian, arus fasa R akan berkurang sebesar 24 A, sementara fasa S dan T masing-masing bertambah sebesar 16 A dan 8 A.



Gambar 3.4 Pelaksanaan Penyeimbangan Beban di Lapangan

Berikut daftar nama pelanggan yang dipindahkan dari fasa R ke S dan T.

Tabel 3. 2 Pelanggan Yang Rencana Akan Dipindahkan Dari Fasa R ke S dan T

No.	IDPEL	Nama	Tarif	Daya (VA)	Pindah ke Fasa
1	427200018xxx	YUVENSIUS BUNAI	R1T	1300	S
2	424300177xxx	MONICA TEKEGE	R1MT	900	S
3	427200022xxx	AGUSTINUS DOO	R1T	1300	S
4	424300175xxx	BENY GOBAI	R1MT	900	S
5	424300177xxx	GAPU PATIDUNGAN	R1MT	900	T
6	427200008xxx	NAFTALI KAYAME	R1T	1300	T

Daftar pelanggan di atas dipilih dengan mempertimbangkan pola pemakaian listrik rumah tangga yang umum di daerah tersebut, di mana tiap rumah diperkirakan memberikan kontribusi beban sekitar 4 Ampere pada saat beban puncak. Hal ini menjadikan keenam pelanggan tersebut sebagai kandidat yang ideal untuk dimanuver guna menyeimbangkan beban antar fasa secara efektif dan praktis di lapangan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Gardu Distribusi PANIAI007 yang berlokasi di Jl. SD Negeri Enarotali, Kabupaten Paniai. Gardu ini merupakan salah satu gardu distribusi milik PLN yang berfungsi untuk menyuplai energi listrik kepada pelanggan di wilayah permukiman sekitar. Gardu tersebut menggunakan transformator distribusi bermerek Trafindo dengan kapasitas 50 kVA, tegangan primer 20 kV, dan tegangan sekunder 400/230 V.

Transformator ini menyalurkan beban ke pelanggan melalui tiga fasa, yaitu fasa R, S, dan T. Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan pada tanggal 5 Desember 2024, diperoleh data bahwa pembebanan trafo menunjukkan ketidakseimbangan arus yang cukup mencolok antar fasa. Pada pukul 10.00 WIT, arus pada fasa R tercatat sebesar 54,11 A, fasa S sebesar 26,25 A, dan fasa T sebesar 31,29 A, dengan arus netral mencapai 37,81 A. Sedangkan pada pukul 19.00 WIT, terjadi peningkatan beban dengan arus fasa R sebesar 80,40 A, fasa S sebesar 38,53 A, dan fasa T sebesar 48,08 A, serta arus netral sebesar 51,76 A.

Dari hasil pengukuran tersebut terlihat bahwa fasa R merupakan fasa dominan dengan beban tertinggi, sedangkan fasa S dan T relatif lebih rendah. Ketidakseimbangan ini menjadi perhatian khusus karena dapat menyebabkan timbulnya arus netral, yang berdampak pada rugi-rugi daya tambahan di sistem distribusi yang berpotensi menurunkan efisiensi distribusi energi listrik di area layanan gardu tersebut.. Dalam penelitian ini, analisis difokuskan pada rugi daya akibat adanya arus netral pada transformator, tanpa membahas secara mendalam rugi-rugi lain seperti rugi inti maupun rugi tembaga. Oleh karena itu, data ini digunakan sebagai dasar untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban serta mengevaluasi potensi penyeimbangannya yang akan dibahas pada subbab selanjutnya.

4.2 Analisis Ketidakseimbangan Beban Sebelum Penyeimbangan

Tabel 4.1 Data Pengukuran Gardu PNIAI007 Sebelum Penyeimbangan Beban

Trafo	Waktu	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)
PNIAI007	10.00	54,11	26,25	34,29	37,81
	19.00	80,40	38,53	48,08	51,76

Berikut merupakan hasil pengukuran gardu distribusi PNIAI007 sebelum penyeimbangan beban. Berdasarkan hasil pengukuran arus beban pada Trafo PANIAI007 yang dilakukan pada tanggal 5 Desember 2024, diperoleh data arus pada masing-masing fasa pada dua waktu berbeda, yaitu pukul 10.00 WIT dan 19.00 WIT.

Pada pukul 10.00 WIT, arus yang mengalir pada fasa R adalah sebesar 54,11 A, pada fasa S sebesar 26,25 A, dan pada fasa T sebesar 34,29 A. Sedangkan arus netral (N) yang terbentuk akibat ketidakseimbangan pembebanan tercatat sebesar 37,81 A.

Sementara itu, pada pukul 19.00 WIT yang merupakan beban puncak (peak load), arus pada fasa R meningkat menjadi 80,40 A, fasa S menjadi 38,53 A, dan fasa T menjadi 48,08 A. Arus netral yang terbentuk pada waktu ini juga meningkat signifikan menjadi 51,76 A.

Data tersebut menunjukkan bahwa terdapat ketidakseimbangan pembebanan antar fasa, di mana fasa R merupakan fasa dominan dengan beban paling besar, sedangkan fasa S memikul beban paling ringan. Tingginya arus netral yang tercatat pada kedua waktu pengukuran menunjukkan bahwa ketidakseimbangan ini cukup signifikan dan berpotensi menyebabkan rugi-rugi daya akibat arus netral pada transformator.

4.2.1 Perhitungan Persentase Pembebanan Trafo Sebelum Penyeimbangan

Sebelum dilakukan penyeimbangan beban, langkah pertama yang dilakukan adalah mengevaluasi seberapa besar beban yang bekerja pada masing-masing fasa transformator. Langkah ini penting untuk mengetahui apakah terjadi kelebihan beban (*overload*) pada salah satu fasa, yang bisa menjadi tanda adanya

ketidakseimbangan beban dan dapat mempengaruhi kinerja transformator dalam jangka panjang.

Evaluasi dilakukan dengan cara merekap data arus aktual yang diukur pada waktu tertentu, kemudian dibandingkan dengan arus beban penuh (*full load current*) dari trafo. Tujuannya adalah untuk menghitung persentase pembebanan rata-rata fasa dan masing-masing fasa, yaitu fasa R, S, dan T, terhadap kapasitas maksimal transformator.

Perhitungan ini menggunakan rumus-rumus yang telah dijelaskan pada Bab II, yaitu Persamaan (2.16), (2.17), (2.18), dan (2.19). Dengan pendekatan ini, kita dapat mengetahui kondisi awal beban trafo sebelum dilakukan tindakan penyeimbangan. Perhitungannya disajikan sebagai berikut:

$$S = 50 \text{ kVA} = 50.000 \text{ VA}$$

$$V_{L-L} = 0,4 \text{ kV} = 400 \text{ V}$$

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

$$I_{FL} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72,17 \text{ A}$$

- Pembebanan trafo untuk tiap fasa

Perhitungannya menggunakan rumus berikut:

$$\% \text{ Pembebanan tiap fasa} = \frac{I_{\text{fasa}}}{I_{FL}} \times 100\%$$

- Pada jam 10.00 WIT

$$\% \text{ Pembebanan Fasa R} = \frac{54,11}{72,17} \times 100\% = 74,9\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa S} = \frac{26,25}{72,17} \times 100\% = 36,4\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa T} = \frac{31,29}{72,17} \times 100\% = 43,3\%$$

- Pada jam 19.00 WIT

$$\% \text{ Pembebanan Fasa R} = \frac{80,40}{72,17} \times 100\% = 111,4\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa S} = \frac{38,53}{72,17} \times 100\% = 53,4\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa T} = \frac{48,08}{72,17} \times 100\% = 66,6\%$$

Persentase rata-rata pembebanan transformator dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \text{ Rata – Rata Pembebanan} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\%$$

- Jam 10.00 WIT

$$\% \text{ Rata – Rata Pembebanan} = \frac{37,22}{72,17} \times 100\% = 51,6\%$$

- Jam 19.00 WIT

$$\% \text{ Rata – Rata Pembebanan} = \frac{55,67}{72,17} \times 100\% = 77,2\%$$

Setelah dilakukan perhitungan pembebanan terhadap setiap fasanya pada gardu distribusi PNIAI007, pada waktu pengukuran pukul 10.00 WIT diperoleh hasil bahwa fasa R memiliki persentase pembebanan paling besar, yaitu sebesar 74,9%, sedangkan fasa S memiliki pembebanan terendah, yakni 36,4%. Fasa T berada di tengah dengan pembebanan sebesar 43,3%. Rata-rata pembebanan trafo pada waktu tersebut sebesar 51,6% dari kapasitas 50 kVA.

Sementara itu, pada pengukuran pukul 19.00 WIT yang merupakan waktu beban puncak, fasa R tercatat mengalami pembebanan tertinggi sebesar 111,4%, melebihi kapasitas nominal trafo. Fasa S menunjukkan pembebanan sebesar 53,4%, dan fasa T sebesar 66,6%, dengan rata-rata pembebanan keseluruhan mencapai 77,2%.

Dari hasil tersebut terlihat ketidakseimbangan beban antar fasa yang cukup signifikan, terutama pada beban puncak, di mana salah satu fasa melebihi kapasitas nominal. Ketidakseimbangan ini menyebabkan timbulnya arus netral yang tinggi, meningkatkan rugi-rugi daya, mempercepat keausan komponen transformator, serta menurunkan efisiensi distribusi energi. Oleh karena itu, kondisi ini menunjukkan perlunya dilakukan penyeimbangan beban guna menjaga kinerja dan keandalan transformator.

Merujuk pada Surat Edaran Direksi PT PLN Nomor 0017.E/DIR/2014 tentang Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset, penyeimbangan beban dilakukan bila pembebanan mencapai 80–100%. Namun, di PT PLN (Persero) ULP Enarotali, penyeimbangan diterapkan saat beban telah mencapai $\geq 70\%$ sebagai langkah preventif dalam menjaga keandalan dan usia pakai aset gardu distribusi. Dengan hasil rata-rata pembebanan trafo sebesar 77%, maka

dapat disimpulkan bahwa transformator PNIAI007 telah memenuhi kriteria untuk dilakukan penyeimbangan beban.

4.2.2 Perhitungan Tingkat Ketidakseimbangan Beban Sebelum Penyeimbangan Beban

Subbab ini menyajikan perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban pada Gardu PNIAI007 sebelum dilakukan penyeimbangan. Tingkat ketidakseimbangan dihitung berdasarkan nilai arus tiap fasa yang diperoleh dari hasil pengukuran pada dua waktu berbeda, yaitu pukul 10.00 WIT dan 19.00 WIT. Perhitungan dilakukan menggunakan metode deviasi rata-rata terhadap arus rata-rata fasa, yang kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase. Hasil perhitungan ini menjadi dasar untuk mengevaluasi sejauh mana beban menyimpang dari kondisi seimbang, dan seberapa besar pengaruhnya terhadap performa distribusi listrik sebelum dilakukan penyeimbangan.

Perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban pada trafo PNIAI007 adalah sebagai berikut:

- Jam 10.00

$$\text{Arus R} = 54,11, \text{ Arus S} = 26,25, \text{ Arus T} = 31,29$$

$$\text{Arus rata-rata} = \frac{54,11 + 26,25 + 31,29}{3} = 37,21$$

$$\text{Nilai a} = \frac{54,1}{37,21} = 1,453$$

$$\text{Nilai b} = \frac{26,25}{37,21} = 0,705$$

$$\text{Nilai c} = \frac{31,29}{37,21} = 0,84$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|1,453-1|+|0,705-1|+|0,84-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{0,453+0,295+0,16}{3} \times 100\% = 30,26\%$$

- Jam 19.00

$$\text{Arus R} = 80,4, \text{ Arus S} = 38,53, \text{ Arus T} = 48,08$$

$$\text{Arus rata-rata} = \frac{80,4 + 38,53 + 48,08}{3} = 55,34$$

$$\text{Nilai a} = \frac{80,4}{55,34} = 1,454$$

$$\text{Nilai } b = \frac{38,53}{55,34} = 0,696$$

$$\text{Nilai } c = \frac{48,08}{55,34} = 0,869$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|1,454-1|+|0,696-1|+|0,869-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{0,454+0,304+0,131}{3} \times 100\% = 29,61\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan, tingkat ketidakseimbangan arus pada Gardu PNIAI007 tercatat sebesar 30,26% pada pukul 10.00 WIT dan 29,61% pada pukul 19.00 WIT. Nilai-nilai tersebut secara signifikan melebihi batas toleransi yang diperbolehkan, yakni maksimal 10%, sebagaimana ditetapkan dalam Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0017.E/DIR/2014 tentang Pedoman Operasi dan Pemeliharaan Jaringan Distribusi Tegangan Menengah dan Rendah.

Ketidakseimbangan ini menunjukkan bahwa terjadi pembagian beban antar fasa yang tidak merata, yang dapat menyebabkan arus netral membesar dan menimbulkan kerugian daya yang signifikan. Jika kondisi ini terus berlanjut tanpa adanya penanganan, maka dapat berdampak pada penurunan keandalan trafo serta mempercepat penurunan kualitas kinerja sistem distribusi. Untuk itu, diperlukan langkah penyeimbangan beban guna menjaga performa trafo tetap stabil, mengurangi rugi daya, serta memperpanjang umur pakai peralatan distribusi listrik di lapangan.

4.2.3 Rugi – Rugi Netral Dan Persentase Loss Netral Akibat Arus Pada Penghantar Netral Sebelum Penyeimbangan Beban

Dalam penelitian terkait penyeimbangan beban akibat ketidakseimbangan pada Gardu Distribusi PNIAI007, perhitungan rugi-rugi daya dilakukan dengan mengacu pada penghantar netral transformator sepanjang 1,5 km dan berpenampang 70 mm². Nilai resistansi penghantar tersebut ditetapkan sebesar 0,5049 Ω/km pada suhu 20°C, sesuai dengan standar teknis yang tercantum dalam dokumen “Kriteria Desain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik” yang diterbitkan oleh PT PLN (Persero) Tahun 2010. Berdasarkan spesifikasi teknis tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan rugi-rugi daya netral

yang timbul akibat arus yang mengalir pada penghantar netral sebelum pelaksanaan penyeimbangan beban.

- Jam 10.00
 $I_N = 37,81 \text{ A}$
 $R_N = 0,5049 \Omega/\text{km} \cdot 1,5 \text{ km} = 0,75735 \Omega$
- Jam 19.00
 $I_N = 51,76 \text{ A}$
 $R_N = 0,5049 \Omega/\text{km} \cdot 1,5 \text{ km} = 0,75735 \Omega$

Kemudian dilanjutkan menghitung daya netral yaitu sebagai berikut :

- Jam 10.00
 $P_N = I_N^2 \times R_N$
 $= 37,81^2 \text{ A} \times 0,75735 \Omega = 1.082,82 \text{ Watt}$
- Jam 19.00
 $P_N = I_N^2 \times R_N$
 $= 51,76^2 \text{ A} \times 0,75735 \Omega = 2.029,17 \text{ Watt}$

Diperoleh hasil bahwa rugi-rugi daya pada penghantar netral sebesar 1.082,82 Watt pada pukul 10.00 WIT (waktu LWBP) dan sebesar 2.029,17 Watt pada pukul 19.00 WIT (waktu WBP). Selanjutnya, dilakukan perhitungan persentase kerugian daya yang ditimbulkan oleh arus netral pada penghantar netral transformator:

$$\begin{aligned} P &= S \times \cos \varphi \\ &= 50.000 \text{ VA} \times 0,85 \\ &= 42.500 \text{ kW} \end{aligned}$$

- Jam 10.00
 $\%Loss_{siang} = \frac{P_n}{P} \times 100\%$
 $= \frac{1082,82}{42500} \times 100 = 2,55 \%$
- Jam 19.00
 $\%Loss_{malam} = \frac{P_n}{P} \times 100\%$
 $= \frac{2029,17}{42500} \times 100 = 4,77\%$

Dari data tersebut, rugi daya akibat arus netral dihitung menggunakan rumus

$P_N = I_N^2 \times R_N$. Hasilnya, rugi daya netral pada siang hari adalah sebesar 1.082,82 Watt, dan pada malam hari meningkat hingga 2.029,17 Watt. Rugi daya ini kemudian dibandingkan dengan kapasitas daya trafo untuk mengetahui seberapa besar kerugian yang ditimbulkan terhadap total kapasitas trafo sebesar 50 kVA dengan faktor daya 0,85. Diperoleh bahwa rugi daya akibat arus netral pada siang hari mencapai 2,55%, sedangkan pada malam hari sebesar 4,77% dari total kapasitas trafo.

Besarnya rugi daya yang disebabkan oleh arus netral ini menjadi indikator bahwa ketidakseimbangan beban antar fasa dapat memberikan dampak langsung terhadap efisiensi sistem distribusi, serta dapat menurunkan umur pakai dari komponen transformator. Oleh karena itu, penyeimbangan beban menjadi tindakan yang penting untuk dilakukan guna meminimalisasi kerugian daya dan meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

4.3 Analisis Hasil Penyeimbangan Beban

Setelah dilakukan tindakan penyeimbangan beban dengan memindahkan sambungan rumah (SR) dari fasa dengan beban berlebih (R) ke fasa yang lebih ringan (S dan T), dilakukan kembali pengukuran arus pada ketiga fasa untuk mengevaluasi keberhasilan manuver tersebut. Pengukuran ini dilaksanakan pada dua kondisi, yaitu saat beban puncak (WBP) dan saat luar beban puncak (LWBP) guna memperoleh gambaran menyeluruh atas kondisi distribusi arus pasca penyeimbangan.

Tabel berikut menyajikan hasil pengukuran arus pasca penyeimbangan pada trafo PNIAI007:

Tabel 4.2 Data Pengukuran Gardu PNIAI007 Setelah Penyeimbangan Beban

Trafo	Waktu	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)
PNIAI007	10.00	38,02	40,85	39,56	14,58
	19.00	56,8	55,81	54,8	19,83

Berikut merupakan hasil pengukuran gardu distribusi PNIAI007 setelah dilakukannya penyeimbangan beban oleh tim teknik ULP Enarotali pada tanggal 6 Desember 2025. Pengukuran dilakukan kembali pada dua waktu berbeda, yaitu

pukul 10.00 WIT dan pukul 19.00 WIT, untuk mengetahui kondisi distribusi arus pasca dilakukan manuver pemindahan beban antar fasa.

Pada pukul 10.00 WIT (saat luar beban puncak), tercatat arus pada fasa R sebesar 38,02 A, fasa S sebesar 40,85 A, dan fasa T sebesar 39,56 A. Arus netral tercatat sebesar 14,58 A. Sementara itu, pada pukul 19.00 WIT (beban puncak), arus fasa R tercatat sebesar 56,80 A, fasa S sebesar 55,81 A, dan fasa T sebesar 54,80 A. Arus netral yang terbaca saat itu sebesar 19,83 A.

Data hasil pengukuran ini selanjutnya akan dianalisis untuk mengetahui seberapa besar perubahan nilai pembebanan transformator, tingkat ketidakseimbangan antar fasa, serta rugi-rugi daya yang ditimbulkan akibat arus netral setelah dilakukannya penyeimbangan beban.

4.3.1 Perhitungan Persentase Pembebanan Trafo Setelah Penyeimbangan

Setelah dilakukan tindakan penyeimbangan beban pada transformator PNIAI007, langkah selanjutnya adalah menghitung kembali besarnya pembebanan trafo untuk mengetahui kondisi aktual pasca penyesuaian beban antar fasa. Perhitungan pembebanan ini bertujuan untuk melihat apakah distribusi arus pada masing-masing fasa sudah lebih merata dan mendekati nilai rata-rata ideal.

Pemeriksaan terhadap kondisi beban setelah penyeimbangan dilakukan dengan menghitung arus beban penuh, berdasarkan data arus aktual yang telah direkap. Selanjutnya, digunakan rumus-rumus pada Persamaan (2.16), (2.17), (2.18), dan (2.19) untuk menentukan persentase pembebanan pada masing-masing fasa dan rata-rata fasa. Perhitungan ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah distribusi beban sudah lebih merata setelah penyeimbangan dilakukan, dengan hasil disajikan sebagai berikut:

$$S = 50 \text{ kVA} = 50.000 \text{ VA}$$

$$V_{L-L} = 0,4 \text{ kV} = 400 \text{ V}$$

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

$$I_{FL} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72,17 \text{ A}$$

- Pembebanan trafo untuk tiap fasa

Perhitungannya menggunakan rumus berikut:

$$\% \text{ Pembebanan tiap fasa} = \frac{I_{\text{fasa}}}{I_{FL}} \times 100\%$$

- Arus Rata-Rata Setelah Penyeimbangan

$$\text{Arus rata-rata siang} = \frac{38,02 + 40,85 + 39,56}{3} = 39,48 \text{ A}$$

$$\text{Arus rata-rata malam} = \frac{56,8 + 55,81 + 54,8}{3} = 55,8 \text{ A}$$

- Pada jam 10.00 WIT

$$\% \text{ Pembebanan Fasa R} = \frac{38,02}{72,17} \times 100\% = 52,67\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa S} = \frac{40,85}{72,17} \times 100\% = 56,61\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa T} = \frac{39,56}{72,17} \times 100\% = 54,82\%$$

- Pada jam 19.00 WIT

$$\% \text{ Pembebanan Fasa R} = \frac{56,8}{72,17} \times 100\% = 78,69\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa S} = \frac{55,81}{72,17} \times 100\% = 77,34\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Fasa T} = \frac{54,8}{72,17} \times 100\% = 75,94\%$$

Persentase rata-rata pembebanan transformator dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\% \text{ Rata – Rata Pembebanan} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\%$$

Irata-rata =

- Jam 10.00 WIT

$$\% \text{ Rata – Rata Pembebanan} = \frac{39,48}{72,17} \times 100\% = 54,72\%$$

- Jam 19.00 WIT

$$\% \text{ Rata – Rata Pembebanan} = \frac{55,8}{72,17} \times 100\% = 77,33\%$$

Dari hasil pengukuran tersebut, dilakukan perhitungan persentase pembebanan pada masing-masing fasa dengan membandingkan arus aktual yang mengalir terhadap arus penuh (full load current) trafo, yaitu sebesar 72,17 A. Selain

itu, juga dihitung persentase rata-rata pembebanan untuk mengetahui sejauh mana trafo bekerja secara keseluruhan setelah proses penyeimbangan.

Pada pukul 10.00 WIT, fasa R mengalami pembebanan sebesar 52,67%, fasa S sebesar 56,61%, dan fasa T sebesar 54,82%. Nilai pembebanan rata-rata trafo pada waktu ini adalah sebesar 54,72%, yang menunjukkan kondisi trafo berada dalam zona operasi ringan dan cukup seimbang antar fasa.

Sementara itu, pada pukul 19.00 WIT, pembebanan meningkat seiring dengan naiknya konsumsi energi oleh pelanggan. Fasa R tercatat memikul beban sebesar 78,69%, fasa S sebesar 77,34%, dan fasa T sebesar 75,94%, dengan rata-rata pembebanan sebesar 77,33%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi beban puncak, pembebanan antar fasa telah menunjukkan keseimbangan yang lebih baik dibandingkan kondisi sebelum penyeimbangan, dengan distribusi arus yang lebih merata.

Namun demikian, perlu dicatat bahwa rata-rata pembebanan trafo pada waktu beban puncak telah mendekati ambang batas ideal yaitu 80%–100%. Pembebanan yang mendekati batas ini dapat mengindikasikan bahwa kapasitas trafo hampir maksimal, sehingga trafo PNIAI007 layak dimasukkan dalam daftar pemantauan untuk rencana penambahan (sisip) trafo atau penggantian trafo di masa mendatang. Hal ini penting guna menjaga keandalan pasokan listrik serta mencegah potensi overload yang dapat menurunkan umur pakai trafo.

4.3.2 Perhitungan Tingkat Ketidakseimbangan Beban Setelah Penyeimbangan Beban

Setelah dilakukan penyeimbangan beban pada gardu distribusi PNIAI007, diperlukan evaluasi terhadap tingkat keberhasilannya melalui analisis ketidakseimbangan arus antar fasa. Ketidakseimbangan beban merupakan salah satu parameter penting yang dapat memengaruhi kualitas distribusi daya listrik, efisiensi trafo, serta besar arus netral yang timbul.

Pada subbab ini, akan disajikan perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban setelah dilakukannya manuver pemindahan beban antar fasa. Perhitungan dilakukan pada dua kondisi waktu, yaitu saat luar beban puncak (LWBP) dan beban puncak (WBP), untuk mendapatkan gambaran seberapa jauh distribusi arus antar

fasa telah berhasil diseimbangkan setelah tindakan korektif dilakukan. Berikut perhitungan tingkat ketidakseimbangan setelah penyeimbangan beban :

- Jam 10.00

Arus R = 38,02 A, Arus S = 40,85 A, Arus T = 39,56 A

$$\text{Arus rata-rata} = \frac{38,02 + 40,85 + 39,56}{3} = 39,48 \text{ A}$$

$$\text{Nilai a} = \frac{38,02}{39,48} = 0,963$$

$$\text{Nilai b} = \frac{40,85}{39,48} = 1,035$$

$$\text{Nilai c} = \frac{39,56}{39,48} = 1,002$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|0,963-1|+|1,035-1|+|1,002-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{0,037+0,035+0,002}{3} \times 100\% = 2,47\%$$

- Jam 19.00

Arus R = 56,8 A, Arus S = 55,81 A, Arus T = 54,8 A

$$\text{Arus rata-rata} = \frac{56,8 + 55,81 + 54,8}{3} = 55,8 \text{ A}$$

$$\text{Nilai a} = \frac{56,8}{55,8} = 1,0179$$

$$\text{Nilai b} = \frac{55,81}{55,8} = 1,0002$$

$$\text{Nilai c} = \frac{54,8}{55,8} = 0,982$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|1,0179-1|+|1,0002-1|+|0,982-1|}{3} \times 100\%$$

$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{0,0179+0,0002+0,018}{3} \times 100\% = 1,21\%$$

Hasil perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban menunjukkan adanya penurunan yang signifikan setelah dilakukan manuver penyeimbangan beban. Pada kondisi luar beban puncak (jam 10.00 WIT), tingkat ketidakseimbangan berhasil ditekan hingga sebesar 2,47%, di bawah batas toleransi 10% yang umumnya dianjurkan dalam sistem distribusi tenaga listrik.

Sementara itu, pada kondisi beban puncak (jam 19.00 WIT), ketidakseimbangan beban hanya sebesar 1,21%, yang juga menunjukkan kondisi distribusi beban antar fasa yang sangat baik. Hasil ini menandakan bahwa upaya redistribusi sambungan rumah (SR) ke fasa yang lebih ringan mampu memberikan dampak positif dalam menurunkan ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi.

4.3.3 Rugi – Rugi Netral Dan Persentase Loss Netral Akibat Arus Pada Penghantar Netral Setelah Penyeimbangan Beban

Setelah dilakukan penyeimbangan beban, arus yang mengalir pada penghantar netral juga mengalami perubahan sebagai dampak dari distribusi beban antar fasa yang menjadi lebih merata. Pengukuran arus netral dilakukan untuk mengevaluasi besarnya rugi-rugi daya yang masih terjadi pada penghantar netral pasca penyeimbangan.

Rugi-rugi daya pada penghantar netral diakibatkan oleh adanya arus netral yang mengalir melalui konduktor dengan nilai resistansi tertentu. Semakin besar arus netral yang mengalir, maka semakin besar pula energi yang hilang dalam bentuk panas. Untuk mengetahui efisiensi hasil penyeimbangan, berikut disajikan perhitungan rugi-rugi daya netral setelah penyeimbangan beban pada gardu distribusi PNIAI007 berdasarkan hasil pengukuran arus netral pasca manuver penyeimbangan beban:

- Jam 10.00
 $IN = 14,58 \text{ A}$
 $RN = 0,5049 \Omega/\text{km} \cdot 1,5 \text{ km} = 0,75735 \Omega$
- Jam 19.00
 $IN = 19,83 \text{ A}$
 $RN = 0,5049 \Omega/\text{km} \cdot 1,5 \text{ km} = 0,75735 \Omega$

Kemudian dilanjutkan menghitung daya netral yaitu sebagai berikut :

- Jam 10.00
 $PN = IN^2 \times RN$
 $= 14,58^2 \text{ A} \times 0,75735 \Omega = 161,16 \text{ Watt}$
- Jam 19.00
 $PN = IN^2 \times RN$
 $= 19,83^2 \text{ A} \times 0,75735 \Omega = 297,15 \text{ Watt}$

Diperoleh hasil bahwa rugi-rugi daya pada penghantar netral sebesar 161,16 Watt pada pukul 10.00 WIT (waktu LWBP) dan sebesar 297,15 Watt pada pukul 19.00 WIT (waktu WBP). Selanjutnya, dilakukan perhitungan persentase kerugian daya yang ditimbulkan oleh arus netral pada penghantar netral transformator:

$$\begin{aligned} P &= S \times \cos \varphi \\ &= 50.000 \text{ VA} \times 0,85 \\ &= 42.500 \text{ W} \end{aligned}$$

- Jam 10.00

$$\begin{aligned} \%Loss_{\text{siang}} &= \frac{P_n}{P} \times 100\% \\ &= \frac{161,16}{42500} \times 100 = 0,38 \% \end{aligned}$$

- Jam 19.00

$$\begin{aligned} \%Loss_{\text{malam}} &= \frac{P_n}{P} \times 100\% \\ &= \frac{297,15}{42500} \times 100 = 0,7 \% \end{aligned}$$

Setelah dilakukan proses penyeimbangan beban pada trafo PNIAI007, dilakukan kembali pengukuran untuk menilai sejauh mana pengaruhnya terhadap rugi daya pada penghantar netral. Hasil pengukuran terbaru menunjukkan bahwa arus netral mengalami penurunan cukup drastis, baik saat siang hari pukul 10.00 WIT maupun malam hari pukul 19.00 WIT.

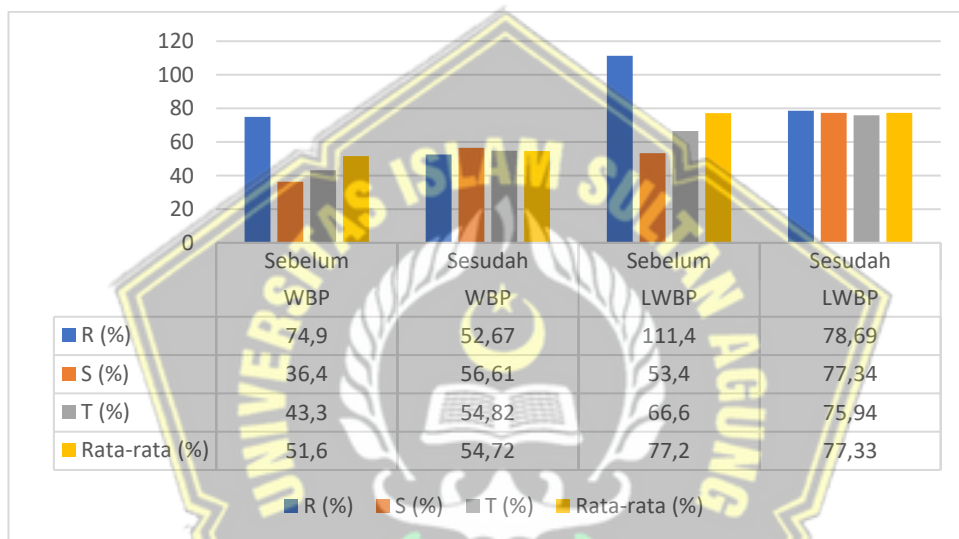
Berdasarkan hasil perhitungan, rugi daya netral pasca penyeimbangan tercatat sebesar 161,16 Watt pada siang hari dan 297,15 Watt pada malam hari. Jika dibandingkan dengan kondisi sebelum penyeimbangan yaitu sebesar 1.082,82 Watt dan 2.029,17 Watt maka terdapat penurunan rugi daya lebih dari 80%.

Persentase rugi daya terhadap total kapasitas trafo sebesar 42.500 Watt juga ikut menurun secara signifikan, menjadi hanya 0,38% di siang hari dan 0,7% di malam hari. Hal ini mengindikasikan bahwa upaya penyeimbangan beban yang dilakukan terbukti efektif dalam mengurangi arus netral yang berlebih, meningkatkan efisiensi distribusi energi, serta membantu menjaga performa trafo agar tetap andal dalam jangka panjang.

4.4 Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan Beban

Subbab ini membahas perbandingan antara kondisi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban pada trafo distribusi PNIAI007. Tujuannya adalah untuk menilai efektivitas upaya penyeimbangan yang telah dilakukan berdasarkan beberapa parameter penting, yaitu pembebanan fasa, tingkat ketidakseimbangan arus antar fasa, besarnya arus netral, dan rugi-rugi daya pada penghantar netral. Evaluasi ini dilakukan pada dua waktu pengukuran, yaitu pukul 10.00 WIT dan pukul 19.00 WIT. Berikut adalah ringkasan hasil perbandingan:

4.4.1 Persentase Pembebanan Gardu Distribusi PNIAI007

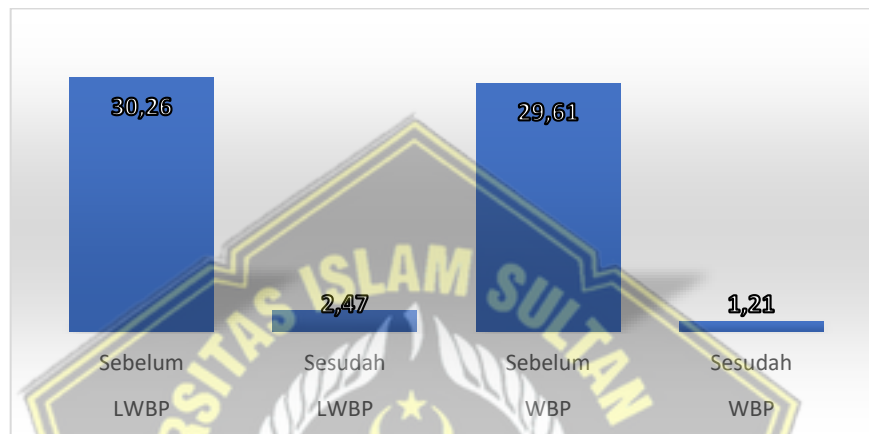


Gambar 4.1 Grafik Persentase Pembebanan Gardu Distribusi PNIAI007

Persentase pembebanan fasa menunjukkan distribusi arus pada masing-masing fasa terhadap kapasitas nominal transformator. Sebelum penyeimbangan, terlihat adanya ketimpangan signifikan, terutama pada jam 10.00 di mana fasa R mencapai 74,9% sementara fasa S hanya 36,4%. Ketimpangan paling mencolok terjadi pada jam 19.00, di mana fasa R mengalami pembebanan hingga 111,4%, melebihi kapasitas nominal trafo (overload), yang menunjukkan potensi beban WBP (Waktu Beban Puncak) yang tidak seimbang. Setelah penyeimbangan, distribusi pembebanan menjadi lebih merata dengan ketiga fasa berada di kisaran 52–56% pada jam 10.00 dan 75–78% pada jam 19.00. Hal ini menandakan peningkatan penyeimbangan beban antar fasa yang berkontribusi terhadap kestabilan dan keselamatan operasi sistem distribusi listrik. Namun, perlu dicermati

bahwa rata-rata pembebanan trafo pada jam 19.00 sudah mulai memasuki kisaran 80–100% dari kapasitas trafo, yang mengindikasikan bahwa trafo tersebut mendekati batas kapasitas optimalnya. Oleh karena itu, gardu distribusi ini sebaiknya dipertimbangkan untuk dilakukan penyisipan trafo baru (sisip trafo) atau peningkatan kapasitas (uprating) trafo guna mengantisipasi pertumbuhan beban di masa depan.

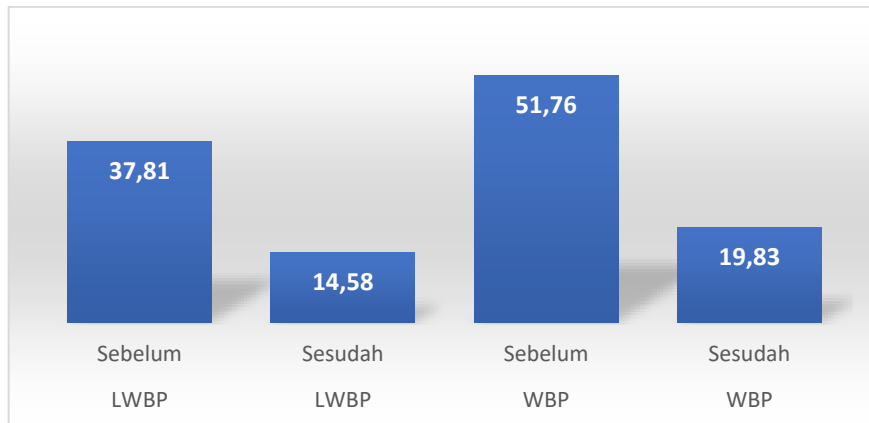
4.4.2 Tingkat Ketidakseimbangan Arus Gardu Distribusi PNIAI007



Gambar 4.2 Grafik Tingkat Ketidakseimbangan Arus Gardu Distribusi PNIAI007

Tingkat ketidakseimbangan arus mengindikasikan seberapa besar perbedaan antar arus fasa terhadap rata-ratanya. Sebelum penyeimbangan, tingkat ketidakseimbangan termasuk tinggi yaitu 30,26% pada jam 10.00 atau Luar Waktu Beban Puncak dan 29% pada Jam 19.00 atau Waktu Beban Puncak, ini berisiko menyebabkan arus netral besar serta rugi daya. Setelah penyeimbangan, ketidakseimbangan menurun drastis menjadi hanya 2,47% pada jam 10.00 atau Luar Waktu Beban Puncak dan 1,21% pada Jam 19.00 atau Waktu Beban Puncak, menunjukkan keberhasilan upaya penyeimbangan dalam menstabilkan Gardu Distribusi PNIAI007.

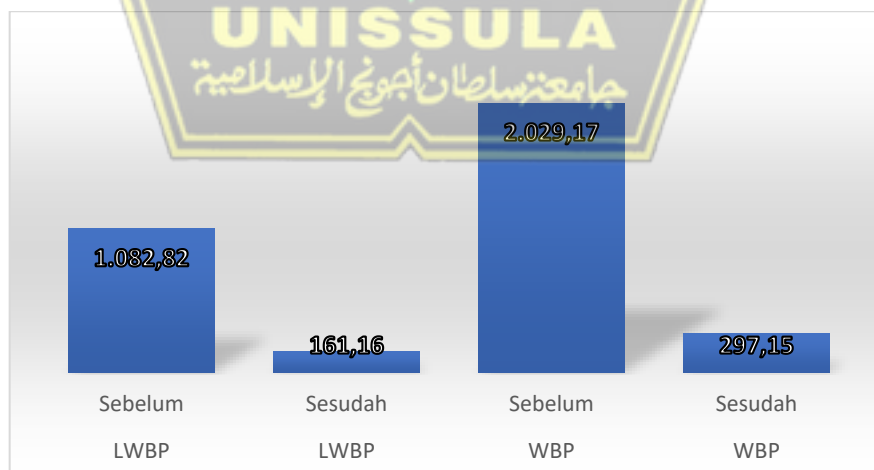
4.4.3 Arus Netral Gardu Distribusi PNIAI007



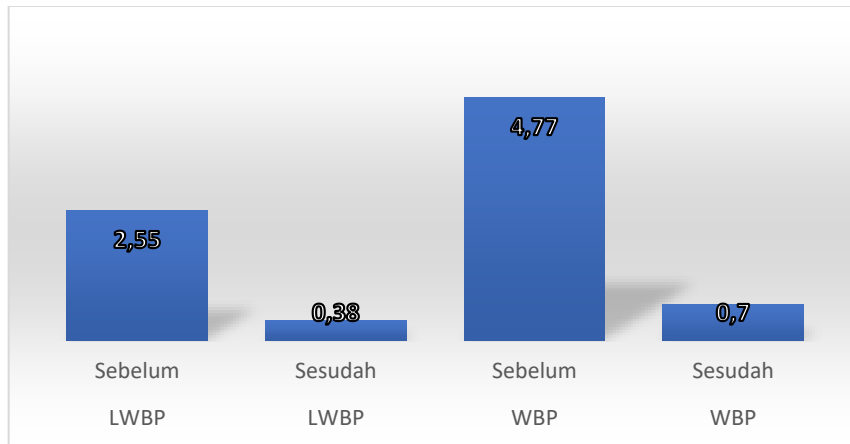
Gambar 4.3 Grafik Arus Netral Gardu Distribusi PNIAI007

Arus netral mencerminkan besarnya arus yang mengalir akibat ketidakseimbangan beban antar fasa. Sebelum penyeimbangan, arus netral sangat tinggi yaitu 37,81 A pada jam 10.00 dan 51,76 A pada jam 19.00. Setelah dilakukan penyeimbangan, nilai arus netral berkurang secara signifikan menjadi 14,58 A dan 19,83 A. Arus netral menurun drastis hingga sekitar 61% baik pada siang maupun malam hari. Ini membuktikan bahwa ketidakseimbangan beban yang menyebabkan arus netral tinggi berhasil diminimalisir pasca penyeimbangan.

4.4.4 Rugi-Rugi Daya dan %Loss Pada Penghantar Netral Gardu Distribusi PNIAI007



Gambar 4.4 Grafik Rugi-rugi Daya Netral



Gambar 4.5 Grafik Loss pada Penghantar Netral

Rugi-rugi daya pada penghantar netral disebabkan oleh arus netral yang mengalir akibat beban yang tidak seimbang. Sebelum penyeimbangan, rugi daya cukup besar yakni mencapai 1.082,82 Watt (2,55%) pada siang hari dan 2.029,17 Watt (4,77%) pada malam hari. Setelah penyeimbangan, nilai rugi daya menurun drastis menjadi 161,16 Watt (0,38%) dan 297,15 Watt (0,7%) masing-masing pada siang dan malam hari. Rugi-rugi daya akibat arus netral mengalami penurunan yang sangat signifikan, yaitu lebih dari 85% baik pada siang maupun malam hari. Ini menunjukkan efisiensi energi yang lebih baik setelah proses penyeimbangan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan perhitungan terhadap data pembebanan transformator sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan, maka dapat disimpulkan:

1. Distribusi pembebanan antar fasa menunjukkan ketidakseimbangan signifikan sebelum penyeimbangan, terutama pada waktu beban puncak. Pada pukul 19.00, fasa R mengalami pembebanan sebesar 111,4% dari kapasitas trafo, sementara fasa lainnya jauh di bawahnya. Setelah penyeimbangan dilakukan menggunakan metode dua titik waktu, distribusi beban menjadi lebih merata, dengan ketiga fasa berada dalam kisaran ideal 52–78%.
2. Nilai ketidakseimbangan arus berhasil ditekan secara signifikan dari kondisi awal sebesar 30,26% (siang) dan 29% (malam) menjadi hanya 2,47% dan 1,21% setelah redistribusi beban dilakukan. Hal ini menandakan keberhasilan strategi penyeimbangan manual dalam menstabilkan sistem distribusi tiga fasa.
3. Arus netral yang sebelumnya tinggi akibat ketidakseimbangan beban berhasil diturunkan secara signifikan. Nilainya berkurang dari 37,81 A dan 51,76 A menjadi 14,58 A dan 19,83 A, masing-masing pada siang dan malam hari. Penurunan arus netral ini berdampak langsung terhadap efisiensi dan keamanan operasional trafo.
4. Rugi daya akibat arus netral juga menunjukkan efisiensi energi yang meningkat. Sebelum penyeimbangan, rugi daya tercatat hingga 2.029,17 W (4,77%), dan setelah penyeimbangan turun menjadi 297,15 W (0,7%). Ini menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga lebih dari 85%.
5. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode penyeimbangan beban secara manual dengan pendekatan dua titik waktu efektif dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik, serta dapat diterapkan pada gardu distribusi lainnya dengan kondisi serupa.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, maka disampaikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Disarankan untuk mempertimbangkan penyisipan trafo tambahan atau peningkatan kapasitas transformator (uprating) guna mengantisipasi potensi pertumbuhan beban, khususnya pada periode beban puncak.
2. Evaluasi berkala terhadap tingkat keseimbangan beban perlu dilakukan guna menjaga keandalan sistem serta mencegah beban berlebih pada salah satu fasa.
3. Dalam proses penambahan pelanggan baru, sebaiknya memperhatikan kondisi pembebanan pada gardu agar tidak terjadi ketimpangan fasa yang berlebihan.
4. Bagi peneliti selanjutnya, penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk mengembangkan metode penyeimbangan beban yang lebih praktis dan sesuai dengan kondisi lapangan. Selain itu, pendekatan manual yang digunakan dalam penelitian ini juga dapat dikaji ulang agar lebih efisien, atau dikembangkan lebih lanjut dengan bantuan teknologi jika dibutuhkan.

Dengan demikian, penyeimbangan beban yang dilakukan terbukti mampu meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem distribusi, sekaligus memberikan manfaat terhadap umur peralatan dan kualitas layanan kepada pelanggan.

Daftar Pustaka

- Ardhianto, D., Utama, B., & Arsyad, M. (2023). Penyeimbangan Beban Trafo Distribusi 3 Fasa Pada Jaringan Tegangan Rendah (Studi Kasus PT. PLN (Persero) ULP Purwokerto Kota). *Jurnal Teknik Elektro*.
- Eri, S., & Sofyan Putra, K. (2017). Kerugian Daya Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Pada Transformator Distribusi. *Jurnal Sains & Teknologi Fakultas Teknik*, 7(1), 60–71.
- Ermawanto. (2013). Analisa Berlangganan Listrik Antara Tegangan Menengah (TM) Dengan Tegangan Rendah (TR) Dan Analisa Efisiensi Trafo Dalam Rangka Konservasi Energi Kampus Undip Tembalang.
- Gonen, T. (2008). *Electric Power Distribution System Engineering (Second)*. Crc Press.
- Iftiar, Y. (2024). Analisis Pembebanan Trafo Distribusi 200 Kva 20 KV/400 V Wilayah Ronggowarsito Dari Penyulang 5 Tambak Lorok Milik PT. PLN (Persero) UP 3 Semarang.
- Kawihing, A. P., Tuegeh, M., Patras, L. S., & Pakiding, M. (2013). Pemerataan Beban Transformator Pada Saluran Distribusi Sekunder. *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer*, 2(1), 1–9.
<https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/elekdankom/article/view/920>
- Khoirunisa, A. A. (2023). Analisis Pembeban Trafo Distribusi Pada Penyulang 6 PT. PLN (Persero) ULP Weleri Di Desa Gebangan Kecamatan Pageruyung. Universitas Islam Sultan Agung.
- Mulyadi, A. D. (2011). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Rugi Daya Saluran Netral Jaringan Distribusi Tegangan Rendah. *Jurnal Teknik Energi*.
- Novfowan, A. D., Mieftah, M., & Kusuma, W. (2023). Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 10(1), 54–56.
<https://doi.org/10.33795/elposys.v10i1.716>
- Okriyanto, W. (2019). Analisa Perencanaan Jaringan Distribusi Bawah Tanah Cluster Montana @The Green Perumahan Graha Candi Golf Semarang.

- Pranoto, S., Sofyan, & Rusli, N. N. (2020). Penyeimbangan Beban Pada Trafo Distribusi Penyulang Akkarena Di Unit Layanan Pelanggan Mattoanging PT PLN (Persero). *Jurnal Teknik Elektro*.
- Prasetya, I. W. Y., Setiawan, I. N., & Arjana, I. G. D. (2020). Analisis Ketidakseimbangan Beban Dan Harmonisa Pada Transformator Distribusi Mi 0096 Penyulang Abianbase. *Jurnal Spektrum*, 7(1), 109–115. <https://doi.org/10.24843/Spektrum.2020.V07.I01.P16>
- PT PLN (Persero). (1991). Splan 8-1:1991 - Spesifikasi Umum Transformator Distribusi.
- PT PLN (Persero). (2014). Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset. <https://id.scribd.com/document/348641264/1-Se-Har-Trafo-Dis-0017-E-Tahun-2014-Pdf>
- PT. PLN (Persero) UBSP3BJB. (1985). Pelatihan Operator Gardu Induk.
- PT. PLN (Persero) ULP Enarotali. (2025). Data – Data Internal Dan Lapangan.
- Rihi, J. J. D. (2023). Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Di Penyulang Batuplat PT. PLN (Persero) Ulp Kupang.
- Sentosa, J., Machmudsyah, T., & Isnanto, Y. (2006). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi. *Jurnal Teknik Elektro*, 6(1), 68–73.
- Siregar, M. A. (2013). Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Rayon Panam Pekanbaru.
- Soetiadi, R. D. P. (2023). Analisis Ketidakseimbangan Pembebanan Transformator Distribusi Tiga Fasa Wilayah Semarang Barat Di Daerah Dworowati.
- Sulasno. (2009). Teknik Konversi Energi Listrik Dan Sistem Pengaturan. Graha Ilmu.
- Sutikno. (2018). Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 Kv Dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(1), 1–7. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jte/article/view/26308>
- Wijaya, D. A. (2019). Analisa Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Pada Transformator 2500 Kva Departemen Spinning 4 Di Pt. Asia Pacific Fiber, Tbk.