

## Studi Analisa Perbaikan Beban Trafo Tidak Seimbang Gardu Portal Feeder 1 Batu Palano di PT.PLN (Persero) ULP Kayu Aro

Taufik Fata Muftiadi\*, Rosnita Rauf, Hazlif Najif

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Ekasakti, Padang

\*Email: [Taufikfata07@gmail.com](mailto:Taufikfata07@gmail.com)

### ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dapat meningkatkan rugi-rugi daya (*losses*), menurunkan efisiensi, serta mengurangi kemampuan penyaluran energi listrik sehingga berdampak pada kualitas pelayanan dan kerugian finansial. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban dan pengaruh penyeimbangan beban terhadap penurunan *losses* pada Trafo Depan Kantor Rayon (200 kVA) dan Trafo Dara Gumanti (50 kVA) di Gardu Portal Feeder 1 Batu Palano. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pengukuran arus dan tegangan sebelum dan sesudah penyeimbangan, perhitungan arus netral, rugi daya konduktor, rugi finansial, serta simulasi redistribusi beban antar fasa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *losses* total pada Trafo Depan Kantor Rayon menurun dari 90.309,7 W menjadi 80.033,65 W, sedangkan pada Trafo Dara Gumanti menurun dari 4.851,75 W menjadi 1.384,17 W setelah dilakukan penyeimbangan beban. Dari sisi efisiensi, Trafo Dara Gumanti mengalami peningkatan efisiensi dari 63,75% menjadi 89,09%, sementara Trafo Depan Kantor Rayon meningkat dari 17,81% menjadi 19,78%. Selain itu, penghematan rugi finansial mencapai Rp7.783.492 per bulan pada Trafo Depan Kantor Rayon dan Rp2.626.036,88 per bulan pada Trafo Dara Gumanti. Penelitian ini membuktikan bahwa penyeimbangan beban efektif dalam menurunkan arus netral, mengurangi *losses*, serta meningkatkan efisiensi transformator dan keandalan jaringan distribusi.

**Kata kunci:** Ketidakseimbangan Beban, *Losses*, Transformator Distribusi, *Saving* kWh.

### 1. PENDAHULUAN

PT PLN (Persero) memiliki tanggung jawab fundamental dalam menjamin ketersediaan serta keandalan suplai energi listrik bagi masyarakat Indonesia. Seiring dengan meningkatnya permintaan domestik, kualitas distribusi dan mutu tegangan menjadi parameter krusial dalam pelayanan publik. Namun, pada praktiknya, pertumbuhan jumlah pelanggan sering kali terkendala oleh kondisi *overload* transformator yang dipicu oleh ketidakseimbangan beban. Fenomena ini tidak hanya menghambat ekspansi sambungan pelanggan baru, tetapi juga memicu susut teknis (*technical losses*) yang berdampak langsung pada penurunan pendapatan perusahaan.

Mengingat urgensi tersebut, penelitian ini difokuskan pada optimalisasi pembebanan transformator di lingkup PT PLN (Persero) ULP Kayu Aro (UP3 Solok), khususnya pada Gardu Portal Feeder 1 Batu Palano. Masalah ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik memang kerap terjadi karena ketidaksamaan pemakaian energi listrik oleh pelanggan. Penelitian terdahulu tahun 2014 menunjukkan bahwa ketidakseimbangan pembebanan tertinggi dapat mencapai 127,02% yang memicu rugi-rugi jaringan yang signifikan [1]. Ketidakseimbangan ini menyebabkan munculnya arus di netral trafo yang memicu *losses*, baik pada penghantar netral maupun arus yang mengalir ke tanah [2], [3].

Faktor penyebab ketidakseimbangan ini beragam, mulai dari pembagian beban yang tidak beraturan hingga jarak jaringan yang melebihi standar SPLN, yang pada akhirnya mengakibatkan jatuh tegangan di luar ketentuan PUIL [4]. Pengukuran di lapangan menunjukkan bahwa persentase ketidakseimbangan beban sangat fluktuatif, di mana nilai

tertinggi sering terjadi pada waktu-waktu tertentu akibat penggunaan listrik yang tidak bersamaan oleh konsumen [5].

Guna mengatasi hal tersebut, diperlukan analisis mendalam mengenai besar beban puncak, persentase ketidakseimbangan, dan efisiensi trafo. Hasil analisis ini kemudian dibandingkan dengan standar yang berlaku, seperti Keputusan Direksi PT PLN (Persero) terkait standar konstruksi gardu dan jaringan tegangan rendah [5], [6], serta metode pemeliharaan berbasis manajemen aset [7]. Upaya penyeimbangan beban sangat krusial untuk mengoptimalkan energi dan meminimalisasi susut daya pada sistem distribusi 20 kV [3], [8]. Dengan melakukan perbaikan beban, diharapkan dapat dilakukan *setting* ulang sistem distribusi guna mengantisipasi gangguan atau kerusakan fatal pada transformator di masa mendatang.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

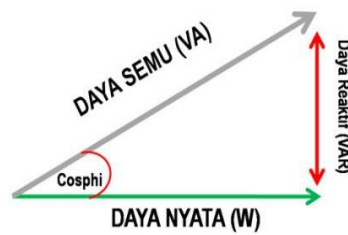
### 2.1 Ketidakseimbangan Beban Trafo

Penyeimbangan beban pada sistem distribusi tiga fasa merupakan instrumen krusial dalam menjaga efisiensi operasional dan memperpanjang usia pakai transformator. Kondisi beban yang tidak seimbang menyebabkan pemanfaatan kapasitas transformator menjadi tidak optimal, di mana salah satu fasa dapat mencapai titik jenuh beban sementara fasa lainnya masih berada jauh di bawah kapasitas nominalnya. Secara teknis, ketidakseimbangan ini ditandai dengan munculnya arus pada penghantar netral akibat resultan vektor arus ketiga fasa yang tidak bernilai nol, yang pada akhirnya memicu peningkatan rugi-rugi daya (*losses*) serta risiko kerusakan permanen pada unit transformator.

Faktor pemicu ketidakseimbangan beban tersebut umumnya bersumber dari prosedur instalasi dan manajerial di lapangan, seperti penentuan titik sambung baru yang hanya mengutamakan kemudahan akses fisik tanpa mempertimbangkan pemerataan fasa. Selain itu, praktik penyambungan deret yang melampaui batas standar maksimal pelanggan per fasa turut memperparah beban pincang dan menyebabkan jatuh tegangan (*voltage drop*) di ujung saluran. Kondisi ini diperburuk oleh minimnya pengawasan serta verifikasi data beban pasca-pemasangan, sehingga akumulasi beban pada fasa tertentu tidak terdeteksi secara dini dan mengakibatkan degradasi performa jaringan distribusi secara keseluruhan.

### 2.2 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi per satuan waktu yang digunakan untuk melakukan usaha dalam suatu sistem tenaga listrik [9]. Pada sistem arus bolak-balik (AC), daya diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama yang saling berhubungan dalam representasi trigonometri yang dikenal sebagai segitiga daya. Ketiga komponen tersebut meliputi daya aktif (P) dengan satuan Watt yang merepresentasikan energi aktual yang dikonversi menjadi usaha seperti panas atau cahaya, daya reaktif (Q) dengan satuan VAR yang berfungsi untuk pembentukan medan magnet pada beban induktif seperti transformator dan motor, serta daya semu (S) dengan satuan VA yang merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus total dalam jaringan.



Gambar 1. Segitiga Daya

Secara operasional, daya aktif mencerminkan daya rata-rata yang dikonsumsi secara riil oleh beban untuk menghasilkan energi mekanik atau termal. Di sisi lain, daya reaktif berperan penting dalam sirkulasi fluks magnetik namun tidak melakukan usaha nyata, sehingga keberadaannya perlu dikelola untuk menjaga efisiensi sistem. Interaksi antara daya aktif dan reaktif ini membentuk daya semu, yang menggambarkan total kapasitas daya yang dikeluarkan oleh sumber AC atau yang diserap oleh sistem distribusi. Penguasaan parameter-parameter ini menjadi fundamental dalam menganalisis keandalan dan faktor daya pada jaringan distribusi tenaga listrik.

### 2.3 Sistem Hubungan Bintang–Segitiga (Y– $\Delta$ )

Konfigurasi hubungan bintang (Y) dan segitiga ( $\Delta$ ) merupakan skema fundamental dalam sistem tenaga listrik tiga fasa yang berfungsi untuk menyelaraskan parameter tegangan dan arus antara sisi primer dan sekunder transformator [10]. Dalam implementasinya, hubungan bintang menyediakan titik pertemuan sentral yang diposisikan sebagai titik netral beban. Secara teoritis, apabila impedansi pada ketiga fasa berada dalam kondisi setimbang, maka resultan arus fasa akan saling meniadakan. Namun, pada sistem dengan netral mengambang (*floating neutral*), setiap perbedaan nilai impedansi akan menyebabkan pergeseran titik netral yang memengaruhi stabilitas tegangan sistem.

Ketidakseimbangan beban pada konfigurasi ini berimplikasi langsung pada munculnya arus netral akibat penjumlahan vektor arus fasa yang tidak bernilai nol. Fenomena tersebut memicu aliran arus residu melalui penghantar netral menuju titik kesetimbangan arus, yang secara teknis mengindikasikan adanya distribusi beban yang tidak merata. Analisis terhadap pergeseran tegangan dan kemunculan arus netral ini menjadi instrumen krusial dalam mengevaluasi efisiensi operasional transformator, terutama dalam memitigasi risiko kerugian teknis pada jaringan distribusi.

Sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa menggunakan dua konfigurasi utama, yaitu hubungan bintang (Y) dan segitiga ( $\Delta$ ), yang masing-masing memiliki karakteristik elektrikal spesifik. Hubungan bintang mengintegrasikan ujung lilitan pada satu titik netral, sehingga memungkinkan penggunaan tegangan fasa ( $V_{Ph}$ ) dan tegangan garis ( $V_L$ ) secara simultan dengan korelasi  $V_L = \sqrt{3} \times V_{Ph}$  dan arus garis yang identik dengan arus fasa ( $I_L = I_{Ph}$ ). Konfigurasi ini sangat efektif untuk menyuplai beban tidak seimbang melalui penghantar netral. Sebaliknya, hubungan segitiga membentuk rangkaian tertutup di mana tegangan garis sama dengan tegangan fasa ( $V_L = V_{Ph}$ ), namun arus garis meningkat sebesar  $\sqrt{3}$  kali arus fasa. Keunggulan sistem  $\Delta$  terletak pada kemampuannya menahan ketidakseimbangan antar-fasa dengan lebih stabil serta redundansi operasional apabila terjadi kerusakan pada salah satu lilitan.

Implementasi konversi antara hubungan Y dan  $\Delta$  menjadi strategi teknis untuk mengoptimalkan efisiensi sistem dan menyeimbangkan distribusi beban. Perubahan

konfigurasi ini berdampak langsung pada parameter daya aktif ( $P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \phi$ ) dan rugi-rugi daya (*losses*) dalam jaringan. Melalui konversi yang tepat, arus pada fasa yang mengalami beban lebih dapat direduksi, yang secara linear menurunkan intensitas rugi-rugi teknis dan meningkatkan penghematan energi (kWh). Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi hubungan transformator tidak hanya didasarkan pada kebutuhan tegangan beban, tetapi juga sebagai instrumen mitigasi terhadap inefisiensi akibat ketidakseimbangan pembebanan pada jaringan distribusi.

#### 2.4 Energi Tidak Tersalurkan Dan Saving Kwh

*Energy Not Served* (ENS) merupakan sistem distribusi yang merepresentasikan besarnya energi listrik yang gagal disalurkan kepada konsumen akibat adanya gangguan atau ketidakefisienan sistem. Dalam konteks trafo distribusi, ENS sering kali dipicu oleh ketidakseimbangan beban antar fasa (R, S, dan T) yang menyebabkan pergeseran sudut vektor beban dan munculnya arus pada penghantar netral. Fenomena ini tidak hanya mengakibatkan rugi-rugi teknis berupa panas (*losses*), tetapi juga berisiko memicu proteksi *thermal overload* yang menyebabkan pemutusan aliran listrik secara tiba-tiba. Ketidakseimbangan ini secara langsung membatasi kapasitas maksimal trafo dalam menyalurkan daya, karena salah satu fasa mungkin telah mencapai titik jenuh sementara fasa lainnya masih berada di bawah kapasitas optimalnya.

Upaya mitigasi melalui penyeimbangan beban (*load balancing*) bertujuan untuk mengoptimalkan kembali distribusi arus agar mendekati kondisi setimbang, yang pada akhirnya akan menghasilkan Saving kWh. *Saving kWh* didefinisikan sebagai jumlah energi yang berhasil diselamatkan dan dialihkan dari kerugian teknis menjadi energi produktif yang dapat dikonsumsi oleh pelanggan. Dengan meminimalisir arus netral dan memperbaiki profil tegangan di sisi ujung jaringan, efisiensi operasional trafo akan meningkat secara signifikan.

### 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1. Jenis dan Lokasi Penelitian

Jenis penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif yang menganalisa Sistem Indikator Gardu Distribusi dan Manajemen Beban Seimbang. Lokasi yang dipilih sebagai tempat pelaksanaan penelitian skripsi adalah PT. PLN (Persero) ULP Kayu Aro terkhususnya di gardu Depan Kantor dan gardu Dara Gumanti.

#### 3.2. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui komputasi matematis terhadap parameter teknis transformator untuk mengukur performa jaringan secara objektif. Data numerik yang terkumpul diproses melalui perhitungan arus primer, arus sekunder, serta analisis fluktuasi arus terhadap daya aktif yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik analitik guna mengidentifikasi pembebanan dan anomali sistem. Hasil perhitungan tersebut dievaluasi secara inferensial berdasarkan standar kelistrikan yang berlaku untuk memvalidasi tingkat ketidakseimbangan beban.

#### 3.3. Metode Perhitungan

- Daya aktif beban tiap fasa:

$$P_R = V_{RN} \times I_R \times \cos \phi \quad (1)$$

$$P_S = V_{SN} \times I_S \times \cos \phi \quad (2)$$

$$P_T = V_{TN} \times I_T \times \cos \phi \quad (3)$$

- Total beban tiga fasa:

$$P_{\text{Total}} = P_R + P_S + P_T \quad (4)$$

- Energi:

$$E = P \times t \quad (5)$$

- Arus Netral:

$$I_N = \sqrt{(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) - (I_R \cdot I_S + I_R \cdot I_T + I_S \cdot I_T)} \quad (6)$$

- Arus Tidak Seimbang:

$$I_{\text{ketidakseimbangan}} = \frac{(|a-1|) + (|b-1|) + (|c-1|)}{3} \times 100\% \quad (7)$$

- Losses:

$$P_{LR} = I_R^2 \cdot R \cdot L \quad (8)$$

$$P_{LS} = I_S^2 \cdot R \cdot L \quad (9)$$

$$P_{LT} = I_T^2 \cdot R \cdot L \quad (10)$$

$$P_{LN} = I_N^2 \cdot R \cdot L \quad (11)$$

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (12)$$

- Losses Finansial:

$$E_L = P \times t \quad (13)$$

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Deskripsi Data

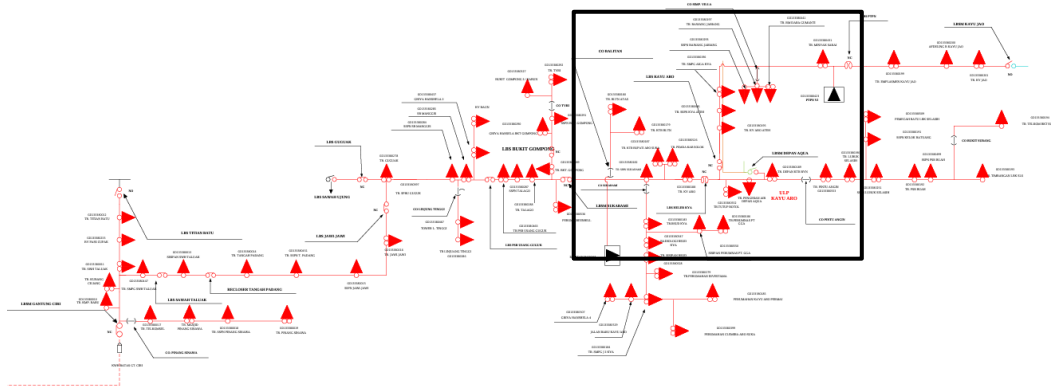
Karakteristik teknis dan profil data awal objek penelitian berpusat pada Penyulang Feeder 1 Batu Palano di wilayah kerja ULP Kayu Aro. Objek studi difokuskan pada dua unit transformator, yaitu Trafo Depan Kantor Rayon (Trafo 1) dan Trafo Dara Gumanti (Trafo 2) yang melayani kategori beban campuran antara sektor perkantoran dan pemukiman. Data primer diperoleh melalui dua tahapan observasi, yakni pengukuran pra-penyeimbangan pada 29 Oktober 2025 dan pasca-penyeimbangan pada 14 November 2025. Analisis terhadap spesifikasi serta kondisi operasional ini menjadi basis empiris untuk memetakan pengaruh variasi pembebanan antar-fasa terhadap kinerja transformator, sekaligus menjadi landasan dalam mengalkulasi tingkat ketidakseimbangan beban dan rugi-rugi teknis (*losses*) pada sistem distribusi.

**Tabel 1.** Spesifikasi Trafo

No	Data Trafo	Trafo 1	Trafo 2
1	Merk Trafo	STARLITE	TRAFINDO
2	Nomor Trafo	DKR-T-0040	DRG-T-0299
3	Jenis Trafo	1 x 3 fasa	1 x 3 fasa
4	Frekuensi	50 Hz	50 Hz
5	Faktor Daya	0,9	0,9
6	Pabrikan	PT. Asata Utama EI	PT. Trafindo Prima Perkasa
7	Daya	200 kVA	50 kVA
8	Hubungan	Dyns	Yzns
9	Tegangan Nominal	400 V	400 Volt
10	Arus Nominal	288,6 A	72,17 A
11	Impedansi	4%	4 %
12	Volume Minyak	315 Kg	160 Liter

13	Berat Total	1275 Kg	615 Kg
----	-------------	---------	--------

Berdasarkan hasil survey lapangan dan data hasil pengukuran beban trafo penulis mengambil data gardu portal pada Feeder ULP Kayu Aro khususnya di daerah Depan Kantor Rayon dan Dara Gumanti untuk diseimbangkan. Berikut gambar *single line* gardu pada *Feeder* ULP Kayu Aro.



**Gambar 1.** *Single Line Gardu* Feeder Kayu Aro

Penyeimbangan beban trafo yang akan dilakukan pada penelitian kali ini dengan cara melakukan pengukuran besaran arus dan tegangan perfasa untuk menentukan persentase ketidakseimbangan dan menghitung kWh yang tidak tersalurkan akibat beban tidak seimbang. Dari perhitungan tersebut akan didapatkan saving kwh setelah dilakukan penyeimbangan beban trafo. *Saving* kWh ini nantinya akan konversikan dalam bentuk Rupiah sehingga didapat seberapa besar penyelamatan secara finansial yang didapat dari penyeimbangan beban trafo tersebut.

**4.2 Data Beban Untuk Penyeimbangan Beban**

Berdasarkan hasil pengukuran beban pada trafo yang direncanakan untuk diseimbangkan, dilakukan simulasi perhitungan guna memprediksi kondisi setelah penyeimbangan. Simulasi ini bertujuan untuk memperoleh gambaran hasil yang optimal sebelum tindakan penyeimbangan beban trafo dilakukan.

**Tabel 2.** Perhitungan Simulasi untuk Penyeimbangan Beban Trafo.

No	Tempat	Beban Sebelum			Rujukan Nilai per-Fasa	Rencana Pemindahan Beban					Perkiraan Beban Sesudah			
		R	S	T		R-S	R-T	S-T	S-R	T-R	T-S	R	S	T
1	Depan Kantor Rayon	147,9	118,5	161,2	141,2	5,4	-	-	-	-	18,7	141	142	139
2	Dara Gumanti	28,2	3,9	26,3	19,5	8,71	-	-	-	-	6,85	20	19	19

Tindakan memindahkan beban dari fasa yang arusnya tinggi ke fasa yang arusnya rendah merupakan inti dari penyeimbangan beban (*load balancing*). Proses ini harus dimulai dengan pengukuran ulang yang cermat untuk memverifikasi dampak setiap kali pemindahan sambungan dilakukan, guna mencegah kelebihan beban mendadak pada fasa yang baru (fasa ringan). Prioritaskan untuk memindahkan sambungan yang memiliki

beban besar dan stabil terlebih dahulu, karena satu pemindahan ini akan memberikan efek penyeimbangan yang jauh lebih besar dibandingkan memindahkan banyak sambungan kecil.

#### 4.3 Perhitungan Daya Aktif Beban Tiap Fasa Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Perhitungan daya aktif di Trafo Depan kantor sebelum diseimbangkan menggunakan persamaan 1,2 dan 3 sebagai berikut:

Daya aktif beban pada fasa R:

$$\begin{aligned} P_R &= V_{RN} \times I_R \times \cos \emptyset \\ &= 240 \times 147,9 \times 0,9 \\ &= 31.946,40 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Daya aktif beban pada fasa S:

$$\begin{aligned} P_S &= V_{SN} \times I_S \times \cos \emptyset \\ &= 239 \times 118,5 \times 0,9 \\ &= 25.489,35 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Daya aktif beban pada fasa T:

$$\begin{aligned} P_T &= V_{TN} \times I_T \times \cos \emptyset \\ &= 240 \times 161,2 \times 0,9 \\ &= 34.819,20 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan nilai daya aktif beban pada setiap fasanya di trafo Depan Kantor Rayon, maka didapatkanlah nilai daya total menggunakan persamaan 4 sebagai berikut:

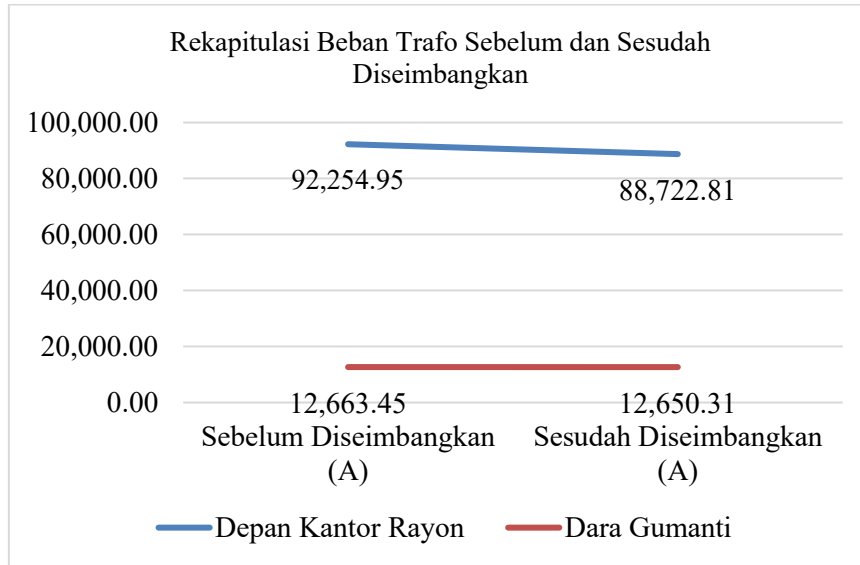
$$\begin{aligned} P_{Total} &= P_R + P_S + P_T \\ P_{Total} &= 92.254,95 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama didapatkanlah perhitungan daya aktif beban di Depan Kantor dan Dara Gumanti sebelum dan sesudah diseimbangkan pada tabel 3. Data ini digunakan sebagai dasar perhitungan daya, energi, arus netral, ketidakseimbangan beban, serta rugi-rugi daya pada kondisi awal sebelum dilakukan penyeimbangan

**Tabel 3.** Rekapitulasi Beban (Daya Aktif) Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan

No	Lokasi Trafo	P <sub>total</sub> Sebelum (W)	P <sub>total</sub> Sesudah (W)
1	Depan Kantor Rayon	92.254,95	88.722,81
2	Dara Gumanti	12.663,45	12.650,31

Berdasarkan gambar 2 grafik perbandingan beban tidak seimbang pada Trafo Depan Kantor Rayon dan Trafo Dara Gunanti, terlihat adanya penurunan nilai arus tidak seimbang setelah dilakukan proses penyeimbangan beban. Pada Trafo Depan Kantor Rayon, nilai ketidakseimbangan menurun dari 92.254,95 Watt menjadi 88.722,81 Watt, yang menunjukkan adanya perbaikan distribusi beban antar fasa. Sementara itu, pada Trafo Dara Gunanti nilai ketidakseimbangan juga mengalami penurunan dari 12.663,45 Watt menjadi 12.650,31 Watt. Penurunan ini mengindikasikan bahwa tindakan penyeimbangan beban berhasil mengurangi selisih arus antar fasa sehingga ketidakseimbangan sistem menjadi lebih kecil. Dengan berkurangnya arus tidak seimbang, rugi daya dan potensi gangguan terhadap kualitas pelayanan listrik dapat diminimalkan, sehingga kinerja penyaluran energi listrik menjadi lebih optimal.



**Gambar 2.** Grafik Beban Tidak Seimbang Trafo Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

#### 4.4 Perhitungan Energi Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Perhitungan energi dilakukan untuk periode 24 jam di Depan Kantor Rayon menggunakan persamaan 5 sebagai berikut:

$$E = P \cdot t$$

$$E = 92.254,95 \times 24$$

$$= 2.214.429,36 \text{ Wh}$$

$$= 2.214,43 \text{ kWh/hari}$$

Perhitungan energi dilakukan untuk periode 24 jam di Dara Gumanti :

$$E = P \cdot t$$

$$E = 12.663,45 \times 24$$

$$= 304.234,80 \text{ Wh}$$

$$= 304,23 \text{ kWh/hari}$$

Dengan cara yang sama didapatkanlah perhitungan energi di Depan Kantor dan Dara Gumanti sebelum dan sesudah diseimbangkan pada tabel 4.

**Tabel 4.** Rekapitulasi Energi Beban (Daya Aktif) Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan

No	Lokasi Trafo	$E_{\text{beban}}$ Sebelum (kWh/hari)	$E_{\text{beban}}$ Sesudah (kWh/hari)
1	Depan Kantor Rayon	2.214,43	2.129,35
2	Dara Gumanti	304,23	303,61

#### 4.5 Perhitungan Arus Netral Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Pada sistem tiga fasa empat kawat, arus netral timbul akibat ketidakseimbangan arus antar fasa. Secara fasor, arus netral merupakan resultan dari arus fasa R, S, dan T. Karena ketiga fasor arus berselisih sudut  $120^\circ$ , besar arus netral dapat dihitung menggunakan persamaan 6 sebagai berikut:

Nilai arus netral ( $I_N$ ) Depan Kantor Rayon :

$$I_N = \frac{\sqrt{(147,9^2 + 118,5^2 + 161,2^2) - (147,9 \cdot 118,5 + 147,9 \cdot 161,2 + 118,5 \cdot 161,2)}}{3}$$

$$I_N = \sqrt{1.432,3}$$

$$I_N = 37,85 \text{ A}$$

Nilai arus netral ( $I_N$ ) Dara Gumanti :

$$I_N = \frac{\sqrt{(28,2^2 + 3,9^2 + 26,3^2) - (28,2 \cdot 3,9 + 28,2 \cdot 26,3 + 3,9 \cdot 26,3)}}{3}$$

$$I_N = \sqrt{547,9}$$

$$I_N = 23,41 \text{ A}$$

Ketidakseimbangan beban pada transformator merupakan kondisi ketika arus pada masing-masing fasa (R, S, dan T) tidak memiliki nilai yang sama. Untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan tersebut secara kuantitatif, diperlukan suatu parameter yang dapat menggambarkan deviasi arus tiap fasa terhadap kondisi ideal seimbang. Dalam penelitian ini, persentase ketidakseimbangan beban dihitung berdasarkan perbandingan arus masing-masing fasa terhadap arus rata-rata. Dengan cara yang sama didapatkanlah perhitungan arus netral di Depan Kantor dan Dara Gumanti sebelum dan sesudah diseimbangkan pada tabel 5.

**Tabel 5.** Rekapitulasi Beban dan Arus Netral Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

No	Lokasi Trafo	Arus Netral (A)	
		Sebelum	Sesudah
1	Depan Kantor Rayon	37,85	8,75
2	Dara Gumanti	23,41	1,84

Data pada tabel 5 menunjukkan bahwa kedua transformator berada dalam kondisi beban tidak seimbang sebelum dilakukan penyeimbangan. Kondisi ini menjadi dasar untuk dilakukan analisis lebih lanjut mengenai persentase ketidakseimbangan beban, perhitungan losses, serta evaluasi dampak penyeimbangan beban pada subbab berikutnya.

#### 4.6 Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Ketidakseimbangan beban pada transformator merupakan kondisi ketika arus pada masing-masing fasa (R, S, dan T) tidak memiliki nilai yang sama. Untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan tersebut secara kuantitatif, diperlukan suatu parameter yang dapat menggambarkan deviasi arus tiap fasa terhadap kondisi ideal seimbang. Dalam penelitian ini, persentase ketidakseimbangan beban dihitung berdasarkan perbandingan arus masing-masing fasa terhadap arus rata-rata. Metode ini dipilih karena secara langsung merepresentasikan perbedaan distribusi arus antar fasa pada sistem tiga fasa.

$$I_{\text{avg}} = \frac{147,9 + 118,5 + 161,2}{3} = 142,5 \text{ A}$$

Hitung a, b, c

$$a = \frac{147,9}{142,5} = 1,04$$

$$b = \frac{118,5}{142,5} = 0,83$$

$$c = \frac{161,2}{142,5} = 1,13$$

Perhitungan ketidakseimbangan menggunakan persamaan 7:

$$I_{ket} = \frac{|1,04 - 1| + |0,83 - 1| + |1,13 - 1|}{3} \times 100\%$$

$$I_{ket} = \frac{0,04 + 0,17 + 0,13}{3} \times 100\%$$

$$I_{ket} = 0,1124 \times 100\% = 11,24\%$$

Dengan cara yang sama didapatkanlah perhitungan arus netral dan persentase ketidakseimbangan di Depan Kantor dan Dara Gumanti sebelum dan sesudah diseimbangkan pada tabel 6.

**Tabel 6.** Rekapitulasi Beban dan Arus Netral Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

No	Lokasi Trafo	Persentase Ketidakseimbangan (%)	
		Sebelum	Sesudah
1	Depan Kantor Rayon	11,24	2,39
2	Dara Gumanti	53,3	3,88

Data pada tabel 6 menunjukkan bahwa kedua transformator berada dalam kondisi beban tidak seimbang sebelum dilakukan penyeimbangan. Kondisi ini menjadi dasar untuk dilakukan analisis lebih lanjut mengenai persentase ketidakseimbangan beban, perhitungan losses, serta evaluasi dampak penyeimbangan beban pada subbab berikutnya. Nilai ketidakseimbangan dihitung sebesar 3,88 %. Nilai ini menunjukkan bahwa kondisi beban pada transformator berada dalam kategori sangat seimbang, karena jauh di bawah batas maksimal 10% sesuai standar PLN.

**Tabel 7.** Standar Health Index Trafo menurut Edaran Direksi No. 017.E/DIR/2014

Characteristic Group	Characteristic	Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Load Reading and Profiling	Ketidakseimbangan Arus Antar Fasa	< 10%	10% – <20%	20% – <25%	≥ 25%
	Besar Arus Netral (% terhadap arus beban trafo)	< 10%	10% – <20%	15% – <20%	≥ 20%
	Pembebanan Trafo (% terhadap kapasitas)	< 10%	10% – <60%	60% – <80%	≥ 80%

#### 4.7 Menghitung Losses Gardu sampai Titik Beban Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Jenis penghantar yang digunakan adalah kabel SKUTR aluminium dengan luas penampang 70 mm<sup>2</sup> untuk fasa dan 50 mm<sup>2</sup> untuk netral. Panjang jaringan dari gardu hingga titik beban adalah 3 km. Rugi-rugi daya pada penghantar fasa dihitung menggunakan persamaan 8-12:

Losses pada fasa R

$$P_{LR} = I_R^2 \cdot R \cdot L$$

$$= 147,9^2 \text{ A} \cdot 0,443 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 3 \text{ km}$$

$$= 29.005,5 \text{ Watt}$$

Losses pada fasa S

$$P_{LS} = I_S^2 \cdot R \cdot L$$

$$= 118,5^2 \text{ A} \cdot 0,443 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 3 \text{ km}$$

$$= 18.620,0 \text{ Watt}$$

Losses pada fasa T

$$P_{LT} = I_T^2 \cdot R \cdot L$$

$$= 161,2^2 \text{ A} \cdot 0,443 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 3 \text{ km}$$

$$= 34.456,7 \text{ Watt}$$

Losses pada Netral

$$P_{LN} = I_N^2 \cdot R \cdot L$$

$$= 37,85^2 \text{ A} \cdot 0,581 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 3 \text{ km}$$

$$= 2.497,1 \text{ Watt}$$

Losses pada Grounding

$$P_G = I_N^2 \cdot R$$

$$= 37,85^2 \text{ A} \cdot 4 \text{ } \Omega$$

$$= 5.730,5 \text{ Watt}$$

$$P_{LossesTotal} = P_{LR} + P_{LS} + P_{LT} + P_{LN} + P_G$$

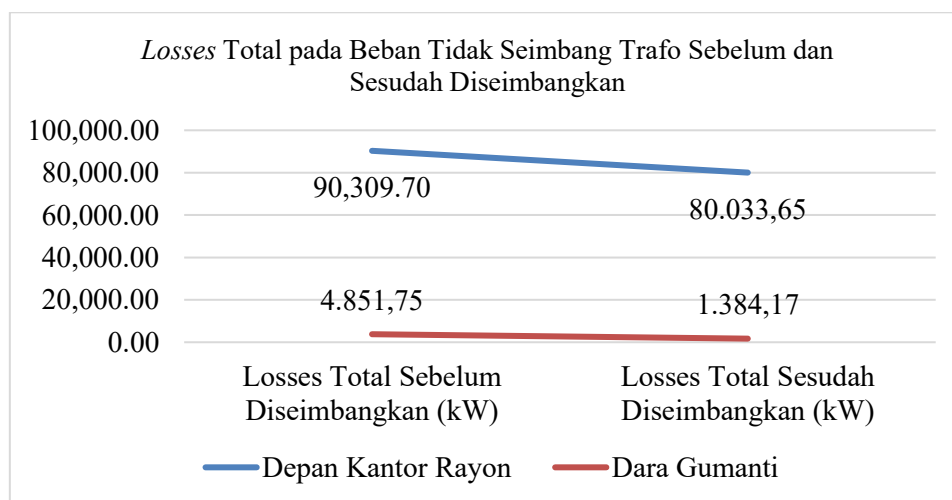
$$= 29.005,5 + 18.620,0 + 34.456,7 + 2.497,1 + 5.730,5$$

$$= 90.309,7 \text{ Watt}$$

Dengan cara yang sama didapatkanlah perhitungan *losses* di Depan Kantor dan Dara Gumanti sebelum dan sesudah diseimbangkan pada tabel 8.

**Tabel 8.** *Losses* Total pada Beban Tidak Seimbang Trafo Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

No	Tempat	<i>Losses</i> Sebelum (Watt)	<i>Losses</i> Sesudah (Watt)
1	Depan Kantor Rayon	90.309,7	80.033,65
2	Dara Gumanti	4.851,75	1.384,17



**Gambar 3.** *Losses* Total pada Beban Tidak Seimbang Trafo Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Berdasarkan gambar 3 grafik *losses* total pada beban tidak seimbang sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban, terlihat adanya penurunan nilai rugi daya pada kedua trafo. Pada Trafo Depan Kantor Rayon, nilai *losses* total turun dari 90.309,7 W menjadi 80.033,65 W. Penurunan ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan arus antar fasa yang sebelumnya menyebabkan rugi daya tinggi dapat dikurangi melalui proses redistribusi beban. Sementara itu, pada Trafo Dara Gumanti, *losses* total juga mengalami penurunan yang signifikan, yaitu dari 4.851,75 W menjadi 1.384,17 W setelah penyeimbangan dilakukan. Hal ini menandakan bahwa sistem bekerja lebih efisien, karena rugi-rugi energi akibat ketidakseimbangan beban telah berhasil diminimalkan.

#### 4.8 Perhitungan Losses Finansial Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Secara umum, proses penyeimbangan beban pada trafo terbukti mampu menurunkan nilai kWh tidak tersalur. Ketika kondisi beban antar fasa semakin seimbang, kinerja trafo menjadi lebih optimal dan perangkat bekerja dalam keadaan yang lebih sehat. Upaya *balancing* yang telah dilakukan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kWh tidak tersalur, sehingga diperoleh penghematan energi (*saving kWh*) yang cukup besar.

**Tabel 9.** *Saving* Energi kWh yang Didapatkan Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan

Uraian	Depan Kantor Rayon kWh Tidak Tersalur kWh			Dara Gumanti kWh Tidak Tersalur kWh		
	1 Jam	1 hari	1 bulan	1 Jam	1 hari	1 bulan
	Sebelum Diseimbangkan	90,309	2.167,4	65.022,5	4,851	116,4
Sesudah Diseimbangkan	80,033	1.920,8	57.623,8	1,384	33,2	996,5
Selisih	10,276	246,6	7.398,7	3,467	83,2	2.496,2

Tabel 9 merupakan hasil perhitungan *saving* energi sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban. Energi yang tidak tersalurkan (kWh tidak tersalur) mengalami penurunan yang signifikan pada kedua lokasi. Pada Trafo Depan Kantor Rayon, nilai energi tidak tersalur menurun dari 90,309 kWh/jam menjadi 80,033 kWh/jam, sehingga diperoleh penghematan sebesar 10,276 kWh/jam atau setara 7.398,7 kWh/bulan. Sementara itu, pada Trafo Dara Gumanti terjadi penurunan energi tidak tersalur dari 4,851 kWh/jam menjadi 1,384 kWh/jam, dengan penghematan sebesar 3,467 kWh/jam atau setara 2.496,2 kWh/bulan. Hasil ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban mampu menekan rugi-rugi energi dan meningkatkan efisiensi penyaluran daya pada sistem distribusi.

Dampak positif serupa juga terlihat pada lokasi Dara Gumanti, di mana energi yang berhasil diselamatkan mencapai 2.496,2 kWh per bulan. Penurunan kerugian energi terjadi dari 4,851 kWh per jam sebelum penyeimbangan menjadi 1,384 kWh per jam setelah penyeimbangan, sehingga diperoleh selisih sebesar 3,467 kWh per jam.

Perhitungan *losses* finansial dilakukan berdasarkan energi rugi-rugi daya (*losses* jaringan) yang diasumsikan konstan selama 24 jam per hari dan 30 hari per bulan. Rumus *losses* finansial dapat dihitung dengan persamaan 13.

Untuk menghiung *losses* finansial di Depan Kantor Rayon, dibutuhkan data total *losses* dan nilai rupiah untuk setiap *losses*nya. Harga jual/kWh rata rata bulan Desember 2024

ULP Kayu Aro sebesar Rp. 1.052,-. Data untuk nilai total lossesnya ada pada perhitungan point 3 yaitu Menghitung *Losses* Gardu sampai Titik Beban.

$$E_L = P \times t$$

$$E_{L/BULAN} = 90.309,7 \times 24 \times 30 \times 1052$$

$$E_{L/BULAN} = \text{Rp } 68.404.179$$

Losses finansial di Dara Gumanti:

$$E_{L/BULAN} = 4.851,75 \times 24 \times 30 \times 1052$$

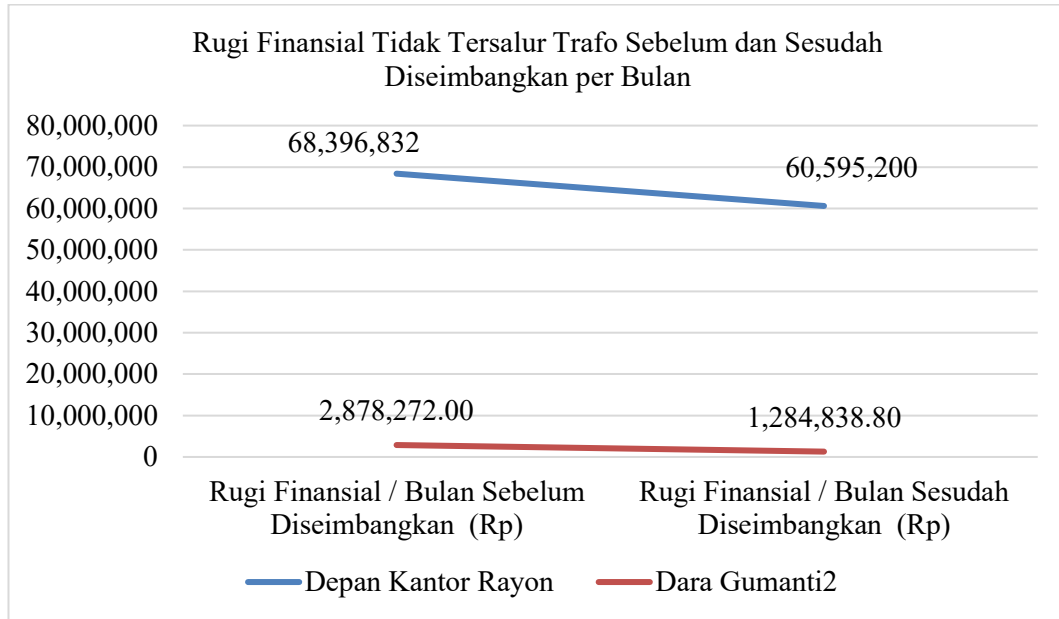
$$E_{L/BULAN} = \text{Rp } 3.674.909$$

**Tabel 10.** *Saving* Rupiah yang Didapatkan Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan

Uraian	Depan Kantor Rayon			Dara Gumanti		
	Rp Tidak Tersalur Rupiah			Rp Tidak Tersalur Rupiah		
	1 Jam	1 hari	1 bulan	1 Jam	1 hari	1 bulan
Sebelum Diseimbangkan	94.995,6	2279894,4	68.396.832	6.630,82	95.942,4	2.878.272
Sesudah Diseimbangkan	84.160	2019840	60.595.200	1.784,5	38.710,7	1.284.838,8
Selisih	10.835,60	260.054,40	7.801.632,00	4.846,32	57.231,70	1.593.433,20

Berdasarkan tabel 10 rugi finansial tidak tersalur pada Trafo Depan Kantor Rayon dan Trafo Dara Gumanti sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban, terlihat adanya pengurangan kerugian finansial yang cukup signifikan pada kedua trafo. Pada Trafo Depan Kantor Rayon, rugi finansial per jam menurun sebesar Rp 10.835,60, yaitu dari Rp 94.995,60 menjadi Rp 84.160,00. Secara harian, penurunan mencapai Rp 260.054,40, sementara dalam skala bulanan kerugian berkurang sebesar Rp 7.801.632,00. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses penyeimbangan beban dapat menekan energi tidak tersalur sehingga berdampak langsung pada pengurangan biaya kerugian perusahaan.

Pada Trafo Dara Gumanti, penurunan rugi finansial juga terlihat jelas. Rugi per jam turun sebesar Rp 4.846,32, dari Rp 6.630,82 menjadi Rp 1.784,50. Dalam skala harian terjadi penurunan sebesar Rp 57.231,70, sedangkan rugi finansial bulanan berkurang sebesar Rp 1.593.433,20. Penurunan ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada trafo telah berhasil diminimalkan sehingga energi yang sebelumnya tidak tersalur dapat ditekan.



**Gambar 4.** *Losses* Total pada Beban Tidak Seimbang Trafo Sebelum dan Sesudah Diseimbangkan

Grafik pada gambar 4 menunjukkan perbandingan kerugian finansial antara kondisi sebelum dan sesudah penyeimbangan beban. Secara garis besar, grafik tersebut memperlihatkan bahwa perbaikan teknis pada trafo berdampak langsung pada penghematan biaya perusahaan. Pada Trafo Depan Kantor Rayon, grafik mencatat penurunan kerugian yang cukup besar. Meskipun secara visual garisnya terlihat landai karena skala angkanya yang besar. Hal ini membuktikan bahwa pada trafo dengan beban tinggi, penyeimbangan arus fasa sangat krusial untuk menyelamatkan potensi pendapatan yang hilang.

Sementara itu, pada Trafo Dara Gumanti efisiensinya terlihat jauh lebih drastis. Grafik menunjukkan penurunan biaya kerugian hingga lebih dari 50%. Kemiringan garis yang tajam pada trafo ini memperlihatkan bahwa tindakan penyeimbangan beban berhasil memangkas inefisiensi secara total. Secara keseluruhan, tren menurun pada kedua garis grafik tersebut menjadi bukti kuat bahwa semakin seimbang beban sebuah trafo, maka nilai energi yang tidak tersalurkan (ENS) akan semakin kecil dan keuntungan perusahaan akan meningkat.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa maka dapat disimpulkan :

1. Kegiatan penyeimbangan beban trafo yang telah dilaksanakan pada Desember 2025 terbukti memberikan kontribusi signifikan dalam menekan angka kehilangan daya teknis pada sistem distribusi. Berdasarkan hasil pengukuran, tindakan ini mampu menurunkan nilai losses trafo di lokasi Depan Kantor Rayon secara drastis, yakni dari angka 90.309,7 Watt menjadi 80.033,65 Watt. Hasil positif yang lebih efektif secara proporsional juga terlihat pada lokasi Dara Gumanti, di mana rugi-rugi daya berhasil dipangkas dari 4.851,75 Watt ke titik operasional yang jauh lebih efisien sebesar 1.384,17 Watt.
2. Dari sisi finansial, penyeimbangan beban memberikan dampak penghematan yang cukup besar. Pada Trafo Depan Kantor Rayon, rugi finansial dapat ditekan hingga Rp

7.783.492 per bulan, sedangkan pada Trafo Dara Gumanti diperoleh penghematan sebesar Rp2.626.036,88 per bulan. Hasil ini menunjukkan bahwa pengurangan energi tidak tersalur secara langsung menurunkan biaya kerugian perusahaan.

3. Kegiatan penyeimbangan beban trafo berhasil meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan. Di Trafo Dara Gumanti, efisiensi meningkat yakni dari 63,75% menjadi 89,09%, yang menunjukkan performa trafo kini jauh lebih optimal. Sementara itu, Trafo Depan Kantor Rayon juga mengalami kenaikan efisiensi dari 17,81% menjadi 19,78%. Peningkatan ini membuktikan bahwa pembagian beban yang merata antar fasa mampu menekan rugi-rugi daya dan arus netral, sehingga penyaluran energi menjadi lebih efektif dan menjaga keandalan perangkat distribusi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Ardianto, B. Utama, and M. Arsyad, "Penyeimbangan Beban Trafo Distribusi 3 Fasa pada Jaringan Tegangan Rendah (Studi Kasus PT. PLN (Persero) ULP Purwokerto Kota)," *JMTE*, vol. 1, no. 1, pp. 31–43, Aug. 2020.
- [2] S. P. FIRDAUS, "Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi PT. PLN Tarakan (Kalimantan)," Bandung, 2022.
- [3] T. Sukmadi and B. Winardi, "Perhitungan dan Analisis Keseimbangan Beban pada Sistem Distribusi 20 kV terhadap Rugi-Rugi Daya (Studi Kasus pada PT. PLN UPP Slawi)," *Transmisi, Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 47–52, Mar. 2009.
- [4] A. T. M. Nugraha, S. Sutisna, A. Andang, and M. A. Risnandar, "Analisis Penyeimbangan Beban Pada Transformator di Fakultas Pertanian Universitas Siliwangi," *Journal of Energy and Electrical Engineering*, vol. 3, no. 2, Apr. 2022, doi: 10.37058/jeee.v3i2.3679.
- [5] PT. PLN (Persero), *Keputusan Direksi PT PLN (Persero) No. 605.K/DIR/2010 tentang Penetapan Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik (Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik)*. 2010.
- [6] PT. PLN (PERSERO), *Keputusan Direksi PT PLN (Persero) Nomor 475.K/DIR/2010 Tentang Penetapan Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Rendah Tenaga Listrik*. 2010.
- [7] PT. PLN (PERSERO), "Edaran Direksi PLN nomor 0017/E.DIR/2014 tentang Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Bebas Kaidah Manajemen Aset," 2014.
- [8] A. Bachtiar and D. Aprinaldo, "Optimasi Penyeimbangan Beban Pada Trafo Distribusi Terhadap Susut Energi," Padang, 2020.
- [9] W. N. Agustianingsih, F. Kurniawan, and P. Setiawan, "Analisis Ketepatan Pengukur Daya dan Faktor Daya Listrik Berbasis Arduino Uno R3 328P," *Aviation Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, and Controls (AVITEC)*, vol. 3, no. 1, p. 15, Nov. 2020, doi: 10.28989/avitec.v3i1.794.
- [10] Y. A. M. Ambabunga, H. Masiku, and E. A. M. Sampetoding, "KARAKTERISTIK TRANSFORMATOR 3 FASA (HUBUNG BINTANG DAN DELTA) PADA SISTEM TENAGA LISTRIK AC," *Journal Dynamic Saint*, vol. 6, no. 1, pp. 12–18, Jun. 2021, doi: 10.47178/dynamicsaint.v6i1.1195.