



Analisis Hubungan Persentase Ketidakseimbangan Beban terhadap Rugi Daya pada Transformator Distribusi di PT PLN (Persero) ULP Binjai Timur

Alexius Victor Purba^{1*}, Haris Gunawan², Dino Erivianto³

¹⁻³Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia

*Penulis Korespondensi: alexius.purba2022@gmail.com

Abstract. *The distribution transformer is one of the most important components in the electrical power distribution system. Distribution transformers often experience load imbalance issues. One previous study indicated that load imbalance can reach 25.6%, contributing to an increase in power losses. This study aims to analyze the relationship between the percentage of load imbalance and the power losses that occur at PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur. This research was conducted using a quantitative approach by calculating the percentage of load imbalance and the resulting power losses. Data were collected through direct observation, voltage and current measurements, followed by calculations and analysis. The results of the study show that the higher percentage of load imbalance occurred at night, with 12.96%, while during the day it was 10.03%. The power losses were higher at night, amounting to 853.3 watts, while during the day it was 4,386.3 watts. Therefore, it can be concluded that the higher the percentage of load imbalance, the higher the power losses that occur.*

Keywords: *Load Imbalance; Power Distribution; Power Losses; Quantitative Approach; Transformer*

Abstrak. Transformator distribusi merupakan salah satu komponen yang sangat penting dalam sistem distribusi tenaga listrik. Transformator distribui sering mengalami masalah ketidakseimbangan beban. Salah satu penelitian terdahulu menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban dapat mencapai 25,6% yang berkontribusi dalam peningkatan rugi daya (*losses*). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan persentase ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya yang ditimbulkan di PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif dengan menghitung besarnya persentase ketidakseimbangan beban dan rugi daya yang ditimbulkan. Data dikumpulkan melalui observasi secara langsung, pengukuran tegangan dan arus, kemudian dilakukan perhitungan dan analisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase ketidakseimbangan beban yang lebih besar terjadi pada malam hari sebesar 12,96% sedangkan pada siang hari sebesar 10,03%. Dan rugi daya (*losses*) yang ditimbulkan lebih besar terjadi pada malam hari sebesar 853,3 Watt sedangkan pada siang hari 4.386,3 Watt. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin besar persentase ketidakseimbangan beban maka akan semakin besar pula rugi daya (*losses*) yang ditimbulkan.

Kata Kunci: Distribusi Listrik; Ketidakseimbangan Beban; Pendekatan Kuantitatif; Rugi Daya; Transformator

1. LATAR BELAKANG

Transformator distribusi merupakan salah satu komponen yang sangat penting dalam sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan dan menurunkan tegangan listrik dari tingkat tegangan menengah (medium voltage) ke tingkat rendah (low voltage) agar dapat digunakan oleh konsumen sesuai dengan kebutuhan. Dalam praktik operasionalnya transformator distribusi sering menghadapi berbagai tantangan dan gangguan. Salah satunya adalah ketidakseimbangan beban. Menurut Sya'roni & Rijanto (2019) kondisi ketidakseimbangan beban pada transformator dapat mencapai 25,6% yang berkontribusi terhadap peningkatan rugi daya yang cukup signifikan. PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur merupakan salah satu penyedia layanan distribusi tenaga listrik di wilayah Binjai Timur yang menghadapi kondisi ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi. Hal ini menjadi

kebaruan dan urgensi penelitian ini dilakukan karena belum adanya penelitian sebelumnya yang dilakukan terkait kondisi persentase ketidakseimbangan beban dan rugi daya yang ditimbulkan di PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur. Oleh karena itu, tujuan penelitian analisis hubungan persentase ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya pada transformator distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur perlu dilakukan untuk mengetahui bagaimana hubungan antara persentase ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya pada transformator sehingga dapat memberikan kontribusi nyata dalam optimalisasi penyaluran energi listrik serta peningkatan keandalan sistem distribusi tenaga listrik di wilayah Binjai Timur seperti yang ditekankan oleh (Yusiran & Hasabudin, 2025).

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik adalah suatu proses penyaluran tenaga listrik dari sistem transmisi 150 kV kepada konsumen, baik yang memanfaatkan tegangan 20 kV maupun yang menggunakan tegangan 220/380 V (Tonda et al., 2025). Proses distribusi tenaga listrik dimulai dari keluaran gardu induk (*output substation*) 20 kV hingga sampai ke konsumen (Ramadhan et al., 2024). Sistem yang mengalirkan arus listrik dari gardu induk distribusi kepada konsumen dengan standar pelayanan yang baik serta berkeberlanjutan adalah tujuan utama dari sistem distribusi (Siagian et al., 2023), guna mencukupi kebutuhan pasokan listrik yang bermutu dan berkesinambungan.

Transformator Distribusi

Transformator adalah suatu peralatan listrik elektromagnetik yang memiliki fungsi untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya dengan tingkat tegangan yang berbeda melalui proses induksi elektromagnetik. Dengan mekanisme ini, transformator dapat mengubah level tegangan listrik, baik dari tinggi ke rendah ataupun sebaliknya, sesuai kebutuhan sistem kelistrikan (Tonda et al. 2025). Salah satu transformator distribusi dapat menurunkan tegangan dari 20 kV menjadi 220/380 Volt untuk pengguna TR (Anisah 2018). Oleh karena itu, keandalan transformator distribusi menjadi kunci utama dalam menjamin kontinuitas penyaluran energi listrik yang stabil dan berkualitas bagi aktivitas ekonomi masyarakat yang semakin kompleks (Satrio et al., 2023). Salah tantangan dan gangguan yang sering dihadapi transformator distribusi adalah kondisi ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan beban adalah kondisi di mana nilai vektor arus/tegangan pada masing-masing fasa (R, S, dan T) dalam sistem tiga fasa tidak sama besar atau tidak memiliki beda sudut fasa 120° antar fasanya (Siregar & Harahap, n.d.). Kondisi ini umumnya disebabkan

oleh distribusi pelanggan yang tidak merata, pola konsumsi listrik yang berubah-ubah, serta adanya gangguan pada jaringan listrik (Muliadi et al. 2022). Dampak dari ketidakseimbangan beban ini cukup signifikan mempengaruhi keandalan transformator. Secara teknis, kondisi ini akan menimbulkan arus netral yang berlebih yang berpotensi meningkatkan rugi daya (*losses*) dan efisiensi yang menurun dalam penyaluran energi listrik kepada konsumen (Afrianda et al., 2021). Daya transformator ditinjau dari sisi tegangan primer dapat dituliskan sebagai berikut (Ardiansyah & Erivianto, n.d.):

$$S = \sqrt{3}.V.I \text{ (1)}$$

Di mana :

S : Daya Transformator (kVA)

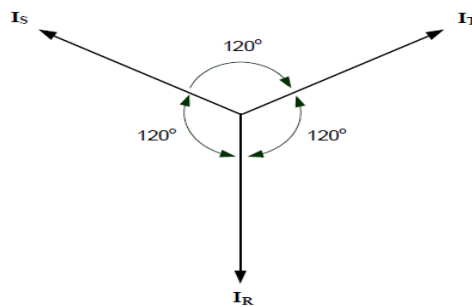
V : Tegangan Sisi Primer Transformator (kV)

I : Arus (A)

Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban merupakan suatu kondisi di mana terdapat perbedaan besarnya beban atau arus yang melewati setiap fase dalam sistem tenaga listrik tiga fasa (Novfowan et al., 2021). Kondisi beban seimbang adalah keadaan di mana (Ruliyanto, 2020) :

- Ketiga vektor (*R, S dan T*) arus/tegangan sama besar.
- Ketiga vektor (*R, S dan T*) saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

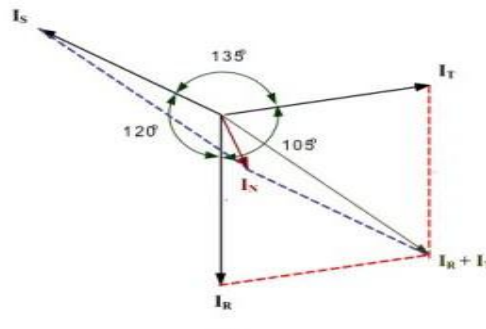


Gambar 1. Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang

Sumber: Rulianto (2020)

Sedangkan kondisi beban tidak seimbang dimana salah satu syarat beban seimbang tidak tercapai (Frangino & Gatot, 2024):

- Ketiga vektor (*R, S dan T*) sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° .
- Ketiga vektor (*R, S dan T*) tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° .
- Ketiga vektor (*R, S dan T*) tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° .



Gambar 2. Vektor Diagram Arus Keadaan Tidakseimbang

Sumber: Rulianto (2020)

Untuk menentukan seberapa besar persentase ketidakseimbangan beban tersebut, langkah pertama adalah menghitung arus $I_{rata-rata}$ menggunakan rumus berikut: (Rohmat & Riyadi, 2023).

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2)$$

Kemudian langkah yang dilakukan adalah mencari koefisien a, b, dan c. koefisien ini adalah perbandingan antara I pada setiap fasa (R,S,T) dengan $I_{rata-rata}$ (Sutama & Sari, 2023). Persamaan berikut menyatakan hubungan antara koefisien tersebut dengan arus setiap fasa.

$$\begin{aligned} I_R &= a \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \\ I_S &= b \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \\ I_T &= c \cdot I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \end{aligned} \quad (3)$$

Kemudian untuk menghitung persentase ketidakseimbangan beban dapat dihitung menggunakan rumus (Aini et al., 2021):

$$\text{Ketidakseimbangan}(\%) = \frac{(|a-1| + |b-1| + |c-1|)}{3} \times 100 \% \quad (4)$$

Di mana :

I_R : Nilai arus fasa R

I_S : Nilai arus fasa S

I_T : Nilai arus fasa T

Rugi Daya (Losses) Akibat Arus Netral pada Penghantar Netral Transformator

Salah satu penyebab utama dari susut daya adalah ketidakmerataan beban (Sam & Gunawan, 2025) . Arus yang mengalir melalui kabel netral pada transformator dengan konfigurasi bintang tiga fasa dengan empat kabel dikenal sebagai arus netral(Istoni Reza & Gunawan Andi, 2021). Besaran ketidakseimbangan beban berkaitan dengan jumlah arus yang melewati kabel netral (Zebua et al., 2021). Arus mengalir ke kabel netral karena adanya pembebanan yang tidak merata di antara ketiga fase. Arus ini mengakibatkan rugi daya (*losses*)

sepanjang kabel netral (Jatmiko et al., 2024). Rugi daya pada penghantar netral trafo ini dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Ginting, 2022):

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (5)$$

Di mana :

P_N : rugi daya (*losses*) pada penghantar netral (W)

I_N : arus yang mengalir pada sisi netral (A)

R_N : resistansi penghantar netral (Ω/km)

Rugi Daya (Losses) Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah

Selain arus yang ada pada penghantar netral, arus yang timbul akibat ketidakseimbangan beban juga mengalir ke tanah melalui penghantar pentanahan (Frangino & Gatot, 2024). Untuk menghitung rugi daya (*losses*) yang ditimbulkan dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Sains, 2022):

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (6)$$

Di mana

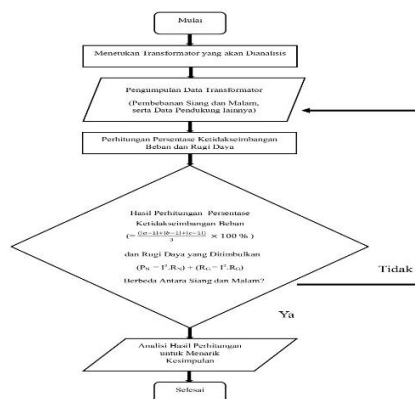
P_G : rugi daya (*losses*) akibat arus netral yang mengalir ke tanah (W)

I_G : arus yang mengalir pada penghantar pentanahan (A)

R_G : resistansi pentanahan (Ω)

3. METODE PENELITIAN

Tahapan Penelitian



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

Jenis Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk penelitian kuantitatif yang berfokus pada data numerik dan analisis statistik untuk mengetahui hubungan persentase ketidakseimbangan beban dan rugi daya yang ditimbulkan pada transformator distribusi di wilayah PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur.

Variabel yang Dianalisis

- a. Ketidakseimbangan beban (%).
- b. Rugi daya pada penghantar netral trafo yang disebabkan oleh ketidakseimbangan beban (Watt).
- c. Rugi daya akibat arus netral yang mengalir ke pentanahan (Watt)

Teknik Pengumpulan Data

- a. Wawancara dengan pihak ULP Binjai Timur untuk mengetahui kondisi pembebanan transformator di lapangan.
- b. Pengamatan pengukuran beban harian untuk pemilihan transformator yang akan diteliti.
- c. Pengukuran variabel teknis yang dibutuhkan untuk penelitian (arus, tegangan, dan resistansi).

Analisis Data

- a. Menghitung persentase ketidakseimbangan beban transformator distribusi.
- b. Menghitung rugi daya yang timbul akibat ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi.
- c. Menarik kesimpulan tentang hubungan antara persentase ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya yang ditimbulkan pada transformator distribusi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan Data

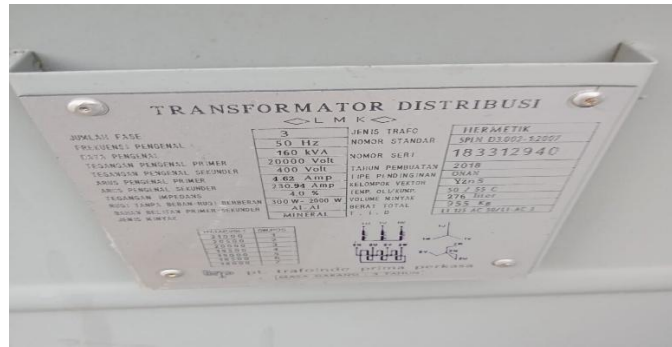
Berdasarkan pengamatan yang maka ditentukan transformator yang akan dianalisis adalah sebagai berikut.



Gambar 4. Transformator Distribusi 160 kVA

Sumber: Dokumentasi penelitian (2025)

Adapun name plate transformator distribusi yang akan di analisis adalah sebagai berikut.



Gambar 2. Nameplate Transformator Distribusi 160 kVA

Sumber: Dokumentasi penelitian (2025)

Tabel 1. Data Name Plate Transformator yang Akan Dianalis

Merk Trafo	Trafo
Daya	160 kVA
Tegangan Primer	20000 Volt
Tegangan Sekunder	400 Volt
Rugi Tanpa Beban	300 W
Rugi Berbeban	2000 W
Tipe Pendingin	ONAN
Kelompok Vektor	Yzn5
Penghantar Netral	A3CS 70 mm
Resistansi Grounding	2,1 Ω

Tabel 2. Resistensi

Resistensi	Keterangan
Resistansi Penghantar Netral	Resistansi penghantar berjenis AAACS dengan diameter 70 mm 0.443 Ω /km (https://unifibercable.com/products/overhead-insulated-cable/a3cs-aaacs-cable-indonesia.html)

Berdasarkan pengukuran beban yang dilakukan pada tanggal 9 September 2025 terhadap transformator distribusi 160 kVA diperoleh data sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Tegangan pada Siang dan Malam Hari

Tegangan	Siang (Volt)	Malam (Volt)
Fasa R-N	228	225
Fasa S-N	226	222
Fasa T-N	229	227

Tabel 4. Hasil Pengukuran Arus pada Siang dan Malam Hari

Arus	Siang (Ampere)	Malam (Ampere)
Fasa R	85,6	163,3
Fasa S	63,3	111,5
Fasa T	74,5	135,7
Penghantar N	39,9	90,3
Grounding	8,4	19,2

Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban

Perhitungan Ketidakseimbangan Beban pada Siang Hari

Sebelum menghitung seberapa besar persentase ketidakseimbangan beban pada siang hari, maka untuk pertama kali adalah menghitung arus $I_{rata-rata}$ berdasarkan persamaan (2) sebagai berikut.

$$I_{rata-rata} = \frac{IR+IS+IT}{3} = \frac{85,6+63,3+74,5}{3} = 74,4$$

Maka $I_{rata-rata} = 74,4$

Kemudian setelah mencari arus rata-rata, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah mencari nilai koefisien a, b, dan c berdasarkan persamaan (3) sebagai berikut.

$$a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} = \frac{85,6}{74,4} = 1,150$$

$$b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} = \frac{63,3}{74,4} = 0,850$$

$$c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} = \frac{74,5}{74,4} = 1,001$$

Dan besarnya persentase ketidakseimbangan beban berdasarkan persamaan (4) pada siang hari adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Ketidakseimbangan}(\%) &= \frac{(|1,150-1|+|0,850-1|+|1,001-1|)}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{0,301}{3} \times 100 \% \\ &= 10,03\% \end{aligned}$$

Maka persentase ketidakseimbangan beban pada siang hari adalah 10,03 %.

Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban pada Malam Hari

Sebelum menghitung seberapa besar persentase ketidakseimbangan beban pada malam hari maka untuk pertama kali adalah menghitung arus $I_{rata-rata}$ berdasarkan persamaan (2) sebagai berikut.

$$I_{rata-rata} = \frac{IR+IS+IT}{3} = \frac{163,5+111,5+135,7}{3} = 136,9$$

Maka $I_{rata-rata} = 136,9$

Kemudian setelah mencari arus rata-rata, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah mencari nilai koefisien a, b, dan c berdasarkan persamaan (3) sebagai berikut.

$$a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} = \frac{163,5}{136,9} = 1,194$$

$$b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} = \frac{111,5}{136,9} = 0,814$$

$$c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} = \frac{135,7}{136,9} = 0,991$$

Dan besarnya persentase ketidakseimbangan beban pada malam hari berdasarkan persamaan (4) adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Ketidakseimbangan}(\%) &= \frac{(|1,194-1|+|0,814-1|+|0,991-1|)}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{0,389}{3} \times 100 \% \\ &= 12,96\%\end{aligned}$$

Maka persentase ketidakseimbangan beban pada malam hari adalah 12,96 %.

Perhitungan Rugi Daya (Losses) Akibat Ketidakseimbangan Beban

Rugi Daya (Losses) Akibat Ketidakseimbangan pada Siang Hari

a. Rugi Daya (*losses*) pada Penghantar Netral Transformator

Berdasarkan persamaan (5), maka rugi daya (*losses*) pada penghantar netral akibat saat siang hari adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{IN} &= 39,9 \text{ A} \\ \text{RN} &= 0,443 \Omega \\ \text{PN} &= \text{IN}^2 \cdot \text{RN} \\ &= 39,9^2 \cdot 0,443 \\ &= 705,2 \text{ Watt} \\ &= 0,7052 \text{ kW}\end{aligned}$$

b. Rugi Daya (*losses*) Akibat Arus yang Mengalir ke Tanah

Berdasarkan persamaan (6), maka rugi daya (*losses*) akibat arus yang mengalir ke tanah adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{IG} &= 8,4 \text{ A} \\ \text{RG} &= 2,1 \Omega \\ \text{PG} &= \text{IG}^2 \cdot \text{RG} \\ &= 8,4^2 \cdot 2,1 \\ &= 148,1 \text{ Watt} \\ &= 0,1481 \text{ kW}\end{aligned}$$

Rugi Daya (Losses) Akibat Ketidakseimbangan pada Malam Hari

a. Rugi Daya (*Losses*) pada Penghantar Netral Transformator

Berdasarkan persamaan (6), maka rugi daya (*losses*) pada penghantar netral akibat ketidakseimbangan beban pada malam adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_N &= 90,3 \text{ A} \\ R_N &= 0,443 \, \Omega \\ P_N &= I_N^2 \cdot R_N \\ &= 90,3^2 \cdot 0,443 \\ &= 3.612,2 \text{ Watt} \\ &= 3,6122 \text{ kW} \end{aligned}$$

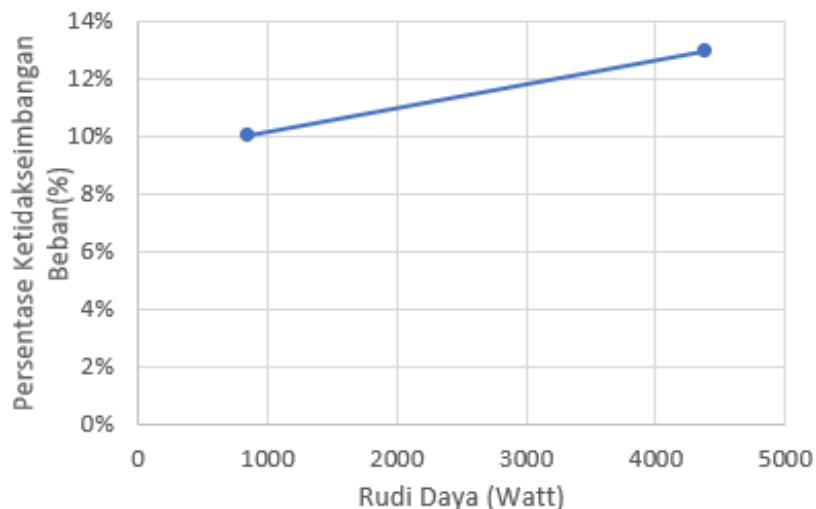
b. Rugi Daya (*losses*) Akibat Arus yang Mengalir ke Tanah

Berdasarkan persamaan (6), maka rugi daya (*losses*) akibat arus yang mengalir ke tanah pada malam hari sebagai berikut :

$$\begin{aligned} I_G &= 19,2 \text{ A} \\ R_G &= 2,1 \, \Omega \\ P_G &= I_G^2 \cdot R_G \\ &= 19,2^2 \cdot 2,1 \\ &= 774,1 \text{ Watt} \\ &= 0,774,1 \text{ kW} \end{aligned}$$

Analisis Hasil Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban dan Rugi Daya (*Losses*) yang Ditimbulkan

Dari hasil perhitungan persentase ketidakseimbangan dan beban rugi daya yang ditimbulkan pada kondisi siang hari diperoleh ketidakseimbangan sebesar 10,03% dan menimbulkan rugi daya (*losses*) sebesar 705,2 Watt pada penghantar netral dan rugi daya (*losses*) akibat arus yang mengalir ke tanah sebesar 148,1 Watt. Maka rugi daya total yang ditimbulkan adalah sebesar 853,3 Watt atau 0,8533 kW. Sementara pada malam hari diperoleh ketidakseimbangan sebesar 12,96% dan menimbulkan rugi daya (*losses*) sebesar 3.612,2 Watt pada penghantar netral dan rugi daya (*losses*) akibat arus yang mengalir ke tanah sebesar 774,1 Watt. Maka rugi daya total yang ditimbulkan adalah sebesar 4.386,3 Watt atau 4,3863 kW. Dari hasil perhitungan tersebut ditemukan bahwa besarnya persentase ketidakseimbangan beban yang terjadi antara siang dan malam hari berbeda, dengan jumlah persentase ketidakseimbangan pada malam hari lebih besar yakni 12,96% dari pada siang hari yakni 10,03%. Selain persentase ketidakseimbangan beban, ditemukan juga jumlah rugi daya (*losses*) yang ditimbulkan lebih besar pada malam hari yakni 4.386,3 Watt dari pada siang hari yakni 853,3 Watt. Dengan demikian hubungan antara persentase ketidakseimbangan beban dengan rugi daya (*losses*) yang ditimbulkan dapat di gambarkan dengan grafik sebagai berikut.



Gambar 3. Grafik Hubungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Terhadap Rugi Daya

Sumber: Dokumentasi penelitian (2025)

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Persentase ketidakseimbangan beban yang lebih besar terjadi pada malam hari yaitu sebesar 12,96% sedangkan pada siang hari sebesar 10,03%. Rugi daya (*losses*) yang ditimbulkan oleh ketidakseimbangan beban yang lebih besar terjadi pada malam hari yaitu 4.386,3 Watt atau 4,3863 kW sedangkan pada siang hari 853,3 Watt atau 0,8533 kW sehingga dapat disimpulkan semakin besar persentase ketidakseimbangan beban antara fasa R, S, dan T maka akan semakin besar pula rugi daya yang ditimbulkan atau dapat dikatakan berbanding lurus. Hal ini dapat dilihat dari hasil perhitungan kondisi siang dan malam hari yakni kondisi siang hari dengan persentase ketidakseimbangan beban 10,03 % menimbulkan rugi daya 853,3 Watt atau 0,8533 kW dan persentase ketidakseimbangan beban 12,96% dengan rugi rugi daya yang ditimbulkan 4.386,3 Watt atau 4,3863 kW pada malam hari.

Dari kesimpulan tersebut disarankan untuk PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur agar mengatur kegiatan penyeimbangan serta melakukan redistribusi beban untuk mengurangi persentase ketidakseimbangan beban dan rugi daya. Dan untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat melakukan analisis lebih dalam dan melibatkan seluruh lokasi distribusi PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

DAFTAR REFERENSI

- Afrianda, R., Samsurizal, S., & Nurul, A. A. (2021). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap efisiensi transformator distribusi studi gardu PT PLN (Persero) Area Bekasi. *Sutet*, 10(1), 29–38. <https://doi.org/10.33322/sutet.v10i1.1277>
- Aini, Z., Mutari, E., Liliana, L., & Candra, O. (2021). Analysis of imbalance loads and losses based on the largest loading by 3 units of 3-phase distribution transformer. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, 7(1), 69–75. <https://doi.org/10.24036/jtev.v7i1.111965>
- Anisah, S. (2018). Analisis perbaikan tegangan ujung pada jaringan tegangan menengah 20 kV Express Trienggadeng daerah kerja PT PLN (Persero) Area Sigli Rayon Meureudu dengan simulasi E-Tap. *Journal of Electrical and System Control Engineering*, 2(1), 2–7. <https://doi.org/10.31289/jesce.v2i1.1916>
- Ardiansyah, M. R., & Erivianto, D. (n.d.). Analysis of drop voltage in low voltage network (JTR) 380/220 volt distribution substation of PT PLN (Persero) ULP Tanah Jawa. pp. 469–480.
- Frangino, S. S. M., & Gatot, B. (2024). Analisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses pada trafo distribusi di EDTL, E.P. *Jurnal Ilmiah Research Student*, 1(3), 90–103.
- Ginting, R. T. (2022). Analisis ketidakseimbangan beban jaringan distribusi tegangan rendah menggunakan ETAP. *Sain, Energi, Teknologi & Industri*, 6(2), 81–89. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v6i2.9734>
- Jatmiko, H. B., Trihasto, A., & Pravitasari, D. (2024). Evaluasi ketidakseimbangan beban terhadap arus netral pada transformator di gardu induk 150 kV Secang. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 1–8. <https://doi.org/10.30596/rele.v7i1.20350>
- Muliadi, M., Syukri, S., Asyadi, T. M., & Salim, A. (2022). Analisa pengaruh ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi penyulang Mibo Rayon Merduati. *Aceh Journal of Electrical*, 2(2), 7–12.
- Novfowan, A. D. M., Mieftah, M., & Kusuma, W. (2021). Alternatif penanganan losses akibat ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi. *Jurnal Teknik Ilmu dan Aplikasi*, 9(1), 83–90. <https://doi.org/10.33795/jtia.v9i1.17>
- Ramadhan, R., Lesmana, D., & Tharo, Z. (2024). Penurunan drop tegangan penyulang 20 kV dengan metode pecah beban. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 13(2), 288–292. <https://doi.org/10.30591/polektro.v13i2.6849>
- Reza, I., & Gunawan, A. (2021). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan rugi-rugi pada transformator 3 fasa 20 kV/400 V di PT. SGMW Motor Indonesia. *Jurnal Sains & Teknologi*, 11(3), 109–116.
- Rohmat, K., & Riyadi, M. A. (2023). Analisis ketidakseimbangan beban transformator distribusi. *Jurnal*, 4, 186–192. <https://doi.org/10.14710/transmisi.25.4.186-192>
- Ruliyanto, R. (2020). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan arus ground pada trafo 1 dan trafo 2 pada beban puncak sesaat. *Jurnal Ilmiah Giga*, 23(1), 27–35. <https://doi.org/10.47313/jig.v23i1.867>
- Sains, J. (2022). SAINTEK+ Vol. 1 No. 2 Desember 2022, 106–123. *Sainteknologi*, 1(2), 106–123.

- Sam, J. F., & Gunawan, H. (2025). Analysis and simulation of load unbalance of distribution transformer feeder LK.10 in ULP Medan City. *Jurnal*, 5(2). <https://doi.org/10.56495/hs.v5i2.1239>
- Satrio, A., Slamet, P., & Widagdo, R. S. (2023). Analisa keandalan transformator distribusi menggunakan Weibull distribution di wilayah ULP Rungkut Kota Surabaya. *Jurnal FORTECH*, 2(2), 51–56. <https://doi.org/10.56795/fortech.v2i2.203>
- Siagian, A. Z., Zulkarnain, Z., Dalimunthe, M. E., & Tharo, Z. (2023). Analisis kehandalan sistem konfigurasi jaringan penyulang 20 kV di PT. PLN (Persero) ULP Pakam Kota berbasis Matlab. *Jurnal Rekayasa Elektro Sriwijaya*, 5(1), 18–31. <https://doi.org/10.36706/jres.v5i1.89>
- Siregar, R. S., & Harahap, R. (n.d.). Perhitungan arus netral, rugi-rugi, dan efisiensi transformator distribusi 3 fasa 20 kV/400 V di PT PLN (Persero) Rayon Medan Timur akibat ketidakseimbangan beban.
- Sutama, I. W., & Sari, I. A. L. N. (2023). Analisis ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi KA 0251 penyulang Gelogor Carik. *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil dan Teknik Informasi*, 6(2), 209–218. <https://doi.org/10.38043/telsinas.v6i2.4893>
- Sya'roni, Z., & Rijanto, T. (2019). Analisis ketidakseimbangan beban transformator distribusi 20 kV dan solusinya pada jaringan tegangan rendah. *Teknik Elektro*, 8(1), 173–180.
- Tonda, H., Parsa, M., Crispinus, D., & Tamal, P. (2025). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral trafo pada gardu distribusi di PT PLN (Persero) ULP Larantuka. *Jurnal Teknologi*, 19(1), 15–23.
- Unifibercable. (n.d.). A3CS / AAACS Cable Indonesia – Overhead Insulated Cable. Retrieved from <https://unifibercable.com/products/overhead-insulated-cable/a3cs-aaacs-cable-indonesia.html>
- Yusiran, Y., & Hasanudin, H. (2025). Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi transformator step down 20 kV/400 V. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 5(3), 2113–2120. <https://doi.org/10.54082/jupin.1675>
- Zebua, O., Komalasari, E., Alam, S., & Aldiansyah, A. (2021). Rancang bangun alat monitoring ketidakseimbangan beban transformator distribusi berbasis Internet of Things. *Electrician*, 15(2), 146–152. <https://doi.org/10.23960/elc.v15n2.2203>