

Analisis Optimasi Penyeimbangan Beban Transformator 630 kVA untuk Menurunkan Arus Netral di Gardu KSBI Cirebon

Load Balancing Optimization Analysis of 630 kVA Transformer to Reduce Neutral Current at KSBI Cirebon Substation

Diofany Nur Jamia
Teknik Elektro
Universitas Swadaya Gunung Jati
Cirebon, Jawa Barat
diofany.122220004@ugj.ac.id

Taryo*
Teknik Elektro
Universitas Swadaya Gunung Jati
Cirebon, Indonesia
taryo@ugj.ac.id

Diterima : April 2026
Disetujui : Juni 2026
Dipublikasi : Juli 2026

Abstrak— Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi tiga fasa dapat menimbulkan arus netral, meningkatkan rugi-rugi daya, menurunkan efisiensi transformator, serta mengganggu kestabilan sistem distribusi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh optimasi penyeimbangan beban terhadap penurunan arus netral pada transformator distribusi 630 kVA di Gardu KSBI Cirebon. Metode yang digunakan adalah metode kuantitatif melalui pengukuran arus dan tegangan pada sisi sekunder transformator, perhitungan pembebanan transformator, persentase ketidakseimbangan beban, rugi-rugi daya, serta efisiensi transformator. Selain itu, simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0 dengan metode unbalanced load flow guna membandingkan kondisi sebelum dan setelah penyeimbangan beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi Waktu Beban Puncak (WBP), ketidakseimbangan beban berkurang dari 15,71% menjadi 5,86%, arus netral berdasarkan perhitungan menurun dari 41 A menjadi 23 A, sementara hasil simulasi ETAP menunjukkan penurunan arus netral dari 55 A menjadi 19 A. Rugi-rugi daya pada kondisi WBP berkurang dari 2,244 kW menjadi 2,165 kW, dan efisiensi transformator meningkat dari 97,78% menjadi 97,84%. Pada kondisi Luar Waktu Beban Puncak (LWBP), ketidakseimbangan beban menurun dari 12% menjadi 3,19%, arus netral berdasarkan perhitungan turun dari 36 A menjadi 20 A, sementara hasil simulasi ETAP menunjukkan penurunan arus netral dari 41 A menjadi 20 A. Rugi-rugi daya dalam kondisi LWBP berkurang dari 2,004 kW menjadi 1,997 kW, dan efisiensi transformator meningkat dari 97,90% menjadi 97,94%. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa penyeimbangan beban efektif dalam menurunkan arus netral, mengurangi rugi-rugi daya, serta meningkatkan efisiensi transformator distribusi di Gardu KSBI Cirebon.

Kata Kunci—Arus Netral; Ketidakseimbangan Beban; Rugi-Rugi Daya; Transformator Distribusi

Abstract— *Load imbalance in three-phase distribution transformers Load imbalance in three-phase distribution*

transformers can cause neutral current, increase power losses, reduce transformer efficiency, and disrupt the stability of the electricity distribution system. This study aims to analyze the effect of load balancing optimization on the reduction of neutral current in a 630 kVA distribution transformer at the KSBI Cirebon Substation. The method used is a quantitative method through measuring current and voltage on the secondary side of the transformer, calculating transformer loading, percentage of load imbalance, power losses, and transformer efficiency. In addition, simulations were carried out using ETAP 12.6.0 software with the unbalanced load flow method to compare conditions before and after load balancing. The results of the study show that under Peak Load Time (WBP) conditions, the load imbalance decreases from 15.71% to 5.86%, the calculated neutral current decreases from 41 A to 23 A, while the ETAP simulation results show a decrease in neutral current from 55 A to 19 A. Power losses under WBP conditions decrease from 2.244 kW to 2.165 kW, and the transformer efficiency increases from 97.78% to 97.84%. Under Off-Peak Load Time (LWBP) conditions, the load imbalance decreases from 12% to 3.19%, the calculated neutral current decreases from 36 A to 20 A, while the ETAP simulation results show a decrease in neutral current from 41 A to 20 A. Power losses under LWBP conditions decrease from 2.004 kW to 1.997 kW, and the transformer efficiency increases from 97.90% to 97.94%. Based on these results, it can be concluded that load balancing is effective in reducing neutral current, reducing power losses, and increasing the efficiency of distribution transformers at the KSBI Cirebon Substation.

Keywords—Neutral Current; Load Imbalance; Power Losses; Distribution Transformer

I. PENDAHULUAN

Sistem distribusi listrik berperan penting dalam mengantarkan energi dari pembangkit ke konsumen lewat jaringan transmisi dan distribusi. Dalam sistem tiga fasa, sering terjadi isu ketidakseimbangan beban karena distribusi arus yang tidak seimbang diantara fasa-fasa [1]. Subsistem ini berhubungan secara langsung dengan pengguna, karena

pengiriman energi ke lokasi pemakaian dilakukan melalui sistem distribusi [2].

Ketidakseimbangan ini menghasilkan aliran pada penghantar netral yang berfungsi sebagai tanda bahwa sistem tidak stabil dan mempengaruhi mutu tegangan serta efektivitas operasional [3]. Dampak ketidakseimbangan terlihat pada kualitas tegangan fasa, dimana beban yang lebih berat biasanya membuat tegangan turun, sementara fasa dengan beban lebih ringan bisa mengalami kenaikan tegangan. Kondisi ini menyebabkan distribusi energi listrik menjadi kurang stabil [4]. Selain itu, ketidakseimbangan dalam beban sangat terkait dengan bertambahnya kehilangan energi di jaringan distribusi, dimana sejumlah energi terbuang selama proses pengiriman dari gardu induk ke konsumen [5]. Faktor utama yang mendorong kenaikan rugi-rugi saluran pada jaringan distribusi tegangan rendah adalah ketidakseimbangan beban tiga fasa serta fluktuasi perbedaan antara beban puncak dan lembah. Pernyataan ini menegaskan bahwa analisis terhadap ketidakseimbangan beban sangat penting, sebab hal tersebut secara langsung memengaruhi peningkatan kerugian daya dalam jaringan distribusi [6].

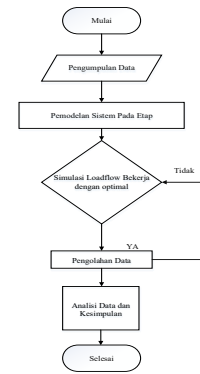
Studi sebelumnya menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi mampu meningkatkan kehilangan daya serta mengurangi efisiensi sistem kelistrikan [7]. Diperlukan metode analisis yang dapat memberikan gambaran pembebanan transformator dengan akurasi tinggi. Salah satunya adalah pemodelan sistem tenaga listrik menggunakan perangkat lunak ETAP, yang memungkinkan simulasi pembebanan tiap fasa serta analisis mendalam terhadap variasi arus, arus netral, dan kerugian daya [8].

Berdasarkan data operasional PT PLN ULP Cirebon Kota, Gardu Distribusi Kesambi (KSBI) dipilih sebagai objek penelitian karena terjadi ketidakseimbangan beban antar fasa akibat variasi karakteristik beban pelanggan seperti rumah tangga, usaha kecil, dan beban komersial. Penelitian ini menganalisis ketidakseimbangan beban, arus netral, rugi-rugi daya, serta efisiensi transformator distribusi 630 kVA di Gardu KSBI melalui perhitungan matematis dan simulasi ETAP 12.6.0.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pengukuran lapangan dan simulasi ETAP 12.6.0. Data dianalisis meliputi arus fasa R, S, T, arus netral, tegangan antar fasa, tegangan fasa-netral, persentase pembebanan dan ketidakseimbangan beban transformator, rugi-rugi daya, serta efisiensi transformator. Objek penelitian adalah transformator distribusi 630 kVA di Gardu Distribusi Kesambi (KSBI) PT PLN (Persero) ULP Cirebon Kota.

Tahapan penelitian dilakukan melalui proses pengumpulan data, pemodelan sistem pada software ETAP 12.6.0, simulasi *load flow*, pengolahan data, serta analisis hasil dan penarikan kesimpulan. Alur penelitian yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan data arus, tegangan, spesifikasi transformator, dan jaringan distribusi Gardu KSBI, lalu memodelkan sistem di ETAP 12.6.0. Simulasi *load flow* dilakukan untuk mengevaluasi beban transformator dan arus tiap fasa. Jika hasil simulasinya belum optimal, parameter model disesuaikan hingga berjalan baik. Data simulasi dan pengukuran selanjutnya diolah untuk menghitung pembebanan transformator, ketidakseimbangan beban, rugi daya, dan efisiensi transformator, lalu dianalisis untuk menarik kesimpulan.

A. Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi adalah bagian akhir sistem tenaga listrik yang menyalurkan energi ke pengguna. Fluktuasi pemakaian listrik masyarakat memengaruhi beban jaringan ini. Ketidakseimbangan beban pelanggan di setiap fasa pada beberapa gardu distribusi menyebabkan variasi arus signifikan, membuat transformator beroperasi kurang stabil pada waktu tertentu. [9].

Ketidakseimbangan beban menyebabkan arus di penghantar netral, meningkatkan kerugian daya transformator distribusi, dan menurunkan kualitas tegangan dengan tegangan fasa yang tidak konsisten. Jika berlangsung lama, efisiensi transformator menurun dan perangkat distribusi cepat panas. Oleh karena itu, perlu analisis tingkat ketidakseimbangan beban untuk memahami kondisi sistem dan menyeimbangkan beban tiap fasa agar performa trafo optimal [10].

B. Ketidakseimbangan Beban

Ketika satu atau lebih fasa pada transformator memiliki nilai yang berbeda, maka terjadi ketidakseimbangan beban. Beban vektor arus atau tegangan dan sudut fase tiap fasa akan menunjukkan perbedaan ini. Pada transformator, sistem tiga fasa dianggap seimbang jika vektor arus fasa R, S, dan T sama besar dan sudut antar fasanya adalah 120° [11].

Perhitungan ketidakseimbangan beban dilakukan dengan menentukan arus rata-rata dari ketiga fasa terlebih dahulu. Arus rata-rata dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (1)$$

Koefisien tiap fasa dihitung menggunakan persamaan :

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (3)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (4)$$

Persentase ketidakseimbangan beban dihitung menggunakan persamaan :

$$\%UL = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\% \quad (5)$$

Semakin besar nilai ketidakseimbangan, semakin tidak seimbang arus yang mengalir diantara fasa. Hal ini bisa membuat arus pada kabel netral naik, kerugian daya menjadi lebih banyak, dan efisiensi transformator distribusi menurun [12].

C. Metode Pengukuran dan Simulasi

Pengukuran dilakukan di sisi sekunder transformator distribusi Gardu KSBI, mencatat arus fasa R, S, T, arus netral, tegangan antar fasa, dan tegangan fasa ke netral. Pengambilan data berlangsung 14 hari pada pukul 14.00 WIB (beban puncak) dan 20.00 WIB (beban non-puncak). Alat yang digunakan adalah tang amper untuk arus dan multimeter digital untuk tegangan. Data ini digunakan untuk menghitung pembebanan transformator, ketidakseimbangan beban, kerugian daya, dan efisiensi..

Simulasi dilakukan dengan ETAP 12.6.0 menggunakan metode unbalanced load flow, dengan parameter transformator 630 kVA, tegangan primer 20 kV, sekunder 0,4 kV, frekuensi 50 Hz, serta data arus dan tegangan hasil pengukuran. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan data lapangan untuk menilai kesesuaian model dengan kondisi nyata.

D. Pembebanan Transformator

Arus beban penuh pada transformator berfungsi sebagai indikator kapasitas arus maksimum yang mampu disalurkan oleh transformator tersebut. Besarnya arus beban penuh dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut [13]:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (6)$$

Persentase beban transformator ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$\%L = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (7)$$

E. Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator

Kerugian daya pada penghantar ditentukan untuk mengukur jumlah energi yang terbuang akibat arus yang melewati penghantar tersebut [14]. Besaran rugi-rugi daya dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$P_{loss} = I^2 \times R \quad (8)$$

Dengan P_{loss} melambangkan kerugian daya pada konduktor, I merupakan arus yang mengalir melalui konduktor, dan R adalah tahanan konduktor tersebut. Dalam penelitian ini, nilai tahanan konduktor yang dipakai sebesar $0,0310 \Omega$, sesuai dengan spesifikasi teknik kabel NFA2X 70 mm² pada jalur yang di analisis.

Sedangkan untuk kerugian daya pada konduktor netral, rumus yang diterapkan adalah sebagai berikut :

$$P_N = I_N^2 \times R \quad (9)$$

Dengan P_N adalah rugi-rugi daya pada penghantar netral I_N adalah arus netral, dan R adalah tahanan penghantar.

Total rugi-rugi daya dihitung dengan menjumlahkan rugi daya pada masing-masing fasa dan penghantar netral menggunakan rumus :

$$P_{loss-total} = P_R + P_S + P_T + P_N \quad (10)$$

Persentase rugi daya dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\%P_{loss} = \frac{P_{loss\ sebelum} - P_{loss-total}}{P_{loss\ sebelum}} \times 100\% \quad (11)$$

Efisiensi transformator dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss-total}} \times 100\% \quad (12)$$

F. Redistribusi Beban

Redistribusi beban dilakukan untuk mengurangi perbedaan arus antar fasa agar pembebanan lebih seimbang. Prosedur ini berdasarkan data pengukuran arus tiap fasa, dengan memindahkan beban dari fasa berarus tertinggi ke fasa berarus lebih rendah secara bertahap [15].

Proses redistribusi beban diilustrasikan melalui simulasi *unbalanced load flow* menggunakan ETAP 12.6.0. Perbandingan antara kondisi sebelum dan setelah redistribusi dilakukan guna mengamati perubahan pada nilai arus setiap fasa, arus netral, persentase ketidakseimbangan beban, kerugian daya, serta efisiensi transformator.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN (HEADING 1)

Penelitian dilakukan di gardu distribusi Kesambi (KSBI), bagian wilayah kerja PT.PLN (Persero) ULP Cirebon Kota, menggunakan transformator distribusi 630 kVA yang menurunkan tegangan dari jaringan menengah ke rendah sebelum disalurkan ke pelanggan. Kondisi transformator tersebut terlihat pada gambar 1.



Gambar 2. Transformator Gardu KSBI

Spesifikasi transformator merupakan dasar penting untuk perhitungan pembebanan, ketidakseimbangan beban, dan analisis rugi daya pada sistem distribusi. Detail transformator Gardu Distribusi Kesambi (KSBI) tercantum pada tabel berikut.

TABEL I. SPESIFIKASI TRANSFORMATOR

Parameter	Nilai
Merek	UNINDO
Jenis	Oil Immersed Transformer
Fasa	3 Fasa
Frekuensi	50 Hz
Tegangan Primer	20 kV
Tegangan Sekunder	400 V
Kapasitas	630 kVA
Vector Group	Dyn5
Cooling	ONAN (Oil Natural Air Natural)
Impedansi	4-6%
Standar	SPLN/IEC

transformator pada sisi sekunder. Nilai ini digunakan sebagai pembanding dalam perhitungan persentase pembebanan transformator sebelum dan sesudah pemerataan.

a. Pembebanan Transformator WBP Sebelum Pemerataan

Pada kondisi WBP sebelum pemerataan, pembebanan transformator dihitung memakai nilai arus rata-rata dari ketiga fasa R, S, dan T. Arus rata-rata ini dibandingkan dengan arus beban penuh transformator untuk menentukan persentase pembebanannya. Berikut cara perhitungan pembebanan transformator pada kondisi WBP sebelum pemerataan menggunakan persamaan (1) dan (7).

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

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{187 + 127 + 140}{3} = 151,33 \text{ A}$$

$$\%L = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\%$$

$$\%L = \frac{151,33}{909,35} \times 100\% = 16,64\%$$

Pembebanan transformator pada kondisi WBP sebelum pemerataan adalah sebesar 16,64%. Nilai ini menunjukkan bahwa transformator masih bekerja jauh di bawah kapasitas nominalnya, tetapi distribusi arus antar fasa belum merata.

b. Pembebanan Transformator WBP Sesudah Pemerataan

Beban transformator pada kondisi WBP pasca pemerataan dihitung dari arus hasil redistribusi pada fasa R, S, dan T untuk mengetahui persentase perubahan beban. Arus rata-rata pasca pemerataan dibandingkan dengan arus beban penuh transformator 909,35 A, menggunakan persamaan (1) dan (7).

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

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{165 + 150 + 140}{3} = 151,67 \text{ A}$$

$$\%L = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{FL}} \times 100\%$$

$$\%L = \frac{151,67}{909,35} \times 100\% = 16,68\%$$

Pembebanan transformator sebelum dan sesudah pemerataan hampir sama, yaitu 16,64% dan 16,68%. Hal ini menunjukkan bahwa pemerataan beban tidak mengurangi total beban transformator secara besar, tetapi hanya memindahkan sebagian beban dari fasa yang berlebih ke fasa yang lebih rendah.

6. Analisis Ketidakseimbangan Beban pada WBP

Ketidakseimbangan beban dihitung dengan membandingkan arus tiap fasa terhadap arus rata-rata. Semakin jauh arus tiap fasa dari arus rata-rata, semakin besar nilai persentase ketidakseimbangan beban.

a. Ketidakseimbangan Beban WBP Sebelum Pemerataan

Ketidakseimbangan beban pada WBP sebelum pemerataan diukur dengan membandingkan arus tiap fasa terhadap arus rata-rata. Koefisien fasa R, S, dan T digunakan

untuk menentukan sejauh mana arus tiap fasa menyimpang dari kondisi seimbang. Perhitungan ketidakseimbangan beban WBP sebelum pemerataan memakai persamaan (2), (3), (4), dan (5).

$$a = \frac{187}{151,33} = 1,24$$

$$b = \frac{127}{151,33} = 0,84$$

$$c = \frac{140}{151,33} = 0,93$$

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

$$\%UL = \frac{|1,24 - 1| + |0,84 - 1| + |0,93 - 1|}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 15,71\%$$

Ketidakseimbangan beban pada kondisi WBP sebelum pemerataan sebesar 15,71%. Nilai ini terjadi karena arus pada fasa R, S, dan T tidak sama besar, terutama akibat perbedaan arus antara fasa R dan fasa S.

b. Ketidakseimbangan Beban WBP Sesudah Pemerataan

Setelah pemerataan beban, ketidakseimbangan beban pada kondisi WBP dihitung ulang berdasarkan arus redistribusi di fasa R, S, dan T untuk menentukan tingkat ketidakseimbangan setelah pemerataan. Nilai arus rata-rata yang digunakan adalah 151,67 A, dengan perhitungan menggunakan persamaan (2), (3), (4), dan (5).

$$a = \frac{165}{151,67} = 1,09$$

$$b = \frac{150}{151,67} = 0,99$$

$$c = \frac{140}{151,67} = 0,92$$

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

$$\%UL = \frac{|1,09 - 1| + |0,99 - 1| + |0,92 - 1|}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 5,86\%$$

Ketidakseimbangan beban menurun dari 15,71% menjadi 5,86%. Penurunan ini menunjukkan bahwa distribusi arus antar fasa menjadi lebih baik setelah sebagian beban dari fasa R dipindahkan ke fasa S.

7. Analisis Arus Netral pada WBP

Arus netral dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh pemerataan beban pada penghantar netral. Penurunan arus netral menandakan distribusi arus antar fasa yang lebih seimbang, dan rugi-rugi penghantar netral dihitung dengan persamaan (9).

$$P_N = I_N^2 \times R$$

$$P_N = 41^2 \times 0,0310$$

$$P_N = 52,11 \text{ W}$$

$$P_N = I_N^2 \times R$$

$$P_N = 23^2 \times 0,0310$$

$$P_N = 16,40 \text{ W}$$

Berdasarkan rugi daya pada penghantar netral saat WBP sebelumnya 52,11 W, turun menjadi 16,40 W setelah pemerataan. Penurunan ini karena arus netral berkurang dari 41 A menjadi 23 A, menunjukkan pemerataan beban efektif mengurangi arus dan rugi daya. Arus netral turun 18 A atau sekitar 43,90% dari kondisi awal.

8. Analisis Rugi-Rugi Daya pada WBP

Rugi-rugi daya pada penghantar dihitung berdasarkan besar arus yang mengalir dan nilai tahanan penghantar. Pada penelitian ini digunakan nilai tahanan penghantar sebesar

$$R = 0,0310 \Omega.$$

Rugi-rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan (8).

Rugi daya pada fasa R:

$$P_R = 187^2 \times 0,0310 = 1.084,04 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa S:

$$P_R = 127^2 \times 0,0310 = 500,16 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa R:

$$P_R = 140^2 \times 0,0310 = 607,60 \text{ W}$$

Rugi daya pada penghantar netral:

$$P_R = 41^2 \times 0,0310 = 52,11 \text{ W}$$

Kemudian total rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan (10).

$$P_{loss-total} = P_R + P_S + P_T + P_N$$

$$P_{loss-total} = 1.084,04 + 500,16 + 607,60 + 52,11$$

$$P_{loss-total} = 2.243,75 \text{ W}$$

$$P_{loss-total} = 2,244 \text{ kW}$$

Total rugi daya pada kondisi WBP sebelum pemerataan adalah sebesar 2,244 kW. Nilai ini berasal dari penjumlahan rugi-rugi daya pada fasa R, fasa S, fasa T, dan penghantar netral.

Berikut ini merupakan perhitungan rugi-rugi daya pada saat sesudah pemerataan.

Rugi daya pada fasa R:

$$P_R = 165^2 \times 0,0310 = 843,98 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa S:

$$P_R = 150^2 \times 0,0310 = 697,50 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa R:

$$P_R = 140^2 \times 0,0310 = 607,60 \text{ W}$$

Rugi daya pada penghantar netral:

$$P_R = 23^2 \times 0,0310 = 16,40 \text{ W}$$

Kemudian total rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan (10).

$$P_{loss-total} = P_R + P_S + P_T + P_N$$

$$P_{loss-total} = 843,98 + 697,50 + 607,60 + 16,40$$

$$P_{loss-total} = 2.165,48 \text{ W}$$

$$P_{loss-total} = 2,165 \text{ kW}$$

Presentase penurunan rugi daya dihitung menggunakan persamaan (11).

$$\%P_{loss} = \frac{P_{loss \text{ sebelum}} - P_{loss-total}}{P_{loss \text{ sebelum}}} \times 100\%$$

$$\%P_{loss} = \frac{2,244 - 2,165}{2,244} \times 100\%$$

$$\%P_{loss} = 3,52\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan, total rugi daya pada kondisi WBP menurun dari 2,244 kW menjadi 2,165 kW, atau mengalami penurunan sebesar 3,52%. Penurunan ini menunjukkan bahwa pemerataan beban mampu mengurangi rugi-rugi daya pada penghantar.

9. Efisiensi Transformator pada WBP

Efisiensi transformator dihitung untuk mengetahui perbandingan antara daya keluaran dan total daya masukan transformator. Semakin kecil rugi-rugi daya, maka efisiensi transformator akan semakin besar. Efisiensi transformator dihitung menggunakan persamaan (12).

a. Efisiensi Transformator WBP Sebelum Pemerataan

Berdasarkan simulasi ETAP pada situasi WBP sebelum dilakukannya pemerataan, diperoleh daya keluaran transformator sebesar 99 kW. Total rugi daya menurut perhitungan sebelumnya mencapai 2,356 kW

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss-total}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{99}{99 + 2,244} \times 100\%$$

$$\eta = 97,78\%$$

b. Efisiensi Transformator WBP Setelah Pemerataan

Berdasarkan simulasi ETAP pada situasi WBP sebelum dilakukannya pemerataan, diperoleh daya keluaran transformator sebesar 98 kW. Total rugi daya menurut perhitungan sebelumnya mencapai 2,165 kW

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss-total}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{98}{98 + 2,165} \times 100\%$$

$$\eta = 97,84\%$$

Efisiensi transformator meningkat dari 97,78% menjadi 97,84. Peningkatan ini terjadi karena rugi-rugi daya mengalami penurunan setelah pemerataan beban dilakukan.

B. Analisis Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) Sebelum dan Sesudah Pemerataan

Analisis kondisi di luar beban puncak dilakukan untuk mengamati perubahan beban transformator, ketidakseimbangan, arus netral, rugi daya, dan efisiensi sebelum dan setelah pemerataan beban, dengan data diambil dari pengukuran pukul 20.00 WIB.

1. Data Pengukuran LWBP Sebelum Pemerataan

Data pengukuran LWBP sebelum pemerataan ditunjukkan pada tabel di bawah.

TABEL IV DATA PENGUKURAN 2025

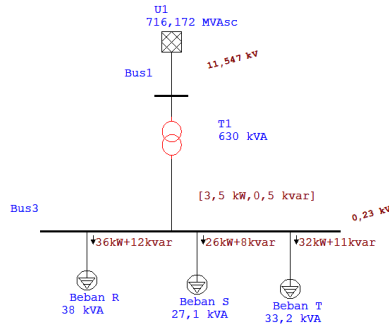
Pengukuran Malam (20.00 WIB)		
Arus/Beban Transformator	R	165 A
	S	118 A
	T	149 A
	N	36 A
Tegangan Transformator	R-S	395 V
	R-T	395 V

Pengukuran Malam (20.00 WIB)		
	S-T	399 V
	R-N	227 V
	S-N	229 V
	T-N	228 V

Berdasarkan Tabel IV, arus puncak terjadi pada fasa R sebesar 165 A, sedangkan arus terendah pada fasa S 118 A. Perbedaan arus ini menunjukkan pembebanan transformator LWBP sebelum pemerataan masih tidak seimbang antar fasa. Arus netral 36 A juga mengindikasikan ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa.

2. Simulasi ETAP LWBP Sebelum Pemerataan

Simulasi ini dirancang untuk memvisualisasikan situasi pembebanan transformator saat kondisi LWBP, sebelum dilakukan langkah redistribusi beban.



Gambar 5. Simulasi ETAP LWBP Sebelum Pemerataan

Hasil simulasi ETAP menunjukkan arus netral 12 A sedangkan hasil pengukuran lapangan menunjukkan 20 A. Perbedaan tersebut karena simulasi ETAP menggunakan pendekatan model sistem, dan parameter jaringan.

3. Data Pengukuran LWBP Setelah Pemerataan

Setelah dilakukan pemerataan beban, diperoleh data arus dan tegangan pada kondisi LWBP sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut.

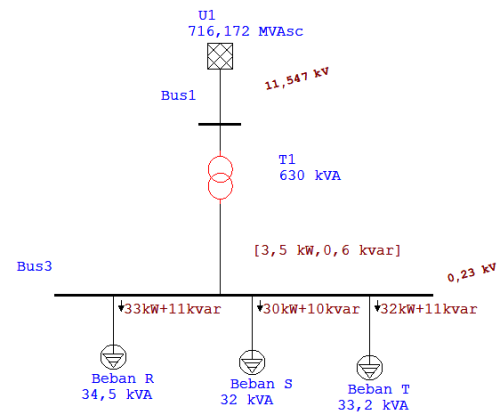
TABEL V DATA PENGUKURAN 2026

Pengukuran Malam (20.00 WIB)		
Arus/Beban Transformator	R	150 A
	S	139 A
	T	149 A
	N	20 A
Tegangan Transformator	R-S	379 V
	R-T	377 V
	S-T	371 V
	R-N	229 V
	S-N	209 V
	T-N	239 V

Dari Tabel V, setelah beban dibagi rata, arus pada fasa R menjadi 150 A, fasa S 139 A, dan fasa T 149 A. Arus netral turun dari 36 A menjadi 20 A. Ini menunjukkan bahwa pemerataan beban mengurangi arus pada penghantar netral saat kondisi LWBP.

4. Simulasi ETAP LWBP Sebelum Pemerataan

Data pemerataan pada kondisi LWBP disimulasikan ulang dengan ETAP 12.6.0 untuk mengamati perubahan arus netral dan distribusi beban setelah redistribusi.



Gambar 6. Simulasi ETAP LWBP Setelah Pemerataan

Hasil simulasi ETAP menunjukkan arus netral 12 A sedangkan hasil pengukuran lapangan menunjukkan 20 A. Perbedaan tersebut karena simulasi ETAP menggunakan pendekatan model sistem, dan parameter jaringan.

5. Analisis Pembebanan Transformator Pada LWBP

Sebelum menghitung persentase pembebanan transformator, digunakan nilai arus beban penuh transformator sebesar 909,35 A. Nilai ini diperoleh dari perhitungan kapasitas transformator 630 kVA pada sisi sekunder 400 V.

a. Pembebanan Transformator LWBP Sebelum Pemerataan

Pada kondisi LWBP sebelum pemerataan, pembebanan transformator dihitung dari arus rata-rata ketiga fasa (R, S, T), lalu dibandingkan dengan arus beban penuh transformator untuk mendapatkan persentase pembebanannya. Perhitungan ini menggunakan persamaan (1) dan (7).

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

$$I_{rata-rata} = \frac{165 + 118 + 149}{3} = 144 \text{ A}$$

$$\%L = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\%$$

$$\%L = \frac{144}{909,35} \times 100\% = 15,83\%$$

Dari perhitungan, arus rata-rata saat kondisi LWBP sebelum pemerataan adalah 144 A. Dengan arus beban penuh transformator sebesar 909,35 A, persentase pembebanan transformator adalah 15,83%. Ini berarti transformator masih bekerja di bawah kapasitas maksimumnya, tapi arus di setiap fasa belum seimbang.

b. Pembebanan Transformator LWBP Setelah Pemerataan

Pada kondisi LWBP setelah pemerataan, pembebanan transformator dihitung dari arus rata-rata ketiga fasa (R, S, T), lalu dibandingkan dengan arus beban penuh untuk menentukan persentase pembebanannya. Berikut adalah cara perhitungan menggunakan persamaan (1) dan (7).

$$I_{rata-rata} = \frac{150 + 139 + 149}{3} = 146 \text{ A}$$

$$\%L = \frac{146}{909,35} \times 100\% = 16,06\%$$

Pembebanan transformator sebelum pemerataan sebesar 15,83%, sedangkan setelah pemerataan menjadi 16,06%. Perubahan ini relatif kecil, sehingga menunjukkan bahwa proses pemerataan tidak mengubah total beban secara signifikan.

6. Analisis Ketidakseimbangan Beban pada LWBP

Ketidakseimbangan beban dihitung dengan membandingkan arus tiap fasa terhadap arus rata-rata. Semakin jauh arus tiap fasa dari arus rata-rata, semakin besar nilai persentase ketidakseimbangan beban.

a. Ketidakseimbangan Beban LWBP Sebelum Pemerataan

Ketidakseimbangan beban LWBP sebelum pemerataan diukur dengan membandingkan arus tiap fasa terhadap arus rata-rata. Koefisien fasa R, S, dan T menentukan sejauh mana arus tiap fasa menyimpang dari keseimbangan, dihitung sesuai persamaan (2), (3), (4), dan (5).

$$a = \frac{165}{144} = 1,15$$

$$b = \frac{118}{144} = 0,82$$

$$c = \frac{149}{144} = 1,03$$

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

$$\%UL = \frac{|1,15 - 1| + |0,82 - 1| + |1,03 - 1|}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 12\%$$

Ketidakseimbangan beban pada kondisi LWBP sebelum pemerataan sebesar 12%. Nilai ini terjadi karena arus pada fasa R, S, dan T tidak sama besar, terutama akibat perbedaan arus antara fasa R dan fasa S.

b. Ketidakseimbangan Beban LWBP Sesudah Pemerataan

Setelah pemerataan beban, ketidakseimbangan LWBP dihitung ulang berdasarkan arus redistribusi pada fasa R, S, dan T menggunakan WBP setelah pemerataan dilakukan dengan persamaan (2), (3), (4), dan (5).

$$a = \frac{150}{146} = 1,03$$

$$b = \frac{139}{146} = 0,95$$

$$c = \frac{149}{146} = 1,02$$

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

$$\%UL = \frac{|1,03 - 1| + |0,95 - 1| + |1,02 - 1|}{3} \times 100\%$$

$$\%UL = 3,19\%$$

Ketidakseimbangan beban pada kondisi LWBP menurun dari 12% menjadi 3,19% penurunan ini menunjukkan bahwa distribusi arus antar fasa menjadi lebih seimbang.

7. Analisis Arus Netral LWBP

Arus netral dianalisis untuk menilai pengaruh pemerataan beban terhadap besarnya arus pada penghantar netral. Dalam sistem tiga fasa, arus netral timbul akibat ketidakseimbangan arus antar fase. Penurunan arus netral menunjukkan

pemerataan beban memperbaiki kondisi sistem, yang dapat dihitung dengan persamaan (9).

$$P_N = I_N^2 \times R$$

$$P_N = 36^2 \times 0,0310$$

$$P_N = 40,176 \text{ W}$$

$$P_N = I_N^2 \times R$$

$$P_N = 20^2 \times 0,0310$$

$$P_N = 12,4 \text{ W}$$

Menurut perhitungan awal, rugi daya pada penghantar netral saat LWBP sebelum pemerataan adalah 40,176 W, kemudian turun menjadi 12,4 W setelah pemerataan. Penurunan ini disebabkan arus netral berkurang dari 36 A menjadi 20 A, sehingga pemerataan beban berhasil mengurangi arus dan rugi daya pada penghantar netral.

8. Analisis Rugi-Rugi Daya pada LWBP

Rugi-rugi daya pada penghantar dihitung berdasarkan besar arus yang mengalir dan nilai tahanan penghantar. Pada penelitian ini digunakan nilai tahanan penghantar sebesar

$$R = 0,0310 \Omega.$$

Rugi-rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan (8).

Rugi daya pada fasa R:

$$P_R = 165^2 \times 0,0310 = 843,98 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa S:

$$P_R = 118^2 \times 0,0310 = 431,64 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa T:

$$P_R = 149^2 \times 0,0310 = 688,23 \text{ W}$$

Rugi daya pada penghantar netral:

$$P_R = 38^2 \times 0,0310 = 40,18 \text{ W}$$

Kemudian total rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan (10).

$$P_{\text{loss-total}} = P_R + P_S + P_T + P_N$$

$$P_{\text{loss-total}} = 843,97 + 431,64 + 688,23 + 40,18$$

$$P_{\text{loss-total}} = 2.004,03 \text{ W}$$

$$P_{\text{loss-total}} = 2,004 \text{ kW}$$

Total rugi-rugi daya pada kondisi LWBP sebelum pemerataan adalah sebesar 2,004 kW. Nilai ini berasal dari penjumlahan rugi-rugi daya pada fasa R, fasa S, fasa T, dan penghantar netral.

Berikut ini merupakan perhitungan rugi-rugi daya pada saat sesudah pemerataan.

Rugi daya pada fasa R:

$$P_R = 150^2 \times 0,0310 = 697,50 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa S:

$$P_R = 139^2 \times 0,0310 = 598,59 \text{ W}$$

Rugi daya pada fasa T:

$$P_R = 149^2 \times 0,0310 = 688,23 \text{ W}$$

Rugi daya pada penghantar netral:

$$P_R = 20^2 \times 0,0310 = 12,40 \text{ W}$$

Kemudian total rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan (10).

$$P_{loss-total} = P_R + P_S + P_T + P_N$$

$$P_{loss-total} = 697,50 + 598,59 + 688,23 + 12,40$$

$$P_{loss-total} = 1.996,72 \text{ W}$$

$$P_{loss-total} = 1,997 \text{ kW}$$

Presentase penurunan rugi daya dihitung menggunakan persamaan (11).

$$\%P_{loss} = \frac{P_{loss \text{ sebelum}} - P_{loss-total}}{P_{loss \text{ sebelum}}} \times 100\%$$

$$\%P_{loss} = \frac{2,004 - 1,997}{2,004} \times 100\%$$

$$\%P_{loss} = 0,35\%$$

Rugi daya pada kondisi LWBP menurun dari 2,004 kW menjadi 1,997 kW, atau turun sebesar 0,35%. Penurunan ini relatif kecil karena total arus sebelum dan sesudah pemerataan hampir sama. Namun demikian, rugi rugi pada penghantar netral tetap berkurang karena arus netral mengalami penurunan.

9. Efisiensi Transformator pada LWBP

Efisiensi transformator mengukur perbandingan daya keluaran terhadap total daya masukan. Semakin kecil rugi daya, efisiensi semakin tinggi. Efisiensi dihitung dengan persamaan (12).

c. Efisiensi Transformator LWBP Sebelum Pemerataan

Berdasarkan simulasi ETAP pada situasi WBP sebelum dilakukannya pemerataan, diperoleh daya keluaran transformator sebesar 93,5 kW. Total rugi daya menurut perhitungan sebelumnya mencapai 2,004 kW

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss-total}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{93,5}{93,5 + 2,004} \times 100\%$$

$$\eta = 97,90\%$$

d. Efisiensi Transformator LWBP Setelah Pemerataan

Berdasarkan simulasi ETAP pada situasi WBP sebelum dilakukannya pemerataan, diperoleh daya keluaran transformator sebesar 95 kW. Total rugi daya menurut perhitungan sebelumnya mencapai 1,997 kW

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss-total}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{95}{95 + 1,997} \times 100\%$$

$$\eta = 97,94\%$$

Efisiensi transformator meningkat dari 97,90 menjadi 97,94%. Peningkatan ini terjadi karena rugi daya sesudah pemerataan menjadi lebih kecil.

C. Analisis Perbandingan Hasil Sebelum dan Sesudah Pemerataan

Dari hasil simulasi ETAP dan hitungan manual, pemerataan beban memengaruhi perubahan kondisi beban trafo, arus netral, kerugian daya, dan efisiensi trafo. Perbandingan dibuat untuk dua kondisi, yaitu Saat Beban Puncak (WBP) dan Saat Tidak Beban Puncak (LWBP).

1. Perbandingan Kondisi WBP

Pada kondisi WBP, arus fasa berubah dari 187 A, 127 A, dan 140 A menjadi 165 A, 150 A, dan 140 A setelah pemerataan. Total arus sebelum dan sesudah hampir sama, yaitu 454 A dan 455 A, sehingga pemerataan hanya mengatur ulang pembagian beban antar fasa. Hasilnya, ketidakseimbangan beban turun dari 15,71% menjadi 5,86%, arus netral perhitungan turun dari 41 A menjadi 23 A, sedangkan simulasi ETAP turun dari 55 A menjadi 19 A. Selain itu, rugi-rugi daya menurun dari 2,244 kW menjadi 2,165 kW, dan efisiensi transformator meningkat dari 97,78% menjadi 97,84%.

2. Perbandingan Kondisi LWBP

Pada kondisi LWBP, arus fasa sebelum pemerataan sebesar 165 A, 118 A, dan 149 A, kemudian setelah pemerataan menjadi 150 A, 139 A, dan 149 A. Total arus sebelum dan sesudah tidak berubah jauh, yaitu 432 A dan 438 A, sehingga pemerataan tidak mengurangi total beban secara drastis. Ketidakseimbangan beban menurun dari 12% menjadi 3,19%, arus netral hasil perhitungan menurun dari 36 A menjadi 20 A, sedangkan hasil simulasi ETAP menunjukkan penurunan dari 41 A menjadi 20 A. Rugi-rugi daya juga menurun dari 2,004 kW menjadi 1,997 kW, dan efisiensi transformator meningkat dari 97,90% menjadi 97,94%.

3. Rekapitulasi Perbandingan Hasil

Tabel VI menunjukkan rekapitulasi perbandingan arus fasa R, S, T, arus netral, dan persentase ketidakseimbangan beban sebelum dan sesudah pemerataan untuk menilai pengaruhnya terhadap keseimbangan beban trafo.

TABEL VI. PERBANDINGAN SEBELUM DAN SESUDAH PEMERATAAN

Kondisi Beban Transformator	R	S	T	IN	%UL
WBP Sebelum Pemerataan	187 A	127 A	140 A	41 A	15,71%
WBP Sesudah Pemerataan	165 A	150 A	140 A	23 A	5,86%
LWBP Sebelum Pemerataan	165 A	118 A	149 A	36 A	12%
LWBP Sesudah Pemerataan	150 A	139 A	149 A	20 A	3,19%

Arus netral yang awalnya tinggi akibat ketidakseimbangan mengalami penurunan setelah dilakukan pemerataan, sehingga arus antar fasa menjadi lebih seimbang. Pada kondisi WBP, arus netral berkurang dari 41 A menjadi 23 A, sedangkan pada kondisi LWBP menurun dari 36 A menjadi 20 A. Persentase ketidakseimbangan beban juga menyusut, yakni dari 15,71% menjadi 5,86% pada WBP dan menjadi 3,19% pada LWBP. Dengan demikian, pemerataan beban terbukti efektif dalam mengurangi arus netral serta meningkatkan keseimbangan beban pada transformator.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran, perhitungan, dan simulasi ETAP, pemerataan beban pada transformator 630 kVA Gardu KSBI Cirebon mampu memperbaiki keseimbangan arus antar fasa dan menurunkan arus netral. Ketidakseimbangan beban pada WBP menurun dari 15,71% menjadi 5,86%, sedangkan pada LWBP menurun dari 12% menjadi 3,19%. Berdasarkan perhitungan lapangan, arus netral turun dari 41 A menjadi 23 A pada WBP dan dari 36 A

menjadi 20 A pada LWBP. Sementara itu, hasil simulasi ETAP menunjukkan arus netral turun dari 55 A menjadi 19 A pada WBP dan dari 41 A menjadi 20 A pada LWBP. Selain itu, rugi-rugi daya menurun dan efisiensi transformator sedikit meningkat. Dengan demikian, penyeimbangan beban efektif dalam menurunkan arus netral dan meningkatkan kinerja transformator distribusi. Dengan begitu, penyeimbangan beban terbukti efektif untuk memperbaiki kerja transformator distribusi. Sebagai saran, PLN perlu melakukan audit beban secara rutin di gardu yang mengalami perubahan beban dinamis supaya keseimbangan fasa tetap terjaga dan kerugian daya bisa dikurangi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Swadaya Gunung Jati Cirebon, terutama Program Studi Teknik Elektro, atas dukungan akademik selama penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Taryo, S.T., M.T., dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan karya ini.

Selanjutnya, penulis mengucapkan terima kasih kepada PT.PLN (Persero) ULP Cirebon Kota yang telah memberikan izin dan dukungan selama penelitian berlangsung, sehingga pengambilan data dapat berjalan lancar. Penulis juga berterima kasih kepada orang tua dan keluarga atas doa, dukungan, dan motivasi yang diberikan sehingga penelitian dan penulisan ini dapat selesai dengan baik.

REFERENSI

- [1] M. Firmansyah Pratama, M. M. I. T. Arsyad, and Z. Abidin, "Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) ULP Putussibau," 2023. [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/j3eituntan/article/download/62008/75676596287>
- [2] S. Yasa, A. Wirajaya, and N. Adrama, "Analysis of Load Unbalance on Transformer Distribution at PT. PLN (Persero) Ulp Bangli," *JESCE (Journal of Electrical and System Control Engineering)*, vol.8 2024, doi: 10.31289/jesce.v6i2.11992.
- [3] Y. Ridal, Budiman, and Wahyudi, "Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo 200 kVA," vol. 6, no. 1, pp. 67–77, 2025, doi: 10.53695/jm.v6i1.1146.
- [4] A. B. Prayoga and B. Suprianto, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Terhadap Rugi Daya (Losses) Dengan Digsilent Power Factory di PT. PLN (Persero) ULP Ngunut," 2023. doi: 10.26740/jte.v12n2.p23-32.
- [5] M. Soleh, Taryo, and A. Kurniawan, "Analisis Susut Energi Pada Sistem Jaringan Distribusi Di PT. PLN (Persero) ULP Indramayu (Studi Kasus Penyulang Lohbener)," 2023. doi: 10.47685/mestro.v5i1.401.
- [6] C. Huangfu, E. Wang, T. Yi, and L. Qin, "Low-Voltage Distribution Network Loss-Reduction Method Based on Load-Timing Characteristics and Adjustment Capabilities," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 5, Mar. 2024, doi: 10.3390/en17051115.
- [7] R. N. Sidabutar, "Studi Pemerataan Beban Transformator Tidak Seimbang Pada Gardu Distribusi BR 114 Di PT. PLN (PERSERO) ULP Medan Baru," 2024, doi: 10.51510/jitl.v3i1.1656.
- [8] N. N. Fitrah, M. Syukri, A. Syukriyadin, and J. T. Elektro, "Analisis Aliran Daya Dengan Beban Tidak Seimbang Pada Penyulang Teubeng Gardu Hubung Sigli Kota Menggunakan Software ETAP 16.0," vol. 1, no. 1, pp. 12–20, 2022, doi: 10.52626/joge.v1i1.6.
- [9] A. Dasa Novfowan, M. Miftah, and W. Kusuma, "Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi," *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.33795/elposys.v10i1.716.
- [10] Rusliadi, Yulianto La Elo, Nurul Husnah, and Naomi Lembang, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi 20 KV pada Gardu Distribusi Tipe BBD Kampung Tanama PT PLN (Persero) ULP Fakfak," vol. 6, no. 2, 2023, doi: 10.55606/isaintek.v6i02.148.
- [11] T. Rugi *et al.*, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 Kv Terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi pada Penyulang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP Panakukkang Makassar," 2021. Accessed: Apr. 02, 2026. [Online]. Available: <https://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/2822/0>
- [12] G. Satriyo Wicaksono and T. Wrahatnolo, "Evaluasi Ketidakseimbangan Beban pada GTT 20kV di Penyulang Plumbungan Surabaya," vol. 5, Jul. 2023, doi: 10.37905/jjee.v5i2.20139.
- [13] R. Tambara Ginting, Zulfahri, and Arlenny, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP," *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, vol. 6, no. 2, pp. 81–89, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9734.
- [14] Y. Yusiran and H. Hasanudin, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator Step Down 20 KV/400 V," *Jurnal Penelitian Inovatif*, vol. 5, no. 3, pp. 2113–2120, Jul. 2025, doi: 10.54082/jupin.1675.
- [15] Mohammad Farizki Widodo, Dultudes Mangopo, Theresia Wuri Oktaviani, and Yosef Lefaan, "Optimalisasi Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi Terhadap Arus Netral," 2023, Accessed: Apr. 02, 2026. [Online]. Available: <https://teletronic.elektrouncen.com/index.php/teletronic/article/view/13>