



Analisis Penyeimbangan Beban Secara Manual Menggunakan Metode Dua Titik Waktu pada Transformator Distribusi 50 kVA PNIAI007

Rangga Bismantara^{1*}, Arief Marwanto²

¹⁻²Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Email: 30602200227@std.unissula.ac.id¹, arief@unissula.ac.id²

* Penulis Korespondensi: 30602200227@std.unissula.ac.id

Abstract: Load imbalance in three-phase distribution transformers can increase neutral current and power losses, thereby reducing the efficiency and reliability of electric power distribution systems. This study aims to analyze the level of load imbalance, power losses caused by neutral current, and the effectiveness of manual load balancing using the two-time-point method, namely peak load time (PLT) and off-peak load time (OPLT). The research was conducted on the PNIAI007 distribution transformer at PT PLN (Persero) ULP Enarotali using a quantitative descriptive approach with a case study design. Data were obtained through measurements of phase currents and neutral current, which were then analyzed to compare conditions before and after load balancing. The results show that the load imbalance level was significantly reduced from more than 29% to 2.47% during daytime operation and 1.21% during nighttime operation. The neutral current decreased from 37.81 A to 14.58 A during the daytime and from 51.76 A to 19.83 A at night. In addition, power losses due to neutral current were reduced by more than 85%. These results indicate that the two-time-point load balancing method is effective in improving the efficiency and operational reliability of distribution transformers.

Keywords: load balancing; load imbalance; neutral current; power loss; two-time-point method.

Abstrak: Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi tiga fasa dapat meningkatkan arus netral dan rugi daya, sehingga menurunkan efisiensi serta keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban, rugi daya akibat arus netral, serta efektivitas penyeimbangan beban secara manual menggunakan metode dua titik waktu, yaitu waktu beban puncak (WBP) dan luar beban puncak (LWBP). Penelitian dilakukan pada transformator distribusi PNIAI007 di PT PLN (Persero) ULP Enarotali dengan pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis studi kasus. Data diperoleh melalui pengukuran arus beban tiap fasa dan arus netral, kemudian dianalisis untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah penyeimbangan beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat ketidakseimbangan beban berhasil diturunkan secara signifikan dari lebih dari 29% menjadi 2,47% pada siang hari dan 1,21% pada malam hari. Arus netral juga mengalami penurunan dari 37,81 A menjadi 14,58 A pada siang hari serta dari 51,76 A menjadi 19,83 A pada malam hari. Selain itu, rugi daya akibat arus netral berkurang lebih dari 85%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode penyeimbangan beban berdasarkan dua titik waktu efektif dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan operasi transformator distribusi.

Kata kunci: arus netral; ketidakseimbangan beban; metode dua titik waktu; penyeimbangan beban; rugi daya

1. LATAR BELAKANG

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian krusial dalam jaringan kelistrikan karena berhubungan langsung dengan konsumen akhir (Iman et al., 2024; Zulkhulaifah & Rudito, 2021; Santos et al., 2025). Dalam rangka menjamin kontinuitas dan kualitas pasokan listrik, PT PLN (Persero) dituntut untuk menghadirkan listrik yang andal, stabil, dan efisien. Savina et al. (2018) Sampe (2022) Namun demikian, pembagian beban yang tidak merata pada jaringan distribusi sering menimbulkan ketidakseimbangan beban antar fasa, yang dapat mengakibatkan peningkatan arus netral dan rugi daya (Azis et al., 2024; Sutikno, 2018; Ramadhan et al., 2021). Kondisi ini secara langsung menurunkan efisiensi sistem serta mempercepat degradasi peralatan distribusi (Widagdo & Andriawan, 2023; Hidayat et al., 2022).

Kasus ketidakseimbangan beban ditemukan pada transformator distribusi PNIAI007 yang berada pada penyulang Cemara, ULP Enarotali. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa arus beban pada fasa R mencapai 80,4 A, jauh lebih tinggi dibandingkan fasa S sebesar 38,53 A dan fasa T sebesar 48,08 A. Ketimpangan ini dipengaruhi oleh dominasi sambungan rumah satu fasa pada fasa tertentu serta kurangnya evaluasi dan redistribusi beban secara berkala (Prasetyo & Nugroho, 2023). Akibatnya, tingkat ketidakseimbangan beban mencapai 30,26% pada siang hari dan 29,61% pada malam hari, yang telah melampaui batas ketidakseimbangan beban.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban dan rugi daya akibat arus netral serta mengevaluasi efektivitas penyeimbangan beban secara manual menggunakan metode dua titik waktu, yaitu waktu beban puncak dan luar beban puncak. Penelitian ini menekankan penerapan metode penyeimbangan dua titik waktu berbasis data lapangan aktual sebagai solusi praktis yang mudah diterapkan pada jaringan distribusi eksisting tanpa memerlukan penambahan perangkat (Pranoto et al., 2020; Setiawan et al., 2021). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi pengelola jaringan distribusi dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan transformator distribusi.

2. KAJIAN TEORITIS

Transformator Distribusi

Pada sistem distribusi sendiri, dikenal adanya transformator distribusi. Trafo distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan transmisi menengah 20 kV ke tegangan distribusi 220/380 V sehingga dapat digunakan oleh pelanggan (Syamsiana et al., 2023; Yusmartato et al., 2019; Hafizh, 2025).

Pembebanan Transformator

Transformator bekerja optimal pada kondisi pembebanan nominal. Pembebanan yang mendekati atau melebihi kapasitas nominal dalam jangka waktu lama dapat meningkatkan suhu operasi, menyebabkan rugi daya, mempercepat degradasi isolasi, serta menurunkan kualitas daya dan keandalan sistem distribusi (Prasetya et al., 2020).

Untuk beban penuh (*full load*) dapat menggunakan persamaan (Prasetya et al., 2020):

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (I)$$

Di mana:

I_{FL} = Arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan sisi sekunder trafo (kV)

Besarnya persentase pembebanan transformator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Prasetya et al., 2020):

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

Di mana:

%Pembebanan = Persentase pembebanan

$I_{\text{rata-rata}}$ = Nilai arus rata-rata dari ketiga fasa (A)

Untuk menghitung persentase pembebanan pada masing-masing fasa transformator distribusi, dapat digunakan rumus berikut (Prasetya et al., 2020):

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

Di mana:

%Pembebanan fasa = Persentase pembebanan fasa

Adapun nilai Arus rata-rata beban RST:

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

Dimana:

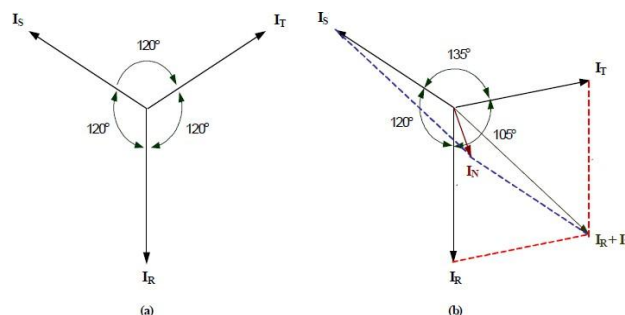
I_R = Arus pada fasa R (A)

I_S = Arus pada fasa S (A)

I_T = Arus pada fasa T (A)

Ketidakseimbangan Beban

Sistem tenaga listrik dikatakan seimbang apabila ketiga vektor arus atau tegangan memiliki besar yang sama dan membentuk sudut 120° satu sama lain. Dalam praktiknya, kondisi ideal ini sering tidak tercapai karena distribusi beban yang tidak merata antar fasa. Ketidakseimbangan beban terjadi apabila salah satu atau kedua syarat kesetimbangan tidak terpenuhi, baik karena besar arus yang berbeda maupun sudut antar fasa yang menyimpang dari 120° .



Gambar 1. Diagram vektor arus (a) kondisi seimbang, (b) kondisi tidak seimbang.

Gambar 1 menunjukkan diagram vektor arus dalam kondisi seimbang dan tidak seimbang. Pada kondisi seimbang (a), ketiga vektor arus (I_R , I_S , dan I_T) memiliki besar yang sama dan membentuk sudut 120° , sehingga resultan arus adalah nol dan tidak terbentuk arus netral. Sebaliknya, pada kondisi tidak seimbang (b), besar arus antar fasa tidak sama, sehingga menghasilkan arus netral (I_N) yang bergantung pada derajat ketidakseimbangan beban.

Tingkat ketidakseimbangan beban yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi sistem distribusi. Berdasarkan Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014, kondisi ketidakseimbangan dikategorikan baik apabila berada di bawah 10%, cukup pada rentang 10–20%, kurang di antara 20–25%, dan buruk jika $\geq 25\%$ (Persero, 2014).

Untuk mengukur ketidakseimbangan, digunakan rumus perbandingan absolut arus masing-masing fasa terhadap arus rata-rata (Mulyadi, 2011):

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

keterangan :

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

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

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

Arus Netral

Arus netral merupakan arus yang mengalir melalui penghantar netral pada sistem transformator tiga fasa empat kawat dengan konfigurasi bintang. Arus ini timbul akibat ketidakseimbangan beban dan dapat diperparah oleh harmonisa dari beban nonlinier. Nilai arus netral sebanding dengan tingkat ketidakseimbangan antar fasa, dan dapat dihitung menggunakan prinsip Kirchhoff.

Rugi daya yang disebabkan oleh arus ini dihitung dengan persamaan berikut (Mulyadi, 2011):

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (XIV)$$

Dimana

Di mana:

P_N = rugi daya akibat arus netral (W),

I_N = arus netral (A),

R_N = resistansi penghantar netral (Ω).

Persentase rugi daya terhadap daya total pembebanan dapat dihitung menggunakan:

$$\%Loss_{siang} = \frac{P_n}{P} \times 100\% \quad (XV)$$

3. METODE PENELITIAN

Objek dan Lokasi Penelitian

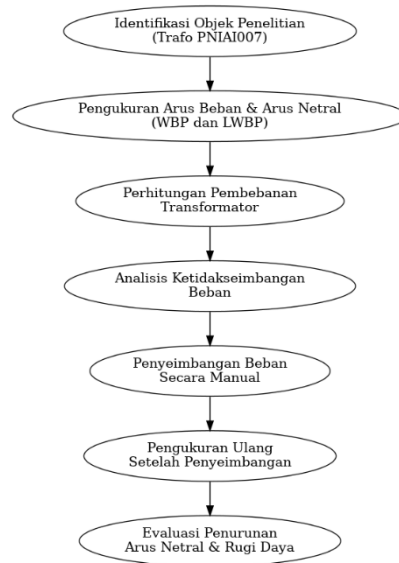
Penelitian ini dilaksanakan pada transformator distribusi PNIAI007 yang terhubung pada penyulang Cemara, PT PLN (Persero) ULP Enarotali. Pengambilan data dilakukan pada periode Desember 2024 hingga Juni 2025. Objek penelitian difokuskan pada pengukuran arus beban tiap fasa (R, S, dan T) serta analisis tingkat ketidakseimbangan beban pada kondisi waktu beban puncak dan luar beban puncak.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif dengan pendekatan studi kasus pada transformator distribusi PNIAI007. Pengukuran arus beban pada masing-masing fasa (R, S, dan T) serta arus netral dilakukan secara langsung di lapangan untuk mengidentifikasi tingkat ketidakseimbangan beban yang terjadi.

Analisis data dilakukan menggunakan metode penyeimbangan dua titik waktu dengan membandingkan kondisi pembebanan pada waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP). Redistribusi beban dilakukan secara manual berdasarkan selisih arus antar fasa. Selanjutnya, hasil pengukuran sebelum dan sesudah penyeimbangan dianalisis melalui perhitungan persentase pembebanan transformator, tingkat ketidakseimbangan beban, arus netral, serta rugi daya akibat arus netral guna mengevaluasi dampak penyeimbangan beban terhadap kinerja transformator distribusi.

Tahapan penelitian dilakukan secara berurutan mulai dari pengukuran arus beban dan arus netral, perhitungan pembebanan dan ketidakseimbangan beban, hingga evaluasi hasil penyeimbangan beban manual, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir tahapan penelitian penyeimbangan beban manual pada transformator distribusi.

Teknik Pengumpulan Data

Data dalam penelitian ini diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan pada transformator distribusi PNIAI007 yang berada pada penyulang Cemara, ULP Enarotali. Parameter yang diukur meliputi arus beban pada masing-masing fasa (R, S, dan T) serta arus netral. Pengukuran dilakukan pada dua kondisi waktu, yaitu waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP), untuk merepresentasikan variasi pembebanan harian.

Pengambilan data dilakukan sebelum dan sesudah penyeimbangan beban secara manual. Data hasil pengukuran selanjutnya digunakan untuk menghitung persentase pembebanan transformator, tingkat ketidakseimbangan beban, arus netral, serta rugi daya akibat arus netral sebagai dasar evaluasi efektivitas penyeimbangan beban.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengevaluasi efektivitas metode penyeimbangan beban, dilakukan pengukuran arus pada trafo PNIAI007 sebelum dan sesudah pelaksanaan redistribusi beban. Data hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan untuk menghitung besarnya pembebanan transformator pada tiap fasa, tingkat ketidakseimbangan beban, arus netral, serta rugi daya akibat arus yang mengalir pada penghantar netral. Analisis ini bertujuan untuk menilai sejauh mana perbaikan kondisi distribusi tercapai setelah penyeimbangan dilakukan. Berikut adalah Tabel Data Pengukuran Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan :

Tabel 1. Data Pengukuran Sebelum dan Sesudah Penyeimbangan

Waktu	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)
Sebelum Penyeimbangan Beban				
10.00	54,11	26,25	34,29	37,81
19.00	80,40	38,53	48,08	51,76
Sesudah Penyeimbangan Beban				
10.00	38,02	40,85	39,56	14,58
19.00	56,8	55,81	54,8	19,83

Perhitungan Persentase Pembebanan

Analisis persentase pembebanan dilakukan untuk mengetahui seberapa besar arus yang mengalir pada masing-masing fasa dibandingkan dengan arus penuh (*full load current*) transformator. Perhitungan dilakukan pada dua kondisi, yaitu sebelum dan sesudah dilakukan penyeimbangan beban. Hasil ini digunakan untuk menilai perubahan distribusi beban antar fasa serta untuk mengidentifikasi adanya potensi kelebihan beban yang dapat memengaruhi kinerja dan keandalan trafo.

Perhitungan ini mengacu pada rumus yang telah dijelaskan pada bagian kajian pustaka, yaitu Persamaan (1) hingga Persamaan (4). Perhitungannya disajikan sebagai berikut:

a. Arus Beban Penuh (XV)

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

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

b. Persentase Pembebanan Trafo Untuk Tiap Fasa (XVI)

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

Sebelum Penyeimbangan Beban

– Pada jam 10.00 WIT

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

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

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

– Pada jam 19.00 WIT

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

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

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

Sesudah Penyeimbangan Beban

– Pada jam 10.00 WIT

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

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

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

– Pada jam 19.00 WIT

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

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

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

c. Rata-rata Arus

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

Sebelum Penyeimbangan Beban

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

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

Sesudah Penyeimbangan

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

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

d. Persentase rata-rata pembebanan

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

Sebelum Penyeimbangan Beban

– Jam 10.00 WIT

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

– Jam 19.00 WIT

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

Sesudah Penyeimbangan Beban

- Jam 10.00 WIT

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

- Jam 19.00 WIT

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

Berdasarkan hasil perhitungan, terlihat bahwa sebelum dilakukan penyeimbangan beban, terjadi ketimpangan distribusi arus yang cukup signifikan antar fasa, bahkan pada kondisi beban puncak, fasa R mengalami pembebanan melebihi kapasitas nominal transformator sebesar 111,4%. Setelah dilakukan redistribusi beban, pembebanan pada masing-masing fasa menjadi lebih merata dan berada dalam kisaran aman, dengan rata-rata pembebanan trafo sebesar 54,72% pada siang hari dan 77,33% pada malam hari. Hal ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban yang dilakukan berhasil mengurangi dominasi beban pada salah satu fasa serta meningkatkan kesetaraan pembebanan antar fasa pada trafo distribusi.

Perhitungan Tingkat Ketidakseimbangan Beban

Tingkat ketidakseimbangan beban antar fasa merupakan indikator penting dalam menilai kualitas distribusi daya pada sistem tiga fasa. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana distribusi arus pada masing-masing fasa menyimpang dari kondisi ideal. Evaluasi dilakukan berdasarkan data arus aktual sebelum dan sesudah penyeimbangan beban, dengan menggunakan metode deviasi rata-rata terhadap arus rata-rata tiap fasa, sebagaimana dijelaskan dalam Persamaan (5),(6),(7), dan (8). Nilai ketidakseimbangan kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase untuk memudahkan interpretasi terhadap kondisi operasional trafo.

Perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban pada trafo PNIAI007 adalah sebagai berikut:

Sebelum Penyeimbangan Beban

- Jam 10.00

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

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

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

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

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

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

– Jam 19.00

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

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

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

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

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

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

Sesudah Penyeimbangan Beban

– Jam 10.00

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

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

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

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

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

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

– Jam 19.00

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

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

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

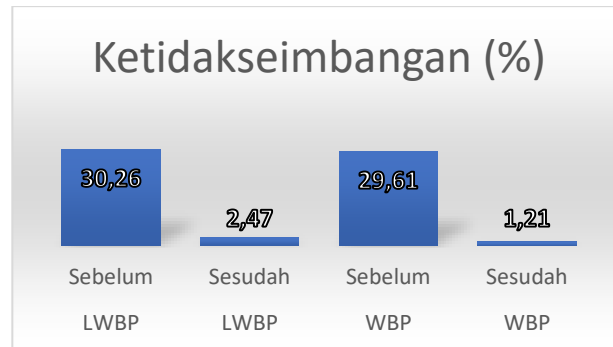
$$\% \text{Ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\%$$

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

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

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tingkat ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan berada pada kategori buruk, yakni sebesar 30,26% pada siang hari dan 29,61% pada malam hari. Nilai tersebut jauh melebihi batas ambang ketidakseimbangan yang

dikategorikan baik, yaitu di bawah 10% sesuai standar PLN. Setelah dilakukan penyeimbangan, ketidakseimbangan beban menurun drastis menjadi 2,47% dan 1,21%, yang masuk dalam kategori baik. Hasil ini mengindikasikan bahwa tindakan redistribusi beban telah berhasil menciptakan keseimbangan antar fasa dan memperbaiki kinerja sistem distribusi secara signifikan.



Gambar 3. Grafik Ketidakseimbangan Sebelum dan Sesudah.

Rugi-Rugi Netral Dan Loss Netral Akibat Arus Netral

Ketidakeimbangan beban antar fasa menyebabkan munculnya arus netral yang mengalir melalui penghantar netral transformator. Arus ini menimbulkan rugi-rugi daya dalam bentuk panas akibat adanya resistansi konduktor, dan secara langsung memengaruhi efisiensi distribusi energi. Untuk menilai seberapa besar dampaknya, dilakukan perhitungan rugi daya netral sebelum dan sesudah penyeimbangan beban.

Dalam penelitian ini, perhitungan rugi-rugi daya mengacu pada penghantar netral sepanjang 1,5 km dengan penampang 70 mm². Nilai resistansi penghantar ditetapkan sebesar 0,5049 Ω/km pada suhu 20°C, berdasarkan standar teknis dalam dokumen *Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik* (PT PLN, 2010). Dengan mengacu pada nilai resistansi tersebut dan arus netral yang terukur, dilakukan perhitungan rugi daya menggunakan rumus daya resistif sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (9) dan (10), baik untuk kondisi sebelum maupun sesudah penyeimbangan.

a. $R_N = 0,5049 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 1,5 \text{ km} = 0,75735 \text{ } \Omega$

b. $P = S \times \text{Cos } \varphi$
 $= 50.000 \text{ VA} \times 0,85 = 42.500 \text{ W}$

c. Rugi Daya Netral

Sebelum Penyeimbangan Beban

– Jam 10.00

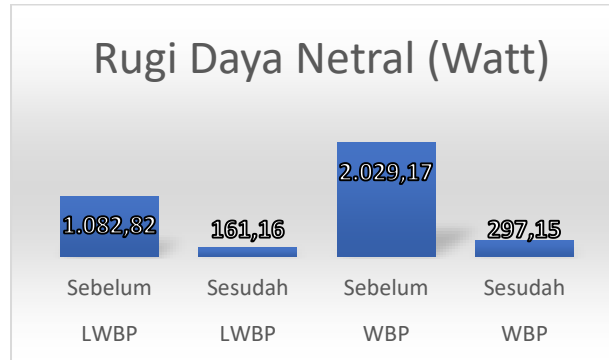
$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= 37,81^2 \text{ A} \times 0,75735 \text{ } \Omega = 1.082,82 \text{ Watt}$$

- Jam 19.00
 $= 51,76^2 \text{ A} \times 0,75735 \ \Omega = 2.029,17 \text{ Watt}$

Sesudah Penyeimbangan Beban

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



Gambar 4. Grafik Rugi Daya Sebelum dan Sesudah.

d. Persentase *Loss* Netral

Sebelum Penyeimbangan Beban

- Jam 10.00

$$\%Loss = \frac{P_n}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{1082,82}{42500} \times 100 = 2,55 \%$$
- Jam 19.00

$$= \frac{2029,17}{42500} \times 100 = 4,77\%$$

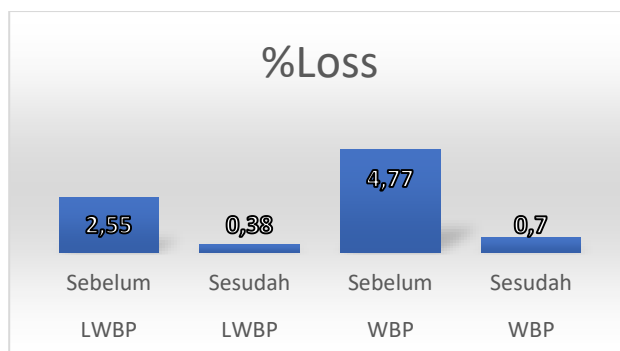
Sesudah Penyeimbangan Beban

- Jam 10.00

$$\%Loss = \frac{P_n}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{161,16}{42500} \times 100 = 0,38 \%$$
- Jam 19.00

$$= \frac{297,15}{42500} \times 100 = 0,7 \%$$



Gambar 5. % Loss Netral Sebelum dan Sesudah.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rugi daya pada penghantar netral sebelum penyeimbangan mencapai 1.082,82 W pada siang hari dan 2.029,17 W pada malam hari. Nilai ini setara dengan 2,55% dan 4,77% dari kapasitas daya transformator, yang tergolong cukup tinggi. Setelah dilakukan penyeimbangan beban, rugi daya menurun drastis menjadi 161,16 W dan 297,15 W, atau hanya 0,38% dan 0,7% dari kapasitas transformator. Penurunan lebih dari 80% ini menunjukkan bahwa redistribusi beban tidak hanya menyeimbangkan arus antar fasa, tetapi juga secara signifikan meningkatkan efisiensi sistem distribusi dengan menekan kerugian daya pada penghantar netral.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis penyeimbangan beban yang telah dilakukan pada transformator distribusi PNIAI007, dapat disimpulkan bahwa transformator tersebut mengalami ketidakseimbangan beban yang cukup signifikan. Tingkat ketidakseimbangan beban tercatat sebesar 30,26% pada pagi hari dan 29,61% pada malam hari. Nilai tersebut telah melebihi batas toleransi ketidakseimbangan beban yang direkomendasikan oleh PLN, yaitu sebesar 10%, sehingga kondisi pembebanan transformator dapat dikategorikan kurang baik dan berpotensi menimbulkan kerugian daya serta menurunkan keandalan sistem distribusi.

Penerapan metode penyeimbangan dua titik waktu melalui redistribusi sambungan rumah (SR) antar fasa terbukti efektif dalam memperbaiki kondisi pembebanan transformator. Setelah dilakukan penyeimbangan, tingkat ketidakseimbangan beban berhasil diturunkan menjadi 2,47% pada pagi hari dan 1,21% pada malam hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi pembebanan transformator menjadi lebih seimbang dan telah berada dalam kategori baik sesuai standar operasional sistem distribusi tenaga listrik.

Selain itu, penyeimbangan beban yang dilakukan juga memberikan dampak signifikan terhadap penurunan arus netral. Arus netral pada pagi hari menurun dari 37,81 A menjadi 14,58 A, sedangkan pada malam hari menurun dari 51,76 A menjadi 19,83 A. Penurunan arus netral

tersebut secara langsung berpengaruh terhadap berkurangnya rugi daya pada penghantar netral hingga lebih dari 80%, sehingga efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik dapat meningkat secara lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT PLN (Persero) ULP Enarotali yang telah memberikan izin dan dukungan selama proses penelitian berlangsung, khususnya dalam penyediaan data dan fasilitas pengukuran pada transformator distribusi PNIAI007. Terima kasih juga kepada dosen pembimbing serta seluruh pihak dari Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung yang telah memberikan arahan, masukan, dan dukungan akademik sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang sistem distribusi tenaga listrik dan penyeimbangan beban transformator.

DAFTAR REFERENSI

- Azis, A., Rizal, M., Emidiana, E., Pebrianti, I. K., Amin, M. S. Al, Nurdiana, N., Perawati, P., & Irwansi, Y. (2024). Analysis of load imbalance in Tarakan distribution transformer of PT PLN (Persero) Sukarami customer service unit. *Mağallať Al-Handasatť Wa-al-Tiknũlũğiyã*. <https://doi.org/10.47191/etj/v9i05.12>
- dos Santos, Q. F., Soares, J. G., & Siband, R. L. (2025). Calculation and analysis of balanced loads in 20 kV distribution system. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*. <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v10i10.62223>
- Hafizh, Mhd. R. Al. (2025). Studi pengaruh beban tak seimbang pada transformator distribusi Gardu SL.247 di PT PLN (Persero) ULP Sunggal. *Jurnal Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik*. <https://doi.org/10.51510/jtril.v1i1.1725>
- Hidayat, R., Pratama, A., & Yusuf, M. (2022). Evaluasi sistem distribusi tenaga listrik untuk meningkatkan keandalan jaringan. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 10(2), 88–95.
- Iman, D. F., Khaerunnisa, P., Fitri, H. M., & Aribowo, D. (2024). Analisis operasional sistem distribusi tegangan menengah ke tegangan rendah di Gardu Induk Serang. *Journal of Electrical Power Control and Automation*, 7(2), 66–71. <https://doi.org/10.33087/jepca.v7i2.119>
- Mulyadi, A. D. (2011). Pengaruh ketidakseimbangan beban pada rugi daya saluran netral jaringan distribusi tegangan rendah. *Jurnal Teknik Energi*.
- Pranoto, S., Sofyan, & Rusli, N. N. (2020). Penyeimbangan beban pada trafo distribusi penyulang Akkarena di Unit Layanan Pelanggan Mattoanging PT PLN (Persero). *Jurnal Teknik Elektro*.
- Prasetya, I. W. Y., Setiawan, I. N., & Arjana, I. G. D. (2020). Analisis ketidakseimbangan beban dan harmonisa pada transformator distribusi MI 0096 penyulang Abianbase. *Jurnal SPEKTRUM*, 7(1), 109–115. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2020.v07.i01.p16>

- Prasetyo, D., & Nugroho, A. (2023). Analisis pembebanan transformator distribusi pada jaringan tegangan rendah. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 11(1), 54–61.
- PT PLN (Persero). (2014). *Metode pemeliharaan trafo distribusi berbasis kaidah manajemen aset*. <https://id.scribd.com/document/348641264/1-SE-HAR-TRAFO-DIS-0017-E-tahun-2014-pdf>
- Ramadhan, F., Putri, N., & Saputra, H. (2021). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral transformator distribusi. *Jurnal Energi Listrik*, 9(3), 73–80.
- Sampe, A. (2022). Analisis rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi 20 kV/380 V di penyulang DPR Kota. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 1(2), 106–123. <https://doi.org/10.58169/saintek.v1i2.84>
- Santos, P., Almeida, R., & Ferreira, J. (2025). Load balancing analysis in low-voltage distribution transformers. *International Journal of Electrical Power Systems*, 18(2), 55–63.
- Savina, N. V., Myasoedov, Y. V., & Myasoedova, L. A. (2018). Influence of quality of the electric energy on reliability of electrical supply systems. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602690>
- Setiawan, D., Wijaya, H., & Firmansyah, R. (2021). Penerapan metode penyeimbangan beban berbasis dua titik waktu pada transformator distribusi. *Jurnal Teknologi Kelistrikan*, 8(4), 115–122.
- Sutikno. (2018). Analisis ketidakseimbangan beban transformator distribusi 20 kV dan solusinya pada jaringan tegangan rendah. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(1), 1–7. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/JTE/article/view/26308>
- Syamsiana, I. N., Prasetyo, B. E., Hassidiqi, H., & Firdaus, S. F. (2023). Balancing load outgoing transformator 2 di Politeknik Negeri Malang. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 10(3), 201–207. <https://doi.org/10.33795/elposys.v10i3.4266>
- Widagdo, R. S., & Andriawan, A. H. (2023). Analysis of losses due to load unbalance in a 2000 kVA transformer at Supermall Mansion 2 Tower Tanglin Surabaya. *Journal of Engineering and Science Research*. <https://doi.org/10.23960/jesr.v5i2.144>
- Yusmartato, Nasution, R., & Armansyah, A. (2019). Pemilihan fuse cut out untuk pengaman transformator distribusi 400 KVA. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 4(2), 73–79.
- Zulkhulaifah, P., & Rudito, H. (2021). Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban trafo distribusi 20 kV terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi pada penyulang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP Panakukkang Makassar. *Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika*, 6–11.