Ketidakseimbangan Beban Pada Gardu Distribusi PI0483 Penyulang Merapi di PLN ULP Indralaya

Daeny Septi Yansuri[1*], Armin Sofijan[2], Subianto[3], Siti Sailah[4], Dwi Pratiwi[5], Anisah Harum Sari[6]
[1,3,5,6] Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Palembang, Indonesia
[2] Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indonesia
[4]Program Studi Fisika, Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya, Indonesia
daenyyansuri@gmail.com[1*], a_sofijan@ft.unsri.ac.id[2], subiantodaeny07@gmail.com[3], siti.sailah@unsri.ac.id[4], pratiwidwi562@gmail.com[5], anisahharumsari850@gmail.com[6]

Received 05 Agustus 2026 | *Revised* 06 September 2026 | *Accepted* 14 September 2026

ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa empat kawat dapat menyebabkan peningkatan arus netral, pemanasan penghantar, dan menurunkan efektivitas pemanfaatan peralatan distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menghitung tingkat ketidakseimbangan arus dan membandingkan arus netral hasil pengukuran dengan resultan teoretis; (2) menghitung daya semu yang berkaitan dengan arus netral serta persentasenya terhadap kapasitas transformator; dan (3) menentukan prioritas penyeimbangan beban berdasarkan beberapa indikator kelistrikan. Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus berdasarkan data teknis sekunder Gardu Distribusi PI0483 Penyulang Merapi di Indralaya. Transformator berkapasitas 100 kVA melayani dua saluran, dengan arus fasa R-S-T masing-masing sebesar 26-15-16 A pada Saluran I dan 71-85-38 A pada Saluran II. Hasil analisis menunjukkan tingkat ketidakseimbangan sebesar 24,56% dan 27,49%. Arus netral terukur masing-masing sebesar 13 A dan 47 A, sedangkan hasil perhitungan teoretis sebesar 10,54 A dan 41,80 A. Dengan tegangan fasa-netral rata-rata 234 V, daya semu terkait arus netral mencapai total 12,25 kVA berdasarkan arus hitung dan 14,04 kVA berdasarkan arus terukur, atau sekitar 12,25%-14,04% kapasitas transformator. Saluran II menjadi prioritas penyeimbangan karena memiliki tingkat ketidakseimbangan, arus netral, rentang arus antarfasa, dan daya semu netral yang lebih tinggi. Hasil ini menunjukkan pentingnya redistribusi beban dan pemantauan berkala untuk meningkatkan pemerataan pembebanan pada jaringan distribusi.

Kata kunci: Ketidakseimbangan Beban, Arus Netral, Transformator Distribusi, Daya Semu, Penyulang

Load imbalance in a three-phase four-wire system can increase neutral current, conductor heating, and reduce utilization of distribution equipment. This study aims to: (1) determine the level of current imbalance and compare measured neutral current with the theoretical resultant; (2) calculate the apparent power associated with neutral current and its percentage relative to transformer capacity; and (3) determine load-balancing priorities based on electrical indicators. A quantitative descriptive case-study approach was applied using secondary data from the PI0483 Distribution Substation on the Merapi Feeder in Indralaya. The 100 kVA transformer supplies two circuits, with R-S-T phase currents of 26-15-16 A for Circuit I and 71-85-38 A for Circuit II. The results show imbalance levels of 24.56% and 27.49%, respectively. Measured neutral currents were 13 A and 47 A, while theoretical values were 10.54 A and 41.80 A. At an average phase-to-neutral voltage of 234 V, the apparent power associated with neutral current was 12.25 kVA based on calculated currents and 14.04 kVA based on measured currents, equivalent to 12.25%-14.04% of transformer capacity. Circuit II is prioritized for load balancing because of its higher imbalance, neutral current, phase-current range, and neutral-current apparent power. These findings highlight the importance of load redistribution and monitoring.

Keywords: Load Imbalance, Neutral Current, Distribution Transformer, Apparent Power, Feeder

I. PENDAHULUAN

Keandalan jaringan distribusi tidak hanya ditentukan oleh kecukupan kapasitas transformator, tetapi juga oleh pemerataan arus pada setiap fasa. Pada jaringan tegangan rendah yang didominasi pelanggan satu fasa, perubahan pola konsumsi dapat membuat fasa R, S, dan T membawa arus berbeda. Ketidakseimbangan tersebut memunculkan arus netral, meningkatkan pemanasan penghantar, dan menurunkan efektivitas pemanfaatan peralatan distribusi (Patilima, 2022; Sutama & Sari, 2023; Yasa et al., 2024). Pada sistem tiga fasa empat kawat yang ideal, arus setiap fasa memiliki magnitudo sama, terpisah 120°, dan jumlah vektornya nol. Ketika magnitudo atau sudut arus tidak seimbang, penghantar netral membawa resultan arus fasa (Siregar et al., 2024). Arus netral dapat menambah pemanasan dan rugi tembaga, tetapi interpretasi dayanya harus tepat: besaran S=IV menyatakan daya semu, sedangkan rugi daya aktif penghantar memerlukan resistansi dan dihitung melalui I^2R (Thango & Bokoro, 2022; León-Martínez et al., 2023). Penelitian terdahulu telah mengevaluasi ketidakseimbangan beban menggunakan persentase deviasi arus, arus netral, dan simulasi aliran

daya (Rizky et al., 2022; Prayoga & Suprianto, 2023; Novfowan et al., 2023). Namun, tidak semua kajian secara eksplisit membedakan empat besaran yang berbeda, yaitu arus netral hasil pengukuran, resultan arus netral berdasarkan asumsi sistem ideal 120°, daya semu yang berkaitan dengan arus netral, dan rugi daya aktif pada penghantar netral. Pembedaan tersebut penting agar indikator pembebanan tidak ditafsirkan sebagai energi yang hilang.

Gardu Distribusi PI0483 Penyulang Merapi dipilih sebagai studi kasus karena data teknis menunjukkan perbedaan arus antarfasa dan arus netral yang nyata pada dua saluran tegangan rendah. Nilai tambah penelitian ini adalah menghubungkan data pengukuran gardu dengan perhitungan vektor tiga fasa dan interpretasi daya secara konsisten, sehingga setiap angka dapat ditelusuri dari data sumber, formulasi, substitusi, hasil, dan implikasi teknisnya. Penelitian ini bertujuan: (1) menghitung tingkat ketidakseimbangan arus dan membandingkan arus netral hasil pengukuran dengan resultan teoretis pada Saluran I dan II; (2) menghitung daya semu yang berkaitan dengan arus netral serta persentasenya terhadap kapasitas transformator 100 kVA; dan (3) menetapkan prioritas penyeimbangan berdasarkan sintesis tingkat ketidakseimbangan, arus netral, rentang arus antarfasa, dan daya semu netral.

II. METODE PENELITIAN

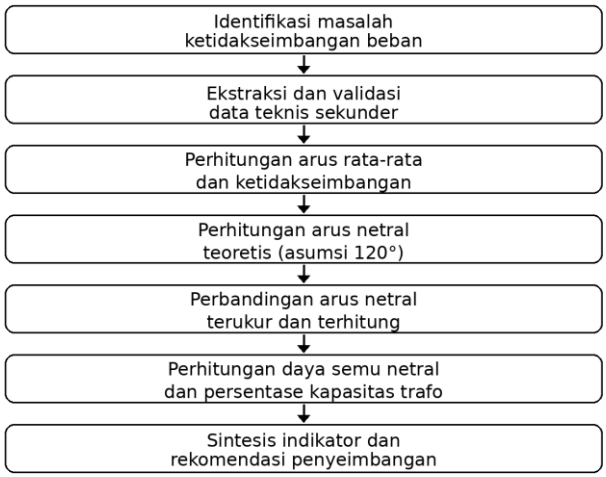
Penelitian menggunakan desain studi kasus deskriptif kuantitatif berbasis data teknis sekunder. Analisis kuantitatif dilakukan untuk mengevaluasi ketidakseimbangan arus fasa, arus netral, dan daya semu yang berkaitan dengan arus netral pada Gardu Distribusi PI0483. Literatur ilmiah digunakan sebagai pendukung untuk menjelaskan konsep dan membandingkan hasil, bukan sebagai metode utama penelitian.

A. Objek dan Sumber Data

Objek penelitian adalah ketidakseimbangan pembebanan pada Gardu Distribusi PI0483 Penyulang Merapi di Indralaya. Gardu menggunakan transformator distribusi berkapasitas 100 kVA dan melayani dua saluran jaringan tegangan rendah, yaitu Saluran I dan Saluran II. Kedua saluran dianalisis secara terpisah agar kontribusi masing-masing terhadap ketidakseimbangan beban dan arus netral dapat diidentifikasi. Data teknis sekunder berasal dari dokumen teknis terdokumentasi Gardu PI0483 tahun 2024, meliputi arus fasa R, S, dan T; arus netral terukur; tegangan fasa-netral; tegangan antar-fasa; kapasitas transformator; panjang jaringan; dan spesifikasi penghantar. Sebelum dianalisis, data diperiksa berdasarkan kelengkapan variabel, keseragaman satuan, dan konsistensi antarnilai. Faktor daya, kandungan harmonisa, temperatur penghantar, dan resistansi netral tidak tersedia, sehingga variabel tersebut tidak diestimasi untuk menghindari kesimpulan yang melampaui data. Selain parameter pembebanan, data resistansi pembumian transformator tidak tersedia pada dokumen teknis sekunder yang digunakan. Oleh karena itu, nilai resistansi pembumian tidak ditentukan melalui estimasi karena nilai tersebut harus diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan earth resistance tester atau metode pengukuran tahanan pembumian yang sesuai. Ketiadaan data tersebut diperlakukan sebagai keterbatasan penelitian dan tidak digunakan untuk menghasilkan nilai numerik yang bersifat asumtif.

B. Prosedur dan Teknik Analisis

Tahapan penelitian meliputi: (1) identifikasi masalah; (2) ekstraksi dan validasi data teknis; (3) perhitungan arus rata-rata, tingkat ketidakseimbangan, dan arus netral teoretis; (4) perbandingan arus netral hasil pengukuran dan perhitungan; (5) perhitungan daya semu terkait arus netral dan persentasenya terhadap kapasitas transformator; serta (6) sintesis indikator untuk menetapkan prioritas penyeimbangan. Seluruh perhitungan dilakukan untuk setiap saluran dan dibulatkan hingga dua angka desimal. Perhitungan arus netral teoretis mengasumsikan beda sudut antarfasa 120° dan menggunakan magnitudo arus fasa. Selisih arus netral dinyatakan relatif terhadap nilai pengukuran. Daya semu netral dihitung menggunakan tegangan fasa-netral rata-rata dan diperlakukan sebagai indikator pembebanan, bukan rugi daya aktif. Rugi aktif penghantar netral hanya dapat ditentukan jika resistansi ekuivalen penghantar tersedia melalui hubungan I^2R.



Gambar 1. Flowchart Penelitian Ketidakseimbangan Beban Gardu PI0483

Gambar 1 menunjukkan alur pembuktian dari data teknis hingga sintesis indikator yang digunakan untuk menetapkan prioritas penyeimbangan beban.

C. Persamaan Analisis

Iavg adalah arus rata-rata fasa (A); IR, IS, dan IT adalah arus pada masing-masing fasa (A); Iunb adalah tingkat ketidakseimbangan (%); IN,ukur dan IN,hitung adalah arus netral hasil pengukuran dan perhitungan (A); VL-N adalah tegangan fasa-netral rata-rata (V); SN adalah daya semu yang berkaitan dengan arus netral (kVA); Strafo adalah kapasitas transformator (kVA); RN adalah resistansi ekuivalen penghantar netral (Ω); dan Ploss,N adalah rugi daya aktif pada penghantar netral (W). Faktor 1000 pada Persamaan (5) mengubah satuan VA menjadi kVA. Persamaan (7) disajikan sebagai kerangka analisis dan tidak dihitung secara numerik karena nilai RN tidak tersedia.

$$I_{avg} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \tag{1}$$

$$I_{unb} = \frac{|I_R - I_{avg}| + |I_S - I_{avg}| + |I_T - I_{avg}|}{3 I_{avg}} \times 100\% \tag{2}$$

$$I_{N,\text{hitung}} = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_R I_T - I_S I_T} \tag{3}$$

$$\Delta I_N = \frac{|I_{N,\text{ukur}} - I_{N,\text{hitung}}|}{I_{N,\text{ukur}}} \times 100\% \tag{4}$$

$$S_N = \frac{I_N \times V_{L-N}}{1000} \tag{5}$$

$$S_{N,\text{trafo}} = \frac{S_N}{S_{\text{trafo}}} \times 100\% \tag{6}$$

$$P_{\text{loss},N} = I_N^2 R_N \tag{7}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Hasil penelitian disusun mengikuti urutan data, formulasi, substitusi, hasil, dan interpretasi. Data teknis Gardu Distribusi PI0483 mencakup kapasitas transformator, tegangan fasa-netral dan antar-fasa, arus beban R-S-T, serta arus netral pada Saluran I dan Saluran II. Perhitungan kemudian menghasilkan arus rata-rata, tingkat ketidakseimbangan, arus netral teoretis, selisih terhadap pengukuran, daya semu terkait arus netral, dan persentasenya terhadap kapasitas transformator 100 kVA. Grafik digunakan untuk memperjelas perbedaan pola pembebanan kedua saluran.

Tabel 1. Data teknis Gardu Distribusi PI0483

Parameter	Nilai	Satuan/Keterangan
Kapasitas transformator	100	kVA
Tegangan R-N / S-N / T-N	232 / 239 / 231	V
Tegangan R-S / R-T / S-T	399 / 398 / 403	V
Jumlah saluran	2	Saluran I dan II
Panjang JTR	1,25	km

Tabel 1 merangkum karakteristik teknis Gardu Distribusi PI0483. Transformator berkapasitas 100 kVA melayani dua saluran jaringan tegangan rendah sepanjang 1,25 km. Tegangan fasa-netral adalah 232 V, 239 V, dan 231 V, sehingga tegangan fasa-netral rata-rata yang digunakan dalam perhitungan daya semu adalah:

$$V_{avg} = \frac{232+239+231}{3} = 234 \text{ V}$$

Deviasi masing-masing fasa:
$\Delta V_R = 232 - 234 = -2V$
$\Delta V_S = 239 - 234 = +5V$
$\Delta V_T = 231 - 234 = -3V$

Deviasi maksimum:
$\Delta V_{max} = 5\,V$

Persentase deviasi maksimum:
$\frac{5}{234} x\ 100\ \% = 2{,}14\ \%$

Berdasarkan data pengukuran yang tersedia, deviasi tegangan maksimum terhadap nilai rata-rata adalah 5 V atau sekitar 2.14%. Tegangan antar-fasa tercatat 399 V, 398 V, dan 403 V. Rentang tegangan fasa-netral hanya 8 V, sedangkan perbedaan arus antarfasa jauh lebih besar. Oleh karena itu, analisis difokuskan pada distribusi arus beban, arus netral, dan indikator daya semu terkait penghantar netral. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tegangan fasa-netral aktual berada pada rentang 231–239 V dengan tegangan rata-rata 234 V. Perbedaan tegangan tersebut menunjukkan adanya ketidakseimbangan tegangan pada sisi tegangan rendah yang perlu diperhatikan bersamaan dengan ketidakseimbangan arus. Namun demikian, nilai deviasi tegangan fasa-netral tersebut tidak secara langsung dapat dinyatakan sebagai besar pergeseran titik netral secara teoritis. Pergeseran titik netral secara analitis memerlukan informasi impedansi beban setiap fasa, impedansi penghantar fasa, dan impedansi penghantar netral. Data tersebut tidak tersedia pada dokumen teknis yang digunakan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan deviasi tegangan fasa-netral terukur sebagai indikator dampak ketidakseimbangan beban terhadap tegangan, sedangkan nilai pergeseran titik netral secara absolut tidak ditentukan secara numerik. Keterbatasan tersebut penting karena pada sistem tiga fasa empat kawat dengan penghantar netral yang terhubung, besar pergeseran potensial titik netral dipengaruhi oleh impedansi penghantar netral dan karakteristik impedansi beban. Oleh sebab itu, penggunaan resultan arus netral saja tidak cukup untuk menentukan besar perpindahan potensial titik netral.

Berdasarkan data yang tersedia, Saluran II memiliki ketidakseimbangan arus sebesar 27,49%, lebih tinggi dibandingkan Saluran I sebesar 24,56%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemerataan beban antarfasa, terutama pada Saluran II, tetap menjadi tindakan utama untuk mengurangi arus netral dan potensi ketidakseimbangan tegangan. Untuk memperoleh nilai pergeseran titik netral secara lebih akurat pada penelitian selanjutnya, diperlukan pengukuran tegangan fasa-netral secara simultan, sudut fasa, impedansi penghantar netral, impedansi beban masing-masing fasa, serta karakteristik faktor daya beban. Dengan data tersebut, perpindahan potensial titik netral dapat dihitung berdasarkan analisis rangkaian tiga fasa yang mempertimbangkan impedansi masing-masing jalur.
Pada Saluran I, arus fasa R-S-T adalah 26-15-16 A. Pada Saluran II, arusnya 71-85-38 A. Agar nilai pada Tabel 2 dapat ditelusuri, contoh substitusi seluruh indikator utama ditampilkan berikut.

Substitusi Saluran I:

$$I_{avg,I} = \frac{26+15+16}{3} = 19.00 \text{ A}$$

$$I_{unb,I} = \frac{|26-19| + |15-19| + |16-19|}{3 \times 19} \times 100\% = 24.56\%$$

$$I_{N,\text{hitung},I} = \sqrt{26^2 + 15^2 + 16^2 - (26 \times 15) - (26 \times 16) - (15 \times 16)} = 10.54 \text{ A}$$

$$\Delta I_{N,I} = \frac{|13 - 10.54|}{13} \times 100\% = 18.96\%$$

Substitusi Saluran II:

$$I_{avg,II} = \frac{71+85+38}{3} = 64.67 \text{ A}$$

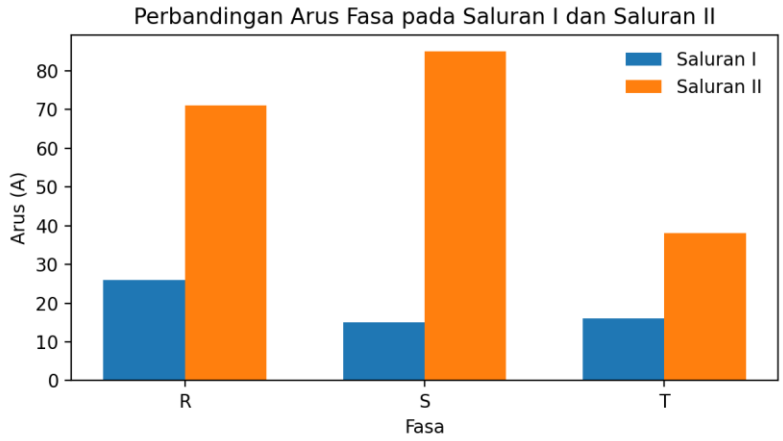
$$I_{unb,II} = \frac{|71 - 64.67| + |85 - 64.67| + |38 - 64.67|}{3 \times 64.67} \times 100\% = 27.49\%$$
$$I_{N,\text{hitung},II} = \sqrt{71^2 + 85^2 + 38^2 - (71 \times 85) - (71 \times 38) - (85 \times 38)} = 41.80 \text{ A}$$
$$\Delta I_{N,II} = \frac{|47 - 41.80|}{47} \times 100\% = 11.07\%$$

Hasil substitusi menunjukkan Saluran II memiliki arus rata-rata dan tingkat ketidakseimbangan lebih tinggi, dengan rentang arus antarfasa 47 A dibandingkan 11 A pada Saluran I. Arus netral teoretis pada kedua saluran tetap lebih rendah daripada arus netral terukur.

Tabel 2. Arus Fasa, Arus Netral, dan Ketidakseimbangan

Sal.	R (A)	S (A)	T (A)	Iavg (A)	Iunb (%)	IN ukur (A)	IN hitung (A)	Selisih (%)
I	26	15	16	19,00	24,56	13,00	10,54	18,96
II	71	85	38	64,67	27,49	47,00	41,80	11,07

Tabel 2 merangkum hasil substitusi. Saluran I memiliki Iavg 19,00 A, Iunb 24,56%, IN,ukur 13,00 A, dan IN,hitung 10,54 A. Saluran II memiliki Iavg 64,67 A, Iunb 27,49%, IN,ukur 47,00 A, dan IN,hitung 41,80 A. Selisih relatif antara arus netral terukur dan terhitung masing-masing adalah 18,96% dan 11,07%.



Gambar 2. Perbandingan Arus Fasa pada Saluran I dan Saluran II

Gambar 2 menunjukkan bahwa distribusi arus pada Saluran II lebih tidak merata dibandingkan Saluran I. Fasa S pada Saluran II membawa arus tertinggi sebesar 85 A, sedangkan fasa T hanya 38 A. Pola tersebut konsisten dengan nilai ketidakseimbangan 27,49% dan rentang arus antarfasa 47 A. Arus netral dapat menambah rugi tembaga pada penghantar dan transformator, tetapi besarnya rugi daya aktif tidak dapat dihitung dari data yang tersedia karena resistansi penghantar netral, temperatur, faktor daya, dan spektrum harmonisa tidak diukur. Oleh karena itu, penelitian ini membatasi perhitungan pada daya semu yang berkaitan dengan arus netral, sedangkan rugi aktif dinyatakan melalui kerangka I^2R (Thango & Bokoro, 2022; León-Martínez et al., 2023).

Arus netral hasil pengukuran adalah 13 A pada Saluran I dan 47 A pada Saluran II, sedangkan perhitungan vektor menghasilkan 10,54 A dan 41,80 A. Selisih tersebut menunjukkan bahwa kondisi lapangan tidak sepenuhnya direpresentasikan oleh model sederhana yang mengasumsikan sudut antarfasa tepat 120°. Perbandingan nilai terukur dan terhitung disajikan pada Gambar 3. Dengan Vavg=234 V, daya semu terkait arus netral dihitung menggunakan Persamaan (5). Substitusinya adalah sebagai berikut:

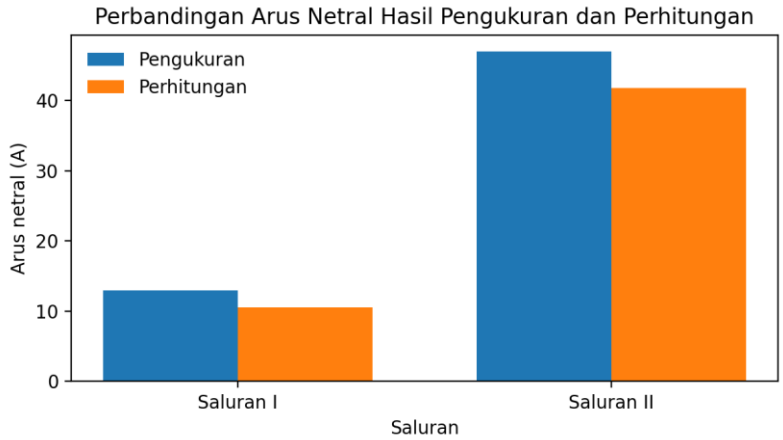
$$S_{N,\text{hitung},I} = \frac{10.54 \times 234}{1000} = 2.47 \text{ kVA}$$
$$S_{N,\text{ukur},I} = \frac{13 \times 234}{1000} = 3.04 \text{ kVA}$$
$$S_{N,\text{hitung},II} = \frac{41.80 \times 234}{1000} = 9.78 \text{ kVA}$$
$$S_{N,\text{ukur},II} = \frac{47 \times 234}{1000} = 11.00 \text{ kVA}$$
$$S_{N,\text{hitung,total}} = 2.47 + 9.78 = 12.25 \text{ kVA} = 12.25\% \, S_{\text{trafo}}$$

$S_{N,\text{ukur,total}} = 3.04 + 11.00 = 14.04\ \text{kVA} = 14.04\%\ S_{\text{trafo}}$

Tabel 3. Indikator Daya Semu Terkait Arus Netral Terhadap Kapasitas Transformator

Sal.	Vavg (V)	S hitung (kVA)	% Trafo	S ukur (kVA)	% Trafo
I	234	2,47	2,47	3,04	3,04
II	234	9,78	9,78	11,00	11,00
Total	—	12,25	12,25	14,04	14,04

Tabel 3 menunjukkan bahwa daya semu terkait arus netral berdasarkan arus hitung adalah 2,47 kVA pada Saluran I dan 9,78 kVA pada Saluran II. Berdasarkan arus terukur, nilainya 3,04 kVA dan 11,00 kVA. Total indikator setara dengan 12,25% hingga 14,04% dari kapasitas transformator 100 kVA. Persentase ini tidak menyatakan kapasitas transformator yang hilang dan tidak boleh ditafsirkan sebagai rugi daya aktif.



Gambar 3. Perbandingan Arus Netral Hasil Pengukuran dan Perhitungan

Gambar 3 memperlihatkan bahwa arus netral terukur lebih tinggi daripada hasil perhitungan pada kedua saluran. Perbedaan tersebut dapat berkaitan dengan sudut arus aktual yang tidak tepat 120°, faktor daya yang berbeda antarfasa, variasi beban saat pengukuran, ketidakseimbangan tegangan, harmonisa urutan nol, atau kondisi jaringan lainnya. Data yang tersedia tidak cukup untuk menetapkan satu penyebab tertentu; karena itu, pengukuran kualitas daya diperlukan untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing faktor (León-Martínez et al., 2023). Perbedaan pembebanan antara kedua saluran menunjukkan bahwa evaluasi gardu perlu dilakukan pada tingkat saluran dan fasa, bukan hanya berdasarkan kapasitas nominal transformator. Saluran II memikul arus lebih besar dan memiliki rentang arus antarfasa yang lebih lebar, sehingga kontribusinya terhadap arus netral juga lebih dominan. Tegangan fasa-netral berada pada rentang 231-239 V, sedangkan variasi arus antarfasa jauh lebih besar. Berdasarkan data yang tersedia, manifestasi utama yang dapat dibuktikan adalah ketidakseimbangan arus beban. Kontribusi faktor daya dan harmonisa terhadap arus netral belum dapat dipisahkan karena kedua variabel tersebut tidak diukur. Secara keseluruhan, hasil penelitian memenuhi tiga sasaran analisis: Saluran II mempunyai tingkat ketidakseimbangan tertinggi; arus netral terukur melampaui resultan teoretis pada kedua saluran; dan daya semu terkait arus netral berada pada 12,25-14,04% kapasitas transformator. Nilai terakhir diperlakukan sebagai indikator pembebanan, bukan rugi energi aktif.

B. Pembahasan

Temuan utama menunjukkan bahwa kondisi PI0483 lebih dipengaruhi oleh distribusi beban antar fasa daripada kapasitas nominal semata. Saluran II memiliki Iunb 27,49%, IN,ukur 47 A, rentang arus 47 A, dan SN,ukur 11,00 kVA. Kombinasi indikator tersebut menunjukkan bahwa pemerataan beban pada Saluran II perlu didahulukan, sejalan dengan pentingnya evaluasi pembebanan transformator pada kondisi operasi aktual (Aminullah et al., 2026). Hasil ini konsisten dengan penelitian yang melaporkan peningkatan arus netral dan rugi tembaga ketika beban transformator tidak merata (Patilima, 2022; Novfowan et al., 2023). Nilai tambah penelitian ini adalah pemisahan eksplisit antara arus netral terukur, arus netral teoretis, daya semu terkait arus netral, dan rugi aktif penghantar netral. Pemisahan tersebut memperkuat ketepatan interpretasi dan mencegah penggunaan indikator daya semu sebagai nilai losses aktif.

Perbedaan antara arus netral terukur dan terhitung tidak digunakan untuk menetapkan penyebab tunggal. Secara teoritis, selisih dapat dipengaruhi oleh deviasi sudut antarfasa dari 120°, faktor daya yang tidak sama,

perubahan beban selama pengukuran, ketidakseimbangan tegangan, dan harmonisa urutan nol. Literatur menunjukkan harmonisa triplen dapat terakumulasi pada penghantar netral, tetapi verifikasi pada PI0483 memerlukan pengukuran spektrum harmonisa secara langsung (León-Martínez et al., 2023). Implikasi praktisnya adalah penyeimbangan tidak cukup dilakukan satu kali. Profil beban pelanggan dapat berubah menurut waktu, sehingga pemindahan pelanggan perlu didasarkan pada pengukuran beberapa periode dan dievaluasi kembali setelah redistribusi. Pemantauan digital arus, tegangan, temperatur, dan gangguan dapat memperkuat pengawasan kondisi transformator distribusi (Nkinyam et al., 2025).

Hubungan antara arus netral dan daya semu pada penelitian ini merupakan hubungan matematis, bukan korelasi statistik. Berdasarkan SN=INVL-N/1000, jika VL-N relatif tetap maka SN meningkat secara linear terhadap IN. Sebaliknya, rugi aktif penghantar netral mengikuti Ploss,N=IN²RN; jika RN tetap, perubahan arus memberi pengaruh kuadratik terhadap rugi aktif. Karena RN tidak tersedia, penelitian ini tidak menghitung losses aktif secara numerik.

Prioritas Saluran II merupakan hasil sintesis empat indikator penelitian, yaitu Iunb, IN, rentang arus antarfasa, dan SN, bukan kategori standar PLN. Tindakan yang direkomendasikan adalah memetakan pelanggan pada setiap fasa, memindahkan sebagian beban dari fasa S ke fasa T pada Saluran II, melakukan pengukuran ulang sebelum dan sesudah penyeimbangan, serta memeriksa sambungan dan kondisi penghantar netral. Pengukuran harmonisa, faktor daya, resistansi, dan temperatur perlu ditambahkan agar rugi aktif dan risiko pemanasan dapat dihitung secara lebih lengkap. Penataan instalasi dan penghantar netral tetap perlu mengacu pada persyaratan instalasi tegangan rendah yang berlaku, termasuk PUIL 2020 (BSN, 2020). Jika profil beban sangat dinamis, pendekatan penyeimbangan aktif atau otomatis dapat dipertimbangkan sebagai pengembangan lanjutan (Chang et al., 2022; Guo et al., 2024).

Selain ketidakseimbangan pembebanan, kondisi pembumian transformator merupakan parameter penting dalam evaluasi sistem distribusi. Resistansi pembumian berpengaruh terhadap kemampuan sistem pembumian dalam menyediakan jalur impedansi rendah bagi arus gangguan menuju tanah. Namun, pada Gardu Distribusi PI0483, nilai resistansi pembumian transformator tidak tersedia dalam data teknis sekunder yang digunakan pada penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian tidak menetapkan nilai resistansi pembumian berdasarkan asumsi atau pendekatan teoritis. Penentuan nilai aktual memerlukan pengukuran langsung di lokasi menggunakan earth resistance tester dengan metode pengukuran yang sesuai serta mempertimbangkan kondisi tanah, konfigurasi elektroda, dan sistem pembumian yang digunakan.

Keterbatasan ini tidak memengaruhi perhitungan utama penelitian mengenai ketidakseimbangan arus, arus netral, dan daya semu terkait arus netral, tetapi membatasi evaluasi menyeluruh terhadap kondisi sistem pembumian Gardu PI0483. Pengukuran resistansi pembumian direkomendasikan sebagai bagian dari penelitian lanjutan untuk melengkapi evaluasi kondisi kelistrikan gardu.

IV. KESIMPULAN

1. Tingkat ketidakseimbangan arus pada Saluran I dan Saluran II masing-masing adalah 24,56% dan 27,49%. Arus netral terukur sebesar 13 A dan 47 A, sedangkan resultan teoretis sebesar 10,54 A dan 41,80 A. Dengan demikian, arus netral aktual pada kedua saluran lebih tinggi daripada hasil model ideal 120°.
2. Pada tegangan fasa-netral rata-rata 234 V, daya semu terkait arus netral berdasarkan arus hitung adalah 2,47 kVA dan 9,78 kVA, sedangkan berdasarkan arus terukur adalah 3,04 kVA dan 11,00 kVA. Total indikator sebesar 12,25-14,04% dari kapasitas transformator 100 kVA dan tidak dapat diperlakukan sebagai rugi daya aktif; rugi aktif memerlukan perhitungan I_N²R_N.
3. Saluran II menjadi prioritas penyeimbangan karena secara bersamaan memiliki Iunb, IN, rentang arus antarfasa, dan SN yang lebih tinggi daripada Saluran I. Prioritas tersebut merupakan hasil sintesis indikator penelitian, bukan kategori standar eksternal.

Saran penelitian berikutnya adalah melakukan pencatatan 24 jam atau multi-hari, pengukuran harmonisa dan faktor daya, pengukuran temperatur serta resistansi penghantar netral, dan evaluasi sebelum-sesudah penyeimbangan agar rugi aktif serta manfaat teknis-ekonominya dapat dihitung secara langsung.

DAFTAR PUSTAKA

Aminullah, M. W., Putra, L., Gumilang, A. G., & Hurairah, M. (2026). Pengaruh Variasi Pembebanan Pada Kinerja Transformator 60 MVA di PT. PLN Gardu Induk Keramasan. Jurnal Surya Energy, 10(2), 92–98. https://doi.org/10.32502/jse.v10i2.1619

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2020). SNI 0225-2:2020 Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020 - Bagian 2: Desain instalasi listrik. Badan Standardisasi Nasional.

Chang, C.-K., Cheng, S.-T., & Boyanapalli, B.-K. (2022). Three-Phase Unbalance Improvement For Distribution Systems Based On The Particle Swarm Current Injection Algorithm. Energies, 15(9), 3460. https://doi.org/10.3390/en15093460

Guo, G., Zhan, X., Wang, J., Liu, Z., Feng, K., Peng, F., Gong, D., Tang, A., Xiang, C., & Wang, Z. (2024). Research On The Three-Phase Load Imbalance Control Of The Active Distribution Network Based On The Distributed Power Flow Controller. Frontiers in Energy Research, 12, 1414084. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1414084

León-Martínez, V., Peñalvo-López, E., Montañana-Romeu, J., Andrada-Monrós, C., & Molina-Cañamero, L. (2023). Assessment Of Load Losses Caused By Harmonic Currents In Distribution Transformers Using The Transformer Loss Calculator Software. Environments, 10(10), 177. https://doi.org/10.3390/environments10100177

Nkinyam, C. M., Encho, L. T., & Mbaka, N. E. (2025). Design and Implementation of a 100 Kva Transformer Monitoring and Fault Detection System for Distribution Network. Journal of Electrical Systems and Information Technology. https://doi.org/10.1186/s43067-025-00213-0

Novfowan, A. D., Mieftah, M., & Kusuma, W. (2023). Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi. ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan, 10(1), 54–56. https://doi.org/10.33795/elposys.v10i1.716

Patilima, M. (2022). Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Losses Dan Pembebanan Transformator Distribusi. Jurnal Electrichsan, 11(1), 20–28. https://doi.org/10.37195/electrichsan.v11i01.85

Prayoga, A. B., & Suprianto, B. (2023). Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Terhadap Rugi Daya (Losses) dengan DIgSILENT PowerFactory di PT PLN (Persero) ULP Ngunut. Jurnal Teknik Elektro, 12(2), 23–32. https://doi.org/10.26740/jte.v12n2.p23-32

Rizky, R. T. G., Zulfahri, Z., & Arlenny, A. (2022). Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP. SainETIn, 6(2), 81–89. https://doi.org/10.31849/sainetin.v6i2.9648

Siregar, A. P., Tarigan, A. D., & Lubis, Z. (2024). Analisis Ketidakseimbangan Beban Akibat Penghantar Netral Jaringan Distribusi Sekunder. Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro, 13(3), 298–301. https://doi.org/10.30591/polektro.v13i3.6967

Sutama, I. W., & Sari, I. A. L. N. (2023). Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Gardu Distribusi KA 0251 Penyulang Gelogor Carik. Jurnal Ilmiah Telsinas, 6(2), 209–218. https://doi.org/10.38043/telsinas.v6i2.4893

Thango, B. A., & Bokoro, P. N. (2022). Stray Load Loss Valuation In Electrical Transformers: A review. Energies, 15(7), 2333. https://doi.org/10.3390/en15072333

Yasa, I. W. S., Wirajaya, A., & Adrama, I. N. (2024). Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi di PT PLN (Persero) ULP Bangli. Journal of Electrical and System Control Engineering, 8(1), 141–154. https://doi.org/10.31289/jesce.v8i1.11992