

Evaluasi Ketidakseimbangan Beban pada Transformator 160 KVA di Gardu Distribusi PA.0507 PT. PLN (Persero) ULP A.Rivai

Raden Ahmad Yani^{1*}, Leni Marlina Efendi¹, Dwi Pratiwi¹

¹Program Studi Teknik Elektro Universitas Palembang, Indonesia
email : rayazhari25@gmail.com

ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dapat menyebabkan peningkatan arus netral, rugi-rugi daya, penurunan efisiensi, serta memperpendek umur peralatan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi ketidakseimbangan beban, menganalisis arus netral dan rugi-rugi daya, serta menguji efektivitas pemerataan beban pada transformator 160 kVA di Gardu PA.0507 ULP A. Rivai. Metode penelitian melalui pengukuran arus dan tegangan per fasa pada kondisi Luar Waktu Beban Puncak (LWBP), analisis perhitungan berdasarkan standar SPLN, dan simulasi pemerataan beban. Hasil penelitian menunjukkan transformator beroperasi pada tingkat pembebanan 37,67% dengan ketidakseimbangan beban 3%. Arus netral terukur 60,02 A dan rugi-rugi daya 4.103,13 W (3,017% dari daya aktif). Setelah simulasi pemerataan, arus netral turun menjadi 8,26 A (penurunan 86,24%) dan rugi-rugi daya menjadi 77,71 W (penurunan 98,11%), meskipun ketidakseimbangan meningkat menjadi 4%. Persentase ketidakseimbangan tidak selalu berkorelasi linear dengan arus netral, sehingga evaluasi perlu mempertimbangkan distribusi arus aktual antarfasa secara vektor. Pemerataan beban efektif menekan arus netral dan rugi-rugi.

Kata kunci: ketidakseimbangan beban, transformator distribusi, arus netral, rugi-rugi daya, pemerataan beban

Evaluation of Load Imbalance in a 160 KVA Transformer at the PA.0507 Distribution Substation PT. PLN (Persero) ULP A.Rivai

ABSTRACT

Load imbalance in distribution transformers can cause an increase in neutral current, power losses, reduced efficiency, and shorten the life of the equipment. This study aims to evaluate load imbalance, analyse neutral current and power losses, and test the effectiveness of load balancing on a 160 kVA transformer at the PA.0507 ULP A. Rivai substation. The research method involved measuring the current and voltage per phase during Off-Peak Load Conditions (LWBP), analysing calculations based on SPLN standards, and simulating load balancing. The results showed that the transformer was operating at 37.67% load with a load imbalance of 3%. The measured neutral current was 60.02 A and power losses were 4,103.13 W (3.017% of active power). After the load balancing simulation, the neutral current decreased to 8.26 A (a reduction of 86.24%) and power losses to 77.71 W (a reduction of 98.11%), although the imbalance increased to 4%. The percentage of imbalance does not always correlate linearly with the neutral current, so the evaluation needs to consider the actual current distribution between phases in vector form. Effective load balancing reduces neutral current and losses.

Keywords: load imbalance, distribution transformer, neutral current, power losses, load balancing,

PENDAHULUAN

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan mata rantai terakhir dalam penyaluran energi listrik dari pembangkit hingga ke konsumen[1]. Pada sistem ini, gardu distribusi memiliki peran strategis, terutama melalui transformator distribusi yang berfungsi menurunkan tegangan menengah 20 kV menjadi tegangan rendah 380/220 V yang siap digunakan oleh pelanggan[2]. Keandalan dan efisiensi operasi transformator distribusi menjadi faktor krusial dalam menjaga kontinuitas dan kualitas pasokan listrik.

Namun dalam praktiknya, transformator distribusi sering menghadapi berbagai kendala operasional[3]. Salah satu permasalahan yang umum ditemui adalah ketidakseimbangan beban antar fasa[4]. Kondisi ini terjadi akibat distribusi beban pelanggan yang tidak merata pada ketiga fasanya, misalnya karena penumpukan sambungan pada satu fasa tertentu[5],[6]. Ketidakseimbangan yang signifikan memicu mengalirnya arus pada penghantar netral. Arus netral yang besar tidak hanya menimbulkan rugi-rugi daya tambahan, tetapi juga berpotensi menyebabkan panas berlebih (*overheating*) yang dapat mempercepat penurunan kualitas isolasi dan memperpendek umur ekonomis transformator[7]..

PT. PLN (Persero) sebagai penyedia tenaga listrik nasional, khususnya Unit Layanan Pelanggan (ULP) A. Rivai, dituntut untuk menjamin keandalan pasokan di wilayah kerjanya. Seiring dengan meningkatnya permintaan energi, upaya meminimalkan rugi-rugi (*losses*), baik teknis maupun non-teknis, menjadi agenda penting untuk meningkatkan efisiensi sistem[8]. Rugi-rugi teknis pada transformator distribusi sendiri cukup besar disumbang oleh operasi yang tidak seimbang, dimana banyak transformator di lapangan ditemukan beroperasi dengan beban antar fasa yang tidak merata[9],[10]. Kondisi ini memperburuk efisiensi penyaluran energi dan meningkatkan biaya operasional.

Berdasarkan permasalahan tersebut

, diperlukan evaluasi dan analisis mendalam terhadap tingkat ketidakseimbangan beban yang terjadi pada transformator distribusi. Penelitian ini memfokuskan kajian pada transformator 160 kVA di Gardu Distribusi PA.0507 yang berlokasi di Jalan PDAM (koordinat -3.01248° LS / 114.73073° BT), dalam wilayah kerja ULP A. Rivai. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis besaran arus netral dan rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan beban, serta memberikan rekomendasi teknis berupa skema pemerataan beban antar fasa. Hasil dari studi ini diharapkan dapat berkontribusi dalam upaya peningkatan efisiensi dan keandalan sistem distribusi, khususnya di lingkungan ULP A. Rivai.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Gardu Distribusi PA.0507 yang berlokasi di Jalan PDAM, dalam wilayah kerja ULP A. Rivai, dengan objek penelitian berupa transformator distribusi tiga fasa berkapasitas 160 kVA. Penelitian bertujuan untuk mengevaluasi tingkat ketidakseimbangan beban, menghitung arus netral dan rugi-rugi daya yang terjadi, serta merancang simulasi pemerataan beban untuk meningkatkan efisiensi operasional transformator.

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data kuantitatif yang diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan. Data primer meliputi arus dan tegangan pada masing-masing fasa (R, S, T) serta arus netral, yang diukur pada kondisi Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) guna merepresentasikan kondisi operasi normal transformator. Pengukuran dilakukan menggunakan *clamp meter* dan *power quality analyzer* yang telah terkalibrasi untuk menjamin akurasi hasil.

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memahami teori ketidakseimbangan beban, standar SPLN yang relevan, serta formula perhitungan arus netral dan rugi-rugi daya[11]. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data lapangan melalui pengukuran arus dan tegangan tiap fasa secara langsung. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan (1) Tingkat ketidakseimbangan beban dihitung berdasarkan deviasi arus tiap fasa terhadap arus rata-rata, mengacu pada standar SPLN No. 17 Tahun 1979 dan No. 56-1 Tahun 1985; (2) Arus netral dihitung menggunakan metode vektor berdasarkan besar dan sudut fasa arus tiap fasa. (3) Rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan beban dihitung dengan menjumlahkan rugi-rugi pada penghantar fasa dan penghantar netral menggunakan persamaan $P_{\text{rugi-rugi}} = I^2 \cdot R$, dengan nilai resistansi penghantar mengacu pada data teknis di lapangan.

Setelah diperoleh hasil analisis kondisi eksisting, dilakukan simulasi pemerataan beban dengan cara merancang ulang distribusi pelanggan antar fasa. Simulasi ini bertujuan untuk meminimalkan selisih arus antar fasa, sehingga dapat diketahui potensi penurunan arus netral dan rugi-rugi daya. Hasil sebelum dan setelah pemerataan kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitas tindakan tersebut.

Arus beban penuh (*full load current* I_{FL}):

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (1)$$

Arus rata-rata pada kondisi LWBP:

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



Persentase pembebanan transformator:

$$Pembelian = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (3)$$

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan menyajikan tabel dan grafik perbandingan, serta menginterpretasikan temuan berdasarkan standar yang berlaku. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran teknis mengenai kondisi aktual transformator dan rekomendasi perbaikan yang aplikatif bagi PT. PLN (Persero) ULP A. Rivai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Gardu Distribusi PA.0507

Penelitian dilaksanakan dengan melakukan pengukuran langsung pada transformator distribusi 160 kVA di Gardu Distribusi PA.0507 yang berlokasi di Jalan PDAM, wilayah kerja ULP A. Rivai. Pengukuran dilakukan pada kondisi Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) untuk merepresentasikan kondisi operasi normal transformator. Data yang diperoleh meliputi arus dan tegangan fasa-netral pada masing-masing fasa R, S, dan T, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data pengukuran beban transformator pada kondisi LWBP

Kapasitas Transformator (kVA)	Fasa R		Fasa S		Fasa T	
	I _R (A)	V _{R-N} (V)	I _S (A)	V _{S-N} (V)	I _T (A)	V _{T-N} (V)
160	108	230	47	231	106	231

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa distribusi arus antar fasa tidak merata, dengan fasa R dan T memiliki arus yang jauh lebih besar dibandingkan fasa S. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya ketidakseimbangan beban yang perlu dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui dampaknya terhadap kinerja transformator.

Analisis Pembebanan Eksisting Transformator

Untuk mengevaluasi tingkat pembebanan transformator, perlu dihitung terlebih dahulu arus beban penuh (*full load current* / I_{FL}) dan arus rata-rata ketiga fasa. Berdasarkan persamaan diatas, arus beban penuh transformator 160 kVA dengan tegangan sekunder 0,4 kV didapat hasil perhitungan pada tabel 2.

Tabel 2. Pembebanan eksisting transformator

I _{FL}	I _{rata-rata}	Pembebanan
230,94 A	87 A	37,67 %

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa transformator beroperasi pada tingkat pembebanan 37,67% dari kapasitas nominalnya. Mengacu pada standar SPLN, transformator masih tergolong dalam kondisi normal dan memiliki cadangan kapasitas yang cukup karena nilai pembebanan masih jauh di bawah ambang batas tidak normal ($\geq 95\%$). Namun demikian, distribusi beban antar fasa yang tidak merata dapat menimbulkan permasalahan lain seperti arus netral yang besar dan rugi-rugi tambahan.

Analisis Tingkat Ketidakseimbangan Beban

Tingkat ketidakseimbangan beban dianalisis dengan menggunakan koefisien a, b, c yang merepresentasikan perbandingan arus masing-masing fasa terhadap arus rata-rata, yang ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Ketidakseimbangan Beban

$\frac{I_R}{I_{rata-rata}}$	$\frac{I_S}{I_{rata-rata}}$	$\frac{I_T}{I_{rata-rata}}$	T (koefisien)
1,24 A	0,54 A	1,22 A	3%

Nilai koefisien (T) a, b, c yang ideal adalah 1,00. Semakin besar deviasi dari nilai 1,00, semakin tinggi tingkat ketidakseimbangan beban. Hasil perhitungan menunjukkan tingkat ketidakseimbangan beban sebesar 3%. Nilai ini tergolong rendah dan masih dalam batas toleransi yang diizinkan. Meskipun relatif rendah, untuk keandalan jangka panjang tetap diperlukan upaya meminimalkan ketidakseimbangan ini sedapat mungkin, mengingat kondisi seimbang sempurna sulit dicapai dalam operasional sistem distribusi yang dinamis.

Analisis Arus Netral

Arus netral dihitung menggunakan metode vektor dengan mempertimbangkan besar dan sudut fasa masing-masing arus (asumsi beda sudut fasa 120°). Hasil perhitungan menunjukkan arus netral terukur sebesar 60,02 A dengan sudut fasa -58,34°. Nilai ini cukup signifikan dan berpotensi menimbulkan rugi-rugi daya pada penghantar netral serta pemanasan berlebih pada transformator. Tingginya arus netral ini disebabkan oleh distribusi arus yang tidak merata antar fasa, meskipun tingkat ketidakseimbangan secara statistik tergolong rendah.

Analisis Rugi-Rugi Daya pada Penghantar Netral

Rugi-rugi daya pada penghantar netral dihitung berdasarkan resistansi penghantar dan besarnya arus netral yang mengalir. Gardu PA.0507 menggunakan kabel twisted (kabel pilin) dengan spesifikasi 3×50 mm² + 1×35 mm². Berdasarkan SPLN-42, resistansi penghantar netral adalah 0,896 Ω/km dengan panjang total penghantar dari transformator sepanjang 1155 meter (1,155 km).

Tabel 4. Rugi-rugi daya dan daya aktif

R _N	P _N	P	%P _N
1,139 Ω	4,103 kW	136 kW	3%

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rugi-rugi daya pada penghantar netral mencapai 4,103 kW atau setara dengan 3,017% dari daya aktif transformator dengan power faktor 0,85. Nilai ini cukup besar dan berkontribusi terhadap penurunan efisiensi sistem distribusi secara keseluruhan. Rugi-rugi ini tidak hanya berdampak pada aspek ekonomi berupa pemborosan energi, tetapi juga aspek teknis berupa pemanasan pada penghantar yang dapat mempercepat penurunan kualitas isolasi.

Simulasi Pemerataan Beban

Untuk menjaga keandalan transformator dan saluran distribusi, perlu dilakukan upaya pemerataan beban sebagai langkah efisiensi. Tujuannya adalah agar arus yang disalurkan dapat terserap secara optimal oleh pelanggan serta mengurangi besarnya arus yang mengalir pada penghantar netral. Berdasarkan data yang diperoleh dari transformator distribusi PA 0507, teramati bahwa arus netral pada kondisi Luar Waktu Beban Puncak tergolong tinggi. Oleh karena itu, tindakan pemerataan beban dinilai diperlukan.

Simulasi pemerataan beban dilakukan dengan cara merancang ulang distribusi pelanggan antar fasa, yaitu memindahkan sebagian beban dari fasa R dan fasa T ke saluran fasa S. Hasil simulasi pemerataan beban disajikan pada tabel 5 dan Gambar 1.

Tabel 5. Perbandingan Arus Sebelum dan Setelah Simulasi Pemerataan Beban

Fasa	Arus Sebelum Pemerataan (A)	Arus Setelah Pemerataan (A)
R	108	91,5
S	47	82,0
T	106	87,5
Total	261	261

Dari tabel 5 terlihat bahwa setelah simulasi pemerataan, distribusi arus antar fasa menjadi lebih merata. Fasa S yang semula hanya 47 A ditingkatkan menjadi 82 A melalui pemindahan sebagian beban dari fasa R dan T. Sebaliknya, arus pada fasa R turun dari 108 A menjadi 91,5 A dan fasa T turun dari 106 A menjadi 87,5 A. Penting untuk dicatat bahwa total arus tetap 261 A, yang mengindikasikan bahwa pemerataan beban tidak mengubah total daya yang disalurkan, hanya mendistribusikannya ulang antar fasa.

Analisis Kondisi Setelah Pemerataan Beban pada Transformator

Setelah simulasi pemerataan, arus total transformator tetap sebesar 261 A, sehingga arus rata-rata juga tetap 87 A. Dengan demikian, persentase pembebanan transformator setelah pemerataan masih sama dengan kondisi sebelum pemerataan, yaitu 37,67%. Hal ini mengkonfirmasi bahwa pemerataan beban hanya mengubah distribusi arus antar fasa tanpa mempengaruhi total beban transformator.

Analisis Tingkat Ketidakseimbangan Beban Setelah Pemerataan

Koefisien ketidakseimbangan setelah pemerataan dihitung dengan membandingkan arus masing-masing fasa terhadap arus rata-rata (87 A) dan persentase ketidakseimbangan beban.

Tabel 6. Ketidakseimbangan Beban setelah pemerataan

$\frac{I_R}{I_{rata-rata}}$	$\frac{I_S}{I_{rata-rata}}$	$\frac{I_T}{I_{rata-rata}}$	T (koefisien)
1,05 A	0,94 A	1,01 A	4%

Perbaikan ketidakseimbangan Beban LWBP (Siang)

$$I_R = a \cdot I ; \text{ maka : } a = \frac{I_R}{I} = \frac{91,5}{87} = 1,05 \text{ A}$$

$$I_S = b \cdot I ; \text{ maka : } b = \frac{I_S}{I} = \frac{82}{87} = 0,94 \text{ A}$$

$$I_T = c \cdot I ; \text{ maka : } c = \frac{I_T}{I} = \frac{87,5}{87} = 1,01 \text{ A}$$

Di mana pada keadaan seimbang koefisien a, b, c adalah 1. Sehingga ketidakseimbangan beban dalam persen adalah :

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

$$T = \frac{\{ |1,05-1| + |0,94-1| + |1,01-1| \}}{3} \times 100 = 4 \%$$

Tingkat ketidakseimbangan beban setelah pemerataan adalah 4 %, yang menunjukkan kondisi yang sangat seimbang (nilai di bawah 10% umumnya dianggap sangat baik). Hasil ini membuktikan efektivitas program pemerataan beban yang telah dilaksanakan.

Analisis Arus Netral Setelah Pemerataan

Hasil perhitungan menunjukkan penurunan arus netral yang sangat signifikan, dari 60,02 A menjadi 8,26 A, atau turun sebesar 86,24%. Penurunan yang drastis ini membuktikan efektivitas pemerataan beban dalam menekan arus netral. Meskipun tingkat ketidakseimbangan secara statistik hanya berubah sedikit (dari 3% ke 4%), distribusi arus yang lebih merata secara vektor menghasilkan resultan arus netral yang jauh lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa analisis ketidakseimbangan beban tidak cukup hanya dengan melihat persentase ketidakseimbangan, tetapi perlu mempertimbangkan distribusi arus aktual antarfasa.

Analisis Rugi-Rugi Daya Setelah Pemerataan

Rugi-rugi daya pada penghantar netral setelah pemerataan dihitung dengan menggunakan nilai arus netral yang baru, dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Rugi-rugi daya dan daya aktif setelah pemerataan

R_N	P'_N	ΔP_N	$\%P'_N$
1,139 Ω	0,078 kW	98,11%	0,057%

Hasil perhitungan menunjukkan penurunan rugi-rugi daya yang sangat drastis, dari 4.103,13 W (3,017%) menjadi hanya 77,71 W (0,057%), atau turun sebesar 98,11%. Penurunan yang signifikan ini sesuai dengan hukum Joule ($P = I^2 \cdot R$), dimana rugi-rugi daya berbanding lurus dengan kuadrat arus. Dengan penurunan arus netral sebesar 86,24%, rugi-rugi daya turun secara kuadratik hingga mencapai 98,11%. Hal ini menunjukkan bahwa upaya pemerataan beban merupakan langkah yang sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi.

Perbandingan Hasil Sebelum dan Setelah Pemerataan Beban

Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai efektivitas pemerataan beban, rangkuman hasil analisis sebelum dan setelah pemerataan beban disajikan pada tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan parameter sebelum dan setelah pemerataan beban

Parameter	Sebelum Pemerataan	Setelah Pemerataan	Perubahan
Arus Fasa R (A)	108	91,5	Menurun (-15,28%)
Arus Fasa S (A)	47	82,0	Meningkat (+74,47%)
Arus Fasa T (A)	106	87,5	Menurun (-17,45%)
Arus Total (A)	261	261	Tetap
Pembebanan Transformator (%)	37,67	37,67	Tetap
Tingkat Ketidakseimbangan Beban (%)	3	4	Meningkat (+1%)
Arus Netral (A)	60,02	8,26	Menurun (-86,24%)
Rugi-Rugi Daya pada Netral (W)	4.103,13	77,71	Menurun (-98,11%)
Persentase Rugi-Rugi terhadap Daya Aktif (%)	3,017	0,057	Menurun (-98,11%)

Tabel 8, menunjukkan bahwa setelah pemerataan beban, terjadi beberapa perubahan penting. Meskipun pembebanan transformator tetap 37,67% dan tingkat ketidakseimbangan sedikit meningkat dari 3% menjadi 4%, arus netral pada transformator gardu PA 0507 turun drastis dari 60,02 A menjadi 8,26 A. Hal ini mengindikasikan bahwa pemerataan berhasil menyelaraskan arus antar fasa meskipun distribusi arus tidak mencapai kondisi ideal sempurna. Efektivitas pemerataan juga terbukti dari penurunan rugi-rugi JTR dari 4.103 W ke 77,71 W (atau dari 3,017% menjadi 0,057% terhadap daya aktif). Artinya, efisiensi sistem meningkat secara signifikan setelah dilakukan pemerataan beban. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pemerataan beban merupakan langkah efektif untuk mengurangi rugi-rugi dan meningkatkan stabilitas sistem.

Efektivitas Pemerataan Beban dalam Menekan Arus Netral dan Rugi-Rugi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemerataan beban terbukti sangat efektif dalam menekan arus netral dan rugi-rugi daya pada penghantar netral. Meskipun tingkat ketidakseimbangan beban hanya mengalami perubahan kecil (dari 3% menjadi 4%), dampaknya terhadap arus netral sangat signifikan. Hal ini disebabkan karena arus netral merupakan resultan vektor dari ketiga arus fasa. Ketika ketiga arus fasa mendekati seimbang, komponen-komponen vektor yang saling berlawanan akan saling meniadakan, sehingga resultannya menjadi kecil.

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui analisis vektor. Pada kondisi sebelum pemerataan, arus fasa R (108 A) dan T (106 A) hampir sama besar dan berlawanan arah (berselisih 120° dan 240°), sementara fasa S sangat kecil (47 A). Ketidakseimbangan ini menyebabkan vektor resultan yang besar. Setelah pemerataan, ketiga arus memiliki nilai yang lebih seimbang (91,5 A, 82 A, dan 87,5 A), sehingga vektor-vektor tersebut hampir saling membatalkan ketika dijumlahkan, menghasilkan arus netral yang kecil.

Penurunan arus netral sebesar 86,24% (dari 60,02 A menjadi 8,26 A) berimplikasi langsung pada penurunan rugi-rugi daya sebesar 98,11% (dari 4.103,13 W menjadi 77,71 W). Hal ini sesuai dengan hukum



Joule ($P = I^2.R$), dimana rugi-rugi daya berbanding lurus dengan kuadrat arus. Dengan demikian, upaya pemerataan beban merupakan langkah yang sangat strategis dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi, terutama karena investasi yang diperlukan relatif kecil dibandingkan manfaat yang diperoleh.

Korelasi antara Ketidakseimbangan Beban, Arus Netral, dan Rugi-Rugi

Temuan menarik dari penelitian ini adalah bahwa tingkat ketidakseimbangan beban yang rendah (3-4%) tidak selalu menjamin arus netral yang kecil. Pada kondisi sebelum pemerataan dengan ketidakseimbangan 3%, arus netral tercatat cukup besar (60,02 A). Sebaliknya, setelah pemerataan dengan ketidakseimbangan 4% (lebih tinggi), arus netral justru turun drastis. Hal ini menunjukkan bahwa indikator ketidakseimbangan beban yang umum digunakan (persentase deviasi dari arus rata-rata) tidak sepenuhnya merepresentasikan besarnya arus netral yang akan timbul.

Analisis lebih lanjut mengungkapkan bahwa pada kondisi sebelum pemerataan, meskipun ketidakseimbangan secara statistik rendah (3%), distribusi arus sangat timpang dengan fasa S hanya 47 A sementara fasa R dan T masing-masing 108 A dan 106 A. Kondisi ini menghasilkan resultan vektor yang besar. Setelah pemerataan, arus antar fasa lebih merata (91,5 A, 82 A, 87,5 A), sehingga resultan vektornya menjadi kecil meskipun ketidakseimbangan secara statistik sedikit meningkat menjadi 4%.

Dari perspektif rugi-rugi daya, penurunan yang dicapai sangat signifikan. Rugi-rugi daya sebesar 4,103 kW setara dengan pemborosan energi sekitar 98,47 kWh per hari (asumsi operasi 24 jam), atau sekitar 2.954 kWh per bulan. Dengan asumsi biaya produksi listrik Rp1.000 per kWh, potensi penghematan yang dapat dicapai melalui pemerataan beban mencapai hampir Rp3 juta per bulan hanya untuk satu gardu distribusi. Jika diterapkan secara luas, penghematan ini akan sangat signifikan bagi efisiensi operasional PLN secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa transformator 160 kVA di Gardu Distribusi PA.0507 beroperasi pada tingkat pembebanan 37,67% (masih dalam batas normal) dengan ketidakseimbangan beban yang berhasil ditekan dari 30,65% menjadi 3,83% setelah simulasi pemerataan beban, yang terbukti sangat efektif menurunkan arus netral dari 60,02 A menjadi 8,26 A (penurunan 86,24%) serta mereduksi rugi-rugi daya pada penghantar netral dari 4.103,13 W (3,017%) menjadi hanya 77,71 W (0,057%) atau penurunan sebesar 98,11%. Temuan ini menegaskan bahwa meskipun transformator tidak mengalami kondisi *overload*, ketidakseimbangan beban yang tinggi tetap berpotensi menimbulkan arus netral besar dan pemanasan berlebih, sehingga pemerataan beban merupakan langkah strategis untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi. Lebih lanjut, evaluasi ketidakseimbangan perlu mempertimbangkan distribusi arus aktual antar fasa secara vektor karena arus netral merupakan resultan vektor dari ketiga fasa. Penelitian ini terbatas pada pengukuran kondisi LWBP, sehingga untuk mendapatkan profil pembebanan yang lebih komprehensif, penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran pada kondisi WBP dan variasi waktu lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rizky Junito, Dian Eka Putra, Raden Ahmad Yani, and Nofiansah, "Pengaruh Fluktuasi Tegangan Akibat Black Out Pada Saluran Distribusi 20 KV Terhadap Kinerja Arrester," *J. Ampere*, vol. 10, no. 1, pp. 117–123, 2025, doi: 10.31851/ampere.v10i1.18283.
- [2] Y. La Elo, N. Husnah, N. Lembang, and H. Hr, "Evaluasi Kinerja Transformator Distribusi : Ketidakseimbangan Beban pada Siang dan Malam Hari," *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 8, no. 1, pp. 183–189, 2026, doi: <https://doi.org/10.32528/elkom.v8i1.3956>.
- [3] R. A. Yani, D. E. Putra, R. M. E. Suherman, and J. Ardian, "Use of Arrester as Security for 20 KV Distribution Substation on 160 KVA Transformer at Akasia Feeder," *AMPERE*, vol. 9, no. 2, pp. 141–149, 2024, doi: <http://doi.org/10.31851/ampere>.
- [4] I. W. Utama and I. A. L. N. Sari, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Gardu Distribusi KA 0251 Penyulang Gelogor Carik," *J. Ilm. Telsinas Elektro, Sipil dan Tek. Inf.*, vol. 6, no. 2, pp. 209–218, 2023, doi: 10.38043/telsinas.v6i2.4893.
- [5] R. S. dan R. H. Siregar, "Perhitungan Arus Netral, Rugi-Rugi, dan Efisiensi transformator Distribusi 3 Fasa 20 KV/400V Akibat ketidakseimbangan beban," *J. Electr. Technology, ISSN 2502 – 3624*, vol. 1099, 2018.

- [6] M. A. Latif and D. B. Santoso, “Analisis Ketidakseimbangan Transformator Untuk Identifikasi Beban Lebih Gardu E308,” *J. Power Elektron.*, vol. 11, no. 1, pp. 108–111, 2022, doi: 10.30591/polektro.v11i1.2604.
- [7] R. Sattu, A. Sampe, T. W. Oktafiani, and D. Patabang, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Adanya Arus Netral dan Rugi Daya pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Sentani Penyulang Jambu,” *J. TELEKTRONIK Telecommun. Electr. Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, 2024, doi: <https://doi.org/10.65306/j.teletronic.v3i1.102>.
- [8] K. Rohmat and M. A. Riyadi, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi,” *J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 4, pp. 186–192, 2023, doi: 10.14710/transmisi.25.4.186-192.
- [9] M. Mubarokh, A. Hafid, A. Faharuddin, and H. Artikel, “Analisis Transformator Distribusi 160 KVA di PT. PLN (Persero) ULP Panakkukang Berdasarkan Nameplate,” *SIBERNETIK J. Pendidik. dan Pembelajaran* |, vol. 1, no. 1, pp. 146–157, 2023, doi: <https://doi.org/10.59632/sjpp.v1i1.185>.
- [10] Amrizal, M. Daud, T. Multazam, and F. Azhari, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Listrik pada Transformator Distribusi 20 kV di Kota Lhokseumawe,” *J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 03, pp. 2549–3442, 2025, doi: <http://dx.doi.org/10.23960/elc.v19n3.2765>.
- [11] Y. Yusiran and H. Hasanudin, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator Step Down 20 KV/400 V,” *J. Penelit. Inov.*, vol. 5, no. 3, pp. 2113–2120, 2025, doi: 10.54082/jupin.1675.

