

## Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator Step Down 20 KV/400 V

Yusiran\*<sup>1</sup>, Hasanuddin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam, Indonesia

Email: <sup>1</sup>yusiran@polibatam.ac.id, <sup>2</sup>hasanuddin@polibatam.ac.id

### Abstrak

Transformator memiliki peran penting dalam sistem distribusi tenaga listrik, khususnya pada kawasan industri. Salah satu permasalahan yang sering terjadi adalah ketidakseimbangan beban antar fasa, yang dapat menyebabkan peningkatan arus netral dan rugi-rugi daya, serta berdampak pada penurunan efisiensi transformator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi pada transformator step down 20 kV/400 V. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dan komparatif dengan pengumpulan data lapangan melalui pengukuran langsung menggunakan amperemeter dan voltmeter pada waktu beban puncak (siang dan sore hari) selama dua minggu. Data hasil pengukuran dibandingkan dengan standar dari PLN sebagai acuan analisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai ketidakseimbangan beban berada dalam kisaran 0%–2%, rugi-rugi daya sebesar 0%–2%, dan efisiensi transformator berkisar antara 98%–99%. Meskipun nilai-nilai tersebut masih dalam batas normal sesuai standar PLN No. 17 Tahun 2014 dan SPLN D3.002-1:2007, ditemukan kecenderungan bahwa semakin tinggi ketidakseimbangan beban, semakin besar rugi-rugi daya yang terjadi dan menurunkan efisiensi transformator. Oleh karena itu, pemantauan dan pengendalian beban antar fasa perlu dilakukan secara berkala untuk menjaga kinerja transformator tetap optimal. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengelolaan transformator distribusi di lingkungan industri secara lebih efisien dan berkelanjutan.

**Kata Kunci:** *Distribusi Listrik, Efisiensi, Ketidakseimbangan Beban, Rugi-Rugi Daya, Transformator Step Down*

### Abstract

*Transformers play a crucial role in electrical power distribution systems, especially in industrial areas. One common issue is unbalanced load across phases, which can cause increased neutral current, resulting in power losses and reduced transformer efficiency. This study aims to analyze the effect of unbalanced load on power losses and efficiency in a 20 kV/400 V step-down distribution transformer. The research employed a quantitative and comparative approach, with data collected through direct field measurements using ammeters and voltmeters during peak load periods (midday and evening) over a two-week period. The measured data were then compared to national standards provided by the State Electricity Company (PLN). The results showed that the load imbalance ranged from 0% to 2%, power losses were between 0% and 2%, and transformer efficiency was in the range of 98%–99%. Although these values are still within acceptable limits based on PLN Standard No. 17 of 2014 and SPLN D3.002-1:2007, the analysis revealed a clear trend: higher unbalanced loads lead to increased power losses and a decrease in transformer efficiency. Therefore, regular monitoring and balancing of phase loads are necessary to maintain optimal transformer performance. This study provides technical insights and is expected to serve as a reference for improving transformer management and ensuring efficient and sustainable power distribution in industrial*

**Keywords:** *Distribution System, Efficiency, Power Losses, Step-Down Transformer, Unbalanced Load*

## 1. PENDAHULUAN

Dalam era pertumbuhan industri dan ekonomi yang terus berkembang, kebutuhan akan energi listrik mengalami peningkatan yang signifikan. Listrik tidak hanya menjadi kebutuhan dasar masyarakat, tetapi juga komponen strategis dalam mendukung pembangunan nasional dan kesejahteraan sosial (Zhao, 2024). Oleh karena itu, sistem pembangkitan dan distribusi listrik harus mampu

menyediakan pasokan yang andal, efisien, dan berkelanjutan. Transformator merupakan komponen kunci dalam sistem distribusi tenaga listrik, berfungsi untuk menyalurkan energi dari jaringan tegangan menengah ke tegangan rendah berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik (Tondok et al., 2019).

Dalam praktiknya, transformator tiga fasa di sisi distribusi sering menghadapi kondisi beban yang tidak seimbang akibat perbedaan konsumsi antar pelanggan (Kusumah et al., 2024). Ketidakseimbangan ini dapat berdampak negatif terhadap performa transformator dan mempercepat degradasi umur operasional. Ketidakseimbangan beban menyebabkan aliran arus pada penghantar netral, yang mengakibatkan rugi-rugi daya tambahan (Sugara & Agung, 2024). Umumnya, ketidakseimbangan terjadi karena salah satu fasa memiliki beban lebih besar, sehingga sudut antar fasa tidak lagi ideal  $120^\circ$  (Darwanto, 2021). Jika kondisi ini berlanjut, rugi daya meningkat secara signifikan dan efisiensi transformator menurun (Solossa & Tasmono, 2024).

Rugi daya pada transformator terbagi menjadi dua jenis, yaitu rugi inti dan rugi tembaga. Rugi inti, termasuk rugi histeresis dan arus eddy, terjadi bahkan saat transformator tanpa beban dan disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi (Elnizar et al., 2021). Sementara itu, rugi tembaga meningkat secara kuadrat terhadap arus beban, memberikan kontribusi besar terhadap kehilangan energi dalam sistem (Risnandar et al., 2022). Efisiensi transformator secara langsung menurun seiring dengan tingginya total rugi daya (Mustari et al., 2024).

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas performa transformator secara umum atau dampak arus netral dalam sistem distribusi. Namun, masih terdapat gap dalam kajian teknis yang secara spesifik mengaitkan ketidakseimbangan beban, rugi-rugi daya, dan penurunan efisiensi transformator berdasarkan pengukuran lapangan aktual pada sistem distribusi tegangan 20 kV/400 V. Selain itu, kajian terintegrasi yang menghubungkan fenomena teknis ini dengan standar operasional dan batas toleransi sistem masih terbatas (Pratama & Rahmawati, 2020). Oleh karena itu, riset lebih lanjut yang bersifat aplikatif dan berbasis data riil sangat diperlukan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi transformator step down 20 kV/400 V berdasarkan data pengukuran di lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkuat pemahaman teknis, tetapi juga menjadi rujukan dalam praktik pemeliharaan prediktif, sebagaimana ditekankan oleh Vita et al. (2023), guna menjaga keandalan dan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik secara berkelanjutan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dan komparatif yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi transformator distribusi tipe step down 20 kV/400 V. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk memperoleh data numerik melalui pengukuran langsung parameter kelistrikan, sedangkan pendekatan komparatif diterapkan untuk membandingkan hasil perhitungan dengan standar teknis yang berlaku, seperti PLN No. 17 Tahun 2014, PLN 50:1997, dan SPLN D3.002-1:2007.

Penelitian ini dilaksanakan di salah satu kawasan industri di Kota Batam, Kepulauan Riau, selama dua minggu pada bulan November 2024. Pengambilan data dilakukan pada waktu siang dan sore hari untuk menangkap kondisi beban puncak. Objek dalam penelitian ini adalah transformator distribusi tiga fasa yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari jaringan tegangan menengah ke tegangan rendah. Data spesifikasi transformator yang digunakan diperlihatkan pada tabel 1.

Table 1. Data Spesifikasi Transformator

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| Phase number      | 3         |
| Rated power       | 630 KVa   |
| Frequency         | 50 Hz     |
| Tegangan Primer   | 20000 v   |
| Tegangan sekunder | 415 v     |
| Connection type   | DYN11     |
| Colling type      | ONAN      |
| Rugi inti /PO     | 919 Watt  |
| Rugi Tembaga      | 6889 Watt |

|                 |         |
|-----------------|---------|
| Impedansi       | 4.8%    |
| Total weight    | 2350 Kg |
| Tahun Pembuatan | 2005    |

Penelitian difokuskan pada evaluasi performa transformator dalam kondisi operasional nyata, khususnya pada aspek keseimbangan beban, rugi-rugi daya, dan efisiensi. Data diperoleh melalui dua jenis sumber. Data primer dikumpulkan melalui data sensor dan pengukuran langsung arus per fasa (R, S, T), arus netral, dan tegangan antar fasa dengan menggunakan alat ukur digital seperti amperemeter dan voltmeter.

Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur dan persiapan lapangan, termasuk pemilihan objek penelitian dan pengecekan alat ukur. Selanjutnya dilakukan pengambilan data lapangan melalui pengukuran arus dan tegangan. Data yang diperoleh kemudian dihitung dan dianalisis untuk memperoleh nilai pembebanan transformator, persentase ketidakseimbangan beban, rugi-rugi daya (termasuk rugi tembaga dan rugi inti), serta efisiensi transformator.

Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dengan batas toleransi yang ditetapkan dalam standar nasional. Hasil evaluasi ini akan menentukan apakah transformator masih dalam kondisi operasi yang efisien dan sesuai standar kelayakan teknis. Evaluasi pembebanan transformator merupakan langkah penting dalam memastikan keandalan dan efisiensi sistem kelistrikan pada transformator, terutama pada sistem distribusi listrik. Untuk menentukan nilai dari pembebanan pada transformator dapat menghitung arus beban penuh pada trafo (IFL) menggunakan Persamaan (1) (Malik et al., 2021).

$$IFL = \frac{\text{Kapasitas Trafo}}{V \times \sqrt{3}} \quad (1)$$

Untuk mengetahui arus rata-rata pada transformator dapat menggunakan rumus Persamaan (2). Setelah mendapatkan hasil perhitungan nilai IFL dari trafo dan I rata-rata, maka dapat dihitung nilai persentase pembebanan trafo dengan menggunakan Persamaan 3 (Soares & Budiono, 2022)

$$I \text{ rata - rata} = \frac{IR+IS+IT}{3} \quad (2)$$

$$\text{Persentase pembebanan} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{Beban penuh}}} \times 100\% \quad (3)$$

Setelah mengetahui nilai arus rata-rata dan persentase pembebanan transformator, analisis selanjutnya yang perlu dilakukan adalah mengamati kondisi keseimbangan beban pada sistem. Ketidakseimbangan beban adalah kondisi ketika arus listrik yang mengalir pada fasa R, S, dan T tidak sama besar atau tidak membentuk sudut  $120^\circ$  secara ideal (Khomarudin & Subekti, 2021). Menganalisis ketidakseimbangan beban adalah langkah penting dalam menjaga kualitas dan kehandalaan sistem tenaga listrik, karena ketidakseimbangan beban dapat mempengaruhi kinerja transformator. Ketidakseimbangan beban dapat dihitung menggunakan Persamaan (4) (Yoga Prasetya et al., 2020).

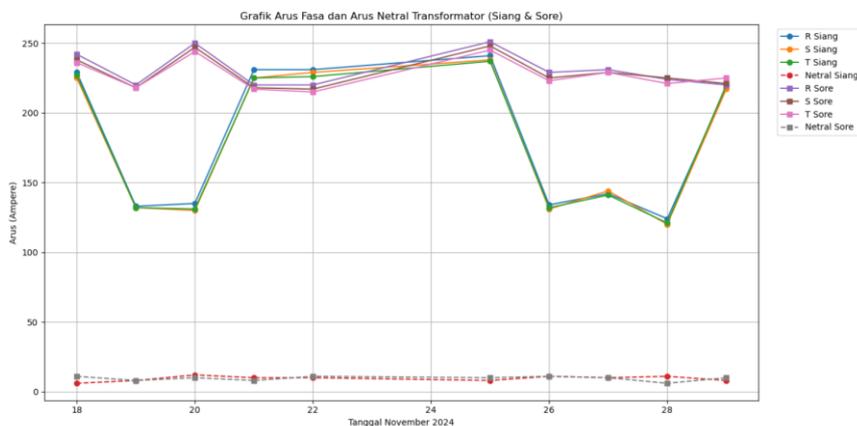
$$\text{Ketidakseimbangan beban} = \frac{[a-1]+[b-1]+[c-1]}{3} \times 100\% \quad (4)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Evaluasi Pembebanan Transformator

Hasil pengukuran arus pada transformator step-down 20 kV/400 V selama dua minggu ditampilkan pada Gambar 1. Nilai arus per fasa pada waktu siang (pukul 12.00) berkisar antara 120 A hingga 241 A. Arus tertinggi tercatat pada tanggal 25 November dengan masing-masing fasa R, S, dan T sebesar 241 A, 238 A, dan 237 A. Sementara itu, arus netral (IN) berada dalam rentang 6 A hingga 12 A, yang menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban ringan. Tegangan antar fasa stabil di kisaran 420–421

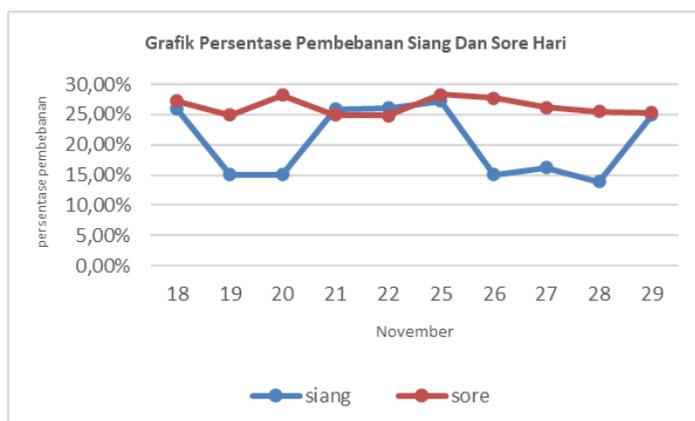
V sepanjang periode pengukuran, menandakan suplai tegangan dari sisi primer transformator tetap terjaga dengan baik.



Gambar 1. Grafik Arus Fasa dan Arus Netral Transformator

Pada waktu sore hari (pukul 16.00), pengukuran menunjukkan adanya peningkatan beban. Arus tertinggi kembali terjadi pada tanggal 25 November dengan nilai 251 A (R), 248 A (S), dan 245 A (T), yang menunjukkan bahwa beban puncak umumnya terjadi pada waktu sore. Arus netral juga meningkat, mencapai 11 A pada beberapa hari, mengindikasikan ketidakseimbangan beban yang cenderung lebih besar dibanding siang hari.

Evaluasi pembebanan transformator penting dilakukan untuk memastikan efisiensi dan keandalan sistem distribusi listrik. Langkah ini diawali dengan menghitung arus beban penuh (IFL) menggunakan Persamaan (1), di mana hasil perhitungan menunjukkan nilai sebesar 876,45 A. Selanjutnya, arus rata-rata transformator dihitung menggunakan Persamaan (2), dan dari kedua nilai tersebut diperoleh persentase pembebanan transformator melalui Persamaan (3). Nilai ini menjadi indikator utama untuk menilai apakah transformator bekerja dalam kondisi ideal, *underload*, atau *overload*



Gambar 2. Grafik Persentase Pembebanan Transformator

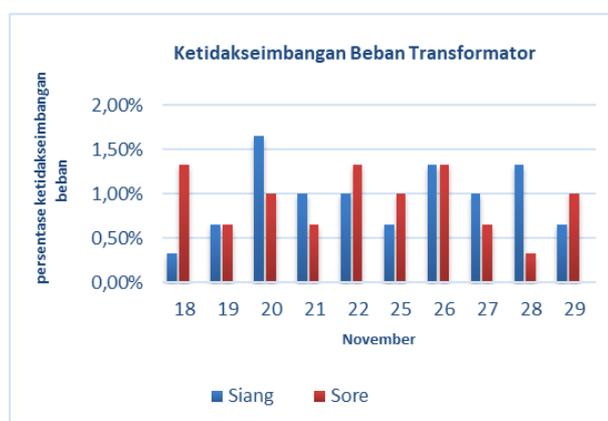
Berdasarkan grafik pada Gambar 2, terlihat bahwa pembebanan transformator berfluktuasi mengikuti pola konsumsi harian, dengan beban tertinggi terjadi pada sore hari. Hal ini sesuai dengan karakteristik umum sistem kelistrikan di mana beban tidak bersifat statis (Soares & Budiono, 2022). Analisis terhadap beban puncak sangat penting untuk memastikan transformator mampu menangani lonjakan tanpa kelebihan beban, serta untuk menghitung faktor beban (load factor) yang mencerminkan efisiensi penggunaan transformator (Marniati & Ayu, 2021).

Dari hasil perhitungan, persentase pembebanan berada di kisaran 13%–29%, jauh di bawah batas aman maksimum 80% sesuai standar SPLN No. 17 Tahun 2014 (Haris & Rizal Sultan, 2020). Hal ini

menunjukkan bahwa transformator masih beroperasi dalam kondisi aman dan efisien. Tidak ditemukan indikasi overload maupun underload yang signifikan, sehingga sistem masih layak diandalkan. Evaluasi ini tidak hanya menjamin keamanan operasional, tetapi juga mendukung efisiensi energi dan umur teknis peralatan. Data historis pembebanan sangat berguna dalam perencanaan kapasitas ke depan, terutama jika terjadi peningkatan kebutuhan daya. Secara keseluruhan, kondisi operasional transformator sesuai standar, dengan distribusi daya yang stabil dan terkelola dengan baik.

### 3.2. Analisis Ketidakseimbangan Beban dan Dampaknya terhadap Kinerja Trafo

Ketidakseimbangan beban terjadi ketika arus listrik pada fasa R, S, dan T tidak sama besar atau tidak membentuk sudut  $120^\circ$  secara ideal (Khomarudin & Subekti, 2021). Kondisi ini dapat memengaruhi kinerja transformator dan menurunkan kualitas sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, analisis ketidakseimbangan beban menjadi langkah penting dalam menjaga keandalan dan efisiensi sistem. Untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan, persentasenya dapat dihitung menggunakan Persamaan (4) (Yoga Prasetya et al., 2020)



Gambar 3. Grafik Ketidakseimbangan Beban Transformator

Berdasarkan Gambar 3, diketahui bahwa ketidakseimbangan beban terjadi akibat distribusi beban satu fasa yang tidak merata, penggunaan listrik pelanggan yang tidak serentak, kerusakan pada salah satu fasa, serta pengaruh beban nonlinier dan harmonisa (Khomarudin & Subekti, 2021). Ketidakseimbangan ini menimbulkan aliran arus netral yang meningkatkan rugi-rugi daya dalam sistem distribusi. Semakin besar ketidakseimbangan, semakin tinggi pula rugi daya yang terjadi.

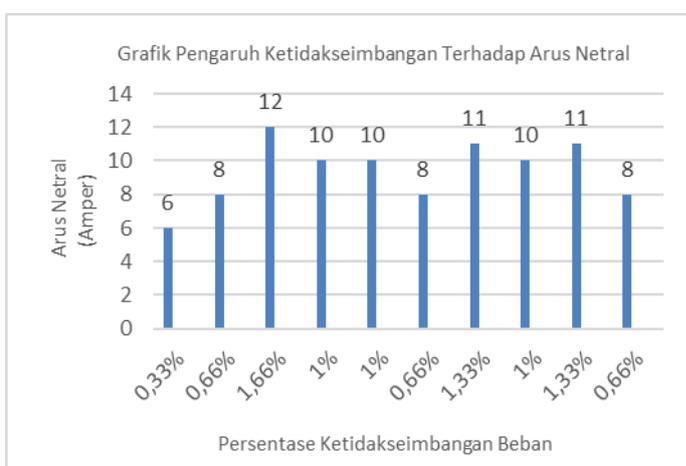
Hasil evaluasi menunjukkan bahwa persentase ketidakseimbangan beban pada transformator step down berada di kisaran 0,33% hingga 2%, dengan rata-rata masih jauh di bawah batas maksimum 10% yang ditetapkan oleh SPLN No. 17 Tahun 2014 (Haris & Rizal Sultan, 2020). Ini menandakan bahwa transformator beroperasi dalam kondisi aman dan stabil. Meskipun terjadi fluktuasi kecil, terutama pada siang dan sore hari, kondisi tersebut masih dalam kategori wajar. Ketidakseimbangan ini menghasilkan rugi daya harian sekitar 0,05–0,21 watt, yang meskipun kecil, jika terjadi terus-menerus dapat menurunkan efisiensi, mempercepat kerusakan isolasi, dan menurunkan kualitas minyak trafo. Oleh karena itu, pemantauan berkala tetap diperlukan untuk mencegah penurunan performa dalam jangka panjang (Zerguit et al., 2023; Winarso et al., 2021).

Senada dengan hal tersebut, hasil penelitian oleh Haris & Rizal Sultan (2020) menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban merupakan hal yang wajar terjadi karena sifat konsumsi pelanggan yang tidak seragam. Penelitian mereka menekankan pentingnya optimasi penyeimbangan beban untuk menurunkan rugi energi, dengan tetap mengacu pada SPLN No. 17 Tahun 2014 sebagai acuan batas aman. Oleh karena itu, selain memantau total beban, operator sistem juga perlu mengawasi keseimbangan antar fasa sebagai bagian dari strategi pemeliharaan berkala dan perencanaan peremajaan peralatan. Keseimbangan beban yang terjaga akan memastikan operasi sistem tetap efisien serta memperpanjang usia pakai transformator.

### 3.3. Analisis Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator

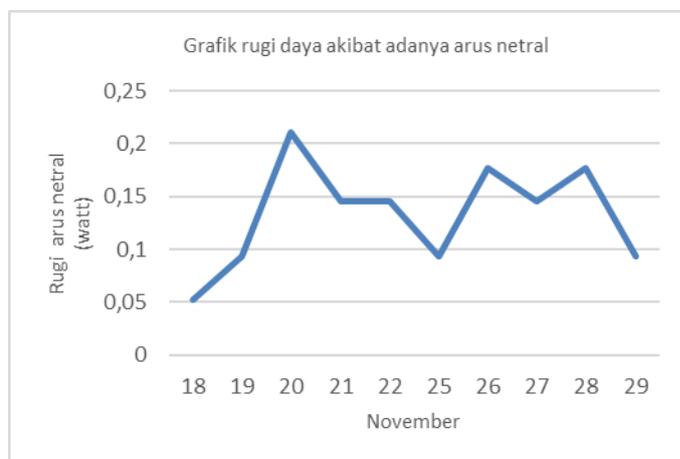
Rugi-rugi daya merupakan indikator kunci dalam menilai efisiensi dan performa transformator pada sistem kelistrikan industri (Saepudin, 2024). Dalam penelitian ini, transformator di PT Batamindo dianalisis berdasarkan data pengukuran aktual selama dua minggu untuk mengidentifikasi besarnya rugi daya yang ditimbulkan, khususnya akibat arus netral yang muncul dari ketidakseimbangan beban antar fasa. Komponen rugi daya yang dianalisis meliputi rugi tembaga (*copper loss*), rugi inti (*core loss*), dan rugi arus netral (*neutral current loss*), di mana ketiganya memberikan gambaran menyeluruh mengenai kinerja transformator.

Gambar 4 menunjukkan adanya korelasi kuat antara ketidakseimbangan beban dan arus netral: semakin tinggi ketidakseimbangan, maka arus netral yang mengalir juga meningkat. Hal ini didukung oleh temuan Novfowan et al. (2023), yang menyatakan bahwa perbedaan besar beban antar fasa menyebabkan arus mengalir melalui penghantar netral, menghasilkan rugi daya tambahan



Gambar 4. Grafik Persentase Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral

Gambar 5 memvisualisasikan rugi daya akibat arus netral yang dalam kasus ini berkisar antara 0,05 hingga 1 watt per hari. Meskipun nilainya tergolong kecil, akumulasi harian dalam jangka panjang dapat berdampak terhadap penurunan efisiensi. Namun demikian, arus netral idealnya tidak mengalir (Malik et al., 2021). Dalam kenyataannya, beban yang tidak simetris antar fasa sulit dihindari, terutama pada sistem distribusi industri dengan profil konsumsi yang fluktuatif.



Gambar 5. Grafik Rugi Daya Akibat Adanya Arus Netral

Berdasarkan hasil perhitungan selama dua minggu pada siang hari, yaitu dari tanggal 18 hingga 29 November 2024, efisiensi transformator berada dalam kisaran 98,61% hingga 99,03%, dengan nilai

tertinggi tercatat pada 25 November dan terendah pada 28 November. Efisiensi yang relatif tinggi ini menunjukkan bahwa transformator masih bekerja dalam kondisi baik dan andal. Meskipun demikian, terdapat indikasi penurunan efisiensi kecil yang disebabkan oleh rugi-rugi daya. Mengacu pada standar SPLN D3.002-1:2007, efisiensi ideal untuk transformator 630 kVA adalah sebesar 99,31% pada beban 50% dan 99,025% pada beban 100%. Dengan demikian, meskipun efisiensi aktual masih tergolong baik, potensi penurunan kinerja tetap perlu diwaspadai melalui pemantauan rutin untuk menjaga keandalan transformator dalam jangka panjang. Sementara itu, data efisiensi transformator pada sore hari selama periode yang sama menunjukkan nilai efisiensi berada dalam kisaran 98,77% hingga 99,29%, yang tergolong sangat baik dan mencerminkan performa transformator yang optimal dalam mendukung sistem kelistrikan, khususnya di kawasan industri.

Efisiensi tinggi ini menunjukkan bahwa hanya sekitar 1% energi yang hilang selama proses distribusi daya. Rugi-rugi daya yang memengaruhi efisiensi terdiri dari rugi inti akibat histeresis dan arus eddy sebesar 919 watt, serta rugi tembaga akibat hambatan kumparan sebesar 6.889 watt. Walaupun nilai rugi-rugi ini tampak cukup besar, jika dibandingkan dengan kapasitas transformator sebesar 630 kVA, dampaknya masih tergolong kecil. Stabilitasnya efisiensi di atas 98%, baik pada siang maupun sore hari, menunjukkan bahwa transformator mampu beroperasi secara andal meskipun menghadapi variasi beban harian. Namun demikian, pengawasan berkala dan evaluasi performa tetap diperlukan untuk menjaga efisiensi tetap optimal dan menjamin keberlangsungan operasional sistem distribusi daya secara keseluruhan

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis selama dua minggu pengamatan, dapat disimpulkan bahwa efisiensi transformator step-down 20 kV/400 V masih berada dalam kategori sangat baik, dengan nilai berkisar antara 98,61% hingga 99,29% pada waktu siang dan sore hari. Efisiensi tertinggi tercatat pada 25 November, sementara efisiensi terendah terjadi pada 28 November. Meskipun nilai efisiensi tersebut masih berada dalam rentang standar yang ditetapkan oleh SPLN D3.002-1:2007, yaitu 99,31% pada beban 50% dan 99,025% pada beban 100%, terdapat indikasi penurunan efisiensi akibat rugi-rugi daya, baik dari sisi rugi inti sebesar 919 watt maupun rugi tembaga sebesar 6.889 watt. Ketidakseimbangan beban antar fasa yang berada dalam kisaran 0,33%–2% turut berkontribusi terhadap munculnya arus netral dan penambahan rugi. Kondisi ini menunjukkan pentingnya pemantauan dan pengendalian beban secara berkala untuk menjaga performa transformator tetap optimal. Secara keseluruhan, transformator masih beroperasi dalam kondisi andal, efisien, dan sesuai dengan standar industri. Namun, jika tren ketidakseimbangan dan rugi daya dibiarkan tanpa penanganan, hal ini berpotensi menurunkan efisiensi dan mempercepat degradasi peralatan dalam jangka panjang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Darwanto, A. (2021). Analisis ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di PT. PLN (Persero) Rayon Cepu. *Simetris*, 15(1), 35–42. <https://doi.org/10.51901/simetris.v15i01.179>
- Elnizar, H., Gusmedi, H., & Zebua, O. (2021). Analisis rugi-rugi (losses) transformator daya 150/20 KV di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sutami ULTG Tarahan. *Electrician*, 15(2), 116–126. <https://doi.org/10.23960/elc.v15n2.2197>
- Haris, M. H., & Rizal Sultan, A. (2020). Optimasi penyeimbangan beban gardu distribusi terhadap penurunan rugi energi dengan metode seimbang beban sehari. *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 7(3), 14–20. <https://doi.org/10.33795/elposys.v7i3.7>
- Khomarudin, R., & Subekti, L. (2021). Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban dan harmonisa terhadap arus netral pada trafo distribusi 8 kapasitas 500 KVA di PPSDM Migas Cepu. *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, 1(2), 28–33. <https://doi.org/10.22146/juliet.v1i2.59560>
- Malik, N., Zuhajji, & Wahidah, N. (2021). Pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya: The effect of unbalanced load on electrical power losses in the primary. *Media Elektrik*, 18(1), 149–159. <https://doi.org/10.59562/metrik.v19i3.31933>

- Mustari, M., Kurniawan, R., & Ramlan, R. (2024). Analisis efisiensi transformator dalam pembangkit listrik di PT. PLN Indonesia Power UPDK Keramasan. *Jurnal Penelitian Sains*, 26(2), 137. <https://doi.org/10.56064/jps.v26i2.944>
- 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>
- Pratama, N. A., & Rahmawati, Y. (2020). Evaluation of unbalanced load impacts on distribution transformer performances. *Vol*, 2(1), 28–35.
- Risnandar, M. A., Faridah, L., & Nurdiansyah, R. (2022). Analisis rugi daya trafo distribusi pada penyulang Tamansari Kota Tasikmalaya. *Of Energy and Electrical Engineering*, 13(1).
- Saepudin, A. (2024). Advantage power transformer low losses with a case study on 30/60 MVA 150/20/10 kV transformers. *TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi dan Informatika*, 11(1).
- Soares, F. S. M., & Budiono, G. (2022). Analisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan losses pada trafo DT50. *Jurnal Ilmiah Research Student*, 1(3), 455–461.
- Solossa, R. M., & Tasmono, H. (2024). Analisa efisiensi pada transformator daya 60 MVA di Gardu Induk Babadan Sidoarjo. *Ilmiah Ekonomi dan Manajemen*, 2, 323–332.
- Sugara, Y. I. W., Agung, W., & Adrama, I. N. (2024). Analisis ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Bangli. *JESCE (Journal of Electrical and System Control Engineering)*, 8(1), 141–154. <https://doi.org/10.31289/jesce.v6i2.11992>
- Tondok, Y. P., Patras, L. S., & Lisi, F. (2019). Yaved Pasereng Tondok. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 8(2), 83–92.
- Vita, V., Fotis, G., Chobanov, V., Pavlatos, C., & Mladenov, V. (2023). Predictive maintenance for distribution system operators in increasing transformers' reliability. *Electronics (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/electronics12061356>
- Winarso, M. (2021). Estimasi umur pakai dan rugi daya transformator. *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, 15(2).
- Yoga Prasetya, I. W., Setiawan, I. N., & Dyana Arjana, I. G. (2020). Analisis ketidakseimbangan beban dan harmonisa pada transformator distribusi MI 0096 penyulang Abianbase. *Jurnal SPEKTRUM*, 7(1), 109. <https://doi.org/10.24843/spektrum.2020.v07.i01.p16>
- Zerguit, Y. (2023). A relay-based automatic balancing system for three-phase loads in Industry 4.0. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 101(5).
- Zhao, X. (2024). Life cycle cost estimation and analysis of transformers based on failure rate. *Applied Sciences*, 14(3).