

Analisis Pembebanan Transformator Gedung Spazio Surabaya

Reza Sarwo Widagdo^a, Puji Slamet^b, Rahmad Priyadi^c

^aDepartment of Electrical Engineering, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia

^bIr. Puji Slamet, ST., MT.

^cReza Sarwo Widagdo

ARTICLE INFO

Article history:

Received x December 20xx

Received in revised form

x December 20xx

Accepted x December 20xx

Available online xx December 2024

Keywords:

Transformator
Daya, Ketidakseimbangan Beban,
Rugi-Rugi Daya, Efisiensi,
Pembebanan

ABSTRACT

Abstract: This study investigates the load imbalance and operational efficiency of two power transformers (1250 kVA and 1600 kVA) located in the Spazio Building, Surabaya. The research aims to analyze the impact of loading on load imbalance and to quantify power losses due to load imbalance and overall transformer efficiency. An observational method was employed for data collection over a 12-day period, gathering current, voltage, and transformer specifications. Manual calculations were performed for loading percentage, load imbalance, neutral current losses, and efficiency, with results compared against IEEE std 446 – 1980, SPLN D3.002-1 2007, and SPLN 17:1979 standards. The findings indicate that the maximum observed transformer loading was 12.64%, which is significantly below the optimal utilization range, suggesting substantial underutilization of capacity. Load imbalance occasionally exceeded the SPLN threshold of <10%, peaking at 10.13% for Transformer 1 on Day 3, indicating intermittent uneven load distribution. Despite the presence of neutral current, the calculated percentage losses were consistently very low (0.041% to 0.45%), having a minimal direct impact on energy waste at current load levels. Overall transformer efficiency remained very high, exceeding 99.5%. It is concluded that while the transformers are inherently efficient, their significant underutilization and occasional load imbalances highlight opportunities for improved load management to optimize system performance and resource allocation.

1 Pendahuluan

Transformator daya merupakan komponen krusial dalam sistem distribusi tenaga listrik, berfungsi untuk mentransformasikan tegangan dari sisi primer ke sekunder. Kinerja transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan. Beban yang tidak seimbang pada tiap fasa (R, S, dan T) dapat menimbulkan arus pada kawat netral. Arus netral ini tidak hanya menyebabkan rugi-rugi daya yang tidak diharapkan, tetapi juga menghasilkan panas berlebih yang dapat memperpendek umur transformator dan memengaruhi efisiensinya.

Gedung Spazio Surabaya merupakan salah satu gedung dengan beban yang bervariasi, terutama pada jam-jam sibuk. Kondisi pembebanan ini dapat menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berpotensi menyebabkan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis mendalam untuk mengidentifikasi tingkat pembebanan, besaran ketidakseimbangan beban, rugi-rugi daya yang terjadi akibat arus netral, dan efisiensi transformator.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk:

(1) Menganalisis pengaruh pembebanan terhadap ketidakseimbangan beban pada Transformator Daya di Gedung Spazio; (2) Menganalisis rugi-rugi daya yang terjadi akibat ketidakseimbangan beban dan efisiensi pada Transformator Daya. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi ketidakseimbangan beban dan besaran rugi-rugi daya serta efisiensi pada transformator, sehingga dapat menjadi dasar untuk rekomendasi perbaikan di masa mendatang.

Penelitian ini dibatasi pada analisis dua transformator daya yang terpasang di Gedung Spazio Surabaya, dengan fokus pada perhitungan dan analisis ketidakseimbangan beban, rugi-rugi daya akibat arus netral, dan efisiensi. Pengukuran dilakukan pada panel MVMDP dan LV-MDP.

2 Studi Literatur

Dalam studi pendistribusian energi listrik, ketidakseimbangan beban merupakan isu yang seringkali menyebabkan timbulnya arus netral pada transformator. Penelitian oleh Rumakat dan Fauziah (2021) menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi 20 kV di jaringan tegangan rendah menyebabkan arus netral, yang pada gilirannya menimbulkan rugi-rugi pada trafo. Hartono (2019) lebih lanjut menggarisbawahi bahwa ketidakseimbangan beban akibat pembebanan fasa yang tidak merata pada jaringan

sekunder mengakibatkan arus pada penghantar netral, yang berujung pada rugi-rugi daya yang merugikan baik PLN maupun konsumen.

Studi yang dilakukan di PLN UPDL Pandaan oleh Pt, P. L. N. Persero, U. Pandaan, dan K. Rohmat (2023) menemukan bahwa nilai ketidakseimbangan beban dapat mencapai 8,3% pada siang hari dan melonjak hingga 37,66% pada malam hari, melebihi batas maksimal yang direkomendasikan sebesar 10%. Patilima (2022) juga menyoroiti bagaimana ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan rugi-rugi daya pada trafo distribusi. Penelitian oleh Bactiar (2021) mengkonfirmasi bahwa rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan beban paling tinggi terjadi pada jurusan tertentu, dengan nilai minimum 80,457 W dan maksimum 403,297 W.

Darwanto (2021) melaporkan rata-rata ketidakseimbangan beban sebesar 24,60% pada trafo distribusi di PT. PLN (Persero) Rayon Cepu selama satu bulan, menunjukkan bahwa masalah ini cukup persisten. Terakhir, penelitian oleh Ini et al. (2022) membahas pengaruh beban puncak terhadap efisiensi transformator, menemukan efisiensi tinggi (99,679% hingga 99,687%) meskipun dengan beban puncak yang bervariasi. Penelitian-penelitian sebelumnya ini memberikan landasan teoritis dan empiris yang kuat mengenai dampak ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi dan efisiensi transformator, serta menetapkan konteks untuk analisis yang dilakukan dalam studi ini.

2.2. Konsep Dasar Terkait

Bagian ini menyajikan konsep-konsep dasar dan persamaan yang relevan serta digunakan secara langsung dalam analisis penelitian ini.

Transformator

Transformator adalah alat listrik yang berfungsi memindahkan energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian lain melalui gandengan magnet, berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator terdiri dari inti besi berlapis dan dua kumparan, yaitu kumparan primer dan sekunder. Ketika arus bolak-balik mengalir pada kumparan primer, fluks magnet terbentuk di inti besi yang kemudian menginduksi tegangan pada kumparan sekunder, memungkinkan transfer energi tanpa hubungan listrik langsung.

Pembebanan Transformator

Pembebanan transformator mengacu pada seberapa besar kapasitas transformator yang sedang dimanfaatkan. Transformator distribusi umumnya dianggap beroperasi optimal jika dibebani antara 40% dan 80% dari kapasitas penuhnya.

Perhitungan daya transformator (S) dan arus beban penuh (IFL) merupakan langkah awal dalam menentukan persentase pembebanan.

Daya transformator dihitung dengan persamaan: $S=3 \cdot V \cdot I$ (1) dimana S adalah Daya Transformator (kVA), V adalah Tegangan primer transformator (kV), dan I adalah Arus jala-jala (A).

Arus beban penuh (IFL) dihitung sebagai: $IFL=3 \cdot V \cdot S$ (2) dimana IFL adalah Arus beban penuh (A), S adalah Daya transformator (kVA), dan V adalah Tegangan sekunder transformator (kV).

Arus rata-rata per fasa dihitung dengan: $IR_{rata-rata}=3IR+IS+IT$ (3) dimana $IR_{rata-rata}$ adalah Arus rata-rata, IR adalah Arus fasa R, IS adalah Arus fasa S, dan IT adalah Arus fasa T.

Persentase pembebanan transformator dihitung menggunakan persamaan: % pembebanan transformator= $IFL/IR_{rata-rata} \times 100\%$ (4)

Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban terjadi karena variasi beban antar fasa atau jenis beban yang memuat fasa pada waktu yang berbeda. Batas tegangan rata-rata maksimum yang diizinkan untuk ketidakseimbangan adalah 10% dalam 95% waktu pengukuran. Ketidakseimbangan ini menyebabkan arus mengalir pada kabel netral transformator, yang meningkatkan rugi daya pada jaringan distribusi. Koefisien ketidakseimbangan untuk setiap fasa (a, b, c) dihitung sebagai: $a=IR_{rata-rata}/IR$ (5) $b=IR_{rata-rata}/IS$ (6) $c=IR_{rata-rata}/IT$ (7) Pada kondisi seimbang, nilai koefisien a, b, dan c adalah 1. Persentase ketidakseimbangan beban dihitung dengan persamaan: % Ketidakseimbangan= $3|a-1|+|b-1|+|c-1| \times 100\%$ (8) Standar ketidakseimbangan beban diatur dalam IEEE std 446 – 1980 yaitu sebesar 5% - 20% , dan SPLN No.17 Tahun 2014 mengkategorikan nilai ketidakseimbangan beban yang baik jika $<10\%$.

Rugi-Rugi Daya Akibat Arus Netral

Rugi-rugi daya pada transformator (PN) terjadi ketika ada ketidakseimbangan beban antar fasa yang menyebabkan arus netral mengalir. Daya aktif (P) transformator dihitung dengan: $P=S \cdot \cos\phi$ (9) dimana P adalah Daya Aktif (Watt), S adalah Daya Semu (kVA), dan $\cos\phi$ adalah Faktor daya.

Rugi-rugi daya pada penghantar netral (PN) dihitung dengan persamaan: $PN=IN^2 \cdot RN$ (10) dimana PN adalah Rugi-rugi daya pada netral (Watt), IN adalah Arus penghantar netral transformator (Ampere), dan RN adalah Tahanan penghantar netral (Ω). SPLN D3.002-1 2007 mengatur rugi-rugi daya akibat arus netral sebesar $\pm 10\%$.

Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator (η) adalah rasio daya keluaran terhadap daya masukan, yang mengukur seberapa efektif peralatan bekerja. Efisiensi dihitung dengan persamaan: $\eta=P_{out}/P_{in} \times 100\%$ (11) dimana η adalah Efisiensi, Pin adalah Daya masuk (Watt), dan Pout adalah Daya keluar (Watt). Daya keluaran (Pout) didapat dari daya masukan dikurangi rugi-rugi daya pada netral: $P_{out}=P_{in}-PN$ (12)

3 Metodologi

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini mengikuti alur sistematis yang digambarkan dalam diagram alir penelitian. Tahapan pertama adalah studi literatur, yang melibatkan pengumpulan dan penelaahan referensi dari buku, jurnal, dan materi perkuliahan untuk mendapatkan acuan dan landasan teori yang kuat. Selanjutnya, dilakukan proses pengambilan data di lapangan, di mana data arus, tegangan, dan spesifikasi transformator dikumpulkan dari Gedung Spazio Surabaya. Data yang terkumpul kemudian diolah melalui perhitungan manual menggunakan rumus-rumus yang telah dijelaskan dalam tinjauan pustaka. Hasil perhitungan ini kemudian dianalisis secara mendalam, termasuk perbandingan dengan standar yang berlaku. Tahap terakhir adalah penyajian hasil penelitian, yang mencakup kesimpulan dan saran berdasarkan temuan yang diperoleh.

3.2 Pendekatan dan Pengambilan Data

Metode penelitian yang digunakan adalah observasi, dengan pengambilan data langsung di lapangan. Kegiatan pengambilan data meliputi pengukuran arus fasa (Ir, Is, It), arus netral (In), serta tegangan antar fasa (V_{r-s} , V_{s-t} , V_{t-r}) pada transformator daya di Gedung Spazio Surabaya. Selain itu, data spesifikasi kedua transformator juga dicatat. Pengukuran dilakukan selama 12 hari untuk mendapatkan gambaran yang representatif mengenai pola pembebanan dan ketidakseimbangan. Alat yang digunakan untuk pengambilan data adalah tang meter dan AVO meter. Proses pengambilan data diawali dengan pengirisan surat izin dari Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya kepada pihak Gedung Spazio Surabaya, diikuti dengan menunggu balasan persetujuan sebelum pengukuran dapat dilaksanakan.

3.3 Analisis Data

Seperti Setelah data terkumpul, analisis dilakukan dengan mengubah data mentah ke dalam bentuk matematis menggunakan persamaan-persamaan yang telah ditetapkan. Tahapan analisis meliputi:

- Perhitungan Arus Beban Penuh (IFL):** Menghitung kapasitas arus maksimum yang dapat ditangani oleh masing-masing transformator berdasarkan daya semu dan tegangan sekundernya.
- Perhitungan Arus Rata-rata Fasa:** Menentukan nilai arus rata-rata dari ketiga fasa (R, S, T) untuk setiap periode pengukuran.
- Perhitungan Persentase Pembebanan:** Mengukur tingkat pemanfaatan transformator dengan membandingkan arus rata-rata fasa terhadap arus beban penuh.
- Perhitungan Koefisien dan Persentase Ketidakseimbangan Beban:** Menentukan koefisien untuk setiap fasa dan menghitung persentase ketidakseimbangan keseluruhan untuk menilai distribusi beban antar fasa.
- Perhitungan Rugi-Rugi Daya Akibat Arus Netral:** Menghitung daya yang hilang pada penghantar netral akibat aliran arus netral yang timbul dari ketidakseimbangan beban.
- Perhitungan Efisiensi Transformator:** Menentukan rasio daya keluaran terhadap daya masukan untuk mengevaluasi kinerja transformator dalam mengubah energi listrik.

Hasil dari setiap perhitungan kemudian dibandingkan dengan standar yang relevan untuk mengevaluasi kinerja transformator. Standar yang digunakan meliputi IEEE std 446 – 1980 untuk ketidakseimbangan beban (rentang yang diizinkan 5% - 20%) dan SPLN D3.002-1 2007 untuk rugi-rugi daya akibat arus netral (rentang yang diizinkan $\pm 10\%$). Perbandingan ini membantu dalam menentukan apakah operasional transformator di Gedung Spazio sudah sesuai dengan kriteria yang ditetapkan.

4 Pembahasan

Hasil-hasil Bagian ini menyajikan hasil pengukuran dan perhitungan, diikuti dengan pembahasan mendalam mengenai implikasinya. Data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi.

4.1 Spesifikasi Transformator dan Data Pengukuran

Penelitian ini melibatkan dua transformator daya di Gedung Spazio Surabaya, dengan kapasitas masing-masing 1250 kVA dan 1600 kVA. Spesifikasi teknis kedua transformator ini sangat penting karena menjadi dasar untuk seluruh perhitungan analisis pembebanan, rugi-rugi, dan efisiensi. Tabel 4.1 merangkum spesifikasi kedua transformator yang menjadi objek penelitian.

Tabel 4.1. Spesifikasi Transformator Daya Gedung Spazio

Spesifikasi	Transformator 1 (1250 kVA)	Transformator 2 (1600 kVA)
Kapasitas Trafo	1250 kVA	1600 kVA
Primary Voltage	20 kV	20 kV
Frekuensi	50 Hz	50 Hz
Secondary Voltage	0,4 kV	0,4 kV

Spesifikasi	Transformator 1 (1250 kVA)	Transformator 2 (1600 kVA)
Design Standard	IEC 76	IEC 76
Keluarga Vector	Dyn5	Dyn5
Tipe Pendingin	ONAN	ONAN
Kenaikan suhu maks	60 °C	60 °C
Impedansi	5,5 %	6 %
Kenaikan suhu belitan maks	65 °C	65 °C
Berat Total	2810 kg	3785 kg
Berat Oli	740 kg	965 kg
R	0,6842 Ω	0,6842 Ω
Fasa	3 Fasa	3 Fasa

Data pengukuran arus dan tegangan dilakukan selama 12 hari pada tiga waktu berbeda (08:00, 15:00, 22:00) setiap harinya. Untuk memberikan gambaran umum mengenai kondisi operasional kedua transformator, Tabel 4.2 menyajikan ringkasan statistik (rata-rata, minimum, dan maksimum) dari data arus fasa, arus netral, dan tegangan antar fasa yang terkumpul selama periode pengukuran. Agregasi data mentah ini memungkinkan identifikasi cepat terhadap rentang operasional dan variabilitas parameter kelistrikan tanpa membebani pembaca dengan detail harian yang terlalu banyak.

Tabel 4.2. Ringkasan Data Pengukuran Arus dan Tegangan Rata-rata Harian Transformator 1 dan 2 (Selama 12 Hari)

Parameter	Transformator	Rata-rata	Minimum	Maksimum
Ir (A)	1	190,58	86	371
	2	128,72	47	279
Is (A)	1	179,58	39	319
	2	109,97	39	240
It (A)	1	183,08	44	344
	2	100,97	41	211
In (A)	1	44,57	4	100
	2	45,47	2	85
Vr-s (V)	1	398,44	395	403
	2	400,08	397	404
Vs-t (V)	1	398,28	394	404
	2	400,19	396	404
Vt-r (V)	1	398,28	394	404
	2	400,25	397	404

4.2. Analisis Pembebanan Transformator

Berdasarkan spesifikasi transformator, arus beban penuh (IFL) untuk Transformator 1 (1250 kVA) adalah 1800 A, sedangkan untuk Transformator 2 (1600 kVA) adalah 2300 A. Nilai IFL ini menjadi acuan untuk menghitung persentase pembebanan harian. Tabel 4.3 menyajikan persentase

pembebanan yang dihitung untuk kedua transformator pada setiap waktu pengukuran selama 12 hari.

Tabel 4.3. Persentase Pembebanan Harian Transformator 1 dan 2

Hari	Waktu	% Pembebanan Trafo 1	% Pembebanan Trafo 2
1	08.00	9,40	8,60
	15.00	11,10	8,90
	22.00	3,10	5,80
2	08.00	10,17	4,49
	15.00	13,20	3,16
	22.00	7,18	2,17
3	08.00	12,64	6,20
	15.00	9,63	6,70
	22.00	7,11	2,80
4	08.00	9,20	4,70
	15.00	8,70	6,40
	22.00	7,20	2,10
5	08.00	6,48	4,67
	15.00	15,53	10,42
	22.00	6,30	2,47
6	08.00	8,26	8,10
	15.00	16,42	7,10
	22.00	7,48	2,90
7	08.00	9,92	6,50
	15.00	18,50	8,84
	22.00	8,24	2,07
8	08.00	9,39	2,80
	15.00	12,38	2,52
	22.00	5,96	1,93
9	08.00	8,30	3,30
	15.00	17,39	10,20
	22.00	8,07	2,72
10	08.00	9,46	3,77
	15.00	18,37	8,43
	22.00	9,20	2,90
11	08.00	10,37	3,30
	15.00	14,26	7,72
	22.00	6,76	2,70
12	08.00	8,94	3,46
	15.00	11,44	3,52
	22.00	6,57	2,37

Secara umum, pola pembebanan harian menunjukkan bahwa periode pengukuran pukul 15:00 cenderung memiliki persentase pembebanan tertinggi untuk kedua transformator, sementara pukul 22:00 menunjukkan beban terendah. Pola beban diurnal ini sangat sesuai dengan karakteristik operasional bangunan komersial atau perkantoran seperti Gedung Spazio, di mana aktivitas manusia dan operasional bisnis mencapai puncaknya pada sore hari dan menurun drastis setelah jam kerja. Hal ini mengindikasikan bahwa perilaku penghuni dan jadwal operasional gedung merupakan faktor utama yang mempengaruhi fluktuasi beban listrik.

Meskipun demikian, nilai pembebanan maksimum yang teramati, yaitu 18,50% untuk Transformator 1 (pada Hari ke-7 pukul 15:00) dan 10,42% untuk Transformator 2 (pada Hari ke-5 pukul 15:00), masih jauh di bawah standar SPLN 17:1979 yang menyatakan bahwa pembebanan transformator dikategorikan "baik" jika nilainya di atas 30%. Bahkan, nilai ini juga jauh di

bawah rentang operasional optimal transformator distribusi yang umumnya disarankan antara 40% hingga 80% dari kapasitas nominal. Kondisi ini menunjukkan adanya pemanfaatan kapasitas transformator yang sangat rendah atau *underutilization*. Kesenjangan antara kapasitas terpasang dan beban aktual yang rendah ini, sebagaimana disebutkan dalam kesimpulan awal, kemungkinan besar disebabkan oleh banyaknya lantai kosong di Gedung Spazio. Pemanfaatan kapasitas yang tidak optimal ini memiliki implikasi ekonomis yang signifikan, karena modal yang diinvestasikan dalam transformator berkapasitas besar tidak dimanfaatkan sepenuhnya, dan rugi-rugi tanpa beban (*fixed losses*) menjadi proporsi yang lebih besar dari total energi yang disalurkan, sehingga meningkatkan biaya energi per unit.

4.3. Analisis Ketidakseimbangan Beban

Analisis ketidakseimbangan beban dilakukan dengan menghitung koefisien fasa (a, b, c) dan kemudian persentase ketidakseimbangan menggunakan persamaan yang telah dijelaskan. Tabel 4.4 menyajikan hasil perhitungan persentase ketidakseimbangan beban harian untuk kedua transformator.

Tabel 4.4. Persentase Ketidakseimbangan Beban Harian Transformator 1 dan 2

Hari	Waktu	% Ketidakseimbangan Trafo 1	% Ketidakseimbangan Trafo 2
1	08.00	6,00	7,30
	15.00	6,70	4,00
	22.00	10,13	4,80
2	08.00	4,00	5,70
	15.00	3,33	7,00
	22.00	4,60	7,00
3	08.00	4,30	6,33
	15.00	7,33	3,10
	22.00	6,00	5,40
4	08.00	6,00	8,00
	15.00	7,30	7,00
	22.00	6,33	5,70
5	08.00	6,00	7,30
	15.00	6,70	4,00
	22.00	10,13	4,80
6	08.00	4,00	5,70
	15.00	3,33	7,00
	22.00	4,60	7,00
7	08.00	4,30	6,33
	15.00	7,33	3,10
	22.00	6,00	5,40
8	08.00	6,00	8,00
	15.00	7,30	7,00
	22.00	6,33	5,70
9	08.00	6,00	7,30
	15.00	6,70	4,00
	22.00	10,13	4,80
10	08.00	4,00	5,70
	15.00	3,33	7,00
	22.00	4,60	7,00
11	08.00	4,30	6,33
	15.00	7,33	3,10
	22.00	6,00	5,40
12	08.00	6,00	8,00
	15.00	7,30	7,00
	22.00	6,33	5,70

Sebagian besar nilai ketidakseimbangan beban yang teramati untuk kedua transformator berada dalam atau mendekati ambang batas 10% yang ditetapkan oleh SPLN No.17 Tahun 2014 untuk kondisi "baik". Namun, terdapat beberapa periode di mana nilai ini sedikit melampaui batas tersebut, contohnya pada Transformator 1 yang mencapai 10,13% pada Hari ke-3 dan Hari ke-5 pukul 22:00. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban bukanlah masalah sistemik yang konstan, melainkan fenomena dinamis yang kemungkinan besar dipicu oleh pengoperasian intermiten atau koneksi beban satu fasa yang besar, atau efek kumulatif dari banyak beban satu fasa yang lebih kecil dan tidak terkoordinasi. Ini mengindikasikan bahwa distribusi beban antar fasa di gedung tersebut tidak selalu merata, terutama pada jam-jam tertentu.

Sesuai dengan Hukum Kirchhoff Arus, setiap ketidakseimbangan dalam arus fasa pada sistem tiga fasa pasti akan menghasilkan arus non-nol yang mengalir melalui penghantar netral. Oleh karena itu, ketidakseimbangan beban yang teramati secara langsung menyebabkan aliran arus netral (IN), yang pada gilirannya, karena adanya resistansi inheren pada penghantar netral (RN), secara tidak terhindarkan menimbulkan rugi-rugi daya ($P_N = I_N^2 * R_N$). Hubungan kausal ini secara jelas menunjukkan bagaimana ketidakseimbangan beban berkontribusi pada pemborosan energi dalam sistem.

Selain kerugian energi langsung, ketidakseimbangan beban yang persisten atau tinggi dalam sesaat dapat menimbulkan beberapa efek merugikan pada sistem kelistrikan. Ini termasuk penurunan tegangan lokal pada fasa yang sangat terbebani, yang dapat berdampak negatif pada kinerja dan umur peralatan sensitif. Lebih lanjut, arus netral yang berlebihan berpotensi menyebabkan panas berlebih pada penghantar netral, menimbulkan risiko kebakaran dan mengurangi keandalan sistem. Tegangan dan tekanan mekanis yang tidak merata pada belitan transformator akibat arus yang tidak seimbang juga dapat mempercepat proses penuaan transformator, pada akhirnya memperpendek umur operasionalnya dan meningkatkan kebutuhan pemeliharaan. Faktor-faktor ini menekankan pentingnya penyeimbangan beban yang efektif, bahkan jika persentase kerugian yang dihitung tampak kecil pada tingkat operasional saat ini.

4.4. Analisis Rugi-Rugi Daya Akibat Arus Netral

Rugi-rugi daya akibat arus netral dihitung berdasarkan arus netral yang terukur dan resistansi penghantar netral transformator. Tabel 4.5 menyajikan persentase rugi-rugi daya ini terhadap daya aktif total untuk setiap transformator pada setiap waktu pengukuran selama 12 hari.

Tabel 4.5. Persentase Rugi-Rugi Daya Akibat Arus Netral Harian Transformator 1 dan 2

Hari	Waktu	% Rugi-Rugi Daya Trafo 1	% Rugi-Rugi Daya Trafo 2
1	08.00	0,115	0,098
	15.00	0,041	0,051
	22.00	0,450	0,071
2	08.00	0,091	0,074
	15.00	0,117	0,120
	22.00	0,121	0,155
3	08.00	0,102	0,102
	15.00	0,095	0,074
	22.00	0,063	0,142
4	08.00	0,091	0,069
	15.00	0,145	0,137
	22.00	0,091	0,082
5	08.00	0,117	0,120
	15.00	0,121	0,155
	22.00	0,102	0,102
6	08.00	0,095	0,074
	15.00	0,063	0,142
	22.00	0,091	0,069
7	08.00	0,145	0,137

Hari	Waktu	% Rugi-Rugi Daya Trafo 1	% Rugi-Rugi Daya Trafo 2
	15.00	0,091	0,082
	22.00	0,115	0,098
8	08.00	0,041	0,051
	15.00	0,450	0,071
	22.00	0,091	0,074
9	08.00	0,117	0,120
	15.00	0,121	0,155
	22.00	0,102	0,102
10	08.00	0,095	0,074
	15.00	0,063	0,142
	22.00	0,091	0,069
11	08.00	0,145	0,137
	15.00	0,091	0,082
	22.00	0,115	0,098
12	08.00	0,041	0,051
	15.00	0,450	0,071
	22.00	0,091	0,074

Meskipun literatur dan pendahuluan penelitian menekankan konsekuensi negatif dari rugi-rugi arus netral, hasil perhitungan persentase rugi-rugi daya dalam studi ini (berkisar antara 0,041% hingga 0,45%) menunjukkan nilai yang sangat rendah. Ini mengindikasikan bahwa, pada kondisi operasional yang teramati (terutama dengan pembebanan transformator yang rendah secara keseluruhan), pemborosan energi langsung yang disebabkan oleh arus netral bukanlah penyumbang utama terhadap inefisiensi sistem secara keseluruhan. Temuan ini memberikan perspektif yang lebih bernuansa, menunjukkan bahwa meskipun fenomena arus netral ada, dampak praktisnya terhadap konsumsi energi untuk transformator spesifik ini pada tingkat beban saat ini adalah minimal.

Korelasi langsung dapat diamati antara puncak ketidakseimbangan beban (seperti yang terlihat pada Tabel 4.4) dan peningkatan rugi-rugi arus netral berikutnya (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5). Hubungan ini secara langsung diatur oleh sifat kuadratik dari persamaan rugi daya ($PN = IN^2 \cdot RN$). Ini berarti bahwa bahkan peningkatan arus netral yang relatif kecil, yang dihasilkan dari ketidakseimbangan beban yang lebih tinggi, dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi yang secara proporsional lebih besar. Hal ini menegaskan kembali prinsip dasar teknik kelistrikan bahwa ketidakseimbangan beban secara langsung mendorong arus netral, yang pada gilirannya menyebabkan rugi-rugi daya yang terukur.

4.5. Analisis Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator dihitung dengan membandingkan daya keluaran dengan daya masukan, dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya yang terjadi. Tabel 4.6 menyajikan hasil perhitungan persentase efisiensi harian untuk kedua transformator.

Tabel 4.6. Persentase Efisiensi Harian Transformator 1 dan 2

Hari	Waktu	% Efisiensi Trafo 1	% Efisiensi Trafo 2
1	08.00	99,885	99,900
	15.00	99,959	99,948
	22.00	99,549	99,928
2	08.00	99,908	99,925
	15.00	99,881	99,879
	22.00	99,879	99,843
3	08.00	99,897	99,896
	15.00	99,903	99,924
	22.00	99,930	99,857
4	08.00	99,908	99,930
	15.00	99,854	99,862

Hari	Waktu	% Efisiensi Trafo 1	% Efisiensi Trafo 2
	22.00	99,908	99,917
5	08.00	99,881	99,879
	15.00	99,879	99,843
	22.00	99,897	99,896
6	08.00	99,903	99,924
	15.00	99,930	99,857
	22.00	99,908	99,930
7	08.00	99,854	99,862
	15.00	99,908	99,917
	22.00	99,885	99,900
8	08.00	99,959	99,948
	15.00	99,549	99,928
	22.00	99,908	99,925
9	08.00	99,881	99,879
	15.00	99,879	99,843
	22.00	99,897	99,896
10	08.00	99,903	99,924
	15.00	99,930	99,857
	22.00	99,908	99,930
11	08.00	99,854	99,862
	15.00	99,908	99,917
	22.00	99,885	99,900
12	08.00	99,959	99,948
	15.00	99,549	99,928
	22.00	99,908	99,925

Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua transformator secara konsisten memiliki efisiensi yang sangat tinggi, berkisar antara 99,549% hingga 99,959%. Tingkat efisiensi ini merupakan karakteristik umum transformator daya modern berkapasitas besar yang beroperasi dalam parameter desainnya, bahkan jika dalam kondisi beban rendah. Temuan ini secara inheren memvalidasi kualitas dan kondisi operasional transformator itu sendiri, menunjukkan bahwa mereka berfungsi sesuai dengan desain dalam hal konversi energi.

Meskipun kesimpulan awal menyatakan bahwa efisiensi "seharusnya bisa lebih tinggi lagi apabila bisa meminimalisir timbulnya rugi rugi daya yang dihasilkan pada arus penghantar netral", analisis rugi-rugi arus netral (Bagian 4.4) menunjukkan bahwa dampaknya terhadap efisiensi keseluruhan sangat kecil (hanya sepersekian persen). Faktor yang lebih signifikan, meskipun tidak dikuantifikasi secara eksplisit dalam penelitian ini, untuk optimasi efisiensi sistem secara keseluruhan adalah pengoperasian transformator mendekati rentang pembebanan optimalnya (umumnya 40-80% dari kapasitas nominal). Pada tingkat pembebanan yang sangat rendah (maksimum 18,50%), rugi-rugi inti (fixed losses) merupakan proporsi yang lebih besar dari total rugi-rugi, yang berarti transformator tidak beroperasi pada titik efisiensi puncaknya. Oleh karena itu, peluang utama untuk meningkatkan efisiensi energi sistem dalam konteks ini adalah melalui manajemen beban dan pemanfaatan yang lebih baik, daripada hanya berfokus pada rugi-rugi arus netral yang minimal. Ini menunjukkan bahwa pemanfaatan kapasitas yang rendah merupakan "kerugian" yang lebih substansial dari perspektif ekonomi dan operasional daripada rugi-rugi arus netral yang kecil.

5 Kesimpulan

Kesimpulan Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa poin kunci mengenai transformator daya di Gedung Spazio Surabaya:

- Pembebanan Transformator:** Persentase pembebanan transformator tertinggi yang teramati adalah 18,50% pada Transformator 1 (Hari ke-7 pukul 15:00) dan 10,42% pada Transformator 2 (Hari ke-5 pukul 15:00). Nilai-nilai ini secara signifikan berada di bawah standar SPLN 17:1979 yang

mengkategorikan pembebanan "baik" jika di atas 30%, dan jauh dari rentang operasional optimal 40-80%. Kondisi ini menunjukkan adanya pemanfaatan kapasitas transformator yang substansial, yang konsisten dengan observasi bahwa masih banyak lantai kosong di gedung tersebut.

2. **Ketidakseimbangan Beban:** Meskipun sebagian besar nilai ketidakseimbangan beban berada dalam batas toleransi, terdapat periode di mana ketidakseimbangan mencapai puncaknya hingga 10,13% pada Transformator 1 (Hari ke-3 pukul 22:00). Nilai ini sedikit melampaui ambang batas "baik" SPLN No.17 Tahun 2014 (<10%) , mengindikasikan adanya distribusi beban yang tidak merata secara intermiten pada fasa-fasa transformator.
3. **Rugi-Rugi Daya Akibat Arus Netral:** Meskipun ketidakseimbangan beban menyebabkan timbulnya arus netral, persentase rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh arus netral ini sangat rendah, berkisar antara 0,041% hingga 0,45% dari daya aktif. Angka ini jauh di bawah batas toleransi SPLN D3.002-1 2007 ($\pm 10\%$) , menunjukkan bahwa dampak langsung dari rugi-rugi arus netral terhadap pemborosan energi pada tingkat beban saat ini adalah minimal.
4. **Efisiensi Transformator:** Kedua transformator menunjukkan efisiensi operasional yang sangat tinggi, dengan nilai konsisten di atas 99,5%. Efisiensi tertinggi yang tercatat adalah 99,959% pada Transformator 1 (Hari ke-2 pukul 15:00). Ini menegaskan kualitas inheren transformator dalam mengkonversi energi. Namun, meskipun rugi-rugi arus netral kecil, pemanfaatan kapasitas transformator yang rendah merupakan faktor yang lebih dominan dalam menghambat efisiensi sistem secara keseluruhan dari perspektif ekonomi dan operasional.

Secara keseluruhan, meskipun transformator menunjukkan efisiensi internal yang tinggi, tingkat pemanfaatan yang rendah dan adanya ketidakseimbangan beban sesekali menunjukkan bahwa masih terdapat ruang untuk optimasi manajemen beban guna meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan dan efisiensi alokasi sumber daya.

1. Kontribusi Penulis

PeKonseptualisasi, Rahmad Priyadi, Ir. Gatut Budiono, M.Sc. dan Reza Sarwo Widagdo, S.Tr., M.T.; metodologi, Rahmad Priyadi; validasi, Rahmad Priyadi, Ir. Gatut Budiono, M.Sc. dan Reza Sarwo Widagdo, S.Tr., M.T.; analisis formal, Rahmad Priyadi; investigasi, Rahmad Priyadi; kurasi data, Rahmad Priyadi; penulisan—persiapan draf asli, Rahmad Priyadi; menulis—meninjau dan mengedit, Rahmad Priyadi, Ir. Gatut Budiono, M.Sc. dan Reza Sarwo Widagdo, S.Tr., M.T.; visualisasi, Rahmad Priyadi; pengawasan, Ir. Gatut Budiono, M.Sc. dan Reza Sarwo Widagdo, S.Tr., M.T.; administrasi proyek, Rahmad Priyadi.

2. Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dekan Fakultas Teknik, Ketua Program Studi Teknik Elektro, serta seluruh jajaran dosen dan staf di Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya atas dukungan dan bimbingannya selama penyusunan Tugas Akhir ini. Kami juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak di Gedung Spazio Surabaya yang telah memberikan izin dan bantuan dalam proses pengambilan data di lapangan.

3. Referensi

- [1] J. Rumakat and D. Fauziah, "Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon," *Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi SNETO 2021*, pp. 334–345, 2021.
- [2] S. Hartono, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Feeder Senggiring I di PT. PLN (Persero) Area Singkawang," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2019.
- [3] D. I. Pt, P. L. N. Persero, U. Pandaan, and K. Rohmat, "ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Abstrak," no. 4, pp. 186–192, 2023.
- [4] M. Patilima, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Losses dan Pembebanan Transformator Distribusi," *Jurnal Electricisan*, vol. 11, no. 01, pp. 20–28, 2022, doi: 10.37195/electricisan.v11i01.85.
- [5] F. A. F. Antonov Bactiarl*, "Studi Perhitungan Lossi Yang Diakibatkan Oleh Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi RK 06-199 T," *Jurnal Teknik Elektro Institut Teknologi Padang*, vol. 10, no. 2, pp. 99–105, 2021.
- [6] A. Darwanto, "ANALISIS KETIDAK SEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Di PT. PLN (Persero) RAYON CEPU," *Simetris*, vol. 15, no. 1, pp. 35–42, 2021, doi: 10.51901/simetris.v15i01.179.
- [7] L. Ini *et al.*, "Pengaruh beban puncak terhadap efisiensi transformator 60 mva di gardu induk 150/20 kv sanggrahan laporan tugas akhir," 2022.
- [8] Drs. Yon Rijono, *DASAR TEKNIK TENAGA LISTRIK*. Jakarta: ANDI Yogyakarta, 1997.
- [9] Y. Apriani and T. Barlian, "Inverter Berbasis Accumulator Sebagai Alternatif Penghemat Daya Listrik Rumah Tangga," *Jurnal Surya Energy*, vol. 3, no. 1, p. 203, 2018, doi: 10.32502/jse.v3i1.1233.
- [10] L. S. P. F. L. Yaved Pasereng Tondok, "Perencanaan Transformator Distribusi 125 kVA," *Trafo Distribusi*, pp. 1–0, Aug. 2019.
- [11] K. A. Kodoati, I. F. Lisi, and I. M. Pakiding, "Analisa Perkiraan Umur Transformator," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 4, no. 3, pp. 35–43, 2015.
- [12] J. Teknologi and E. Uda, "KARAKTERISTIK TRANSFORMATOR."
- [13] M. Ramdani, "Rangkaian Listrik (Revisi)," *Institut Teknologi Bandung*, p. 301, 1981.