

Pengaruh Variasi Pembebanan Pada Kinerja Transformator 60 MVA di PT. PLN Gardu Induk Keramasan

Moh. Wahyu Aminullah^{1*}, Legi Putra², Alisha Gita Gumilang³, Muhammad Hurairah⁴

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti

⁴Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang

m.wahyuaminullah@gmail.com^{1*}, legiiputraa@gmail.com², alishagitag@gmail.com³, m.hurairah.st@gmail.com⁴

Received 2 Februari 2026 | Revised 9 Maret 2026 | Accepted 12 Maret 2026

ABSTRAK

Gardu Induk Keramasan melayani sistem distribusi tenaga listrik dengan pola pembebanan yang bersifat fluktuatif setiap harinya. Fluktuasi beban tersebut berpotensi menimbulkan rugi-rugi daya pada transformator, yang selanjutnya menghasilkan panas dan dapat memengaruhi nilai efisiensi operasional transformator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh fluktuasi beban terhadap efisiensi transformator tenaga berkapasitas 60 MVA pada transformator 150/20 kV di Gardu Induk Keramasan. Metode penelitian yang digunakan meliputi identifikasi dan perumusan masalah, studi literatur dari berbagai sumber ilmiah dan laporan teknis, serta observasi langsung di lapangan untuk memperoleh data pembebanan harian, daya input, dan daya output transformator. Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun terjadi fluktuasi beban, pengaruhnya terhadap efisiensi transformator relatif kecil dan tidak signifikan. Nilai efisiensi tertinggi tercatat pada minggu ke-4 yaitu sebesar 98,59% dengan daya input 7828,77 kW, sedangkan nilai efisiensi terendah tercatat pada minggu ke-2 sebesar 98,46% dengan daya input 7198,74 kW, sehingga terjadi penurunan sebesar 0,14%. Rata-rata efisiensi transformator selama periode pengamatan adalah 98,56%. Jika dibandingkan dengan standar efisiensi transformator tenaga menurut SPLN 61:1997 yang ditetapkan oleh PLN, yaitu sebesar $\geq 98,6\%$ pada kondisi beban nominal untuk transformator daya besar, maka nilai rata-rata hanya berbeda sedikit dibawah standar sebesar 0,04%. Secara umum kondisi operasional transformator 60 MVA di Gardu Induk Keramasan masih tergolong baik dan andal dalam mendukung sistem distribusi tenaga listrik.

Kata kunci: Transformator, Efisiensi, Pengaruh Pembebanan

The Keramasan Substation serves an electric power distribution system with a charging pattern that fluctuates every day. Such load fluctuations have the potential to cause power losses in the transformer, which in turn generates heat and can affect the transformer's operational efficiency value. This study aims to analyze the effect of load fluctuations on the efficiency of power transformers with a capacity of 60 MVA on 150/20 kV transformers at the Keramasan Substation. The research methods used include problem identification and formulation, literature study from various scientific sources and technical reports, and direct observation in the field to obtain data on daily loading, input power, and transformer output power. The results of the analysis showed that despite the fluctuations in loads, the effect on transformer efficiency was relatively small and insignificant. The highest efficiency value was recorded in the 4th week which was 98.59% with an input power of 7828.77 kW, while the lowest efficiency value was recorded in the 2nd week of 98.46% with an input power of 7198.74 kW, resulting in a decrease of 0.14%. The average efficiency of the transformer during the observation period was 98.56%. When adjusted to the power transformer efficiency standard according to SPLN 61:1997 set by PLN, which is $\geq 98.6\%$ at the nominal load condition for large power transformers, where the average value is only slightly below the standard of 0.04%. In general, the operational condition of the 60 MVA transformer at the Keramasan Substation is still relatively good and reliable in supporting the electric power distribution system.

Keywords: Transformator, Efficiency, Loading Effect

I. PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu mesin listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mengubah tingkat tegangan tanpa mengubah frekuensi sistem tenaga listrik (Wijaya, 2001). Transformator daya merupakan komponen utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi mengubah tingkat tegangan untuk mendukung proses transmisi dan distribusi energi listrik. Kinerja transformator sangat menentukan keandalan sistem tenaga, sehingga efisiensi transformator menjadi parameter penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. Efisiensi transformator dipengaruhi oleh rugi-rugi inti, rugi-rugi tembaga, harmonisa, serta tingkat pembebanan selama operasi (Setijasa & Triyono, 2023; Djufri, 2022). Variasi pembebanan transformator dapat memengaruhi rugi-rugi daya dan nilai efisiensi secara

signifikan (Fadilah I, 2023). Beban tinggi meningkatkan rugi tembaga akibat arus pada belitan, sedangkan pada kondisi beban rendah rugi inti menjadi dominan sehingga efisiensi tidak optimal (Pratama, 2023). Selain itu, fluktuasi pembebanan dapat meningkatkan temperatur operasi transformator dan mempercepat degradasi isolasi yang berdampak pada penurunan umur pakai transformator (Mustafa, 2024).

Penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh pembebanan terhadap kinerja transformator, di antaranya (Tiasmoro et al., 2023) yang menunjukkan pengaruh pembebanan terhadap efisiensi dan susut umur transformator step-up, (Widagdo dan Andriawan, 2024) yang melaporkan peningkatan rugi-rugi akibat ketidakseimbangan beban, serta (Mukti et al., 2023) yang menyatakan bahwa fluktuasi beban dapat menyebabkan overheating dan menurunkan keandalan sistem distribusi. Namun, sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada temperatur dan umur transformator, sedangkan kajian kuantitatif hubungan pembebanan dan efisiensi transformator daya berbasis data operasional riil masih terbatas, khususnya pada Gardu Induk Keramasan (Wardhana et al., 2023).

Transformator daya 60 MVA di PT PLN (Persero) Gardu Induk (GI) Keramasan berperan penting dalam menyalurkan energi listrik dengan pola pembebanan yang fluktuatif, yang dapat menimbulkan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pembebanan terhadap efisiensi transformator daya 60 MVA di Gardu Induk Keramasan. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis hubungan kuantitatif antara tingkat pembebanan dan efisiensi transformator berdasarkan data operasional aktual, identifikasi titik pembebanan optimum yang menghasilkan efisiensi maksimum, serta penyusunan rekomendasi teknis pengoperasian transformator untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem tenaga listrik. Dalam praktik operasional, pengoperasian dan pemeliharaan transformator tenaga mengacu pada pedoman teknis dan standar yang ditetapkan oleh PT PLN (Persero), termasuk ketentuan spesifikasi dan batas efisiensi transformator tenaga (PT PLN (Persero), 2014; Standar PLN, 1997).

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus pada transformator daya 60 MVA di PT PLN (Persero) Gardu Induk Keramasan. Penelitian ini bersifat observasional dan non-eksperimental, karena data diperoleh dari kondisi operasional nyata tanpa memberikan perlakuan khusus pada objek penelitian. Tahapan penelitian meliputi identifikasi dan perumusan masalah, studi literatur dari jurnal ilmiah, buku, dan sumber lainnya, serta pengumpulan data melalui observasi dan survei langsung ke lapangan. Penelitian dilaksanakan selama periode Mei hingga Agustus 2025. Data yang dikumpulkan berupa data pembebanan, tegangan, arus, dan parameter operasi transformator lainnya yang diperoleh dari sistem monitoring dan laporan operasional gardu induk. Data numerik tersebut dianalisis menggunakan perhitungan efisiensi transformator berdasarkan rugi-rugi daya untuk mengetahui pengaruh pembebanan terhadap efisiensi transformator serta menentukan kondisi pembebanan yang optimal.

A. Metode Perhitungan

Metode perhitungan dalam penelitian ini dilakukan dengan menghitung efisiensi transformator berdasarkan parameter pembebanan dan rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator. Efisiensi transformator dihitung sebagai perbandingan antara daya keluaran dan total daya masuk dengan mempertimbangkan rugi-rugi inti (*core loss*) dan rugi-rugi tembaga (*copper loss*). Rugi-rugi inti diasumsikan konstan terhadap variasi pembebanan, sedangkan rugi-rugi tembaga dihitung berdasarkan kuadrat arus beban transformator (Santos et al., 2018; Li et al., 2020).

Data pembebanan berupa tegangan, arus, dan daya aktif digunakan untuk menentukan daya keluaran transformator, sedangkan data rugi-rugi diperoleh dari spesifikasi teknis transformator dan hasil pengukuran lapangan. Selanjutnya, efisiensi transformator dianalisis pada berbagai tingkat pembebanan untuk mengetahui pengaruh pembebanan terhadap nilai efisiensi serta menentukan kondisi pembebanan optimum yang menghasilkan efisiensi maksimum (Zhang et al., 2019; Yasa et al., 2024). Perhitungan efisiensi transformator dilakukan dengan membandingkan daya keluaran terhadap daya masukan dengan memperhitungkan rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga. Pendekatan ini umum digunakan dalam analisis kinerja transformator daya (Zuhal, 1995).

1. Perhitungan Pembebanan Transformator

Transformator yang berada dalam kondisi bertegangan tanpa beban tetap mengalami rugi-rugi daya, namun panas yang dihasilkan relatif kecil. Ketika transformator mulai dibebani, peningkatan arus pada kumparan menyebabkan kenaikan temperatur pada belitan dan minyak transformator seiring dengan bertambahnya tingkat pembebanan. Pembebanan yang bersifat fluktuatif dapat menimbulkan rugi-rugi pada transformator sehingga menyebabkan nilai efisiensi menjadi berkurang. Untuk mengetahui fluktuatif beban

tersebut bisa dirumuskan dengan K adalah Rasio Pembebanan, dimana perhitungan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$K = \frac{S}{Sr} \quad (1)$$

Pembebanan transformator merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja peralatan tenaga listrik, yang dinyatakan sebagai perbandingan antara daya semu beban (S) terhadap kapasitas nominal transformator (Sr). Rasio ini menunjukkan tingkat pemanfaatan transformator dalam sistem distribusi tenaga listrik. Semakin tinggi nilai pembebanan, semakin besar arus yang mengalir pada kumparan transformator, yang secara langsung mempengaruhi kenaikan temperatur operasi. Menurut Santoso et al. (2023), kondisi pembebanan yang mendekati atau melampaui kapasitas nominal akan menyebabkan peningkatan temperatur pada lilitan, sehingga mempercepat degradasi material isolasi.

Lebih lanjut, Latuny et al. (2021) menjelaskan bahwa peningkatan temperatur akibat overloading tidak hanya berdampak pada penurunan umur pakai transformator, tetapi juga meningkatkan rugi-rugi daya, baik rugi tembaga (*copper loss*) maupun rugi inti (*core loss*). Hal ini pada akhirnya dapat menurunkan efisiensi sistem serta meningkatkan risiko kegagalan operasi.

Transformator memiliki standar ketentuan dari PT. PLN (Persero) mengenai rugi-rugi maupun efisiensi serta pengaturan tegangan. Nilai rugi-rugi pada transformator yang digunakan pada gardu induk yakni berdasarkan pada acuan standar dari SPLN 61 : 1997 Tentang “Spesifikasi Transformator Tenaga Tegangan Tinggi”. Data hasil rugi tembaga dan inti trafo dapat ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Data Hasil Rugi Tembaga dan Inti Trafo

No	Tag Number	Rate Power (MVA)	Voltage (kV)	Load Losses (kW)	No Load Losses (kW)
1	P060LEC777 - 02	60	150/20	110	28,25

2. Daya Pembebanan

Daya pembebanan pada transformator umumnya dinyatakan dalam bentuk daya semu (S), yang merupakan kombinasi dari daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Hubungan antara ketiga parameter tersebut dinyatakan dengan persamaan:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

di mana P merupakan daya aktif yang digunakan oleh beban untuk melakukan kerja nyata, sedangkan Q merupakan daya reaktif yang dibutuhkan untuk membentuk medan magnet pada peralatan listrik. Daya semu S menunjukkan kapasitas total yang harus disuplai oleh transformator dan menjadi dasar dalam penentuan pembebanan transformator, karena kapasitas transformator ditentukan berdasarkan nilai daya semu dalam satuan kVA atau MVA. Parameter ini menunjukkan kapasitas total daya yang harus disuplai oleh sumber dan peralatan listrik, termasuk transformator dan jaringan distribusi. Analisis segitiga daya penting dalam evaluasi pembebanan sistem dan kualitas daya karena daya reaktif meskipun tidak menghasilkan kerja nyata tetap mempengaruhi arus dan kapasitas peralatan listrik (Siregar & Hidayat, 2021).

3. Efisiensi Transformator

Efisiensi menunjukkan tingkat keefisienan suatu transformator yang merupakan perbandingan antara daya keluaran dari transformator (out) dengan daya masukan dari transformator (in). Efisiensi transformator dapat dirumuskan dengan rumus sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana η adalah Efisiensi transformator (%), P_{out} adalah Daya keluaran transformator (W), dan P_{in} adalah Daya masukan transformator (W).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pembebanan didapatkan berdasarkan *logsheet* 1 Agustus 2025 Transformator Daya 150/20 kV 60 MVA GI Keramasan dimana transformator dilihat dari dua sisi yaitu sisi 150 KV dan sisi 20 KV, dengan masing-masing sisi terdapat nilai arus dan tegangan yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Logsheets 1 Agustus 2023 Transformator Daya 150/20 kV 60 MVA GI Keramasan

Jam	Transformator 60 MVA 150 kV/20 kV											Pemakaian Sendiri			
	Sisi 150 kV				Sisi 20 kV				Suhu Lilitan	Suhu Minyak	Posisi Sapadan	Tegangan AC	Arus Phasa		
	Arus	Tegangan	Arus	Tegangan	Daya Nyata		Daya Samar						R	S	T
					+	-	+	-							
	A	kV	A	kV	MW	MW	MVAR	MVAR	°C	°C	TAP	kV	A	A	A
00.00	52	153	415	20,8	13,4		3,8		57	57	11	384	40	69	17
05.00	46	153	331	20,9	11,5		3,4		54	54	11	384	40	69	17
10.00	76	149	590	20,3	18,2		6,9		53	53	11	384	25	56	25
15.00	75	149	556	20,3	18,4		6,3		58	58	11	384	25	56	25
20.00	62	151	457	20,7	15,8		4,3		60	60	11	382	38	62	15
21.00	61	152	445	20,5	15,3		4,3		59	59	11	382	38	62	15
24.00	50	153	348	20,9	12,1		3,9		58	58	11	382	38	62	15

Dengan mengetahui daya nyata dan daya reaktif yang terdapat pada data *logsheets* dari Gardu Induk Keramasan, Data per jam terdapat pada logsheet yang dapat dilihat pada Tabel 2 maka dapat diketahui nilai *S* dengan menggunakan persamaan (2) sehingga hasil yang diperoleh sebagai berikut:

$$S = \sqrt{14,17^2 + 4,48^2}$$

$$S = 14,88 \text{ MVA}$$

Nilai 14,88 merupakan hasil penjumlahan rata-rata daya nyata dan daya reaktif 24 jam dalam 1 hari. Setelah didapat nilai rata-rata 24 jam dalam 1 hari, lalu dilakukan perhitungan nilai rata rata pada bulan agustus dengan menggunakan persamaan (2). Tabel 3 menunjukkan rasio pembebanan (*K*) dalam 1 hari untuk melihat faktor beban fluktuatif, lalu dilakukan perhitungan nilai rata rata pada 28 hari di bulan agustus 2025 dengan menggunakan persamaan (1) seperti yang terdapat pada berdasarkan naik turunnya pembebanan pada Tabel 4.

Tabel 3. Pembebanan 1 Hari Transformator 150/20 kV 60 MVA Pada GI Keramasan

Jam	P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)	K	COS ϕ
00.00-06.00	12,20	3,54	12,71	0,21	0,96
07.00- 12.00	14,00	5,25	14,97	0,25	0,94
13.00- 18.00	16,33	5,37	17,21	0,29	0,95
19.00- 24.00	14,40	4,06	14,96	0,25	0,96
Rata-Rata	14,23	4,56	14,96	0,25	0,95

Tabel 4. Pembebanan 1 Bulan Transformator 150/20 kV 60 MVA Pada GI Keramasan

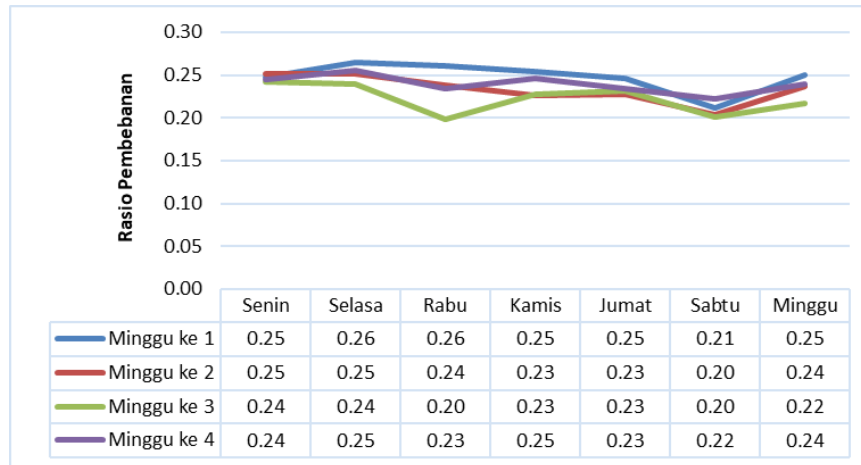
	Minggu ke-1	Minggu ke-2	Minggu ke-3	Minggu ke-4
P (MW)	14,11	13,35	12,75	13,71
Q (MVAR)	4,65	4,16	3,83	4,24
S (MVA)	14,87	14,01	13,34	14,37
K	0,25	0,23	0,22	0,24
COS ϕ	0,95	0,95	0,96	0,96

Selanjutnya dilakukan analisis perhitungan rasio pembebanan berdasarkan data yang telah didapat, dengan menggunakan persamaan (1) dimana diperoleh:

$$K = \frac{14,88 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = 0,25$$

Nilai 14,88 didapat dari rata-rata nilai *S*, sedangkan untuk nilai 60 MVA didapat dari nameplate transformator yang terdapat pada spesifikasi transformator daya 150/20 kV 60 MVA GI Keramasan. Dari pembagian pada persamaan (1) didapat hasil *K* yaitu 0,25 MVA seperti yang terdapat pada Tabel 3. Setelah didapat nilai rata-rata 24 jam dalam 1 hari, lalu dilakukan perhitungan nilai rata-rata per-minggu di bulan agustus 2025 dengan menggunakan persamaan (1) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Untuk mempermudah mengetahui faktor beban fluktuatifnya maka dapat dilihat rata-rata rasio berdasarkan Tabel 4, pembebanan Minggu ke 1 sampai 4 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Rasio Pembebanan pada Minggu ke 1 Sampai 4

Selanjutnya dilakukan perhitungan efisiensi pada transformator dilakukan menggunakan nilai rata rata pembebanan pada bulan agustus 2025 Tabel 4. Perhitungan daya input P_{in} dilakukan menggunakan arus primer, tegangan primer yang terdapat pada Tabel 5. dan $\cos \phi$ pada Tabel 4. Dimana untuk mengetahui nilai Efisiensi transformator maka diperlukan nilai daya input yang bisa didapat menggunakan persamaan:

$$P_{in} = V_{in} \times I_p \times \cos \phi \quad (4)$$

$$P_{in} = 151,4 \times 57,6 \times 0,95$$

$$P_{in} = 8304,5 \text{ kW}$$

Setelah daya input diketahui dan rugi rugi tembaga dilihat pada Tabel 1 maka dilanjutkan perhitungan efisiensi dengan menggunakan persamaan (3) sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{in} - \text{Rugi tembaga}}{P_{in}} \times 100\%$$

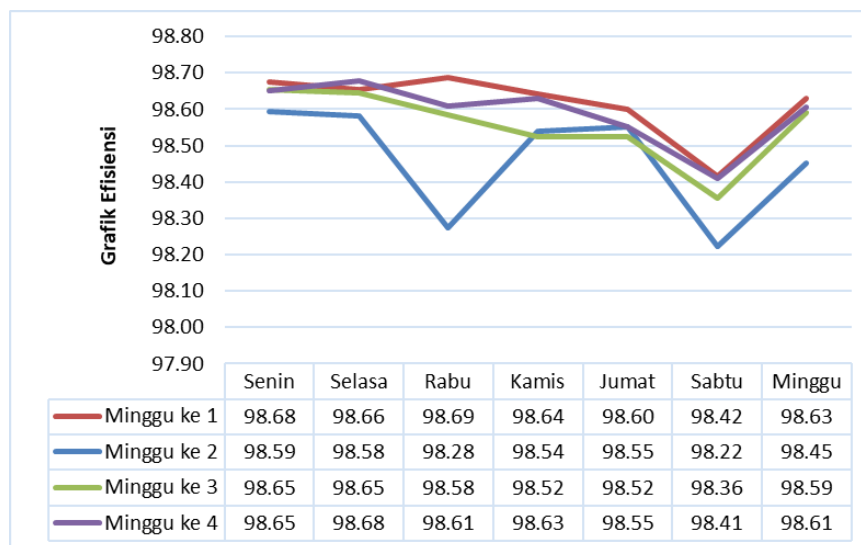
$$\eta = \frac{8304,5 - 110,0}{8304,5} \times 100\%$$

$$\eta = 98,68 \%$$

Setelah didapat nilai rata-rata efisiensi transformator dengan surasi 24 jam dalam 1 hari, kemudian dilakukan perhitungan nilai rata rata efisiensi transformator pada 28 hari di bulan agustus 2025 dengan menggunakan persamaan (3) dan didapatlah nilai efisiensi dalam bulan agustus seperti yang terdapat pada Tabel 5.

Tabel 5. Efisiensi Transformator 150/20 kV 60 MVA Pada GI Keramasan selama 1 Bulan

	Minggu ke-1	Minggu ke-2	Minggu ke-3	Minggu ke-4	Rata-Rata
I_p (A)	55,14	49,79	52,20	53,99	52,78
V_p (kV)	152,44	151,56	153,06	152,13	152,30
P_{in} (kW)	7696,63	7198,74	7637,70	7828,77	7590,46
P_{cu} (kW)	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00
η (%)	98,62	98,46	98,55	98,59	98,56



Gambar 2. Grafik Efisiensi Transformator pada Minggu ke 1-4

Hasil perhitungan rasio pembebanan pada transformator daya 150/20 kV 60 MVA dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 1 berdasarkan data yang didapat dari Tabel 3 dan Tabel 4, bahwa besar faktor beban fluktuatif berpengaruh pada efisiensi transformator akan tetapi pengaruh tersebut tidak signifikan karena dilihat pada grafik rasio pembebanan, Nilai rasio pembebanan paling rendah yang menunjukkan angka 0,20 pada tanggal 17 Agustus 2025 nilai efisiensinya pada tanggal yang sama yakni 98,58%, Sedangkan efisiensi transformator paling rendah terdapat pada 13 Agustus 2025 dengan nilai paling rendah yakni 98,22% diangka rasio pembebanan 0,24.

Hasil analisis efisiensi transformator ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan data pengukuran, efisiensi tertinggi tercatat pada tanggal 3 Agustus 2025 dengan nilai sebesar 98,69% pada daya input 8.383,3 kW. Sebaliknya, efisiensi terendah terjadi pada tanggal 13 Agustus 2025 dengan nilai sebesar 98,22% pada daya input 6.192,9 kW. Secara keseluruhan, rata-rata efisiensi transformator selama bulan Agustus mencapai 98,57% dengan daya input sebesar 7.670,7 kW. Apabila dibandingkan dengan standar SPLN Transformator 61:1997, efisiensi transformator daya 150/20 kV 60 MVA ditetapkan sebesar 99,57%. Dengan demikian, efisiensi transformator yang beroperasi di Gardu Induk Keramasan masih dapat dikategorikan baik karena selisihnya relatif kecil terhadap standar SPLN. Namun demikian, nilai efisiensi tersebut tetap berada di bawah standar yang telah ditentukan, sehingga menunjukkan adanya potensi penurunan kinerja yang perlu diperhatikan dalam evaluasi lebih lanjut.

IV. KESIMPULAN

Faktor beban pada Gardu Induk Keramasan yang bersifat fluktuatif memberikan pengaruh terhadap efisiensi transformator, meskipun dampaknya tidak signifikan. Variasi efisiensi hanya berkisar antara 0,20 pada rasio pembebanan terendah hingga 0,24 pada rasio pembebanan tertinggi, yang menunjukkan bahwa perubahan beban tidak menyebabkan penurunan kinerja yang berarti. Rata-rata efisiensi transformator 150/20 kV 60 MVA selama periode pembebanan bulan Agustus 2025 tercatat sebesar 98,57%. Jika dibandingkan dengan standar efisiensi transformator tenaga berdasarkan SPLN 61:1997 yang ditetapkan oleh PLN, yaitu sebesar $\geq 98,6\%$ pada kondisi beban nominal untuk transformator daya besar, maka nilai rata-rata tersebut berada 0,03% di bawah standar. Adapun nilai efisiensi tertinggi sebesar 98,69% telah melampaui standar SPLN sebesar 0,09%, sedangkan nilai efisiensi terendah sebesar 98,22% berada 0,38% di bawah standar. Secara keseluruhan, meskipun terdapat selisih kecil terhadap nilai acuan SPLN, kinerja transformator masih tergolong baik dan berada dalam batas operasional yang andal.

DAFTAR PUSTAKA

Djufri, I. A. (2022). *Transformator*. Budi Utama.

Fadilah, I. (2023). Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi di PT PLN (Persero) UP3 Garut. *Jurnal Ilmiah Sutet*, 5(2), 45–52.

- 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>
- Latuny, J., Matdoan, A., & Latuconsina, M. (2021). Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Distribusi. *Jurnal Elko: Teknik Elektro*, 6(2), 85–92.
- Li, Y., Wang, Z., & Liu, H. (2020). Loss Analysis and Efficiency Optimization of Power Transformers Under Variable Load Conditions. *Electric Power Systems Research*, 185, 106–119.
- Mukti, H., Sutjipto, R., & Vidiasih. (2023). Efektivitas Mutasi Transformator Dalam Mengatasi Fluktuasi Beban Pada Trafo Distribusi. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 11(2), 98–103.
- Mustafa, A. (2024). Prediction Of Transformer Aging Loss in 150 kV Substation Using GRU-LSTM Method Based on Temperature and Load. *Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 7(2), 76–82.
- Pratama, D. (2023). Load-Dependent Copper Loss Analysis in Educational-Scale Transformers: An Experimental Approach. *Konstan: Jurnal Fisika dan Pendidikan Fisika*, 10(1).
- PT PLN (Persero). (2014). *Pedoman pemeliharaan transformator tenaga*. PT PLN (Persero).
- Santoso, A. H., Rizka, E., & Mukti, H. K. (2023). Analisis Pembebanan Terhadap Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 kV. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 9(3), 145–152.
- Santos, A. C., Ferreira, J. A., & Marques, G. D. (2018). Power Transformer Efficiency Evaluation Considering Load Variation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(5), 2345–2353.
- Setijasa, H., & Triyono. (2023). Perhitungan Efisiensi Transformator. *Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa Dan Sosial*, 19(3), 315–323. <https://doi.org/10.32497/orbith.v19i3.5264>
- Siregar, A., & Hidayat, R. (2021). Analisis Segitiga Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Berbasis IoT. *Jurnal Nasional Komputasi dan Teknologi Informasi*, 4(6), 475–483.
- Standar PLN. (1997). *SPLN 61: Spesifikasi Transformator Tenaga Tegangan Tinggi*. PT PLN (Persero).
- Tiasmoro, I. B., Wirentake, & Topan, P. A. (2023). Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi dan Susut Umur Transformator Step-Up 6 kV/70 kV di PLTU. *Jurnal Tambora*, 5(2).
- Wardhana, W., Azis, A., & Irwansi, Y. (2023). Analisa Penurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Pembebanan dan Temperatur di Gardu Induk Keramasan. *Surya Energy Journal*, 9(1).
- Widagdo, R. S., & Andriawan, A. H. (2024). Analysis of Losses Due to Load Unbalance in Distribution Transformer. *Journal of Engineering and Scientific Research*, 5(2).
- Wijaya, M. (2001). *Dasar-dasar mesin listrik*. Djambatan.
- Zhang, H., Chen, X., & Li, J. (2019). Experimental Investigation of Transformer Losses And Efficiency Under Different Loading Conditions. *IET Electric Power Applications*, 13(8), 1123–1131.
- Zuhal. (1995). *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Gramedia.