



Analisis Perencanaan Mutasi Trafo pada Gardu CMY dengan Metode Least Square untuk Keandalan Sistem Distribusi di PT PLN (Persero) ULP Labuan

Dhita Safira Putri^{1*}, Siti Anisah², Adi Sastra P Tarigan³

¹⁻³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia

*Korespondensi Penulis: dhitasafiraputri007@gmail.com

Abstract. Distribution transformers play a crucial role in delivering electrical energy from the distribution system to consumers to ensure power quality and supply continuity. However, in practice, overload conditions often occur due to increasing demand and load growth that exceed the transformer's rated capacity. This situation can lead to reduced efficiency, increased power losses, and accelerated equipment aging. This study aims to analyze the performance of the CMY distribution transformer at PT PLN (Persero) ULP Labuan, which operates beyond its nominal capacity, and to propose an alternative solution through transformer mutation, namely the replacement of the existing unit with a transformer of more appropriate capacity based on load analysis results. The Least Square Method is employed to predict future load growth and determine the projected time when the transformer will again experience overload after the mutation. The results indicate that the existing 100 kVA transformer is overloaded and should be replaced with a 160 kVA unit. After the mutation, the loading percentage decreases significantly, the transformer's lifespan is extended, and the reliability of the distribution system improves. Furthermore, the Least Square prediction suggests that the new transformer may experience overload again in future years if no further planning is carried out. Therefore, transformer mutation can be considered an effective and medium-term solution to enhance and maintain the reliability of the electrical distribution system within the operational area of PT PLN (Persero) ULP Labuan.

Keywords: Distribution Transformer; Least Square Method; Load Growth Prediction; Overload Analysis; Transformer Replacement

Abstrak. Transformator distribusi memiliki peran yang sangat penting dalam menyalurkan energi listrik dari sistem distribusi ke konsumen agar kualitas dan kontinuitas pasokan listrik tetap terjaga. Namun dalam praktiknya, sering ditemukan kondisi overload pada transformator akibat peningkatan jumlah pelanggan dan pertumbuhan beban yang tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas transformator. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan efisiensi, peningkatan rugi daya, serta mempercepat penurunan umur peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja transformator pada gardu CMY milik PT PLN (Persero) ULP Labuan yang diketahui beroperasi melebihi kapasitas nominalnya, serta mengusulkan alternatif solusi berupa mutasi transformator dengan kapasitas yang lebih sesuai berdasarkan hasil analisis beban. Metode Least Square digunakan untuk memprediksi pertumbuhan beban di masa mendatang dan menentukan proyeksi waktu terjadinya overload kembali setelah dilakukan mutasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa transformator eksisting dengan kapasitas 100 kVA mengalami pembebanan yang melampaui batas nominal, sehingga diperlukan penggantian dengan transformator berkapasitas 160 kVA. Setelah dilakukan mutasi, persentase pembebanan menurun secara signifikan, umur pakai transformator menjadi lebih panjang, dan tingkat keandalan sistem distribusi meningkat. Prediksi menggunakan metode Least Square juga memperkirakan bahwa transformator hasil mutasi akan kembali mengalami overload pada tahun-tahun mendatang apabila tidak dilakukan evaluasi dan perencanaan lanjutan. Dengan demikian, mutasi transformator dapat dikatakan sebagai solusi jangka menengah yang efektif dan strategis untuk menjaga keandalan sistem distribusi listrik di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Labuan.

Kata kunci: Analisis Overload; Metode Least Square; Mutasi Transformator; Prediksi Pertumbuhan Beban; Transformator Distribusi

1. LATAR BELAKANG

Transformator distribusi berfungsi menyalurkan energi dari jaringan distribusi primer ke konsumen pada tegangan rendah, sehingga menjadi salah satu komponen krusial dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik yang stabil dan andal. Keandalan transformator distribusi

sangat menentukan kualitas layanan listrik yang diterima oleh berbagai jenis konsumen, termasuk rumah tangga, industri, dan sektor komersial. Seiring pertumbuhan jumlah pelanggan dan meningkatnya konsumsi energi, transformator distribusi sering menghadapi kondisi pembebanan melebihi kapasitas nominalnya, yang jika berlangsung dalam jangka waktu lama dapat menurunkan efisiensi penyaluran daya, meningkatkan rugi-rugi energi, mempercepat degradasi isolasi, serta memperpendek umur teknis peralatan (**Error! Reference source not found.**). Fenomena ini terjadi pada Gardu CMY di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Labuan, di mana transformator berkapasitas 100 kVA telah beroperasi di atas batas pembebanan standar, sehingga diperlukan tindakan perencanaan yang tepat berupa penggantian trafo dengan kapasitas yang lebih sesuai untuk mengantisipasi risiko overload dan menjaga stabilitas sistem distribusi (. Untuk mendukung pengambilan keputusan yang tepat, diperlukan metode prediksi yang mampu memproyeksikan pertumbuhan beban listrik berdasarkan data historis secara akurat, salah satunya adalah metode Least Square, yang memodelkan hubungan linear antara waktu dan besarnya beban dengan meminimalkan jumlah kuadrat selisih antara data pengamatan dan hasil prediksi (**Error! Reference source not found.**). Dengan penerapan metode ini, tren kenaikan beban dapat diidentifikasi sedini mungkin sehingga penggantian atau mutasi transformator dapat direncanakan secara optimal, tidak hanya untuk mencegah overload saat ini tetapi juga untuk menjaga efisiensi distribusi listrik dalam jangka menengah hingga panjang, sekaligus mempertimbangkan pertumbuhan beban di masa depan. Akurasi peramalan beban melalui pendekatan least squares telah terbukti mampu meningkatkan deteksi dini potensi kelebihan beban pada sistem distribusi, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian terbaru mengenai penerapan metode ILSSVM untuk prediksi beban jangka pendek (Guo et al., 2025). Selain itu, pemanfaatan model prediksi berbasis pembelajaran mesin dan fine-tuning model berparameter efisien juga menunjukkan efektivitas dalam memproyeksikan kinerja transformator distribusi pada kondisi pertumbuhan beban yang dinamis (Zhang et al., 2025). Temuan empiris lain menunjukkan bahwa kondisi overloading yang tidak tertangani secara tepat dapat meningkatkan tingkat kegagalan transformator dan memengaruhi keandalan jaringan distribusi secara keseluruhan (Capulong et al., 2025). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi operasi Transformator Distribusi CMY yang mengalami beban lebih, menentukan kapasitas transformator pengganti yang ideal agar tidak terjadi overload maupun underload, serta mengevaluasi pengaruh penerapan metode Least Square terhadap keandalan dan efisiensi distribusi tenaga listrik dalam jangka menengah.

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan tahap akhir penyaluran energi dari gardu induk ke konsumen dan memegang peran penting dalam menjaga kontinuitas pasokan (**Error! Reference source not found.**). Peningkatan jumlah pelanggan dan pertumbuhan beban yang pesat sering menimbulkan kondisi overload pada transformator distribusi, yang dapat mempercepat penuaan isolasi dan menurunkan efisiensi sistem (**Error! Reference source not found.**). Standar nasional seperti SPLN D3.002-1:2007 menekankan bahwa pembebanan trafo harus dijaga di bawah batas yang ditetapkan agar umur pakai peralatan tetap optimal. Penelitian ini menganalisis kondisi trafo gardu CMY di PT PLN (Persero) ULP Labuan yang mengalami overload, serta mengevaluasi perencanaan mutasi trafo dengan kapasitas lebih besar sebagai solusi peningkatan keandalan distribusi.

Transformator Distribusi

Transformator distribusi adalah peralatan listrik statis yang berfungsi menurunkan tegangan dari tingkat menengah menjadi tegangan rendah yang dapat dimanfaatkan konsumen akhir (**Error! Reference source not found.**). Sebagai komponen penting dalam jaringan distribusi tenaga listrik, transformator ini menghubungkan sistem distribusi primer dengan beban akhir. Prinsip kerjanya didasarkan pada induksi elektromagnetik, di mana tegangan bolak-balik pada kumparan primer menghasilkan fluks magnet yang mengalir melalui inti besi dan kemudian menginduksi tegangan pada kumparan sekunder (

; **Error! Reference source not found.**). Proses ini memungkinkan transfer energi listrik dengan perbedaan tingkat tegangan sesuai perbandingan jumlah lilitan pada kedua kumparan.

Agar kinerjanya andal dan efisien, trafo distribusi memiliki sejumlah karakteristik teknis sebagai berikut :

- a. Kapasitas daya menunjukkan besarnya beban maksimum yang dapat disalurkan tanpa menurunkan umur isolasi. Penentuan kapasitas mempertimbangkan beban puncak, faktor beban, dan proyeksi pertumbuhan energi; operasi di atas batas ini mempercepat degradasi termal.
- b. Sistem pendinginan baik berbasis minyak (ONAN, ONAF, OFAF) maupun *dry type* yang berperan menjaga suhu inti dan lilitan agar tetap aman, terutama saat beban tinggi atau suhu lingkungan ekstrem.
- c. Tegangan operasi, stabilitas tegangan sekunder dijaga melalui *tap changer* manual atau otomatis yang memungkinkan penyesuaian rasio transformasi sehingga tegangan

keluaran tetap dalam toleransi $\pm 5\%$ meski terjadi fluktuasi beban (**Error! Reference source not found.**

- d. Efisiensi beban, dari sisi efisiensi, rugi-rugi utama meliputi kerugian inti yang konstan dan kerugian tembaga yang meningkat sebanding kuadrat arus beban (**Error! Reference source not found.**

Transformator distribusi memegang peranan penting dalam menjaga keandalan penyaluran energi listrik, sehingga kondisi pembebanan menjadi aspek krusial yang harus dikendalikan untuk mencegah kerugian dan gangguan operasi (**Error! Reference source not found.** Terdapat beberapa klasifikasi dari pembebanan transformator distribusi yaitu sebagai berikut:

- a. Beban Optimal (60–80 %): Transformator beroperasi dengan baik dan umur isolasi tetap terjaga.
- b. Beban Rendah (<40 %): Disebut *underload*; meskipun suhu operasi rendah dan isolasi awet, kondisi ini tidak efisien karena kerugian inti tetap konstan.
- c. Beban Penuh (~100 %): Disebut *overload*; Jika berlanjut, memerlukan pemantauan ketat terhadap suhu transformator untuk mencegah penurunan kinerja (**Error! Reference source not found.**

Ketika transformator menyalurkan daya melebihi kapasitas nominalnya, disebut dengan *overload*. Ini adalah kondisi yang berbahaya jika berlangsung lama dan dengan frekuensi yang cukup sering. Berdasarkan SPLN D3.002-1:2007, transformator distribusi diusahakan agar tidak dibebani lebih dari 80% atau dibawah 40% dari kapasitas nominalnya (**Error! Reference source not found.** Jika beban transformator terlalu besar melebihi kapasitas nominal trafo maka akan dilakukan penggantian transformator atau yang biasa disebut mutasi trafo.

Mutasi Trafo

Mutasi transformator distribusi diperlukan untuk mengatasi kondisi beban lebih yang dapat menurunkan efisiensi dan mengganggu kontinuitas pasokan. Faktor-faktor penting yang harus dianalisis meliputi: Kapasitas Trafo, kapasitas nominal transformator tujuan harus lebih besar atau minimal sama dengan beban yang akan dipindahkan agar tidak terjadi overheating dan penurunan umur peralatan (**Error! Reference source not found.**

- a. Profil dan Data Beban Aktual, data beban harian, mingguan, dan musiman menjadi dasar prediksi pertumbuhan beban serta mencegah ketidakseimbangan jaringan setelah mutasi .
- b. Jarak Jaringan, panjang saluran, kualitas isolasi, dan kapasitas konduktor memengaruhi rugi-rugi daya; jarak yang lebih pendek direkomendasikan untuk efisiensi.

- c. Keandalan dan Stabilitas Sistem, mutasi harus menjamin pasokan listrik tetap andal, tanpa menimbulkan gangguan maupun pemadaman.
- d. Biaya dan Efisiensi Operasional, perlu memperhitungkan biaya langsung (instalasi, pemeliharaan) dan tidak langsung (kerugian energi) agar mutasi mengurangi biaya jangka panjang.

Kondisi Fisik dan Usia Trafo, transformator penerima beban tambahan harus dalam kondisi baik dan memiliki umur operasi yang cukup untuk mencegah kegagalan sistem (**Error! Reference source not found..**

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah menerapkan pendekatan kuantitatif deskriptif, dengan tahapan metode sebagai berikut:

Pengumpulan Data

Data primer diperoleh melalui pengukuran arus dan tegangan sisi primer serta sekunder transformator selama periode beban puncak harian selama satu bulan dan data beban puncak tahunan selama 5 tahun terakhir. Data sekunder meliputi kapasitas trafo dan standar teknis PLN (SPLN), yang diperoleh dari dokumen internal PLN.

Perhitungan Data

Perhitungan Persentase Pembebanan

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{\text{Daya yang disalurkan (kVA)}}{\text{Kapasitas Nominal Trafo (kVA)}} \times 100\% \quad (1)$$

Perhitungan Pertumbuhan Beban dengan Metode Least Square

Metode Least Square merupakan teknik statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan linier antara variabel independen dan dependen dengan meminimalkan jumlah kuadrat selisih antara nilai observasi dan nilai prediksi. Dalam analisis distribusi tenaga listrik, variabel independen umumnya adalah waktu, sedangkan variabel dependennya adalah beban listrik pada titik jaringan tertentu. Penerapan metode ini memungkinkan prediksi pertumbuhan beban sehingga waktu yang tepat untuk melakukan mutasi transformator dapat ditentukan, guna mencegah kelebihan beban yang berpotensi merusak peralatan dan menurunkan kualitas pasokan listrik.

$$Y_n = a + bx \quad (2)$$

Untuk mencari nilai a dan b dari persamaan trend dapat digunakan dua persamaan normal sebagai berikut:

$$\sum Y = n \cdot a + b \cdot \sum X \quad (3)$$

$$\sum XY = a \cdot \sum X + b \cdot \sum X^2 \quad (4)$$

Bila titik tengah data sebagai tahun dasar, maka $\sum X = 0$ dan dapat dihilangkan dari kedua persamaan diatas dan menjadi:

$$a = \frac{\sum Y}{n} \quad (5)$$

$$b = \frac{\sum XY}{\sum x^2} \quad (6)$$

Dimana:

Y_n = Data berkala (Time Series)

X = Variabel waktu

a = Nilai trend pada tahun dasar

b = Rata-rata pertumbuhan nilai trend pada tiap tahun

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil analisis yang ditampilkan melalui diagram garis memperlihatkan penurunan persentase pembebanan transformator secara signifikan setelah dilakukan mutasi. Sebelum mutasi, transformator berkapasitas 100 kVA mencatat persentase pembebanan sekitar 93 %, kondisi yang sudah mendekati batas maksimum dan berpotensi menimbulkan peningkatan suhu operasi, percepatan degradasi isolasi, serta penurunan umur pakai. Setelah penggantian dengan transformator berkapasitas 160 kVA, persentase pembebanan menurun menjadi sekitar 58 %. Penurunan ini menunjukkan bahwa transformator baru mampu menyalurkan daya dengan lebih optimal, menjaga kestabilan kinerja distribusi, dan meminimalkan risiko kelebihan beban. Proyeksi pertumbuhan beban hingga tahun 2038 juga menggambarkan tren kenaikan yang bertahap, sehingga diperlukan perencanaan peningkatan kapasitas di masa mendatang untuk memastikan keandalan sistem distribusi tetap terjaga.

Pembahasan

$$= 133 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{rata-rata}} &= \frac{I_{\text{Tot Jur 1}} + I_{\text{Tot Jur 2}} + I_{\text{Tot Jur 3}}}{3} \\ &= \frac{139 + 119 + 133}{3} \\ &= 130,333 \text{ A} \end{aligned}$$

Maka nilai pembebanan total yang diperoleh oleh transformator didapatkan dengan menggunakan rumus berikut :

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} \times V \times I_{\text{rata-rata}} \\ &= \sqrt{3} \times 400 \times 130,333 \\ &= 90295 \text{ VA} \approx 90,25 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas nilai pembebanan total pada trafo gardu CMY dengan kapasitas 100 kVA adalah 90,25 kVA

Perhitungan Persentase Pembebanan Trafo Eksisting

$$\begin{aligned} \% \text{ Pembebanan} &= \frac{\text{Daya yang disalurkan (kVA)}}{\text{Kapasitas Nominal Trafo (kVA)}} \times 100\% \\ &= \frac{90,25 \text{ kVA}}{100 \text{ kVA}} \times 100\% \\ &= 90,25 \% \end{aligned}$$

Data Beban Puncak Harian Bulan Juli Tahun 2025

Tabel 2 menyajikan data historis pembebanan harian transformator Gardu CMY pada bulan Juli tahun 2025 yang menjadi dasar analisis pemilihan kapasitas yang tepat dalam melakukan mutasi trafo.

Tabel 2. Data Beban Puncak Harian Bulan Juli 2025

No	Tanggal	Beban Puncak	% pada 160 kVA	Status	% pada 200 kVA	Status
1	01/07/25	74,82	46,76	Normal	37,4	Underload
2	02/07/25	66,44	41,53	Normal	33,2	Underload
3	03/07/25	69,13	43,21	Normal	34,6	Underload
4	04/07/25	71,3	44,56	Normal	35,6	Underload
5	05/07/25	69,01	43,13	Normal	34,5	Underload
6	06/07/25	72,92	45,58	Normal	36,5	Underload
7	07/07/25	71,43	44,64	Normal	35,7	Underload
8	08/07/25	64,73	40,46	Normal	32,4	Underload
9	09/07/25	76,9	48,06	Normal	38,4	Underload
10	10/07/25	75,78	47,36	Normal	37,9	Underload
11	11/07/25	71,27	44,54	Normal	35,6	Underload
12	12/07/25	75,86	47,41	Normal	37,9	Underload
13	13/07/25	79,3	49,56	Normal	39,6	Underload
14	14/07/25	74,63	46,64	Normal	37,3	Underload
15	15/07/25	75,31	47,07	Normal	37,7	Underload

16	16/07/25	70,88	44,30	Normal	35,4	Underload
17	17/07/25	79,86	49,91	Normal	39,9	Underload
18	18/07/25	78,68	49,18	Normal	39,3	Underload
19	19/07/25	82	51,25	Normal	41	Normal
20	20/07/25	75,1	46,94	Normal	37,6	Underload
21	21/07/25	86,88	54,30	Normal	43,4	Normal
22	22/07/25	81,25	50,78	Normal	40,6	Normal
23	23/07/25	79,6	49,75	Normal	39,8	Underload
24	24/07/25	90,29	56,43	Normal	45,1	Normal
25	25/07/25	82,25	51,41	Normal	41,1	Normal
26	26/07/25	79,09	49,43	Normal	39,5	Underload
27	27/07/25	84,06	52,54	Normal	42	Normal
28	28/07/25	74,73	46,71	Normal	37,4	Underload
29	29/07/25	89,26	55,79	Normal	44,6	Normal
30	30/07/25	83,76	52,35	Normal	41,9	Normal

Berdasarkan tabel diatas, dapat disimpulkan bahwa kapasitas 160 kVA merupakan pilihan yang optimal dibandingkan dengan trafo berkapasitas 200 kVA untuk menggantikan transformator 100 kVA yang saat ini beroperasi dalam keadaan overload, karena mampu mengatasi masalah keandalan tanpa menyebabkan trafo beroperasi dalam keadaan underload.

Data Beban Puncak Tahun 2021-2025

Rincian data beban puncak pada tahun 2021 hingga tahun 2025 berdasarkan data historis PT PLN (Persero) ULP Labuan.

Tabel 3. Data Beban Puncak Tahun 2021-2025

Gardu	Tahun	Beban Puncak
CMY	2021	78,6
	2022	81,65
	2023	85,02
	2024	87,34
	2025	90,29

Penentuan Parameter Metode Least Square

Tabel 4. Parameter Metode *Least Square*

No	Tahun	Beban Puncak (kVA)	X	XY	X ²
1	2021	78,6	-2	-157,2	4
2	2022	81,65	-1	-81,65	1
3	2023	85,02	0	0	0
4	2024	87,34	1	87,34	1
5	2025	90,29	2	180,58	4
n = 5		ΣY = 422,9	ΣX = 0	ΣXY = 29,07	ΣX ² = 10

Menghitung nilai trend pada tahun dasar / nilai perkembangan pada tahun-tahun pertama menggunakan persamaan yaitu:

$$a = \frac{\Sigma Y}{n} = \frac{422,9 \text{ kVA}}{5} = 84,58$$

Untuk menghitung rata-rata laju pertumbuhan setiap tahunnya yaitu menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$b = \frac{\Sigma XY}{\Sigma X^2} = \frac{29,07 \text{ kVA}}{10} = 2,907$$

Berdasarkan hasil perhitungan pertumbuhan beban transformator diatas diperoleh persamaan berikut dengan memakai rumus pada persamaan yaitu:

$$Y_n = a + b \cdot X$$

$$Y_n = 84,58 + 2,907 \cdot X$$

Setelah mendapat persamaan diatas, selanjutnya bisa untuk mengetahui beban puncak pada gardu tersebut ditahun-tahun yang akan datang dengan menggunakan persamaan diatas.

$$Y_n = 84,58 + 2,907 \cdot X$$

$$Y_{2026} = 84,58 + 2,907 \cdot 3$$

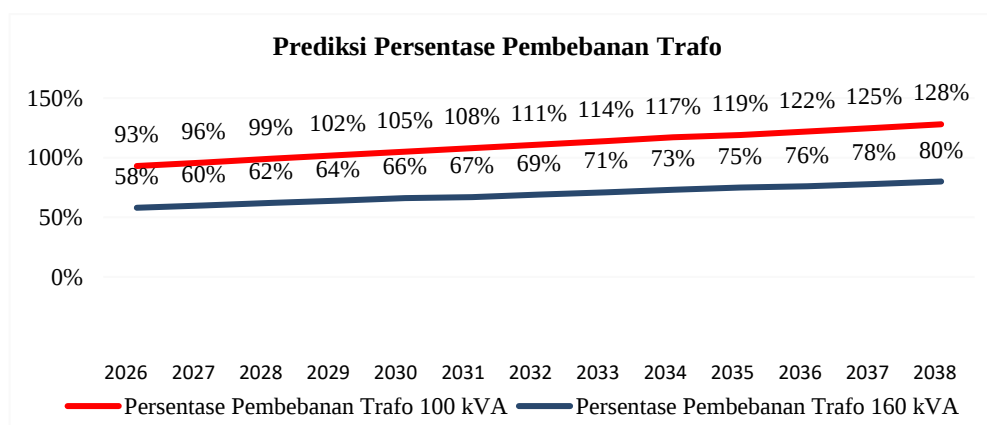
$$Y_{2026} = 93,301 \text{ kVA}$$

Tabel 5. Hasil Perhitungan Pembebanan dengan Kapasitas 160 kVA

No	Tahun	Pembebanan	Persentase Pembebanan (%)	Status
1	2026	93,301	58,31	Normal
2	2027	96,208	60,13	Normal
3	2028	99,115	61,95	Normal
4	2029	102,022	63,76	Normal
5	2030	104,929	65,58	Normal
6	2031	107,836	67,40	Normal
7	2032	110,743	69,21	Normal
8	2033	113,65	71,03	Normal
9	2034	116,557	72,85	Normal
10	2035	119,464	74,67	Normal
11	2036	122,371	76,48	Normal
12	2037	125,278	78,30	Normal
13	2038	128,185	80,12	Overload

Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui bahwa ketika trafo berkapasitas 100 kVA dimutasi dengan yang berkapasitas 160 kVA, maka trafo akan kembali beroperasi dalam keadaan normal.

Perbandingan tingkat pembebanan trafo gardu CMY sebelum dan sesudah mutasi ditampilkan pada Gambar 3 dalam bentuk grafik dua garis, yang menunjukkan penurunan signifikan setelah penggantian kapasitas trafo.



Gambar 2. Grafik Persentase Pembebanan Sebelum dan Setelah Mutasi Trafo

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis, dapat disimpulkan bahwa transformator distribusi pada Gardu CMY berkapasitas 100 kVA saat ini bekerja dalam kondisi kritis dengan beban puncak mencapai 90,29 kVA atau sekitar 90,29 % dari kapasitas nominalnya, yang menimbulkan risiko teknis berupa peningkatan rugi-rugi daya, penurunan kualitas tegangan, percepatan degradasi isolasi, dan pemendekan umur pakai peralatan sehingga berpotensi mengganggu kontinuitas pasokan listrik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa mutasi ke transformator 160 kVA mampu menurunkan persentase pembebanan hingga 56,43 %, menghilangkan risiko overload dan menyediakan cadangan kapasitas yang memadai untuk mengantisipasi pertumbuhan beban beberapa tahun ke depan, sedangkan mutasi ke 200 kVA memang menurunkan pembebanan menjadi 45,15 % namun menimbulkan kondisi underload yang kurang efisien karena rugi-rugi inti tetap terjadi pada beban rendah. Penerapan metode Least Square terbukti efektif untuk memproyeksikan pertumbuhan beban berdasarkan data historis, memberikan perkiraan waktu kapan transformator akan kembali mendekati kapasitas maksimumnya, serta menjadi dasar perencanaan jangka menengah untuk menjaga efisiensi dan keandalan sistem distribusi. Dengan mempertimbangkan hasil simulasi, efisiensi operasional, serta proyeksi pertumbuhan beban, mutasi dari 100 kVA ke 160 kVA direkomendasikan sebagai pilihan paling ideal untuk meningkatkan keandalan pasokan, menekan risiko gangguan, dan memastikan distribusi tenaga listrik yang efisien pada Gardu CMY Penyulang Jiput dalam jangka menengah hingga panjang disesuaikan dengan pertumbuhan bebannya.

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar PT PLN (Persero) ULP Labuan segera melakukan penggantian transformator pada Gardu CMY dari kapasitas 100 kVA menjadi 160 kVA sebagai langkah strategis untuk mengatasi kondisi overload dan meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik. Selain itu, perlu dilakukan monitoring pembebanan secara rutin dan

berkelanjutan agar kebijakan mutasi maupun penambahan kapasitas transformator dapat direncanakan dengan lebih tepat dan efisien. Dalam pengambilan keputusan terkait penggantian transformator, PLN juga diharapkan mempertimbangkan tidak hanya aspek kontinuitas suplai listrik, tetapi juga efisiensi penggunaan transformator guna mengoptimalkan kinerja sistem distribusi.

DAFTAR REFERENSI

- Anisah, S., & Khaizairani, A. (2018). Analisis perbaikan tegangan ujung pada jaringan tegangan menengah 20 kV Express Trienggadeng daerah kerja PT PLN (Persero) Area Sigli Rayon Meureudu dengan simulasi E-Tap Edge. *Journal of Electrical and System Control Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.31289/jesce.v2i1.1916>
- Anisah, S., Tharo, Z., & Rahma Daniati, E. (2024). Analysis of additioning insert transformers in 20 kV networks in improving voltage quality. *Journal of Information Technology and Computer Science (IntecomS)*, 7(2).
- Anshar, C. N. (2023). Studi analisa perkiraan umur transformator distribusi 20 kV akibat pembebanan. *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi dan Sains*, 1(2). <https://doi.org/10.56248/marostek.v1i2.26>
- Arifyanto, D. (2023). Analisis penentuan letak trafo distribusi pada penyulang Walmas menggunakan ETAP Power Station 12.6.0. *Jurnal Teknologi Elekerika*, 20(1). <https://doi.org/10.31963/elekerika.v20i1.4502>
- Capulong, C. D. B., Camat, P. K., Gonzales, P. B., Bunoan, K. G. O., Tolentino, A. C., Gomez, R. H., Jr., & Favorito, R. M. (2025). Analysis of failure rate due to transformer loadings of commonly used transformers in Porac substation. *Journal of Science Technology and Engineering Research (JSTER)*, 6(2), 107–117. <https://doi.org/10.53525/jster.1722805>
- Dewi, T. P., & Lubis, Z. (2024). Analysis of the decrease in insulation resistance of pin type porcelain insulation at the ULP Ampera of PT PLN (Persero). *Jurnal Teknik Elektro*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.52005/fidelity.v6i1.184>
- Guo, W., Liu, J., Ma, J., & Lan, Z. (2025). Short-term power load forecasting using adaptive mode decomposition and improved least squares support vector machine. *Energies*, 18(10), Article 2491. <https://doi.org/10.3390/en18102491>
- Iria, J., Heleno, M., & Candoso, G. (2019). Optimal sizing and placement of energy storage systems and on-load tap changer transformers in distribution networks. *Applied Energy*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.120>
- Pabla, A. S. (2019). *Electric Power Distribution* (7th ed.). Tata McGraw Hill.
- Pebrisasvian, A. T., & Karim, S. (2021). Analisa sisip transformator distribusi terhadap perbaikan overload dan tegangan ujung Gardu BNS-0126 di PT PLN (Persero) UP3 Barabai. *Jurnal EEICT (Electric Electronic Instrumentation Control Telecommunication)*, 4(2). <https://doi.org/10.31602/eeict.v4i2.6585>
- PT PLN (Persero). (2007). *Spesifikasi Transformator Distribusi: SPLN D3.002-1:2007*. Jakarta: PT PLN.

- Sarikin, R. C. D. (2019). Analisis susut daya dan energi pada jaringan distribusi di PT PLN (Persero) Rayon Panakkukang. *Jurnal Teknologi Elekterika*, 16(1). <https://doi.org/10.31963/elekterika.v16i2.1575>
- Sutjipto, R., Sungkowo, H., Mukti Khristiana, H., Dhesah Kharisma, D., Putra Fauzy, G., & Agiesta Anjali, F. (2025). *Implementasi Least Square Method*. (n.d.).
- Syukri, S., Asyadi, T. M., Muliadi, M., & Moesnadi, F. (2022). Analisa pembebanan transformator distribusi 20 kV pada penyulang LS5 Gardu LSA 249. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(2). <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i2.14500>
- Wahyudi Widiatmika, K., Arta Wijaya, I. W., & Setiawan, I. N. (2018). Analisis penambahan transformator sisipan untuk mengatasi overload pada transformator DB0244 di penyulang Sebelanga. *Jurnal Spektrum*, 5(2). <https://doi.org/10.24843/spektrum.2018.v05.i02.p03>
- Zhang, W., Liu, S., Li, M., Bao, H., Yuan, S., & Cheng, X. (2025). A method for load forecasting of distribution transformers based on parameter-efficient fine-tuning of large language models in power system. *Processes*, 13(9), Article 2986. <https://doi.org/10.3390/pr13092986>