

Analisa Penurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Pembebanan dan Temperatur di PT PLN (Persero) P3B Sumatera UPT Palembang Gardu Induk Keramasan

Wisnu Wardhana¹, Abdul Aziz^{2*}, Yudi Irwansi³

^{1,2,3}*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang,*
wisnu1023@gmail.com¹, azis@univpgri-palembang.ac.id^{2*}, irwansiyudi@univpgri-palembang.ac.id³

Received 22 September 2024 | Revised 05 Oktober 2024 | Accepted 21 Oktober 2024

ABSTRAK

Transformator merupakan komponen utama dalam sistem distribusi listrik yang berperan penting dalam menjaga keandalan pasokan tenaga listrik. Kenaikan suhu dan pembebanan berlebih dapat mempercepat penurunan umur transformator, yang berdampak pada efisiensi dan umur pakai peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembebanan dan kenaikan temperatur terhadap penurunan umur transformator di Gardu Induk Keramasan PT PLN (Persero). Analisis dilakukan dengan pendekatan perhitungan laju penuaan thermal relatif, menggunakan data operasional transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformator beroperasi dengan beban rata-rata di bawah 30%, dengan beban tertinggi tercatat sebesar 17,2271 MVA pada pukul 10.00, yang mengakibatkan rugi tembaga sebesar 9,4802 kW dan kenaikan temperatur hot spot hingga 73,60°C. Perhitungan susut umur harian transformator menunjukkan nilai rata-rata sebesar 2,6164 jam per hari, yang berdampak pada laju penuaan transformator. Berdasarkan susut umur tersebut, sisa umur transformator diperkirakan sekitar 6,1153 tahun. Penelitian ini menyimpulkan bahwa transformator daya masih dapat beroperasi untuk jangka waktu yang cukup lama sebelum mencapai akhir masa pakainya, namun perlu dilakukan pemantauan lebih intensif terhadap kenaikan temperatur dan beban selama jam puncak untuk menjaga keandalan dan memperpanjang masa pakai transformator.

Kata Kunci: Transformator, Umur, Pengaruh, Pembebanan, Temperatur

The transformer is the main component in the electricity distribution system which plays an important role in maintaining the reliability of the electricity supply. Rising temperatures and overloading can accelerate the decline in transformer life, which has an impact on efficiency and equipment service life. This research aims to analyze the effect of loading and increasing temperature on reducing the life of transformers at the Keramasan Main Substation of PT PLN (Persero). The analysis was carried out using a relative thermal aging rate calculation approach, using transformer operational data. The research results show that the transformer operates with an average load below 30%, with the highest load recorded at 17.2271 MVA at 10.00, which resulted in copper losses of 9.4802 kW and an increase in hot spot temperatures of up to 73.60°C. Calculation of the daily life loss of the transformer shows an average value of 2.6164 hours per day, which has an impact on the aging rate of the transformer. Based on this age loss, the remaining life of the transformer is estimated to be around 6.1153 years. This research concludes that power transformers can still operate for quite a long period of time before reaching the end of their useful life, but more intensive monitoring of temperature and load increases during peak hours is necessary to maintain reliability and extend the life of the transformer.

Keywords: Transformer, Age, Influence, Loading, Temperature

I. PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu komponen utama dalam sistem kelistrikan yang memiliki peran penting dalam proses transmisi dan distribusi energi listrik. Fungsinya yang vital dalam menaikkan dan menurunkan tegangan listrik menjadikannya komponen yang harus dioperasikan dengan optimal agar dapat berfungsi dengan baik dan berumur panjang (Rizal, dkk., 2024). Namun, dalam praktiknya, transformator sering kali bekerja di bawah kondisi yang menantang, seperti pembebanan yang berlebih dan temperatur yang tinggi, terutama di lingkungan tropis seperti di Palembang.

Pembebanan transformator yang berlebihan dan tidak sesuai dengan kapasitas yang direkomendasikan dapat menyebabkan peningkatan temperatur kerja di dalam unit transformator. Peningkatan temperatur ini dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu beban yang diterima oleh transformator serta temperatur lingkungan sekitar. Kondisi kerja yang berlebihan dapat mempercepat degradasi material isolasi, mengurangi kemampuan pendinginan, serta meningkatkan risiko terjadinya kerusakan pada komponen inti transformator, seperti kumparan dan inti besi (Azis, Nurdiana, & Ithifatin Nisa, 2018).

Salah satu dampak paling signifikan dari peningkatan temperatur akibat pembebanan berlebih adalah penurunan umur operasional transformator. Penurunan ini tidak hanya berdampak pada keandalan pasokan energi listrik, tetapi juga meningkatkan biaya operasional akibat kebutuhan untuk pemeliharaan dan

penggantian transformator yang lebih sering dari yang seharusnya (Febrianti, 2017). Di sisi lain, temperatur lingkungan yang tinggi di Gardu Induk Keramasan juga berperan dalam mempercepat proses penuaan transformator, yang pada akhirnya dapat mengurangi efisiensi operasional dan menambah beban biaya bagi PT PLN (Persero).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis sejauh mana pengaruh pembebanan dan temperatur terhadap penurunan umur transformator di Gardu Induk Keramasan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih dalam terkait interaksi antara faktor operasional dan kondisi lingkungan terhadap kinerja transformator, serta memberikan rekomendasi bagi PT PLN (Persero) dalam mengelola pembebanan dan pendinginan transformator untuk memaksimalkan umur pakai dan keandalan sistem kelistrikan.

II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

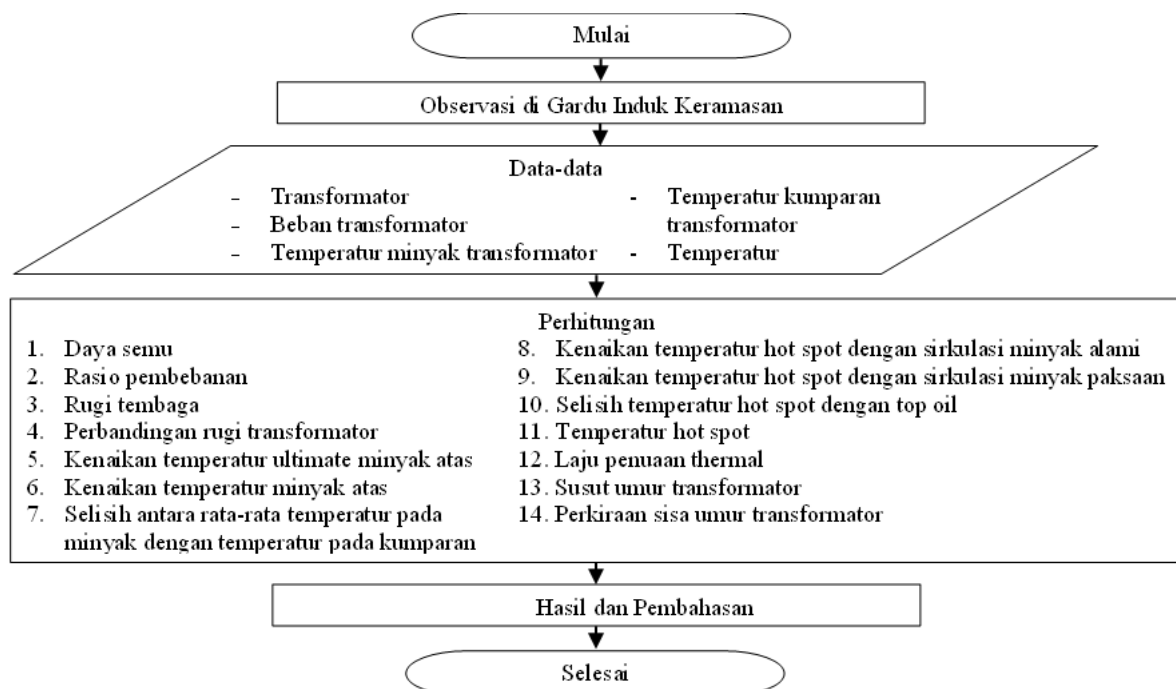
Penelitian dilakukan pada PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera UPT Palembang ULTG Keramasan Gardu Induk Keramasan, beralamat di Jl. Abikusno Cokrosuyoso, RW. 24, Kel. Kemang Agung, Kec. Kertapati, Palembang 30145. Objek penelitian adalah Transformator Daya 60 MVA Gardu Induk Keramasan. Penelitian dilaksanakan mulai tanggal 24 Juli 2023 sampai dengan 24 September 2023.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilaksanakan berdasarkan Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Gardu Induk Keramasan yaitu data transformator, beban transformator, temperatur minyak transformator, dan temperatur kumparan transformator. Kemudian data sekunder yang diperoleh dari BMKG Sumatera Selatan adalah data temperatur lingkungan. Selanjutnya, data yang telah dikumpulkan dianalisis agar dapat digunakan dalam tahapan penelitian yaitu:

1. Daya semu pada transformator S (MVA) merupakan jumlah total daya dalam sistem kelistrikan, yang mencakup daya aktif P (MW) dan daya reaktif Q (MVAr) (Febrianti, 2017).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

2. Rasio pembebanan transformator K adalah perbandingan antara daya semu yang terpakai S (MVA) dengan kapasitas daya pada transformator S_r (MVA) (Al Mufrihi, Tasmono, & Widagdo, 2023).

$$K = \frac{S}{S_r} \quad (2)$$

3. Rugi tembaga transformator P_{t_2} (kW) terjadi akibat aliran arus beban melalui kawat belitan transformator. Kerugian ini dapat dihitung dengan mengalikan kuadrat rasio pembebanan K^2 dengan rugi belitan transformator P_{t_1} (kW) (Dendi, Azis, dan Perawati, 2021).

$$P_{t_2} = K^2 P_{t_1} \quad (3)$$

4. Perbandingan rugi transformator d adalah rasio rugi tembaga yang terjadi pada transformator P_{t_2} (kW) dengan rugi tanpa beban yang dialami oleh transformator $P_{no\ load}$ (kW) (Maruf & Primadiyono, 2021).

$$d = \frac{P_{t_2}}{P_{no\ load}} \quad (4)$$

5. Kenaikan temperatur ultimate minyak atas $\Delta\theta_{ou}$ (°C) adalah hasil dari perkalian antara temperatur referensi $\Delta\theta_{br}$ (°C) dengan rasio total kerugian yang dipangkatkan dengan faktor eksponen yang tergantung pada jenis sistem pendinginan x . $\Delta\theta_{br}$ bernilai 40°C untuk pendinginan OF, dan 55°C untuk pendinginan ON. x bernilai 0,9 untuk ONAN/ONAF, dan 1,0 untuk OFAF/OFWF (Wuwung, 2010).

$$\Delta\theta_{ou} = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right)^x \quad (5)$$

6. Kenaikan temperatur minyak atas $\Delta\theta_{on}$ (°C) merujuk pada temperatur minyak isolasi yang terukur di bagian atas tangki transformator. Kenaikan ini terdiri dari total kenaikan temperatur awal minyak $\Delta\theta_{o(n-1)}$ (°C) ditambah selisih antara kenaikan temperatur ultimate minyak atas $\Delta\theta_{ou}$ (°C) dan kenaikan temperatur awal minyak, yang cenderung mengikuti pola eksponensial. t adalah waktu yang dinyatakan dalam jam. τ merupakan konstanta minyak yang juga diukur dalam jam, τ bernilai 3 jam untuk sistem ONAN/ONAF, dan 2 jam untuk sistem OFAF/OFWF (Maruf & Primadiyono, 2021).

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_{ou} - \Delta\theta_{o(n-1)}) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6)$$

7. Selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dan temperatur pada kumparan $\Delta\theta_{wo}$ (°C) dihitung dengan mengurangi rata-rata kenaikan temperatur kumparan $\Delta\theta_k$ (°C) dengan rata-rata kenaikan temperatur minyak $\Delta\theta_m$ (°C) (Muzar, Syahrizal, & Syukri, 2018).

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m \quad (7)$$

8. Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak alami $\Delta\theta_{cr(alami)}$ (°C) adalah total dari temperatur referensi $\Delta\theta_{br}$ (°C) dan 120% selisih antara rata-rata temperatur minyak dan temperatur kumparan $\Delta\theta_{wo}$ (°C) (Gultom, Patras, & Tuegeh, 2022).

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,2 \Delta\theta_{wo} \quad (8)$$

9. Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak paksaan $\Delta\theta_{cr(paksa)}$ (°C) adalah penjumlahan antara temperatur referensi $\Delta\theta_{br}$ (°C) dan selisih antara kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi

minyak alami ($\Delta\theta_{cr(alami)}$ (°C) serta temperatur referensi $\Delta\theta_{br}$ (°C) (Pujiono, Pambudi, & Mujiman, 2016).

$$\Delta\theta_{cr(paksa)} = \Delta\theta_{br} + (\Delta\theta_{cr(alami)} - \Delta\theta_{br}) \quad (9)$$

10. Selisih antara temperatur hot spot dan top oil $\Delta\theta_{td}$ (°C) dihitung dengan mengurangi kenaikan temperatur hot spot yang menggunakan sirkulasi minyak paksaan $\Delta\theta_{cr(paksa)}$ (°C) dengan temperatur referensi $\Delta\theta_{br}$ (°C), kemudian dikalikan dengan rasio pembebanan transformator K pangkat y . y bernilai 0,8 untuk sistem pendinginan ONAN dan ONAF, 0,9 untuk sistem pendinginan OFAF dan OFWF (Tambunan, Hariyanto, & Tindra, 2015).

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr(paksa)} - \Delta\theta_{br})K^{2y} \quad (10)$$

11. Temperatur hot spot θ_c (°C) adalah temperatur tertinggi di dalam belitan transformator. Temperatur ini diperoleh dari penjumlahan antara temperatur lingkungan sekitar θ_a (°C), kenaikan temperatur top oil $\Delta\theta_{on}$ (°C), dan selisih antara temperatur hot spot dan top oil $\Delta\theta_{td}$ (°C) (Dendi, Azis, dan Perawati, 2021).

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \quad (11)$$

12. Laju penuaan termal relatif (V) dihitung berdasarkan umur pemakaian pada temperatur hot spot, dibandingkan dengan kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak paksaan (Muzar, Syahrizal, & Syukri, 2018).

$$V = 10^{(\theta_c - \Delta\theta_{cr(paksa)})/19,93} \quad (12)$$

13. Susut Umur Transformator (L) merupakan penurunan umur operasional yang terjadi akibat berbagai faktor, seperti pembebanan berlebih dan peningkatan suhu selama masa operasi. Penghitungan susut umur ini didasarkan pada laju penuaan termal relatif, yang menggambarkan kecepatan degradasi material isolasi transformator akibat paparan suhu tinggi dalam rentang waktu tertentu (Pujiono, Pambudi, & Mujiman, 2016).

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \quad (13)$$

14. Perkiraan Sisa Umur Transformator (n) adalah jumlah waktu yang masih dapat dioperasikan oleh transformator sebelum mencapai akhir masa pakainya. Perkiraan sisa umur transformator dihitung dengan cara mengurangkan umur dasar dengan lama masa pakai, lalu membagi hasilnya dengan susut umur transformator (Dendi, Azis, dan Perawati, 2021).

$$n = \frac{\text{Umur dasar} - \text{Lama masa pakai}}{\text{Susut Usia}} \quad (14)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Penelitian

1. Data Transformator Daya 60 MVA Gardu Induk Keramasan:
 - Nomor Seri : 3011070009
 - Tahun : 2008
 - Standar Pabrikan : IEC 60076
 - Kapasitas Daya : 60 MVA
 - Sistem Pendinginan : ONAN/ONAF-70/100%
 - Frekuensi : 50 Hz
 - Fase : 3
 - Tegangan Primer : 150 kV
 - Tegangan Sekunder : 20 kV
 - Rugi Tanpa Beban : 32 kW
 - Rugi Inti : 290 kW

2. Data beban rata-rata Transformator Daya 60 MVA Gardu Induk Keramasan, tanggal 1 Juni 2023 hingga 30 Juni 2023 dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Data Beban Transformator

Waktu (Jam)	Sisi 150 kV		Sisi 20 kV			
	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	P (MW)	Q (MVar)
00.00	41	154	350	20,8	12,1153	3,4554
01.00	41	154	343	20,8	11,8970	3,3796
02.00	40	154	339	20,8	11,7337	3,3633
03.00	40	154	332	20,8	11,4880	3,2529
04.00	38	154	329	20,8	11,3913	3,1758
05.00	39	154	331	20,8	11,4461	3,2601
06.00	38	154	329	20,7	11,3185	3,3614
07.00	38	153	329	20,7	11,1916	3,6828
08.00	41	153	347	20,7	11,6996	4,0913
09.00	52	152	441	20,6	14,6270	5,7987
10.00	58	151	483	20,6	15,9423	6,5281
11.00	56	147	461	20,7	15,3055	6,1652
12.00	51	151	422	20,7	13,6319	5,9101
13.00	53	151	435	20,7	14,5268	5,6522
14.00	56	151	451	20,7	15,0234	5,9143
15.00	56	151	450	20,7	15,0319	5,9212
16.00	54	151	435	20,8	14,5415	5,8004
17.00	48	152	398	20,8	13,4941	4,7958
18.00	48	151	393	20,7	13,2894	4,1913
19.00	48	151	394	20,0	13,7131	3,5604
20.00	49	152	398	20,8	13,8379	3,8605
21.00	48	152	428	20,9	14,8818	4,2222
22.00	47	165	382	20,9	13,2668	3,9075
23.00	44	153	365	20,9	12,6477	3,7308

Sumber: Gardu Induk Keramasan

3. Data temperatur minyak atas, temperatur kumparan, dan temperatur lingkungan Transformator Daya 60 MVA Gardu Induk Keramasan, untuk periode 01 Juni 2023 hingga 30 Juni 2023 dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Data Temperatur Minyak Atas Transformator, Data Temperatur Kumparan Transformator, dan Data Temperatur Lingkungan Transformator

Waktu (Jam)	$\Delta\theta_m$ (°C)	$\Delta\theta_k$ (°C)	θ_a (°C)
00.00	55,3	65,2	25,0
01.00	55,1	65,9	25,0
02.00	54,8	66,2	25,0
03.00	54,5	66,3	26,7
04.00	54,4	66,7	27,3
05.00	54,4	66,9	28,4
06.00	54,3	69,8	28,4
07.00	54,5	70,0	28,4
08.00	54,6	69,6	29,0
09.00	55,3	68,3	30,1
10.00	55,8	70,6	30,1
11.00	57,0	69,0	30,7
12.00	57,6	68,6	33,6
13.00	58,2	69,2	33,6
14.00	59,1	68,9	33,0
15.00	59,7	69,7	29,6
16.00	60,1	68,3	29,6
17.00	59,4	68,1	27,9
18.00	59,2	68,3	27,9
19.00	57,7	67,1	27,3
20.00	57,4	63,6	27,3
21.00	56,1	64,7	27,3
22.00	55,7	62,5	26,1
23.00	55,2	65,2	26,1

Sumber: Gardu Induk Keramasan, dan BMKG Sumatera Selatan

B. Hasil

1. Dengan menggunakan data pembebanan transformator pada Tabel 1, daya semu transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (1). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $P_{00} = 12,1153 \text{ MW}$ dan $Q_{00} = 3,4554 \text{ MVar}$, maka:

$$S_{00} = \sqrt{P_{00}^2 + Q_{00}^2} = \sqrt{12,1153^2 + 3,4554^2} = \sqrt{158,7211} = 12,5985 \text{ MVA}$$

Daya semu transformator untuk jam 01.00 hingga 23.00 dapat dihitung menggunakan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

2. Rasio pembebanan pada transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $S_{00} = 12,5985 \text{ MVA}$ dan $S_r = 60 \text{ MVA}$, maka:

$$K_{00} = \frac{S_{00}}{S_r} = \frac{12,5985}{60} = 0,2100$$

Rasio pembebanan transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

3. Rugi tembaga pada transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $K_{00} = 0,2100$ dan $P_{t1} = 115 \text{ kW}$, maka:

$$P_{t_{200}} = K_{00}^2 P_{t1} = 0,2100^2 \times 115 = 0,0441 \times 115 = 5,0703 \text{ kW}$$

Rugi tembaga transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

4. Perbandingan rugi transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (4). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $P_{t_{200}} = 5,0703 \text{ kW}$ dan $P_{no \text{ load}} = 28 \text{ kW}$, maka:

$$d_{00} = \frac{P_{t_{200}}}{P_{no \text{ load}}} = \frac{5,0703}{28} = 0,1811$$

Perbandingan rugi transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Daya Semu Transformator, Rasio Pembebanan Transformator, Rugi Tembaga Transformator, dan Perbandingan Rugi Transformator

Waktu (Jam)	S (MVA)	K	P_{t2} (kW)	d
00.00	12,5985	0,2100	5,0703	0,1811
01.00	12,3677	0,2061	4,8862	0,1745
02.00	12,2062	0,2034	4,7595	0,1700
03.00	11,9397	0,1990	4,5539	0,1626
04.00	11,8258	0,1971	4,4674	0,1595
05.00	11,9013	0,1984	4,5246	0,1616
06.00	11,8071	0,1968	4,4533	0,1590
07.00	11,7820	0,1964	4,4344	0,1584
08.00	12,3943	0,2066	4,9073	0,1753
09.00	15,7345	0,2622	7,9086	0,2825
10.00	17,2271	0,2871	9,4802	0,3386
11.00	16,5006	0,2750	8,6975	0,3106
12.00	14,8579	0,2476	7,0520	0,2519
13.00	15,5877	0,2598	7,7617	0,2772
14.00	16,1457	0,2691	8,3274	0,2974
15.00	16,1561	0,2693	8,3381	0,2978
16.00	15,6557	0,2609	7,8296	0,2796
17.00	14,3210	0,2387	6,5515	0,2340
18.00	13,9347	0,2322	6,2028	0,2215

19.00	14,1678	0,2361	6,4121	0,2290
20.00	14,3663	0,2394	6,5931	0,2355
21.00	15,4691	0,2578	7,6441	0,2730
22.00	13,8303	0,2305	6,1102	0,2182
23.00	13,1865	0,2198	5,5546	0,1984

Sumber: Hasil Perhitungan

5. Kenaikan temperatur ultimate minyak atas dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (5). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\Delta\theta_{br} = 55^{\circ}\text{C}$, $d_{00} = 0,1811$, $k_{00} = 0,2100$, dan $x = 0,9$, maka:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{ou_{00}} &= \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+d_{00}K_{00}^2}{1+d_{00}} \right)^x = 55 \left(\frac{1+0,1811 \times 0,2100^2}{1+0,1811} \right)^{0,9} = 55 \left(\frac{1+0,0080}{1,1811} \right)^{0,9} \\ &= 55 \left(\frac{1,0080}{1,1811} \right)^{0,9} = 55(0,8534)^{0,9} = 55 \times 0,8671 = 47,6891^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Kenaikan temperatur ultimate minyak atas transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

6. Kenaikan temperatur minyak atas dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (6). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\Delta\theta_{o(n-1)_{00}} = 47,6891^{\circ}\text{C}$, $\Delta\theta_{ou_{00}} = 47,6891^{\circ}\text{C}$, $t = 1$ dan $\tau = 3$, maka:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{on_{00}} &= \Delta\theta_{o(n-1)_{00}} + (\Delta\theta_{ou_{00}} - \Delta\theta_{o(n-1)_{00}}) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 47,6891 + (47,6891 - 47,6891) \\ &\quad \left(1 - e^{-\frac{1}{3}} \right) = 47,6891 + (0,0000)(1 - 0,7165) = 47,6891^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Kenaikan temperatur minyak atas transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

7. Selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (7). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\Delta\theta_{k_{00}} = 65,2^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{m_{00}} = 55,3^{\circ}\text{C}$, maka:

$$\Delta\theta_{wo_{00}} = \Delta\theta_{k_{00}} - \Delta\theta_{m_{00}} = 65,2 - 55,3 = 9,9^{\circ}\text{C}$$

Selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

8. Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak alami dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (8). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\Delta\theta_{br} = 55^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{wo_{00}} = 9,90^{\circ}\text{C}$, maka:

$$\Delta\theta_{cr(alami)_{00}} = \Delta\theta_{br} + 1,2\Delta\theta_{wo_{00}} = 55 + 1,2 \times 9,90 = 5,5 + 11,88 = 66,88^{\circ}\text{C}$$

Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak alami transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Kenaikan Temperatur Ultimate Minyak Atas, Kenaikan Temperatur Minyak Atas, Selisih Antara Rata-Rata Temperatur pada Minyak dengan Temperatur pada Kumparan, dan Kenaikan Temperatur Hot Spot dengan Sirkulasi Minyak Alami

Waktu (Jam)	$\Delta\theta_{ou}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\theta_{on}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\theta_{wo}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\theta_{cr(alami)}$ ($^{\circ}\text{C}$)
00.00	47,6891	47,6891	9,9	66,88
01.00	47,9049	47,9049	10,8	67,96
02.00	48,0554	48,0554	11,4	68,68
03.00	48,3027	48,3027	11,8	69,16
04.00	48,4080	48,4080	12,3	69,76
05.00	48,3383	48,3383	12,5	70,00
06.00	48,4252	48,4252	15,5	73,60
07.00	48,4484	48,4484	15,5	73,60
08.00	47,8800	47,8800	15,0	73,00
09.00	44,7348	44,7348	13,0	70,60

10.00	43,3654	43,3654	14,8	72,76
11.00	44,0259	44,0259	12,0	69,40
12.00	45,5569	45,5569	11,0	68,20
13.00	44,8718	44,8718	11,0	68,20
14.00	44,3530	44,3530	9,8	66,76
15.00	44,3433	44,3433	10,0	67,00
16.00	44,8083	44,8083	8,2	64,84
17.00	46,0639	46,0639	8,7	65,44
18.00	46,4293	46,4293	9,1	65,92
19.00	46,2088	46,2088	9,4	66,28
20.00	46,0210	46,0210	6,2	62,44
21.00	44,9827	44,9827	8,6	65,32
22.00	46,5280	46,5280	6,8	63,16
23.00	47,1363	47,1363	10,0	67,00

Sumber: Hasil Perhitungan

9. Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak paksaan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (9). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\Delta\theta_{br} = 55^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{cr(alami)_{00}} = 66,88^{\circ}\text{C}$, maka:

$$\Delta\theta_{cr(paksa)_{00}} = \Delta\theta_{br} + (\Delta\theta_{cr(alami)_{00}} - \Delta\theta_{br}) = 55 + (66,88 - 55) = 55 + 11,88 = 66,88^{\circ}\text{C}$$

Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak alami transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.

10. Selisih temperatur hot spot dengan top oil dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (10). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\Delta\theta_{cr(paksa)_{00}} = 66,88^{\circ}\text{C}$, $\Delta\theta_{br} = 55^{\circ}\text{C}$, $K_{00} = 0,2100$ dan $y = 0,8$, maka:

$$\Delta\theta_{td_{00}} = (\Delta\theta_{cr(paksa)_{00}} - \Delta\theta_{br})K_{00}^{2y} = (66,88 - 55) 0,2100^{2 \times 0,8} = (11,88) 0,0823 = 0,9779^{\circ}\text{C}$$

Selisih temperatur hot spot dengan top oil transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.

11. Temperatur hot spot dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (11). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\theta_{a_{00}} = 25^{\circ}\text{C}$, $\Delta\theta_{on_{00}} = 47,6891^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{td_{00}} = 0,9779^{\circ}\text{C}$, maka:

$$\theta_{c_{00}} = \theta_{a_{00}} + \Delta\theta_{on_{00}} + \Delta\theta_{td_{00}} = 25 + 47,6891 + 0,9779 = 73,6537^{\circ}\text{C}$$

Temperatur hot spot transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.

12. Laju penuaan thermal dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (12). Dimana pada saat jam 00.00 WIB nilai $\theta_{c_{00}} = 73,6537^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{cr(paksa)_{00}} = 66,88^{\circ}\text{C}$, maka:

$$V_{00} = 10^{(\theta_{c_{00}} - \Delta\theta_{cr(paksa)_{00}})/19,93} = 10^{(73,6537 - 66,88)/19,93} = 2,1871 \text{ jam}$$

Laju penuaan thermal transformator untuk jam 01.00 sampai dengan 23.00 dapat ditentukan dengan metode yang sama, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Kenaikan Temperatur Hot Spot dengan Sirkulasi Minyak Paksaan, Selisih Temperatur Hot Spot dengan Top Oil, Temperatur Hot Spot, dan Laju Penuaan Thermal

Waktu (Jam)	$\Delta\theta_{cr(paksa)} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta\theta_{td} (^{\circ}\text{C})$	$\theta_c (^{\circ}\text{C})$	V (jam)
00.00	66,88	0,9779	73,6537	2,1871
01.00	67,96	1,0357	73,9272	1,9926
02.00	68,68	1,0705	74,1125	1,8732
03.00	69,16	1,0696	76,0785	2,2240
04.00	69,76	1,0979	76,7853	2,2516
05.00	70,00	1,1272	77,8911	2,4885

06.00	73,60	1,3801	78,2310	1,7075
07.00	73,60	1,3754	78,2495	1,7112
08.00	73,00	1,4434	78,3222	1,8495
09.00	70,60	1,8325	76,7125	2,0263
10.00	72,76	2,4118	75,9223	1,4410
11.00	69,40	1,8252	76,5695	2,2895
12.00	68,20	1,4147	80,5558	4,1683
13.00	68,20	1,5275	79,9835	3,9016
14.00	66,76	1,4396	78,8036	4,0206
15.00	67,00	1,4705	75,3859	2,6349
16.00	64,84	1,1466	75,5269	3,4374
17.00	65,44	1,0549	74,9713	3,0077
18.00	65,92	1,0562	75,3379	2,9686
19.00	66,28	1,1203	74,6084	2,6175
20.00	62,44	0,7556	74,0559	3,8268
21.00	65,32	1,1797	73,4417	2,5557
22.00	63,16	0,7798	73,4408	3,2798
23.00	67,00	1,0625	74,3318	2,3328

Sumber: Hasil Perhitungan

13. Susut umur transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (13).

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V = \frac{1}{24} \sum_{n=1}^{24} V_{00} + V_{01} + \dots + V_{23} \\
 &= \frac{1}{24} (2,1871 + 1,9926 + 1,8732 + 2,2240 + 2,2516 + 2,4885 + 1,7075 + 1,7112 + 1,8495 + \\
 &\quad 2,0263 + 1,4410 + 2,2895 + 4,1683 + 3,9016 + 4,0206 + 2,6349 + 3,4374 + 3,0077 + \\
 &\quad 2,9686 + 2,6175 + 3,8268 + 2,5557 + 3,2798 + 2,3328) \\
 &= \frac{1}{24} \times 62,7936 = 2,6164
 \end{aligned}$$

14. Periode pemakaian Transformator Daya 60 MVA pada Gardu Induk Keramasan, terhitung dari tahun 2008 sampai dengan tahun 2022, maka lama masa pakai transformator daya adalah 14 tahun. Sisa umur transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (4).

$$n = \frac{\text{Umur dasar} - \text{Lama masa pakai}}{\text{Susut Umur}} = \frac{30 - 14}{2,6164} = \frac{16}{2,6164} = 6,1153 \text{ tahun}$$

C. Pembahasan

1. Daya Semu (S) menunjukkan fluktuasi sepanjang hari, dengan nilai terendah terjadi pada jam 07.00 sebesar 11,7820 MVA, dan nilai tertinggi pada jam 10.00 sebesar 17,2271 MVA. Ini menunjukkan bahwa beban pada transformator bervariasi, dengan puncak beban terjadi pada siang hari, terutama sekitar pukul 10.00 hingga 16.00.
2. Rasio pembebanan transformator (K) berkisar antara 0,1964 hingga 0,2871. Rasio ini mencerminkan beban transformator relatif terhadap kapasitas maksimumnya. Nilai tertinggi terjadi pada jam 10.00 sebesar 0,2871, yang berarti pada saat tersebut transformator memikul beban mendekati 28,71% dari kapasitas penuh. Rasio pembebanan yang cukup rendah ini menunjukkan bahwa transformator bekerja jauh di bawah kapasitas maksimumnya, yang umumnya dianggap aman untuk menjaga umur transformator.
3. Rugi tembaga (P_{t_2}), yang dipengaruhi oleh rasio pembebanan, bervariasi seiring perubahan K . Nilai P_{t_2} tertinggi terjadi pada jam 10.00 dengan rugi tembaga sebesar 9,4802 kW. Ini sejalan dengan beban tertinggi yang juga terjadi pada waktu yang sama, karena semakin tinggi beban, semakin besar pula arus yang mengalir melalui kawat belitan, sehingga meningkatkan rugi tembaga.
4. Perbandingan rugi transformator (d) mencerminkan perbandingan antara rugi tembaga dan rugi tanpa beban. Nilai tertinggi tercatat pada jam 10.00 sebesar 0,3386. Ini menunjukkan bahwa pada saat beban tinggi, kerugian relatif transformator juga meningkat. Meskipun demikian, nilai perbandingan ini masih berada dalam batas yang aman, mengingat rugi inti tidak berubah, sementara rugi tembaga meningkat seiring dengan naiknya arus beban.
5. Nilai temperatur ultimate minyak atas ($\Delta\theta_{ou}$) dan kenaikan temperatur minyak atas ($\Delta\theta_{on}$) identik karena sama-sama menunjukkan kenaikan temperatur minyak atas. Kenaikan ini dipengaruhi oleh beban transformator dan sirkulasi minyak pendingin. Nilai tertinggi terjadi pada jam 07.00 sebesar 48,4484°C dan nilai terendah pada jam 10.00 sebesar 43,3654°C. Penurunan temperatur minyak atas yang

signifikan pada jam 09.00 hingga 12.00 mungkin menunjukkan adanya fluktuasi beban atau kondisi pendinginan yang lebih efektif selama jam tersebut.

6. Nilai selisih antara rata-rata temperatur minyak dengan kumparan ($\Delta\theta_{wo}$) menunjukkan perbedaan antara temperatur minyak dan kumparan, yang mencerminkan efisiensi perpindahan panas dari kumparan ke minyak. Semakin besar selisih ini, semakin besar panas yang dihasilkan oleh kumparan. Nilai $\Delta\theta_{wo}$ tertinggi tercatat pada jam 06.00 dan 07.00 sebesar 15,5°C, menunjukkan bahwa pada saat ini terdapat beban yang signifikan sehingga panas pada kumparan lebih besar daripada minyak. Nilai terendah terjadi pada jam 20.00 dengan $\Delta\theta_{wo}$ sebesar 6,2°C, yang menunjukkan bahwa pada waktu tersebut perpindahan panas berjalan lebih efektif atau beban lebih ringan.
7. Nilai kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak alami ($\Delta\theta_{cr(alami)}$) mencerminkan kenaikan temperatur titik panas (hot spot) dengan sirkulasi minyak alami, yang merupakan hasil kombinasi kenaikan temperatur minyak atas dan selisih temperatur minyak-kumparan. Nilai ini sangat penting karena hot spot berpotensi mempengaruhi umur isolasi transformator. Nilai tertinggi $\Delta\theta_{cr(alami)}$ terjadi pada jam 06.00 dan 07.00 sebesar 73,60°C, yang sejalan dengan kenaikan temperatur minyak atas dan selisih temperatur minyak-kumparan yang tinggi pada waktu tersebut. Ini menunjukkan bahwa transformator berada dalam kondisi beban berat pada saat ini, sehingga menghasilkan titik panas yang lebih tinggi. Sebaliknya, nilai terendah terjadi pada jam 20.00 sebesar 62,44°C, yang menunjukkan penurunan beban atau peningkatan efisiensi pendinginan.
8. Nilai kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak paksaan ($\Delta\theta_{cr(paksa)}$) mencerminkan kenaikan temperatur pada titik panas (hot spot) transformator ketika sirkulasi minyak dilakukan secara paksa untuk meningkatkan pendinginan. Kenaikan tertinggi terjadi pada jam 06.00 dan 07.00 sebesar 73,60°C. Ini sejalan dengan kenaikan temperatur minyak yang signifikan pada jam-jam tersebut, yang menunjukkan adanya beban tinggi. Nilai $\Delta\theta_{cr(paksa)}$ terendah terjadi pada jam 20.00 sebesar 62,44°C, menunjukkan bahwa beban pada waktu ini relatif lebih ringan, sehingga temperatur hot spot lebih rendah.
9. Selisih temperatur hot spot dengan top oil ($\Delta\theta_{td}$) mencerminkan perbedaan temperatur antara hot spot dan top oil (minyak bagian atas). Nilai ini menunjukkan seberapa besar panas yang terkonsentrasi di titik panas dibandingkan dengan bagian minyak atas yang menerima pendinginan lebih baik. Nilai $\Delta\theta_{td}$ bervariasi dengan fluktuasi terbesar terlihat pada jam 10.00, ketika $\Delta\theta_{td}$ mencapai 2,4118°C, yang menandakan adanya kondisi beban tinggi. Sebaliknya, nilai terendah tercatat pada jam 20.00 dengan selisih 0,7556°C, yang menunjukkan bahwa perbedaan antara hot spot dan minyak relatif kecil pada jam-jam tersebut.
10. Temperatur hot spot (θ_c) adalah temperatur maksimum yang dicapai pada titik panas dalam transformator, dan ini merupakan faktor utama yang memengaruhi umur isolasi transformator. Temperatur hot spot yang terlalu tinggi dapat mempercepat degradasi isolasi, yang mengurangi umur transformator. Temperatur hot spot tertinggi terjadi pada jam 12.00 sebesar 80,5558°C, yang menunjukkan bahwa transformator berada dalam kondisi beban berat pada waktu ini. Temperatur ini cukup tinggi dan memerlukan perhatian khusus untuk mencegah percepatan penuaan isolasi. Nilai terendah terjadi pada jam 23.00 sebesar 73,3318°C, yang menunjukkan kondisi beban yang lebih rendah.
11. Laju penuaan thermal (V) menunjukkan seberapa cepat isolasi transformator mengalami penuaan akibat panas yang dihasilkan selama operasi. Laju penuaan ini berkaitan langsung dengan temperatur hot spot. Semakin tinggi laju penuaan, semakin cepat isolasi transformator mengalami degradasi. Laju penuaan tertinggi terjadi pada jam 12.00 dengan nilai 4,1683 jam, yang berarti bahwa dalam satu jam operasi pada kondisi ini, transformator mengalami penuaan yang setara dengan 4,1683 jam pada kondisi normal. Nilai ini cukup tinggi dan menunjukkan bahwa beban berat selama waktu tersebut dapat mempercepat degradasi transformator. Sebaliknya, laju penuaan terendah tercatat pada jam 10.00 dengan nilai 1,4410 jam, yang berarti bahwa transformator berada dalam kondisi penuaan lebih lambat pada waktu tersebut.
12. Sisa umur transformator sebesar 6,1153 tahun menunjukkan bahwa transformator ini diperkirakan dapat beroperasi selama sekitar 6 tahun lagi sebelum mencapai akhir umur layanannya berdasarkan kondisi saat ini. Susut umur yang relatif tinggi menunjukkan bahwa transformator ini mengalami percepatan penuaan akibat beban yang signifikan dan kondisi operasional lainnya, seperti temperatur dan beban thermal.

IV. KESIMPULAN

1. Transformator tidak bekerja mendekati kapasitas penuh dengan rasio pembebanan rata-rata di bawah 30%. Beban tertinggi terjadi pada pukul 10.00 dengan daya semu mencapai 17,2271 MVA, yang menyebabkan peningkatan rugi tembaga dan kenaikan temperatur.

2. Pada saat beban tertinggi rugi tembaga mencapai 9,4802 kW. Ini menunjukkan bahwa beban berlebih meningkatkan rugi energi pada transformator, sehingga efisiensinya menurun selama beban puncak.
3. Kenaikan temperatur minyak dan hot spot tertinggi tercatat pada pukul 06.00 dan 07.00 dengan 73,60°C, yang menunjukkan adanya tantangan dalam pengelolaan panas selama beban puncak. Fluktuasi temperatur harus dipantau untuk mencegah kerusakan isolasi dan komponen internal transformator.
4. Rata-rata susut umur transformator per hari adalah 2,6164 jam, yang menunjukkan percepatan penuaan transformator akibat beban dan panas berlebih. Periode beban puncak memiliki dampak paling signifikan terhadap laju penuaan transformator.
5. Dengan lama masa pakai selama 14 tahun (2008-2022) dan perkiraan sisa umur 6,1153 tahun, transformator masih memiliki sekitar 6 tahun operasional sebelum mencapai akhir masa pakainya.
6. Transformator daya masih dapat beroperasi untuk jangka waktu yang cukup lama sebelum mencapai akhir masa pakainya, namun perlu dilakukan pemantauan lebih intensif terhadap kenaikan temperatur dan beban selama jam puncak untuk menjaga keandalan dan memperpanjang masa pakai transformator.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Mufrihi, M. Z., Tasmono, H., & Widagdo, R. S. (2023, May). Analisa Pengaruh Beban Dan Temperatur Lingkungan Terhadap Susut Usia Transformator Di Galaxy Mall 3. In *Senakama: Prosiding Seminar Nasional Karya Ilmiah Mahasiswa* (Vol. 2, No. 1, pp. 624-633).
- Azis, A., Nurdiana, N., & Iathifatun Nisa, U. (2018). Rugi-rugi Daya pada Transformator U. 019 PT. PLN (Persero) WS2JB Rayon Ampere Akibat Ketidakseimbangan Beban. *Jurnal Ampere*, 3(1), 177-184.
- Azis, A., & Pebrianti, I. K. (2019). Analisis Penyaluran Daya Listrik Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Dari Pltu Bukit Asam Ke Gardu Induk Keramasan Palembang. *Jurnal Surya Energy*, 3(2), 282-290.
- Azis, A., Wijayanti, L., & Mulyadi, M. (2024). Analisa Pemecahan Beban Pada Penyulang Subaru Gardu Induk Kenten Palembang Untuk Menurunkan Jatuh Tegangan. *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, 10(2), 141-156.
- Dendi, D., Azis, A., & Perawati, P. (2022). Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya 150 kV Di PLTGU Keramasan Palembang. *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, 9(1), 28-41.
- Febrianti, I. K. (2017). Analisa Penurunan Faktor Kerja Transformator Daya 30 MVA. *Jurnal Ampere*, 2(1), 18-22.
- Gultom, R., Patras, L. S., & Tuegeh, M. (2022). Analisa Perkiraan Umur Transformator Di Gardu Induk Paniki Berdasarkan Pengaruh Pembebanan.
- Jelita, P., Pebrianti, I. K., Azis, A., & Perawati, P. (2024). Analisa Kuat Penerangan Lampu Penerangan Jalan Pada Fly Over Jakabaring Palembang. *Jurnal Surya Energy*, 8(2), 58-69.
- Maryati, S., Azis, A., & Irwansi, Y. (2024). Analysis of Lightning Arrester Installation Location on Transformer 1 Bungaran Substation.
- Maruf, A., & Primadiyono, Y. (2021). Analisis Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 60 MVA Unit 1 Dan 2 Di Gi 150 kV Kalisari. *Edu Elektriika Journal*, 10(1), 19-24.
- Muzar, M. A., Syahrizal, S., & Syukri, M. (2018). Analisis Pengaruh Temperatur Akibat Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Di Gardu Induk Lambaro. *Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro*, 3(2).
- Pebrianti, I. K., Azis, A., Perawati, P., Nurdiana, N., & Irwansi, Y. (2021). Analisa Jatuh Tegangan pada Penyulang Cendana Gardu Induk Bungaran Palembang. *Jurnal Ampere*, 6(2), 49-64.

- Pujiono, P., Pambudi, P. E., & Mujiman, M. (2016). Analisis Pembebanan Terhadap Usia Pakai Transformator Tenaga Di Gardu Induk 150 kV. *Jurnal Elektrikal*, 3(1), 11-20.
- Rizal, M., Azis, A., Emidiana, I. K. P., Al Amin, M. S., Nurdiana, N., & Perawati, Y. I. (2024). Analysis of Load Imbalance in Tarakan Distribution Transformer of PT PLN (Persero) Sukarami Customer Service Unit.
- Tambunan, J. M., Hariyanto, A., & Tindra, W. K. (2015). Kerja Pembebanan Dan Temperatur Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 150/20 kV 60 MVA. *Sutet*, 5(2), 91-99.
- Wuwung, J. O. (2010). Pengaruh Pembebanan Terhadap Kenaikan Temperatur Pada Belitan Transformator Daya Jenis Terendam Minyak. *Tekno*, 8(52).