

# Analisis Pembebanan Transformator 20 kV Terhadap Susut Daya (*Losses*) pada Jaringan Distribusi Penyulang Pujon PT PLN ULP Batu

Sobri Miftahus Sururi<sup>1</sup>, Sergio Xavier Paskal W.<sup>2</sup>, Sujito<sup>3</sup>, Rizal Dwi Saputra<sup>4</sup>, Muhammad Satrio Naufal<sup>5</sup>, Mita Elifisia<sup>6</sup>  
Universitas Negeri Malang  
Jl. Semarang No.5, Kota Malang, Jawa Timur 65145  
sujito.ft@um.ac.id

## Abstrak

Susut energi listrik (*losses*) dapat mengakibatkan hilangnya energi selama penyaluran energi pada distribusi. Nilai yang melewati batas toleransi berdampak pada keandalan kualitas daya pada pelanggan PLN. Beban yang bersifat fluktuatif dapat mengakibatkan rugi-rugi pada transformator. Penelitian ini menganalisis pembebanan transformator distribusi 20 kV untuk mengkaji kondisi kerja pembebanan transformator dengan kaitannya terhadap susut daya (*losses*) yang terjadi selama kondisi kerja tersebut berlangsung. Analisis pembebanan transformator didukung oleh data dan simulasi dengan bantuan software ETAP. Dari hasil persentase pembebanan, diperoleh 62 data transformator pada jaringan distribusi penyulang Pujon PT PLN ULP Batu, terdapat 20 transformator memiliki persentase pembebanan < 40% dinyatakan dengan kondisi *underload*, 35 transformator memiliki persentase pembebanan 40%-80% dinyatakan dengan kondisi normal, dan 7 transformator memiliki persentase pembebanan > 80% dinyatakan dengan kondisi *overload*. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh rugi-rugi daya pada transformator tertinggi terjadi pada transformator D0009 dengan nilai rugi-rugi sebesar 5.6 kW dan 8.39 kvar dengan persentase pembebanan transformator 95.05% berkondisi *overload*. Kondisi yang tidak normal pada pembebanan transformator perlu ditindaklanjuti dengan upaya perbaikan.

**Kata Kunci :** Transformator Distribusi 20 kV, Rugi-rugi, Pembebanan

## Abstract

*Electrical energy losses (losses) can result in energy loss during energy distribution in distribution. Values that exceed tolerance limits have an impact on the reliability of power quality for PLN customers. Fluctuating loads can cause losses to the transformer. This research analyzes the loading of a 20 kV distribution transformer to examine the working conditions of the transformer loading in relation to the power losses that occur during these working conditions. Transformer loading analysis is supported by data and simulations with the help of ETAP software. From the results of the loading percentage, data was obtained on 62 transformers in the Pujon PT PLN ULP Batu feeder distribution network, there were 20 transformers with a loading percentage of*

*<40% stated under underload conditions, 35 transformers had a loading percentage of 40% -80% stated under normal conditions, and 7 The transformer has a loading percentage > 80% which is expressed as an overload condition. Based on the simulation results, it was found that the highest power losses in the transformer occurred in the D0009 transformer with a loss value of 5.6 kW and 8.39 kvar with a transformer loading percentage of 95.05% under overload conditions. Abnormal conditions in transformer loading need to be followed up with repair efforts.*

**Keywords :** 20 kV Distribution Transformer, Losses, Load

## I. PENDAHULUAN

Sebagai perusahaan listrik negara berbagai penanganan telah dilakukan oleh PT PLN (Persero) UID Jawa Timur UP3 Malang ULP Batu untuk menanggulangi gangguan pada jaringan distribusi. Salah satu kendala yang muncul yaitu terjadinya susut energi listrik (*losses*) pada jaringan distribusi. Susut energi listrik (*losses*) terjadi akibat hilangnya energi listrik ketika proses penyaluran, hal ini dapat dilihat dari adanya selisih antara energi listrik jual dan beli yang dapat menghasilkan nilai susut energi listrik (*losses*), nilai yang melewati batas toleransi akan berdampak pada ketidak andalan kualitas daya yang dihantarkan menuju pelanggan dan akan menyebabkan kerugian terhadap PLN sebagai perusahaan pen-supply energi listrik. Dalam proses pendistribusian energi listrik tentu tidak lepas dari terjadinya susut energi (*losses*), namun nilai susut energi memiliki batas toleransi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Konversi energi listrik memerlukan peralatan listrik pendukung, salah satunya transformator. Transformator adalah alat listrik statis yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik melalui suatu gandingan magnet dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik yang dapat menaikkan dan menurunkan tegangan atau arus dengan frekuensi yang sama. Pada efisiensi suatu transformator tenaga sangat dipengaruhi beban yang dilayani oleh transformator tersebut. Beban yang terpasang pada transformator biasanya selalu berubah-ubah.

Beban yang bersifat fluktuatif ini menimbulkan rugi-rugi pada transformator. Ketika suatu transformator diberi energi akan timbul rugi-rugi inti, rugi-rugi kumparan dan rugi-rugi bocor merupakan sumber panas dan menyebabkan kenaikan suhu kumparan dan minyak transformator [1]. Kinerja transformator daya ditentukan melalui parameter rugi-rugi daya (*losses*) yang terjadi pada transformator [2]. Jika terjadi rugi-rugi pada inti besi dapat menyebabkan timbulnya panas dan getaran yang berlebih pada transformator sehingga menyebabkan nilai efisiensi dan usia pakai transformator (*Loss of Life*) menjadi berkurang. Salah satu penyebab rugi-rugi daya (*losses*) transformator adalah pembebanan pada transformator yang mengalami *overload*. Kondisi ini mengakibatkan terganggunya kontinuitas penyaluran daya listrik yang dapat menyebabkan tingginya nilai rugi-rugi daya pada transformator. Nilai rugi-rugi daya yang ditetapkan oleh PT. PLN (Persero) melalui SPLN 50: 1997 menetapkan standar rugi-rugi daya pada transformator distribusi  $\leq 2\%$  [3].

Berdasarkan penelitian relevan, pembebanan yang tinggi mengakibatkan rugi daya transformator yang tinggi pula, hal ini dibuktikan dengan data transformator *overload* pada penyulang Tamansari Kota Tasikmalaya yaitu transformator RHY, SBBJ, dan STY. Transformator RHY dengan persentase pembebanan sebesar 92.03% dari 250 kVA kapasitas transformator, mengalami rugi daya aktif 5.2 kW dan rugi daya reaktif 7.8 kVAR dengan persentase rugi daya aktif sebesar 2.45%. Transformator SBBJ dengan persentase pembebanan sebesar 96.58% dari 100 kVA kapasitas transformator, mengalami rugi daya aktif 2.3 kW dan rugi daya reaktif 3.4 kVAR dengan persentase rugi daya aktif sebesar 2.71%. Transformator STY dengan persentase pembebanan sebesar 99.80% dari 100 kVA kapasitas transformator, mengalami rugi daya aktif 2.4 kW dan rugi daya reaktif 3.7 kVAR dengan persentase rugi daya aktif sebesar 2.82%. Dari data tersebut ketiga transformator tersebut memiliki nilai persentase rugi daya aktif  $> 2\%$  yang telah melewati batas rugi daya yang telah ditetapkan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa persentase pembebanan dapat mempengaruhi rugi daya pada transformator [4].

Berdasarkan kondisi tersebut perlu adanya analisis terhadap nilai, faktor penyebab, dan upaya perbaikan susut energi listrik (*losses*) penyulang Pujon. Kontribusi utama penelitian ini menjadi bahan evaluasi terhadap susut energi listrik (*losses*) jaringan distribusi penyulang Pujon dalam rangka mengoptimalkan pemenuhan kebutuhan energi listrik terhadap konsumen.

## II. TEORI

### A. Transformator

Transformator daya adalah peralatan listrik yang mengubah tegangan listrik dari tinggi ke rendah atau sebaliknya. Transformator memegang peranan penting dalam sistem transmisi dan distribusi listrik, sehingga alat ini harus beroperasi secara efisien untuk menyalurkan listrik untuk menciptakan system yang optimal. Transformator dapat

dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu transformator daya, transformator distribusi, dan transformator pengukuran [5].

Transformator memiliki dua belitan untuk mengubah besaran ukur tegangan listrik dari tingkat satu ke tingkat yang lain. Kumparan transformator diisolasi dari inti dan kumparan lain dengan bahan isolasi padat. Transformator dua belitan terdiri dari kumparan primer dan sekunder. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan bolak-balik, maka akan timbul fluks magnet yang menginduksikan tegangan pada kumparan sekunder. Apabila rangkaian sekunder ditutup, maka akan mengalir arus pada kumparan sekunder. Dengan demikian kumparan pada transformator berfungsi untuk mengubah tegangan dan arus listrik [6].

### B. Pembebanan Transformator

Efisiensi transformator sangat dipengaruhi terhadap beban diampu oleh transformator, sehingga transformator harus bebani sesuai dengan kapasitasnya. Pembebanan diatas dan dibawah standar dapat menyebabkan panas berlebih pada kumparan transformator. Beban yang melebihi kapasitas transformator dapat menimbulkan risiko kerusakan [7]. Oleh karena itu diperlukan perhitungan persentase pembebanan pada transformator.

Persamaan (1) merupakan persamaan untuk menghitung persentase pembebanan transformator distribusi, yaitu:

$$\%beban_{trafo} = \frac{S_{beban}}{S_{trafo}} \times 100\% \quad (1)$$

dimana:

$S_{beban}$  = daya pengukuran pada sisi sekunder (kVA)

$S_{trafo}$  = daya nominal trafo (kVA)

Standar kondisi pembebanan transformator distribusi telah ditetapkan oleh PT PLN (Persero), dengan persentase beban terhadap transformator dengan nilai 40 – 80%. Apabila persentase pembebanan  $< 40\%$ , maka kondisi transformator dinyatakan *underload* dan apabila persentase pembebanan  $> 80\%$ , maka kondisi trafo dinyatakan *overload* atau bahkan *overblast* apabila persentase pembebanan  $> 100\%$  [8]. Dengan persamaan tersebut dapat dilakukan pemetaan pada setiap kondisi transformator sehingga dapat dilakukan tindakan untuk meningkatkan efisiensi penyaluran energy listrik.

### C. Rugi-Rugi Daya pada Transformator

Dalam kondisi ideal, daya listrik yang masuk ke transformator akan sama dengan daya listrik yang keluar dari transformator. Namun faktanya hal ini tidak akan terjadi, karena adanya rugi daya pada transformator yang mengakibatkan energi listrik tidak tersalurkan secara penuh. Energi listrik tersebut sebagian akan hilang selama proses transformasi dengan berubah menjadi bentuk energi lain, seperti panas dan getaran [9].

Pada kondisi tidak berbeban, transformator hanya mengalami rugi inti saja. Perubahan beban tidak akan mempengaruhi rugi inti, karena rugi inti akan tetap sama dari beban nol hingga beban penuh. Ketika kondisi berbeban maka

rugi daya yang terjadi disebabkan oleh rugi inti dan rugi tembaga [4]. Persamaan (2) merupakan persamaan untuk menghitung rugi daya pada transformator, yaitu:

$$P_{losses} = P_{Copper} + P_{Core} \quad (2)$$

dimana:

$P_{losses}$  = total rugi-rugi transformator (W)

$P_{Copper}$  = rugi-rugi kumparan transformator (W)

$P_{Core}$  = rugi-rugi Inti besi transformator (W)

1) *Rugi Tembaga (Copper Losses)*: Rugi tembaga adalah rugi yang disebabkan oleh arus listrik yang mengalir dalam kawat tembaga. Rugi tembaga berbanding lurus dengan besarnya beban. Semakin besar beban, semakin besar arus yang mengalir dalam kawat tembaga, dan semakin besar pula rugi tembaga [10]. Persamaan (3) merupakan persamaan untuk menghitung rugi tembaga pada transformator, yaitu:

$$P_{CU} = I^2_P \cdot R_1 + I^2_S \cdot R_2 \quad (3)$$

dimana:

$P_{CU}$  = rugi-rugi tembaga (watt)

$I^2_P$  = arus primer (A)

$I^2_S$  = arus sekunder (A)

$R_1$  = resistansi kumparan primer ( $\Omega$ )

$R_2$  = resistansi kumparan sekunder ( $\Omega$ )

Persamaan tersebut hanya berlaku sebagai pendekatan. Karena arus beban yang terus berubah menyebabkan rugi-rugi tembaga juga berubah-ubah sesuai dengan besar beban.

2) *Rugi Inti Besi (Core Losses)*: Rugi inti besi yang terjadi pada transformator disebabkan oleh dua faktor, yaitu rugi hysteresis dan arus eddy yang dapat diukur melalui pengujian tanpa beban. Rugi hysteresis disebabkan oleh fluks magnet yang berubah-ubah pada inti besi. Sedangkan arus eddy disebabkan oleh arus listrik yang mengalir dalam inti besi [11]. Persamaan (4) merupakan rugi inti besi pada transformator, yaitu:

$$P_{fe} = P_h + P_e \quad (4)$$

dimana:

$P_{fe}$  = rugi inti (watt)

$P_h$  = rugi hysteresis (watt)

$P_e$  = rugi arus eddy (watt)

Rugi hysteresis disebabkan oleh fluks bolak-balik dalam peningkatan efisiensi dari transformasi gelombang elektromagnetik menjadi arus [12]. Persamaan (5) merupakan rugi hysteresis transformator, yaitu:

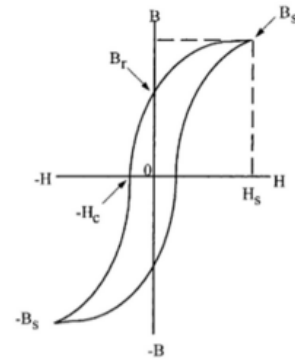
$$P_h = K_h \cdot f \cdot B^2 \quad (5)$$

dimana:

$K_h$  = konstanta hysteresis

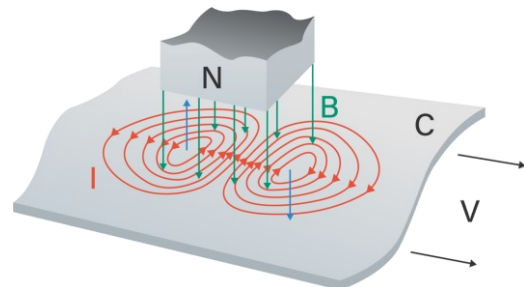
$f$  = frekuensi (Hz)

$B$  = kerapatan fluks maksimum (Tesla)



Gbr. 1 Ilustrasi Rugi Hysteresis

Rugi arus eddy adalah rugi yang disebabkan oleh arus listrik yang mengalir dalam inti besi. Arus listrik ini mengalir dalam bentuk putaran, sehingga disebut arus eddy. Arus eddy menyebabkan pemanasan pada inti besi sehingga energi listrik tersebut terbuang menjadi energi panas [13].



Gbr. 2 Ilustrasi Arus Eddy

Persamaan (6) merupakan rugi arus eddy transformator, yaitu:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (6)$$

dimana:

$K_e$  = konstanta arus eddy

#### D. Faktor Daya

Faktor daya adalah ukuran seberapa efisien energi listrik digunakan. Faktor daya dapat dihitung dengan menggunakan perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu (VA). Daya aktif adalah daya yang sebenarnya digunakan untuk melakukan kerja, sedangkan daya semu adalah daya total yang mengalir dalam sistem [14]. Persamaan (7) merupakan persamaan untuk menghitung faktor daya, yaitu:

$$\cos \varphi = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} \quad (7)$$

Pada sistem tiga fasa diketahui:

$$P = \sqrt{3} \times V \times \cos \varphi, \quad P = S \times \cos \varphi, \quad S = \sqrt{3} \times V \times I$$

dimana:

$\cos \varphi$  = faktor daya

$P$  = daya aktif (kW)

$S$  = daya semu (kVA)

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode simulasi dengan bantuan *software* ETAP. ETAP merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan berbagai simulasi system tenaga listrik. Dalam simulasi terdapat beberapa tahapan yang dapat dilakukan, diantaranya, membuat desain rangkaian sesuai dengan *single line* jaringan distribusi Penyulang Pujon, masukkan data jarak dan kapasitas daya transformator pada *software* ETAP sesuai dengan rangkaian dan letak transformator, dan *runing software* ETAP. Dengan metode simulasi diperoleh hasil rugi-rugi daya (*losses*) setiap transformator pada Penyulang Pujon. Data yang diperoleh akan disajikan dalam bentuk deskripsi.

#### B. Tempat dan Waktu Penelitian

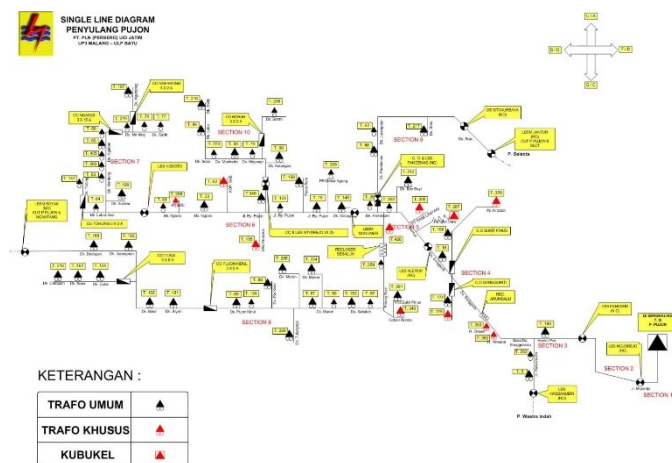
Penelitian dan pengambilan data susut energi listrik (*losses*) dilakukan di PT PLN (Persero) UID Jawa Timur UP3 Malang ULP Batu berlokasi di Jalan Trunojoyo, Songgokerto, Kec. Batu, Kota Batu pada tanggal 3 Juli sampai dengan 25 Agustus 2023.

#### C. Teknik Pengumpulan Data

Data sampel diperoleh dari berbagai sumber untuk mendukung penelitian ini, sehingga data yang diperoleh dapat diselaraskan satu sama lain. Adapun teknik pengumpulan data sampel dalam penelitian ini, diantaranya:

1) *Interview*: Pengumpulan data dilakukan dengan teknik wawancara dan data yang telah tersedia di PT PLN (Persero) UID Jawa Timur UP3 Malang ULP Batu, yaitu data *single line* jaringan distribusi penyulang Pujon yang ditunjukkan oleh Gambar 3 dan data pembebanan trafo distribusi penyulang Pujon yang ditunjukkan pada Tabel 1.

2) *Studi Literature*: Pengumpulan data dilakukan membaca literature baik dari penelitian-penelitian sebelumnya maupun dari internet yang berhubungan dengan objek yang diteliti.



Gbr. 3 Single Line Jaringan Distribusi Penyulang Pujon

TABEL I  
 DATA PEMBEBANAN TRAFODISTRIBUSI PENYULANG PUJON

No	Nomor GTT	Kapasitas Daya Trafo (kVA)	Beban (kVA)
1	D0009	250	237.63
2	D0016	200	117.73
3	D0019	250	125.47
4	D0033	250	178.10
5	D0036	100	81.29
6	D0057	150	117.46
7	D0058	100	72.22
8	D0059	160	113.08
9	D0060	250	170.20
10	D0061	160	146.91
11	D0062	200	10.46
12	D0063	100	58.07
13	D0064	100	60.78
14	D0065	160	110.27
15	D0066	100	60.65
16	D0076	75	35.53
17	D0077	160	112.66
18	D0079	250	185.34
19	D0080	150	88.45
20	D0087	100	43.83
21	D0088	100	41.99
22	D0089	160	157.60
23	D0094	100	79.41
24	D0098	160	97.16
25	D0123	150	112.91
26	D0124	50	35.52
27	D0145	160	152.73
28	D0147	100	38.74
29	D0153	160	111.33
30	D0168	25	5.87
31	D0174	200	104.15
32	D0175	160	1.15
33	D0180	160	80
34	D0195	160	7.04
35	D0196	50	25.15
36	D0197	25	18.01
37	D0198	200	137.37
38	D0202	160	105.57
39	D0204	50	15.09
40	D0206	200	57.48
41	D0212	100	38.61
42	D0216	200	130.85
43	D0217	50	28.07
44	D0219	100	83.67
45	D0223	100	47.09
46	D0236	25	5.97
47	D0262	100	73.73
48	D0265	100	53.75
49	D0266	100	80.41
50	D0287	250	38.87
51	D0298	100	35.96
52	D0305	100	8.90
53	D0334	160	63.55
54	D0340	100	8.95

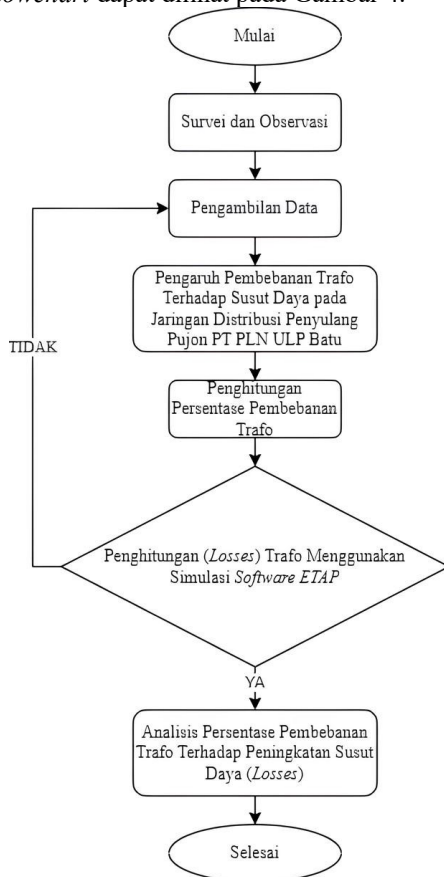
55	D0346	160	87.90
56	D0352	100	20.60
57	D0353	160	28.32
58	D0359	100	2.05
59	D0378	160	64.15
60	D0391	100	0.70
61	D0405	160	59.33
62	D0426	100	1.82

**D. Analisis Pengumpulan Data**

Data yang berhasil diperoleh, baik data dari perusahaan maupun data literature (teori) akan dianalisa secara kualitatif dan akan disajikan dalam bentuk deskriptif. Dengan melakukan simulasi *software* ETAP diperoleh hasil data rugi-rugi daya (*losses*) yang telah merepresentasikan perhitungan rugi-rugi daya yang terjadi pada setiap transformator. Dengan metode ini akan diperoleh deskripsi tentang data dan hasil simulasi yang telah dikumpulkan dalam kalimat logis.

**E. Flowchart**

Setelah memperoleh data yang dibutuhkan, langkah berikutnya yaitu mengolah data, dengan mengolah data tersebut sehingga diperoleh hasil yang akan dianalisa. Langkah terakhir adalah menuliskan penelitian ke dalam karya ilmiah dan memberikan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan. Gambar *flowchart* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gbr. 4 Flowchart Penelitian

**IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Perhitungan Pembebanan Transformator**

Berdasarkan data beban dan kapasitas transformator pada penyulang Pujon yang diperoleh dari PT (Persero) ULP Batu sehingga dapat diketahui persentase pembebanan setiap transformator. Mengacu pada (1), diperoleh persentase pembebanan transformator penyulang Pujon dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL II  
 PERSENTASE PEMBEBANAN TRANSFORMATOR PENYULANG PUJON

No	Nomor GTT	Kapasitas Daya Trafo (kVA)	Beban (kVA)	Pembebanan Trafo (%)	Kondisi Trafo
1	D0009	250	237.63	95.05%	Overload
2	D0016	200	117.73	58.86%	Normal
3	D0019	250	125.47	50.18%	Normal
4	D0033	250	178.10	71.24%	Normal
5	D0036	100	81.29	81.29%	Overload
6	D0057	150	117.46	78.30%	Normal
7	D0058	100	72.22	72.22%	Normal
8	D0059	160	113.08	70.67%	Normal
9	D0060	250	170.20	68.08%	Normal
10	D0061	160	146.91	91.81%	Overload
11	D0062	200	10.46	5.23%	Underload
12	D0063	100	58.07	58.07%	Normal
13	D0064	100	60.78	60.78%	Normal
14	D0065	160	110.27	68.91%	Normal
15	D0066	100	60.65	60.65%	Normal
16	D0076	75	35.53	47.37%	Normal
17	D0077	160	112.66	70.41%	Normal
18	D0079	250	185.34	74.13%	Normal
19	D0080	150	88.45	58.96%	Normal
20	D0087	100	43.83	43.83%	Normal
21	D0088	100	41.99	41.99%	Normal
22	D0089	160	157.60	98.5%	Overload
23	D0094	100	79.41	79.41%	Normal
24	D0098	160	97.16	60.72%	Normal
25	D0123	150	112.91	75.27%	Normal
26	D0124	50	35.52	71.04%	Normal
27	D0145	160	152.73	95.45%	Overload
28	D0147	100	38.74	38.74%	Underload
29	D0153	160	111.33	69.58%	Normal
30	D0168	25	5.87	23.48%	Underload
31	D0174	200	104.15	52.07%	Normal
32	D0175	160	1.15	0.71%	Underload
33	D0180	160	80	50%	Normal
34	D0195	160	7.04	4.4%	Underload
35	D0196	50	25.15	50.3%	Normal
36	D0197	25	18.01	72.04%	Normal
37	D0198	200	137.37	68.68%	Normal
38	D0202	160	105.57	65.98%	Normal
39	D0204	50	15.09	30.18%	Underload
40	D0206	200	57.48	28.74%	Underload
41	D0212	100	38.61	38.61%	Underload

42	D0216	200	130.85	65.42%	Normal
43	D0217	50	28.07	56.14%	Normal
44	D0219	100	83.67	83.67%	Overload
45	D0223	100	47.09	47.09%	Normal
46	D0236	25	5.97	23.88%	Underload
47	D0262	100	73.73	73.73%	Normal
48	D0265	100	53.75	53.75%	Normal
49	D0266	100	80.41	80.41%	Overload
50	D0287	250	38.87	15.54%	Underload
51	D0298	100	35.96	35.96%	Underload
52	D0305	100	8.90	8.9%	Underload
53	D0334	160	63.55	39.71%	Underload
54	D0340	100	8.95	8.95%	Underload
55	D0346	160	87.90	54.93%	Normal
56	D0352	100	20.60	20.6%	Underload
57	D0353	160	28.32	17.7%	Underload
58	D0359	100	2.05	2.05%	Underload
59	D0378	160	64.15	40.09%	Normal
60	D0391	100	0.70	0.7%	Underload
61	D0405	160	59.33	37.08%	Underload
62	D0426	100	1.82	1.82%	Underload

6	D0057	78.30%	Normal	2.28	3.42
7	D0058	72.22%	Normal	1.29	1.94
8	D0059	70.67%	Normal	1.99	2.99
9	D0060	68.08%	Normal	2.87	4.31
10	D0061	91.81%	Overload	3.44	5.16
11	D0062	5.23%	Underload	0.0121	0.0182
12	D0063	58.07%	Normal	0.84	1.26
13	D0064	60.78%	Normal	0.931	1.4
14	D0065	68.91%	Normal	1.9	2.85
15	D0066	60.65%	Normal	0.932	1.4
16	D0076	47.37%	Normal	0.43	0.645
17	D0077	70.41%	Normal	2.01	3.02
18	D0079	74.13%	Normal	3.45	5.17
19	D0080	58.96%	Normal	1.29	1.93
20	D0087	43.83%	Normal	0.477	0.715
21	D0088	41.99%	Normal	0.435	0.652
22	D0089	98.5%	Overload	3.98	5.96
23	D0094	79.41%	Normal	1.58	2.37
24	D0098	60.72%	Normal	1.47	2.21
25	D0123	75.27%	Normal	3.18	4.77
26	D0124	71.04%	Normal	0.65	0.975
27	D0145	95.45%	Overload	3.71	5.57
28	D0147	38.74%	Underload	0.376	0.564
29	D0153	69.58%	Normal	1.92	2.87
30	D0168	23.48%	Underload	0.0345	0.0518
31	D0174	52.07%	Normal	1.32	1.97
32	D0175	0.71%	Underload	0.0001	0.0002
33	D0180	50%	Normal	0.963	1.45
34	D0195	4.4%	Underload	0.0074	0.0111
35	D0196	50.3%	Normal	0.311	0.466
36	D0197	72.04%	Normal	0.327	0.49
37	D0198	68.68%	Normal	2.35	3.53
38	D0202	65.98%	Normal	1.74	2.61
39	D0204	30.18%	Underload	0.11	0.165
40	D0206	28.74%	Underload	0.393	0.589
41	D0212	38.61%	Underload	0.372	0.557
42	D0216	65.42%	Normal	2.15	3.23
43	D0217	56.14%	Normal	0.387	0.581
44	D0219	83.67%	Overload	1.79	2.69
45	D0223	47.09%	Normal	0.548	0.823
46	D0236	23.88%	Underload	0.0353	0.0529
47	D0262	73.73%	Normal	1.34	2
48	D0265	53.75%	Normal	0.727	1.09
49	D0266	80.41%	Overload	1.61	2.41
50	D0287	15.54%	Underload	0.146	0.219
51	D0298	35.96%	Underload	0.319	0.479
52	D0305	8.9%	Underload	0.0196	0.0294
53	D0334	39.71%	Underload	0.628	0.942
54	D0340	8.95%	Underload	0.0195	0.0292
55	D0346	54.93%	Normal	1.2	1.81
56	D0352	20.6%	Underload	0.105	0.158
57	D0353	17.7%	Underload	0.117	0.176
58	D0359	2.05%	Underload	0.001	0.0014
59	D0378	40.09%	Normal	0.619	0.928
60	D0391	0.7%	Underload	0.0002	0.0004
61	D0405	37.08%	Underload	0.537	0.806
62	D0426	1.82%	Underload	0.001	0.0014

### B. Analisis Pembebanan Transformator

Berdasarkan perhitungan pembebanan transformator penyulang Pujon pada Tabel 2, diperoleh hasil persentase pembebanan transformator distribusi penyulang dengan berbagai kondisi, yaitu trafo dengan kondisi normal, *underload*, dan *overload*. Kondisi ini diketahui dari standart persentase pembebanan transformator yang dianjurkan SPLN 50/1982 dan D3.002-1:2007 yaitu dengan nilai 40% - 80% dari transformator distribusi. Jika persentase < 40% maka transformator tersebut dinyatakan *underload*, jika persentase >80% maka transformator tersebut dinyatakan *overload*, dan jika persentase > 100% maka transformator tersebut dinyatakan *overblast* [15]. Dari hasil persentase pembebanan pada Tabel 2, diperoleh 62 transformator terdapat 20 transformator berkondisi *underload*, 35 transformator berkondisi normal, dan 7 transformator berkondisi *overload*. Hasil persentase pembebanan transformator tersebut didukung oleh simulasi dengan bantuan *software* ETAP.

### C. Rugi-Rugi Daya (Losses) pada Transformator

Rugi-rugi daya pada transformator diperoleh dari simulasi dengan bantuan *software* ETAP. Rugi-rugi daya transformator dapat dilihat pada Tabel 3.

TABEL III  
RUGI-RUGI DAYA TRANSFORMATOR

No	Nomor GTT	Pembebanan Trafo (%)	Kondisi Trafo	Rugi-Rugi Daya	
				Daya Nyata (kW)	Daya Reaktif (kvar)
1	D0009	95.05%	Overload	5.6	8.39
2	D0016	58.86%	Normal	1.7	2.55
3	D0019	50.18%	Normal	1.55	2.32
4	D0033	71.24%	Normal	3.18	4.78
5	D0036	81.29%	Overload	1.64	2.47

Berdasarkan Tabel 3, diperoleh rugi-rugi daya pada transformator penyulang Pujon tertinggi terjadi pada transformator D0009 dengan nilai rugi-rugi (*losses*) sebesar 5.6 kW dan 8.39 kvar dengan persentase pembebanan transformator 95.05% berkategori *overload*. Hal ini disebabkan karena rugi-rugi inti besi dan tembaga pada transformator tersebut. Rugi-rugi inti besi dipengaruhi oleh rugi hysteresis disebabkan oleh fluks bolak-balik dari gelombang elektromagnetik menjadi arus, dan arus eddy yang disebabkan oleh listrik yang mengalir dalam inti besi dalam bentuk putaran yang menyebabkan pemanasan pada inti besi sehingga energi listrik tersebut terbuang menjadi energi panas. Rugi-rugi tembaga disebabkan oleh besarnya arus listrik yang mengalir dalam kawat tembaga, karena rugi tembaga berbanding lurus dengan besarnya beban. Sehingga semakin besar beban, semakin besar arus yang mengalir dalam kawat tembaga, dan semakin besar pula rugi tembaga

#### D. Dampak Persentase Pembebanan Transformator Tidak Normal

Dampak yang dialami ketika persentase pembebanan transformator tidak normal akan mengakibatkan nilai rugi daya (*losses*) yang besar pada transformator. Dalam kondisi *overload* akan terjadi peningkatan arus netral, arus netral tinggi yang mengalir pada inti besi transformator dapat mengakibatkan arus eddy yang besar, karena terjadinya peningkatan medan magnet. Peningkatan medan magnet mengakibatkan arus yang mengalir mengalami perputaran pada inti besi yang berdampak pada suhu transformator yang meningkat, karena energi listrik yang mengalir pada inti besi akan berubah menjadi energi panas. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari arus eddy yang mengalir memiliki nilai yang besar [16].

Ketika transformator berkategori *overload* dalam kurun waktu yang lama dapat mengakibatkan kenaikan suhu pada lilitan transformator. Panas berlebih pada lilitan transformator dapat mengakibatkan rusaknya isolator lilitan yang beresiko pada kerusakan dan berkurangnya umur transformator [17].

Pada kondisi *underload*, transformator tidak akan bekerja secara optimal. Hal ini terjadi karena beban yang diampu memiliki nilai kecil dibandingkan dengan kapasitas transformator yaitu < 40% dari kapasitas transformator. Selain itu perusahaan dapat mengalami kerugian finansial karena telah mengeluarkan biaya investasi besar yang tidak sebanding dengan pendapatan beban pada transformator *underload*.

#### E. Upaya Perbaikan Persentase Pembebanan Transformator Tidak Normal

Upaya perbaikan yang dapat dilakukan agar pembebanan transformator normal yaitu dengan melakukan penggantian transformator dengan kapasitas yang sesuai dengan beban listrik di suatu wilayah. Hal ini dilakukan apabila pembebanan transformator berkategori tidak normal yang disebabkan oleh persentase pembebanan transformator yang terlalu besar pada wilayah tersebut. Nilai persentase pembebanan pada

transformator dapat diperoleh dengan persamaan (1). Namun penggantian transformator ini perlu dipertimbangkan karena memerlukan biaya investasi yang besar dan membutuhkan waktu yang lama.

Upaya perbaikan lain yang dapat dilakukan adalah pemindahan beban pada transformator yang mengalami beban *overload* maupun *underload*. Sebelum melakukan pemindahan beban, dilakukan terlebih dahulu pengukuran beban ketika beban puncak sebagai dasar pemetaan beban untuk mengetahui pembebanan transformator. Pengukuran beban puncak dilakukan dengan jenis pelanggan dan jam operasional penggunaan listrik, seperti pelanggan industri dapat dilakukan pengukuran ketika proses produksinya dan pelanggan rumah tangga dapat dilakukan pengukuran ketika malam hari karena pada malam hari penggunaan daya listrik rumah tangga meningkat. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan tang amperemeter untuk mengetahui tegangan dan arus pada setiap fasa transformator. Setelah melakukan pengukuran beban puncak dan pemetaan beban akan diperoleh kondisi pembebanan pada transformator. Apabila persentase pembebanan transformator mengalami kondisi *overload* dan *underload*, maka akan dilakukan pemindahan beban yaitu memindahkan jaringan beban (fasa) yang mengalami *overload* ke jaringan beban (fasa) yang mengalami *underload*. Pemindahan jaringan ini dilakukan dengan memperhitungkan beban yang dapat diampu oleh transformator sesuai dengan kapasitasnya, dengan cara ini beban dapat diampu oleh transformator secara merata [18]. Dalam kasus ini upaya yang dapat dilakukan yaitu melakukan perpindahan beban transformator berkategori *overload* ke transformator *underload* maupun normal, diantaranya dapat dilakukan pemindahan beban transformator D0009 dialihkan ke D0262 atau menuju transformator penyulang lain yaitu penyulang wastra indah, pemindahan beban transformator D0061 dialihkan ke D0033, pemindahan beban transformator D0089 dialihkan ke D0124, dan pemindahan beban D0145 dialihkan ke D019. Sehingga mencapai persentase pembebanan transformator yang normal. Contoh kegiatan pemindahan beban yang dilakukan oleh PT PLN (Persero) ULP Batu dapat dilihat pada Gambar 5.



Gbr. 5 Pemindahan Beban

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data persentase pembebanan, diperoleh 62 data transformator pada jaringan distribusi penyulang Pujon PT PLN ULP Batu, terdapat 20 transformator memiliki persentase pembebanan < 40% dinyatakan dengan kondisi *underload*, 35 transformator memiliki persentase pembebanan 40%-80% dinyatakan dengan kondisi normal, dan 7 transformator memiliki persentase pembebanan > 80% dinyatakan dengan kondisi *overload*. Dan diperoleh rugi-rugi daya transformator tertinggi terjadi pada transformator D0009 dengan nilai rugi-rugi sebesar 5.6 kW dan 8.39 kvar dengan persentase pembebanan transformator 95.05% berdasarkan analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa permasalahan rugi-rugi daya pada transformator bergantung pada kondisi kerja dari pembebanan transformator tersebut. Pada kondisi *overload* transformator memiliki rugi-rugi yang lebih besar dibanding kondisi kerja pembebanan normal. Sehingga kondisi *overload* mengakibatkan kerugian teknis pada transformator. Sedangkan, untuk kondisi kerja transformator yang terindikasi *underload* lebih mengakibatkan pada kerugian investasi karena peralatan yang digunakan tidak digunakan secara optimal sesuai kerja pembebanan normalnya. Sebagai upaya perbaikan untuk mengoptimalkan kerja pembebanan transformator pada jaringan dilakukan penggantian transformator dengan kapasitas yang sesuai dengan beban listrik di suatu wilayah atau dengan pemindahan beban pada transformator yang mengalami beban *overload* maupun *underload*. Upaya perbaikan yang dapat dilakukan PLN ULP Batu yaitu melakukan perpindahan beban transformator berkondisi *overload* ke transformator *underload* maupun normal, diantaranya dapat dilakukan pemindahan beban transformator D0009 dialihkan ke D0262 atau menuju transformator penyulang lain yaitu penyulang wastra indah, pemindahan beban transformator D0061 dialihkan ke D0033, pemindahan beban transformator D0089 dialihkan ke D0124, dan pemindahan beban D0145 dialihkan ke D019. Dengan upaya perbaikan tersebut diharapkan dapat meminimalisir terjadinya rugi-rugi daya transformator sehingga terciptanya sistem distribusi listrik yang handal.

## REFERENSI

- [1] M. Srinivasan dan A. Krishnan, "Prediction of Transformer Insulation Life with an Effect of Environmental Variables," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 55, no. 5, hal. 43–48, 2012, doi: 10.5120/8755-2658.
- [2] Y. Y. Rizki dan E. Ervianto, "Perkiraan Umur Transformator Berdasarkan Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Lingkungan Menggunakan Metode Trend Linear," *Jom Fteknik*, vol. 6, no. 2, hal. 1–8, 2019.
- [3] PT. PLN (Persero), "SPLN 50:1997 Spesifikasi Transformator Distribusi." Jakarta, hal. 1–20, 1997.
- [4] M. Aris Risnandar, L. Faridah, dan R. Nurdiansyah, "Analisis Rugi Daya Trafo Distribusi Pada Penyulang Tamansari Kota Tasikmalaya," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 13, no. 1, hal. 13–19, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.unsil.ac.id/index.php/jeee/article/download/5643/2295>
- [5] J. Tiro dan R. L., "Analisis Penempatan Transformator Distribusi Berdasarkan Jatuh Tegangan Di PT PLN(Persero) ULP Malino," *J. Teknol. Elekterika*, vol. 3, no. 2, hal. 69, 2019, doi: 10.31963/elekterika.v3i2.1553.
- [6] J. Ohoiwutun, M. Dwiyanto, dan T. Sogen, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi 100 kVA pada PT. PLN (Persero) Unit AIMAS," vol. 5, no. 2, hal. 19, 2019.
- [7] A. Monica Putri, Yassir, dan Maimun, "Studi Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Transformator 66 Mva Di Pltmg Sumbagut 2 Peaker 250 Mw," *J. Tektro*, vol. 4, no. 2, hal. 118, 2020.
- [8] C. Arifin, "Studi Analisa Penempatan Transformator Distribusi Berdasarkan Beban Lebih Di Pt. Pln (Persero) Area Kediri Upj Rayon Srengat Blitar," *J. Qua Tek.*, vol. 7, no. 2, hal. 1–15, 2017, doi: 10.35457/quateknika.v7i2.238.
- [9] H. Elnizar, H. Gusmedi, dan O. Zebua, "Analisis Rugi-Rugi (Losses) Transformator Daya 150/20 KV di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sutami ULTG Tarahan," *Electrician*, vol. 15, no. 2, hal. 116–126, 2021, doi: 10.23960/ele.v15n2.2197.
- [10] E. Prabowo, "Studi Analisis Perhitungan Rugi Hysterisis Dan Arus Eddy Pada Trafo Step Up Fase 220V/5Kv," Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia, 2018.
- [11] Syukri, T. M. Asyadi, Muliadi, dan F. Maesnadi, "Analisa Pembebanan Transformator Distribusi 20 kV Pada Penyulang LS5 Gardu LSA 24," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 2, hal. 202–206, 2022.
- [12] M. D. Lubis, "Analisis Pengaruh Rugi-Rugi Total Akibat Pembebanan Terhadap Temperature dan Efisiensi Transformator Distribusi (di PT. Morawa Elektrik Trasbuana, Tanjung Morwa)," Medan: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, 2019.
- [13] H. B. Utomo dan E. B. Putri, "Perhitungan Rugi-Rugi pada Transformator Akibat Harmonisa dan Perancangan Filter Pasif Menggunakan MATLAB," *Pros. 12th Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 2, no. 1, hal. 1–7, 2021.
- [14] Y. Eseye dan S. Lesmana, "Analisa Perbaikan Faktor Daya Sistem Kelistrikan," *J. Sains Teknol.*, vol. 11, no. 1, hal. 103–113, 2021.
- [15] W. Setiawan Anjas dan Ilham, "Analisis Pembebanan Trafo Sebelum Penambahan Gardu Sisipan Terhadap Besarnya Kapasitas Daya untuk Memperbaiki Pembebanan pada Gardu Distribusi," *J. Vertex Elektro*, vol. 14, no. 2, hal. 90–101, 2022, doi: 10.26618/jte.v14i2.10277.
- [16] A. B. Prayoga dan B. Suprianto, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Terhadap Rugi Daya (Losses) Dengan Digsilent Power Factory di PT.PLN (Persero) ULP Ngunut," *J. Tek. Elektro*, vol. 12, no. 2, hal. 23–32, 2023, doi: 10.26740/jte.v12n2.p23-32.
- [17] Nugraha, M. Trian, dan D. Fauziah, "Penanggulangan Overload Transformator Distribusi dengan Metode Uprating di Gardu PNBS 20 KV ULP Pangandaran," *Pros. Semin. Nas. Energi*, hal. 293–304, 2021.
- [18] Kasyanto, "Pengaruh Regulator Tegangan Terhadap Perbaikan Tegangan Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV Penyulang Purwodadi 10," Semarang: Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.

