

**ANALISA PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT UMUR
TRANSFORMATOR DAYA 150 KV DI PLTGU KERAMASAN PALEMBANG****Deden Dendi*, Abdul Azis***, Perawati******Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Jl. Jend. A. Yani Lrg. Gotong Royong 9/10 Ulu, Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan, Indonesia****Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Jl. Jend. A. Yani Lrg. Gotong Royong 9/10 Ulu, Kota Palembang, Provinsi Sumatera Selatan, Indonesia***Email: dedendendi886@gmail.com*****Email: azis@univpgri-palembang.ac.id (Penulis Korespondensi)***ABSTRAK**

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Semakin besar beban yang dipikul transformator maka akan semakin besar pula susut umurnya, demikian juga sebaliknya semakin kecil beban yang dipikul transformator maka akan semakin kecil pula susut umur pada transformator tersebut. Susut umur transformator merupakan hilangnya umur yang disebabkan oleh operasi harian atau bulanan pada suhu panas setempat, dan dapat dinyatakan dalam satuan bulanan, harian atau jam. Penelitian dilakukan pada Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan PLN UPDK Keramasan. Hasil penelitian menunjukkan besarnya pembebanan pada transformator tergantung dari besarnya daya semu yang diserap oleh beban. Apabila pembebanan pada transformator semakin besar, maka temperatur minyak transformator akan semakin besar, dan akan menyebabkan laju penuaan *thermal* akan semakin besar. Apabila laju penuaan *thermal* tersebut semakin besar, maka susut umur transformator semakin besar pula. Susut umur Transformator Daya 54 MVA untuk operasi harian pada tanggal 01 Juni 2021 selama 24 jam adalah 1,21. Perkiraan sisa umur Transformator Daya 54 MVA untuk periode masa pemakaian 9 tahun dari tahun 2012 sampai dengan tahun 2021 adalah 17,42 tahun.

Kata kunci : Transformator, Pembebanan, Susut Umur

1. PENDAHULUAN

Transformator merupakan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator merupakan peralatan yang sangat penting, oleh karenanya diusahakan agar transformator berumur panjang dan dapat lebih lama dipergunakan. Banyak faktor yang dapat mempengaruhi umur suatu transformator, salah satunya adalah akibat pengaruh pembebanan (Kadir, 2010).

Apabila suatu transformator dibebani, maka kumparan dan minyak di dalam transformator akan bertambah panas seiring dengan kenaikan bebannya. Panas yang timbul pada kumparan akan diteruskan secara konduksi pada minyak transformator yang berfungsi sebagai pendingin. Kumparan dan minyak pada transformator mempunyai batas-batas panas yang telah ditentukan, sesuai dengan kelas isolasi dari transformator. Apabila kenaikan panas pada transformator melebihi batas panas yang telah ditentukan, maka dapat merusak transformator (Muzar, Syahrizal, & Syukri, 2018).

Pembebanan pada transformator dapat meningkatkan panas, yang akan mengakibatkan peningkatan temperatur. Panas mengakibatkan terjadinya penguraian dari bahan-bahan transformator yang dapat mempercepat proses penuaan suatu transformator, selain itu faktor pembebanan pada transformator juga dapat mempengaruhi umur transformator. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pembebanan pada transformator daya, kenaikan temperatur pada transformator daya, dan pengaruh pembebanan terhadap susut umur transformator daya.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan dan Pengendalian Pembangkitan Keramasan (PLN UPDK Keramasan), yang beralamat di Jalan Abikusno Cokrosoyo No. 24 Keramasan Palembang (Gambar 1). Objek penelitian adalah Transformator Daya 54 MVA di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap Keramasan (PLTGU Keramasan). Pelaksanaan penelitian dimulai dari tanggal 11 Mei 2021 sampai dengan tanggal 9 Juni 2021.



Gambar 1. Lokasi penelitian

2.2. Metode Yang Digunakan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berupa pengumpulan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi pada objek penelitian, yang terdiri dari data beban transformator dan data suhu transformator. Sedangkan data sekunder yang akan digunakan adalah data *name plate* transformator. Selanjutnya data yang sudah didapatkan kemudian dianalisa dan selanjutnya diproses agar dapat dipergunakan dalam tahapan penelitian. Tahapan dalam penelitian adalah:

A. Daya Semu

Daya semu disebut juga sebagai daya kompleks adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan rms dan arus rms dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif (Febrianti, 2017).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{..... pers. 1}$$

Keterangan:

- S = Daya semu (MVA)
- P = Daya aktif (MW)
- Q = Daya reaktif (MVA_r)

B. Rasio Pembebanan

Rasio pembebanan merupakan hasil pembagian antara daya semu terpakai dan kapasitas daya terpasang transformator (Muzar, Syahrizal, & Syukri, 2018).

$$K = \frac{S}{S_r} \quad \text{..... pers. 2}$$

Keterangan:

- K = Rasio pembebanan
- S = Daya semu terpakai (MVA)

S_r = Kapasitas transformator terpasang (MVA)

C. Rugi Tembaga

Rugi tembaga adalah rugi yang timbul sebagai akibat dari mengalirnya arus beban pada belitan transformator. Rugi tembaga merupakan hasil perkalian antara rasio pembebanan kuadrat dan rugi belitan transformator (Wuwung, 2010).

$$Pt_2 = K^2 Pt_1 \quad \text{..... pers. 3}$$

Keterangan:

Pt_2 = Rugi tembaga (kW)

Pt_1 = Rugi belitan (kW)

K = Rasio pembebanan

D. Perbandingan Rugi Transformator

Perbandingan rugi transformator merupakan hasil pembagian antara rugi tembaga pada transformator dan rugi tanpa beban transformator (Wuwung, 2010).

$$d = \frac{Pt_2}{P_{no\ load}} \quad \text{..... pers. 4}$$

Keterangan:

d = Perbandingan rugi transformator

Pt_2 = Rugi tembaga (kW)

$P_{no\ load}$ = Rugi inti (kW)

E. Kenaikan Temperatur Ultimate Minyak Atas

Kenaikan temperatur ini sepadan dengan kenaikan temperatur *top oil* pada nilai daya yang dikalikan rasio dari total kerugian dengan eksponen x (Pujiono, Pambudi, & Mujiman, 2016).

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

Keterangan:

$\Delta\theta_{ou}$ = Kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas (°C)

$\Delta\theta_{br}$ = Suhu (°C)

= 40°C untuk OF

= 55°C untuk ON

d = Perbandingan rugi transformator

K = Rasio pembebanan

x = 0,9 (ONAN/ONAF)

= 1,0 (OFAF/OFWF)

F. Kenaikan Temperatur Minyak Atas

Kenaikan temperatur minyak atas adalah suhu dari minyak isolasi yang diukur dibagian atas tangki transformator. Kenaikan temperatur minyak atas merupakan hasil penjumlahan kenaikan temperatur awal minyak dengan selisih antara kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas dengan kenaikan temperatur awal minyak dan sangat mendekati untuk menaikkan eksponensial (Pujiono, Pambudi, & Mujiman, 2016).

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

Keterangan:

$\Delta\theta_{on}$ = Kenaikan temperatur minyak atas (°C)

$\Delta\theta_{o(n-1)}$ = Kenaikan temperatur awal minyak (°C)

$\Delta\theta_{ou}$ = Kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas (°C)

- t = Waktu (jam)
 τ = Konstanta minyak (jam)
= 3 (ONAN / ONAF)
= 2 (OFAF / OFWF)

G. Selisih Antara Rata-Rata Temperatur Pada Minyak Dengan Temperatur Pada Kumparan

Selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan merupakan hasil pengurangan antara rata-rata kenaikan temperatur kumparan dan rata-rata kenaikan temperatur minyak (Tambunan, Hariyanto, & Tindra, 2015).

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m \quad \text{..... pers. 7}$$

Keterangan:

- $\Delta\theta_{wo}$ = Selisih rata-rata temperatur pada minyak dengan kumparan ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_k$ = Rata-rata kenaikan temperatur kumparan ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_m$ = Rata-rata kenaikan temperatur minyak ($^{\circ}\text{C}$)

H. Kenaikan Temperatur Hot spot dengan Sirkulasi Minyak Alami

Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami merupakan hasil penjumlahan suhu pada transformator dan 120% selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan (Tambunan, Hariyanto, & Tindra, 2015).

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

Keterangan:

- $\Delta\theta_{cr(alami)}$ = Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{br}$ = Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
= 40°C untuk OF
= 55°C untuk ON
 $\Delta\theta_{wo}$ = Selisih rata-rata temperatur pada minyak dengan kumparan

I. Kenaikan Temperatur Hot spot Dengan Sirkulasi Minyak Paksaan

Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan merupakan hasil penjumlahan suhu pada transformator dengan selisih antara kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami dan suhu pada transformator (Tambunan, Hariyanto, & Tindra, 2015).

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

Keterangan:

- $\Delta\theta_{cr(paksa)}$ = Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{br}$ = Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
= 40°C untuk OF
= 55°C untuk ON
 $\Delta\theta_{cr(alami)}$ = Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami ($^{\circ}\text{C}$)

J. Selisih Temperatur Hot spot dengan Top oil

Selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* merupakan hasil pengurangan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan dengan suhu pada transformator dikali dengan rasio pembebanan transformator (Pujiono, Pambudi, & Mujiman, 2016).

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

Keterangan:

- $\Delta\theta_{td}$ = Selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* ($^{\circ}\text{C}$)

- $\Delta\theta_{cr(paksa)}$ = Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{br}$ = Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
 = 40°C untuk OF
 = 55°C untuk ON
 K = Rasio pembebanan
 y = 0,8 pada ONAN dan ONAF
 = 0,9 pada OFAF dan OFWF

K. Temperatur Hot spot

Temperatur *Hot spot* (suhu titik-panas) adalah suhu terpanas didalam belitan transformator. Temperatur *hot spot* merupakan hasil penjumlahan temperatur lingkungan sekitar, kenaikan temperatur *top oil*, dan selisih antara temperatur *hot spot* dengan *top oil* (Wuwung, 2010).

$$d\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 11}$$

Keterangan:

- θ_c = Temperatur *Hot spot* ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_a = Temperatur lingkungan sekitar ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_n$ = Kenaikan temperatur *top oil* ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{td}$ = Selisih antara temperatur *hot spot* dengan *top oil* ($^{\circ}\text{C}$)

L. Laju Penuaan Thermal

Dalam menentukan nilai relatif dari umur pemakaian sebuah transformator tenaga dapat menggunakan hubungan Montsinger. Hubungan Montsinger sekarang telah digunakan untuk memperoleh laju penuaan *thermal* dari umur pemakaian pada temperatur *hot spot*, dibandingkan dengan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan (Pujiono, Pambudi, & Mujiman, 2016).

$$dV = 10^{(\theta_c - \Delta\theta_{cr(paksa)})/19,93} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 12}$$

Keterangan:

- V = Laju penuaan *Thermal* relatif (jam)
 θ_c = Temperatur *hot spot* ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{cr(paksa)}$ = Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan ($^{\circ}\text{C}$)

M. Susut Umur Transformator

Pada saat transformator memikul beban, semakin besar beban yang dipikul transformator semakin besar pula susut umurnya, demikian juga sebaliknya semakin kecil beban yang dipikul transformator maka semakin kecil pula susut umur pada transformator tersebut. Hal ini berkaitan dengan kenaikan temperatur pada inti transformator dan belitan kawat. Dimana kenaikan beban berbanding lurus dengan kenaikan temperatur inti transformator dan belitan kawat (Muzar, Syahrizal, & Syukri, 2018).

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \quad \dots\dots\dots \text{pers. 13}$$

Keterangan:

- L = Laju umur relatif (susut umur)
 n = Jumlah dari tiap-tiap interval waktu
 N = Jumlah total interval waktu ekuivalen

N. Perkiraan Sisa Umur Transformator

Perkiraan sisa umur transformator merupakan hasil dari umur dasar dikurang lama masa pakai kemudian dibagi susut umur transformator (Muzar, Syahrizal, & Syukri, 2018).

$$n = \frac{\text{Umur dasar} - \text{Lama masa pakai}}{\text{Susut Umur}} \quad \dots\dots\dots \text{pers. 14}$$

Keterangan:

- n* = Sisa umur transformator (tahun)
- Umur dasar* = Umur dasar transformator (tahun)
- Lama masa pakai* = Penggunaan transformator dari waktu ke waktu (tahun)
- Susut Umur* = Laju umur relatif

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data Penelitian

A. Data Transformator

Data Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan adalah sebagai berikut:

- Serial Number : AS 690 00
- Weight : 73,000 kg
- Date : 2012
- Cooling : ONAN/ONAF
- Phase : 3
- Frequency : 50 Hz
- Merk : UNINDO
- Impedance : 8,4%
- Rated Power : 54 MVA
- Voltage Secondary : 11 kV
- Quantity of Oil : 8.000 L
- Voltage Primary : 150 kV
- Rugi Beban Nol : 32 kW
- Rugi Inti : 290 kW

B. Data Beban Transformator

Data beban Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan, tanggal 01 Juni 2021 selama 24 jam dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1
 Data Beban Transformator Daya 54 MVA

Waktu (Jam)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVA _r)	Arus (A)
00.00	36,8	4,5	136
01.00	36,8	3,6	135
02.00	36,9	2,7	134
03.00	36,9	1,1	133
04.00	36,9	0,4	134
05.00	36,9	1,3	134
06.00	37,2	2,6	134
07.00	36,8	3,0	134
08.00	36,8	4,7	136
09.00	36,9	7,2	136
10.00	37,0	7,9	134
11.00	37,1	3,4	136
12.00	36,7	3,6	135
13.00	36,7	4,1	132
14.00	36,6	4,4	136

Lanjutan Tabel 1

15.00	36,7	4,4	136
16.00	36,7	4,9	136
17.00	36,8	6,6	137
18.00	36,9	6,2	138
19.00	37,1	6,5	139
20.00	37,4	6,0	138
21.00	37,2	4,4	132
22.00	37,1	3,4	136
23.00	36,8	4,6	136

Sumber: PLN UPDK Keramasan

C. Data Suhu Transformator

Data suhu Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan, tanggal 01 Juni 2021 selama 24 jam dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2

Data Suhu Transformator Daya 54 MVA

Waktu (Jam)	Suhu Minyak Atas (°C)	Suhu Kumparan (°C)	Suhu Lingkungan (°C)
00.00	50,10	60	22
01.00	49,20	60	22
02.00	48,60	60	22
03.00	48,20	60	25
04.00	47,70	60	26
05.00	47,50	60	28
06.00	47,50	63	28
07.00	47,50	63	28
08.00	48,00	63	29
09.00	50,00	63	31
10.00	50,20	65	31
11.00	53,00	65	32
12.00	54,00	65	37
13.00	54,00	65	37
14.00	55,20	65	36
15.00	53,00	63	30
16.00	54,80	63	30
17.00	54,30	63	27
18.00	53,90	63	27
19.00	53,60	63	26
20.00	53,80	60	26
21.00	51,40	60	26
22.00	53,20	60	24
23.00	50,00	60	24

Sumber: PLN UPDK Keramasan

3.2. Pembebanan Pada Transformator Daya

Hasil perhitungan daya semu, rasio pembebanan, rugi tembaga, dan perbandingan rugi pada Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3
Pembebanan Pada Transformator Daya 54 MVA

Waktu (Jam)	S (MVA)	K	P _{t2} (kW)	d
00.00	37,07	0,69	136,69	4,27
01.00	36,98	0,68	135,97	4,25
02.00	37,00	0,69	136,14	4,25
03.00	36,92	0,68	135,53	4,24
04.00	36,90	0,68	135,43	4,23
05.00	36,92	0,68	135,58	4,24
06.00	37,29	0,69	138,30	4,32
07.00	36,92	0,68	135,58	4,24
08.00	37,10	0,69	136,88	4,28
09.00	37,60	0,70	140,57	4,39
10.00	37,83	0,70	142,36	4,45
11.00	37,26	0,69	138,04	4,31
12.00	36,88	0,68	135,24	4,23
13.00	36,93	0,68	135,62	4,24
14.00	36,86	0,68	135,15	4,22
15.00	36,96	0,68	135,88	4,25
16.00	37,03	0,69	136,34	4,26
17.00	37,39	0,69	139,01	4,34
18.00	37,42	0,69	139,24	4,35
19.00	37,67	0,70	141,09	4,41
20.00	37,88	0,70	142,69	4,46
21.00	37,46	0,69	139,55	4,36
22.00	37,26	0,69	138,04	4,31
23.00	37,09	0,69	136,79	4,27

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 3 menunjukkan bahwa:

1. Pembebanan terendah pada transformator terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $S_{14} = 36,86$ MVA, dan rasio pembebanan terendah pada transformator juga terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $K_{14} = 0,68$. Kemudian pembebanan tertinggi pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $S_{20} = 37,88$ MVA, dan rasio pembebanan tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $K_{20} = 0,70$. Besarnya pembebanan pada Transformator Daya 54 MVA tergantung dari besarnya daya semu yang diserap oleh beban. Besarnya pembebanan pada transformator akan mempengaruhi besarnya rasio pembebanan transformator, karena rasio pembebanan merupakan hasil pembagian antara daya semu terpakai dan kapasitas daya terpasang transformator. Sehingga apabila pembebanan pada transformator semakin besar, maka rasio pembebanan transformator akan semakin besar.
2. Rasio pembebanan terendah pada transformator terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $K_{14} = 0,68$, dan rugi tembaga terendah pada transformator juga terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $P_{t_{2-14}} = 135,15$ kW. Kemudian rasio pembebanan tertinggi pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $K_{20} = 0,70$, dan rugi tembaga tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $P_{t_{2-20}} = 142,69$ kW. Besarnya rasio pembebanan pada Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya rugi tembaga pada transformator, karena rugi tembaga merupakan hasil perkalian antara rasio pembebanan kuadrat dan rugi belitan transformator. Sehingga apabila rasio pembebanan pada transformator semakin besar, maka rugi tembaga pada transformator akan semakin besar.
3. Rugi tembaga terendah pada transformator terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $P_{t_{2-14}} = 135,15$ kW, dan perbandingan rugi transformator terendah pada transformator juga terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $d_{14} = 4,22$. Kemudian rugi tembaga tertinggi pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $P_{t_{2-20}} = 142,69$ kW, dan perbandingan rugi transformator tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $d_{20} = 4,46$. Besarnya rugi tembaga

4. pada Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya perbandingan rugi transformator, karena perbandingan rugi transformator merupakan hasil pembagian antara rugi tembaga pada transformator dan rugi tanpa beban transformator. Sehingga apabila rugi tembaga pada transformator semakin besar, maka perbandingan rugi transformator akan semakin besar.

3.3. Kenaikan Temperatur Pada Transformator Daya

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 pada Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4
Kenaikan Temperatur Pada Transformator Daya 54 MVA

Waktu (Jam)	$\Delta\theta_{ou}$ (°C)	$\Delta\theta_{on}$ (°C)	$\Delta\theta_{wo}$ (°C)	$\Delta\theta_{cr(alami)}$ (°C)
00.00	33,25	33,25	9,90	66,88
01.00	33,17	33,17	10,80	67,96
02.00	33,18	33,18	11,40	68,68
03.00	33,12	33,12	11,80	69,16
04.00	33,10	33,10	12,30	69,76
05.00	33,12	33,12	12,50	70,00
06.00	33,43	33,43	15,50	73,60
07.00	33,12	33,12	15,50	73,60
08.00	33,27	33,27	15,00	73,00
09.00	33,70	33,70	13,00	70,60
10.00	33,91	33,91	14,80	72,76
11.00	33,40	33,40	12,00	69,40
12.00	33,08	33,08	11,00	68,20
13.00	33,13	33,13	11,00	68,20
14.00	33,07	33,07	9,80	66,76
15.00	33,15	33,15	10,00	67,00
16.00	33,21	33,21	8,20	64,84
17.00	33,52	33,52	8,70	65,44
18.00	33,54	33,54	9,10	65,92
19.00	33,76	33,76	9,40	66,28
20.00	33,95	33,95	6,20	62,44
21.00	33,58	33,58	8,60	65,32
22.00	33,40	33,40	6,80	63,16
23.00	33,26	33,26	10,00	67,00

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4 menunjukkan bahwa:

1. Perbandingan rugi terendah pada transformator terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $d_{14} = 4,22$, dan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami terendah pada transformator juga terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{ou-14} = 33,07^{\circ}\text{C}$. Kemudian perbandingan rugi tertinggi pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $d_{20} = 4,46$, dan kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{ou-20} = 33,95^{\circ}\text{C}$. Besarnya perbandingan rugi Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas, karena kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas merupakan hasil perkalian antara suhu pada transformator dan rasio dari total kerugian dengan eksponen x . Sehingga apabila perbandingan rugi transformator semakin besar, maka kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas akan semakin besar.

2. Kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas terendah pada transformator terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{ou-14} = 33,07^{\circ}\text{C}$, dan kenaikan temperatur minyak atas terendah pada transformator juga terjadi pada jam 14.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{on-14} = 33,07^{\circ}\text{C}$. Kemudian kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas tertinggi pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{ou-20} = 33,95^{\circ}\text{C}$, dan kenaikan temperatur minyak atas tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{on-20} = 33,95^{\circ}\text{C}$. Besarnya kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya kenaikan temperatur minyak atas, karena kenaikan temperatur minyak atas merupakan hasil penjumlahan kenaikan temperatur awal minyak dengan selisih antara kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas dengan kenaikan temperatur awal minyak dan sangat mendekati untuk menaikkan eksponensial. Sehingga apabila kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas semakin besar, maka kenaikan temperatur minyak atas akan semakin besar.
3. Kenaikan temperatur kumparan dan rata-rata kenaikan temperatur minyak terendah pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{k-20} = 60^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{m-20} = 53,80^{\circ}\text{C}$, dan selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan terendah pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{wo-20} = 6,20^{\circ}\text{C}$. Kemudian kenaikan temperatur kumparan dan rata-rata kenaikan temperatur minyak tertinggi pada transformator terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{k-06} = 63^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{m-06} = 47,50^{\circ}\text{C}$, dan pada jam 07.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{k-07} = 63^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta\theta_{m-07} = 47,50^{\circ}\text{C}$, dan selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{wo-06} = 15,50^{\circ}\text{C}$, dan pada jam 07.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{wo-07} = 15,50^{\circ}\text{C}$. Besarnya selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan Transformator Daya 54 MVA dipengaruhi oleh rata-rata kenaikan temperatur kumparan dan rata-rata kenaikan temperatur minyak, karena selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan merupakan hasil pengurangan antara rata-rata kenaikan temperatur kumparan dan rata-rata kenaikan temperatur minyak. Sehingga apabila kenaikan temperatur kumparan semakin besar dan rata-rata kenaikan temperatur minyak semakin kecil maka selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan akan semakin besar.
4. Selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan terendah pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{wo-20} = 6,20^{\circ}\text{C}$, dan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami terendah pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(alami)-20} = 62,44^{\circ}\text{C}$. Kemudian selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan tertinggi pada transformator terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{wo-06} = 15,50^{\circ}\text{C}$, dan jam 07.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{wo-07} = 15,50^{\circ}\text{C}$, dan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(alami)-06} = 73,60^{\circ}\text{C}$, dan jam 07.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(alami)-07} = 73,60^{\circ}\text{C}$. Besarnya selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami, karena kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami merupakan hasil penjumlahan suhu pada transformator dan 120% selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan. Sehingga apabila selisih antara rata-rata temperatur pada minyak dengan temperatur pada kumparan semakin besar maka kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami akan semakin besar.

3.4. Laju Penuaan Thermal Pada Transformator Daya

Hasil perhitungan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan, selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil*, temperatur *hot spot*, dan laju penuaan *thermal* pada Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5

Laju Penuaan Thermal Pada Transformator Daya 54 MVA

Waktu (Jam)	$\Delta\theta_{cr(paksa)}$ (°C)	$\Delta\theta_{td}$ (°C)	θ_c (°C)	V (jam)
00.00	66,88	6,51	61,76	0,55
01.00	67,96	7,07	62,24	0,52
02.00	68,68	7,47	62,66	0,50
03.00	69,16	7,71	65,82	0,68
04.00	69,76	8,03	67,13	0,74
05.00	70,00	8,16	69,29	0,92
06.00	73,60	10,29	71,72	0,80
07.00	73,60	10,12	71,24	0,76
08.00	73,00	9,87	72,14	0,91
09.00	70,60	8,74	73,44	1,39
10.00	72,76	10,05	74,96	1,29
11.00	69,40	7,95	73,35	1,58
12.00	68,20	7,17	77,25	2,85
13.00	68,20	7,19	77,31	2,87
14.00	66,76	6,38	75,46	2,73
15.00	67,00	6,54	69,70	1,37
16.00	64,84	5,38	68,59	1,54
17.00	65,44	5,80	66,31	1,11
18.00	65,92	6,07	66,62	1,08
19.00	66,28	6,34	66,10	0,98
20.00	62,44	4,22	64,17	1,22
21.00	65,32	5,75	65,33	1,00
22.00	63,16	4,51	61,91	0,87
23.00	67,00	6,58	63,84	0,69

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 5 menunjukkan bahwa:

1. Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami terendah pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(alami)-20} = 62,44^\circ\text{C}$, dan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan terendah pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(paksa)-20} = 62,44^\circ\text{C}$. Kemudian kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami tertinggi pada transformator terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(alami)-06} = 73,60^\circ\text{C}$, dan jam 07.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(alami)-07} = 73,60^\circ\text{C}$, dan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(paksa)-06} = 73,60^\circ\text{C}$, dan jam 07.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(paksa)-07} = 73,60^\circ\text{C}$. Besarnya kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan, karena kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan merupakan hasil penjumlahan suhu pada transformator dengan selisih antara kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami dan suhu pada transformator. Sehingga apabila kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami semakin besar maka kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan akan semakin besar.
2. Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan terendah pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(paksa)-20} = 62,44^\circ\text{C}$, dan selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* terendah pada transformator juga terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{td-20} = 4,23^\circ\text{C}$. Kemudian kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan tertinggi pada transformator terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(paksa)-06} = 73,60^\circ\text{C}$, dan jam 07.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{cr(paksa)-07} = 73,60^\circ\text{C}$, dan selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{td-06} = 10,29^\circ\text{C}$. Besarnya kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil*, karena selisih

temperatur *hot spot* dengan *top oil* merupakan hasil pengurangan kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan dengan suhu pada transformator dikali dengan rasio pembebanan transformator. Sehingga apabila kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan semakin besar maka besarnya selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* akan semakin besar.

3. Selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* terendah pada transformator terjadi pada jam 20.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{td-20} = 4,23^{\circ}\text{C}$, dan temperatur *hot spot* terendah pada transformator terjadi pada jam 00.00 WIB, yaitu $\theta_{c-00} = 61,76^{\circ}\text{C}$. Kemudian selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* tertinggi pada transformator terjadi pada jam 06.00 WIB, yaitu $\Delta\theta_{td-06} = 10,29^{\circ}\text{C}$, dan temperatur *hot spot* tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 13.00 WIB, yaitu $\theta_{c-13} = 77,31^{\circ}\text{C}$. Besarnya selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya temperatur *hot spot*, karena temperatur *hot spot* merupakan hasil penjumlahan temperatur lingkungan sekitar, kenaikan temperatur *top oil*, dan selisih antara temperatur *hot spot* dengan *top oil*. Sehingga apabila selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* semakin besar maka besarnya temperatur *hot spot* akan semakin besar.
4. Besarnya temperatur *hot spot* Transformator Daya 54 MVA akan mempengaruhi besarnya laju penuaan *thermal*, karena laju penuaan *thermal* merupakan nilai dari umur pemakaian pada temperatur, dibanding dengan nilai normal dari umur pemakaian pada temperatur. Sehingga apabila temperatur *hot spot* semakin besar maka besarnya laju penuaan *thermal* akan semakin besar. Dari Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa temperatur *hot spot* terendah pada transformator terjadi pada jam 00.00 WIB, yaitu $\theta_{c-00} = 61,76^{\circ}\text{C}$, dan laju penuaan *thermal* terendah pada transformator terjadi pada jam 02.00 WIB, yaitu $V_{02} = 0,5$ jam. Kemudian temperatur *hot spot* tertinggi pada transformator terjadi pada jam 13.00 WIB, yaitu $\theta_{c-13} = 77,31^{\circ}\text{C}$, dan laju penuaan *thermal* tertinggi pada transformator juga terjadi pada jam 13.00 WIB, yaitu $V_{13} = 2,87$ jam.

3.5. Susut Umur Transformator

Setelah didapatkan laju penuaan *thermal* maka dapat ditentukan susut umur transformator. Susut umur transformator merupakan hilangnya umur yang disebabkan oleh operasi harian atau bulanan pada suhu panas setempat, dan dapat dinyatakan dalam satuan bulanan, harian atau jam. Susut umur transformator adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V = \frac{1}{24} \sum_{n=1}^{24} V_{00} + V_{01} + \dots + V_{23} \\
 &= \frac{1}{24} \sum_{n=1}^{24} 0,55 + 0,52 + 0,50 + 0,68 + 0,74 + 0,92 + 0,80 + 0,76 + 0,91 + 1,39 \\
 &\quad + 1,29 + 1,58 + 2,85 + 2,87 + 2,73 + 1,37 + 1,54 + 1,11 + 1,08 \\
 &\quad + 0,98 + 1,22 + 1,00 + 0,87 + 0,69 \\
 &= \frac{1}{24} \times 28,94 = 1,21
 \end{aligned}$$

3.6. Perkiraan Sisa Umur Transformator

Setelah didapatkan susut umur transformator maka dapat ditentukan perkiraan susut umur transformator. Perkiraan sisa umur transformator merupakan hasil dari umur dasar dikurang lama masa pakai kemudian di bagi susut umur transformator. Periode pemakaian Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan, terhitung dari tahun 2012 sampai dengan tahun 2021, maka lama masa pakai transformator daya adalah 9 tahun. Sisa umur transformator adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{\text{Umur dasar} - \text{Lama masa pakai}}{\text{Susut Umur}} \\
 &= \frac{30 - 9}{1,21} = \frac{21}{1,21} = 17,42 \text{ tahun}
 \end{aligned}$$

3.7. Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya

Pada saat transformator memikul beban, semakin besar beban yang dipikul transformator semakin besar pula susut umurnya, demikian juga sebaliknya semakin kecil beban yang dipikul transformator maka semakin kecil pula susut umur pada transformator tersebut. Hal ini berkaitan dengan kenaikan temperatur pada inti transformator dan belitan kawat. Dimana kenaikan beban perbandingan lurus dengan kenaikan temperatur inti transformator dan belitan kawat.

Susut umur transformator merupakan hilangnya umur yang disebabkan oleh operasi harian atau bulanan pada suhu panas setempat, dan dapat dinyatakan dalam satuan bulanan, harian atau jam. Susut umur transformator dipengaruhi oleh besarnya laju penuaan *thermal* selama operasi harian atau bulanan pada suhu panas setempat. Apabila laju penuaan *thermal* tersebut semakin besar, maka susut umur transformator semakin besar pula. Susut umur Transformator Daya 54 MVA untuk operasi harian pada tanggal 01 Juni 2021 selama 24 jam adalah $L = 1,21$.

Setelah didapatkan susut umur transformator maka dapat ditentukan perkiraan susut umur transformator. Perkiraan sisa umur transformator merupakan hasil dari umur dasar dikurang lama masa pakai kemudian di bagi susut umur transformator. Periode pemakaian Transformator Daya 54 MVA di PLTGU Keramasan pada PLN UPDK Keramasan terhitung dari tahun 2012 sampai dengan tahun 2021, maka lama masa pakai transformator daya adalah 9 tahun. Sisa umur Transformator Daya 54 MVA adalah $n = 17,42$ tahun.

4. KESIMPULAN

1. Besarnya pembebanan pada transformator tergantung dari besarnya daya semu yang diserap oleh beban. Apabila pembebanan pada transformator semakin besar, maka rasio pembebanan transformator, rugi tembaga, dan perbandingan rugi transformator akan semakin besar.
2. Apabila perbandingan rugi transformator semakin besar, maka 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 akan semakin besar. Kemudian, apabila kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami semakin besar maka kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan, selisih temperatur *hot spot* dengan top oil, temperatur *hot spot* dan laju penuaan *thermal* akan semakin besar.
3. Susut umur transformator dipengaruhi oleh besarnya laju penuaan *thermal* selama operasi harian atau bulanan pada suhu panas setempat. Apabila laju penuaan *thermal* tersebut semakin besar, maka susut umur transformator semakin besar pula. Susut umur Transformator Daya 54 MVA untuk operasi harian pada tanggal 01 Juni 2021 selama 24 jam adalah 1,21. Perkiraan sisa umur Transformator Daya 54 MVA untuk periode masa pemakaian 9 tahun dari tahun 2012 sampai dengan tahun 2021 adalah 17,42 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Azis, A., Nurdiana, N., & Lathifatun Nisa, U. (2018). Rugi-rugi Daya pada Transformator U. 019 PT. PLN 9persero) WS@ JB Rayon Ampere Akibat Ketidakseimbangan Beban. Jurnal Ampere, 3(1), 177-184, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v3i1.3475>
- Febrianti, I. K. (2017). Analisa Penurunan Faktor Kerja Transformator Daya 30 MVA. Jurnal Ampere, 2(1), 18-22, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v2i1.1207>
- Kadir, A. (2010). Transformator. Jakarta. Penerbit Universitas Indonesia Press.

- Muzar, M. A., Syahrizal, S., & Syukri, M. (2018). Analisis Pengaruh Suhu Akibat Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya di Gardu Induk Lambaro. *Jurnal Kitekro*, 3(2),1-8.
- Pujiono., Pambudi, P. Eko., & Mujiman. (2016). Analisis Pembebanan Terhadap Usia Pakai Transformator Tenaga di Gardu Induk 150 kV. *Jurnal Elektrikal*, 3(1), 11-20.
- Tambunan, J. M., Hariyanto, A., & Tindra, W. K. (2015). Kerja Pembebanan Dan Temperatur Terhadap Susut Umur. *Jurnal Sutet*, 5(2), hal. 91-99.
- Wuwung, J. O. (2010). Pengaruh Pembebanan Terhadap Kenaikan Suhu Pada Belitan Transformator Daya Jenis Terendam Minyak. *Jurnal Tekno*, 7(52), 29-39.