

**ANALISIS KUALITAS DAN PERKIRAAN SISA USIA PAKAI
TRANSFORMATOR DAYA PADA PLTA WONOGIRI AKIBAT
PEMBEBANAN**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

Oleh:

YELLA PUTINELA

D400160053

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

2020

HALAMAN PERSETUJUAN

**ANALISIS KUALITAS DAN PERKIRAAN SISA USIA PAKAI
TRANSFORMATOR DAYA PADA PLTA WONOGIRI AKIBAT
PEMBEBANAN**

PUBLIKASI ILMIAH

oleh:

YELLA PUTINELA

D400160053

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing



Umar, S.T., M.T.

NIK. 731

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS KUALITAS DAN PERKIRAAN SISA USIA PAKAI
TRANSFORMATOR DAYA PADA PLTA WONOGIRI AKIBAT
PEMBEBANAN**

OLEH
YELLA PUTINELA
D400160053

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari Selasa, 21 Juli 2020
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. Umar, S.T, M.T
(Ketua Dewan Penguji)
2. Hasyim Asy'ari, S.T, M.T.
(Anggota I Dewan Penguji)
3. Aris Budiman, S.T. M.T
(Anggota II Dewan Penguji)


()
()

Dekan,


Sri Sunarjono, M.T, Ph. D
NIK. 628

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 21 Juli 2020

Penulis


YELLA PUTINELA
D400160053

ANALISIS KUALITAS DAN PERKIRAAN SISA USIA PAKAI TRANSFORMATOR DAYA PADA PLTA WONOGIRI AKIBAT PEMBEBANAN

Abstrak

Transformator memiliki peranan penting pada pengoperasian sistem tenaga listrik dengan menyalurkan tenaga listrik. Transformator daya memiliki fungsi yaitu menyalurkan tenaga listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun sebaliknya. Faktor yang mempengaruhi usia pakai transformator dan kualitasnya yaitu panas yang timbul akibat pembebanan maksimal dan suhu lingkungan sekitar yang menyebabkan suhu *hot-spot* pada transformator daya juga meningkat. Penelitian ini dilakukan guna mengetahui pengaruh suhu pada usia trafo yang timbul akibat pembebanan dan suhu lingkungan sekitar dengan menggunakan perbandingan suhu sekitar sebenarnya, suhu standart IEC yaitu 20°C dan standart IEEE yaitu 30°C. Metode perhitungan untuk mendapatkan hasil perkiraan sisa usia sebuah trafo secara berurutan yaitu menentukan daya semu, rasio pembebanan, rugi tembaga, perbandingan rugi trafo, kenaikan suhu *ultimate top oil*, kenaikan suhu *top oil*, selisih kenaikan suhu minyak dengan kumparan, kenaikan suhu *hot spot* dengan sirkulasi minyak alami maupun paksa, selisih suhu *hot spot* dengan *top oil*, suhu *hot spot*, laju penuaan *thermal*, susut umur trafo dan perkiraan sisa usia trafo. Hasil sisa usia pakai transformator di PLTA Wonogiri sesuai perhitungan yaitu 8,3 tahun lagi terhitung dari tahun 2018, karena data yang diperoleh yaitu data 2018 dengan beban 76,9% - 78,5% yang mempunyai susut umur transformator sebesar 48,25% dan suhu yang digunakan yaitu suhu lingkungan sekitar Wonogiri. Berdasarkan analisis, kualitas transformator di PLTA Wonogiri masih terbilang baik dan aman untuk dioperasikan karena temperatur *hot spot* transformator terdapat dibawah batas maksimum yang telah ditetapkan publikasi IEC76 tahun 1994 yaitu 140°C sedangkan temperatur *hot spot* trafo di PLTA Wonogiri paling besar yaitu 97°C pada jam 13.00 WIB dengan suhu lingkungan sekitar 32°C.

Kata Kunci: transformator, suhu lingkungan sekitar, temperatur *hot spot*, pembebanan, usia, kualitas, susut umur.

Abstract

The transformer has an important role in the operation of the electric power system by delivering electricity. The power transformer has a function that is to supply electric power from high voltage to low voltage and vice versa. Factors affecting the life of the transformer and its quality are heat arising from maximum loading and ambient temperature which causes the temperature of the hot-spot on the power transformer to increase. This study was conducted to determine the effect of temperature on the transformer age arising from loading and ambient temperature using a comparison of actual ambient temperature, IEC standard temperature of 20°C and IEEE standard of 30°C. The calculation method to get the estimated life results of a transformer sequentially is to determine the apparent power, loading ratio, copper loss, transformer loss ratio, temperature rise in ultimate top oil, rise in top oil temperature, difference in oil temperature rise with coil, increase in hot spot temperature with natural or forced oil circulation, the difference between the temperature of the hot spot with the top oil, the temperature of the hot spot, the rate of thermal aging, the shrinkage of the life of the transformer and the estimated remaining life of the transformer. The results of the remaining life of the transformer in the Wonogiri Hydroelectric Power Plant are in

accordance with the calculation of 8.3 more years from 2018, because the data obtained are 2018 data with a load of 76.9% - 78.5% which has a transformer life loss of 48.25% and the temperature used is the temperature of the environment around Wonogiri. Based on the analysis, the quality of the transformer in the Wonogiri hydropower is relatively good and safe to operate because the temperature of the transformer hot spot is below the maximum limit set by IEC76 publication in 1994 which is 140°C while the temperature of the transformer hot spot in the Wonogiri hydropower is 97°C at the highest 13.00 WIB with ambient temperature around 32°C.

Keywords: transformer, ambient temperature, hot spot temperature, loading, age, quality, age loss.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik semakin memuncak seiring perkembangan teknologi yang sangat pesat. Perkembangan teknologi yang sangat pesat membentuk kegunaan listrik semakin banyak baik pada rumah tangga maupun industri. Adanya perkembangan teknologi dan meningkatnya kebutuhan listrik maka dibutuhkan sistem operasi tenaga listrik yang handal dan stabil supaya energi listrik dapat disalurkan dengan berkelanjutan tanpa terputus kepada konsumen energi listrik. Sistem Tenaga Listrik terdapat beberapa bagian seperti pembangkit, saluran transmisi dan saluran distribusi.

Fungsi dari transformator pada sistem tenaga listrik yaitu mentransformasikan tegangan sesuai dengan kebutuhan beban dengan cara menaikkan tegangan maupun menurunkan tegangan. Transformator memiliki peranan penting pada pengoperasian sistem tenaga listrik dengan menyalurkan tenaga listrik. ANSI / IEEE mendefinisikan transformator sebagai perangkat listrik statis, tidak melibatkan bagian yang terus bergerak, digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mentransfer daya antar sirkuit melalui penggunaan elektromagnetik induksi (Harlow, 2011).

Umur transformator pada sistem tenaga listrik akan berkurang seiring berjalannya waktu transformator dioperasikan. Berkurangnya umur pakai transformator disebabkan karena beberapa faktor, salah satunya akibat pola pembebanan yang mengakibatkan suhu pada transformator meningkat. Faktor lainnya yang menyebabkan umur transformator berkurang atau penuaan pada transformator yaitu pengaruh suhu sekitar (lingkungan), suhu belitan transformator dan suhu minyak transformator. Suhu udara sekitar tempat dioperasikannya transformator sangat berpengaruh pada karakteristik *thermal* dan suhu titik panas belitan transformator (Adhie S.G, 2015).

Kebutuhan daya harus disuplai oleh sumber ke beban tergantung pada penyerapan daya oleh beban tergantung pada daya reaktif yang diserap oleh beban tersebut. Daya yang hilang dapat berupa energi panas dan energi magnetisasi yang ditimbulkan pada saluran. Energi panas yang tidak terpakai disebut sebagai rugi – rugi daya aktif dan energi magnetisasi disebut sebagai rugi – rugi daya reaktif. (Irine K.F, 2017).

Semakin tinggi presentase pembebanan maka sisa umur akan semakin menurun (Priyo U, 2019). Nilai suhu akhir *hot spot* Transformator Tenaga semakin besar, maka umur trafo semakin kecil dan kemampuan mensuplai beban juga berkurang. Apabila beban trafo mengalami kenaikan, maka akan menaikkan suhu akhir *hot spot* dengan mendekati nilai maksimum yang diijinkan (Juara Mangapul.T, 2015)

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijabarkan maka penulis melaksanakan penelitian tugas akhir di PLTA Wonogiri mengenai kualitas dan perkiraan sisa usia transformator daya. Penelitian ini menggunakan beberapa data seperti beban pemakaian pada transformator, data suhu baik suhu minyak maupun belitan pada transformator dan suhu sekitar (lingkungan). Hasil pengolahan data yang diperoleh guna mengetahui kualitas dan perkiraan sisa usia pada transformator daya tersebut.

2. METODE

2.1 Rancangan Penelitian

Sebelum menjalankan penelitian, penulis perlu menyusun rancangan penelitian yang berfungsi untuk memaparkan metode atau langkah-langkah yang akan dilaksanakan dalam penelitian. Penelitian kualitas dan perkiraan sisa usia transformator daya pada PLTA Wonogiri akibat pembebanan dapat berjalan sesuai dengan tujuan dan mendapatkan hasil yang baik maka diperlukan beberapa metode seperti menentukan tempat dan jadwal penelitian, wawancara, studi literatur, pengambilan data, pengolahan data, analisa data dan yang terakhir yaitu kesimpulan penelitian.

Data yang digunakan berupa beberapa nilai karakteristik yang menjadi parameter penelitian. Data yang diperoleh dari pihak PLTA Wonogiri meliputi data pembebanan, arus, suhu kumpuran, suhu minyak atas, suhu lingkungan dan spesifikasi dari transformator daya. Data yang diambil merupakan data pembebanan terbesar selama 1 bulan pada tahun 2018. Pengambilan data tersebut berguna untuk melakukan tahap selanjutnya yaitu pengolahan data dan analisa data.

Data yang diperoleh penulis diolah dengan mengambil data pembebanan transformator daya yang terjadi selama satu bulan. Data tersebut masih dipilih dengan mengambil data satu hari dimana hari tersebut terjadi pembebanan terbesar pada transformator daya selama satu bulan penuh. Data yang diperoleh dianalisa dengan perhitungan dan membandingkan pengaruh pola pembebanan transformator daya selama 1 hari penuh yang sudah ditentukan guna mendapatkan hasil berupa kualitas dan perkiraan sisa usia transformator daya dengan metode literatur yang sudah dipelajari oleh penulis.

Analisa perhitungan yang harus ditentukan yaitu daya semu, untuk mendapatkan hasil daya semu maka diperlukan data berupa daya aktif dan daya reaktif. Daya semu sudah didapatkan maka lanjut

menentukan rasio pembebanan, untuk mendapatkan hasil rasio pembebanan maka diperlukan beberapa data seperti hasil dari daya semu yang terpakai dan data kapasitas transformator yang terpasang. Rasio pembebanan sudah didapat maka lanjut menentukan rugi tembaga pada transformator, untuk mendapatkan nilai rugi tembaga pada transformator maka diperlukan data berupa rasio pembebanan yang sudah dihitung sebelumnya dan data rugi inti transformator. Rugi tembaga sudah didapatkan maka lanjut menentukan perbandingan rugi transformator, data yang diperlukan yaitu rugi tembaga dan rugi beban nol pada transformator. Perbandingan rugi trafo digunakan untuk menentukan kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas, selain perbandingan rugi trafo, data yang diperlukan yaitu rasio pembebanan. Perhitungan selanjutnya dengan menentukan kenaikan temperatur minyak atas lalu perhitungan selisih antara kenaikan rata-rata temperatur minyak dengan temperatur kumparan, sehingga diperlukan data suhu minyak maupun kumparan. Analisa perhitungan selanjutnya yaitu menentukan kenaikan temperatur *hot spot* baik pada sirkulasi minyak alami maupun paksaan dan menentukan selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil*. Data suhu sekitar/lingkungan digunakan saat menentukan temperatur *hot spot*, dan hasil dari perhitungan tersebut guna untuk menentukan perhitungan selanjutnya yaitu menentukan laju penuaan *thermal*. Perhitungan laju penuaan *thermal* sudah didapat dengan berbagai perbandingan baik dari suhu sekitar maupun suhu menurut standart IEC dan IEEE maka dilanjutkan dengan perhitungan susut umur transformator, sehingga hasilnya dikemudian akan digunakan untuk menentukan perkiraan sisa usia pakai sebuah transformator tersebut.

Tahapan terakhir penyusunan laporan tugas akhir berupa acuan hasil analisa data penulis. Penyusunan laporan ini sesuai dengan petunjuk atau format penulisan naskah publikasi tugas akhir yang sudah ditentukan.

2.2 Flowchart Penelitian

Gambar dibawah ini merupakan *flowchart* penelitian yang telah dibuat oleh penulis



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data

Penulis memperoleh beberapa data dari PLTA Wonogiri demi menganalisa perhitungan sisa usia transformator dan kualitasnya. Data suhu dan pembebanan transformator yang didapat merupakan data pada bulan Februari tahun 2018. Data yang diperoleh adalah sebagai berikut :

3.1.1 Data *Name Plate* Transformator

Serial Nomor	: 820769	Impedance (%Z)	: 5.73
Weight	: 32100 kg	Rated Power	: 15500 KVA
Date	: 1982	Voltage Secondary	: 22000 Volt
Cooling	: ONAN	Quantity of Oil	: 7700 L
Phase	: 3	Voltage Primary	: 6600 Volt
Frequency	: 50 Hz	Rugi Beban Nol	: 16 kW
Merk	: Aichi Electric MFG. CO., LTD.	Rugi Inti	: 33 kW

3.1.2 Data Suhu

Suhu Minyak Atas 07.00 WIB : 53 °C

Suhu Kumbaran 19.00 WIB : 65 °C

Suhu Minyak Atas 13.00 WIB : 58 °C

Suhu Lingkungan 07.00 WIB : 24°C

Suhu Minyak Atas 19.00 WIB : 53 °C

Suhu Lingkungan 13.00 WIB : 32°C

Suhu Kumbaran 07.00 WIB : 65 °C

Suhu Lingkungan 19.00 WIB : 26°C

Suhu Kumbaran 13.00 WIB : 71 °C

3.1.3 Data Pembebanan Transformator

Tabel 1. Data Pembebanan Transformator

Waktu	Daya Aktif	Daya Reaktif	Arus
07.00 WIB	11.55 MW	3 Mvar	354 Ampere
13.00 WIB	11.93 MW	2.4 Mvar	364 Ampere
19.00 WIB	11.70 MW	3 Mvar	364 Ampere

3.2 Analisa Perhitungan

Data yang diambil penulis merupakan data pembebanan transformator daya PLTA Wonogiri pada tanggal 27 Februari 2018 jam 07.00 WIB, 13.00 WIB dan 19.00 WIB. Demi mendapatkan hasil yang memuaskan maka digunakan perbandingan variasi pembebanan pada waktu tersebut. Data pembebanan sebelumnya sudah dijabarkan baik daya aktif, daya reaktif, arus, suhu kumbaran, suhu minyak atas, dan sebagainya.

a. Daya Semu

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

Keterangan :

S = Daya Semu (MVA)

P = Daya Aktif (MW)

Q = Daya Reaktif (Mvar)

Perhitungan daya semu saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{11,55^2 + 3^2} = 11,93 \text{ MVA}$$

Perhitungan daya semu saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{11,93^2 + 2,4^2} = 12,17 \text{ MVA}$$

Perhitungan daya semu saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{11,70^2 + 3^2} = 12,08 \text{ MVA}$$

b. Rasio Pembebanan

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

Keterangan :

K = Rasio Pembebanan

S = Daya Semu Terpakai (MVA)

Sr = Kapasitas Transformator Terpasang (MVA)

Hasil daya semu yang terpakai digunakan untuk menentukan rasio pembebanan dengan menggunakan persamaan (2), contoh perhitungan rasio pembebanan sebagai berikut :

Perhitungan rasio pembebanan saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$K = \frac{S}{Sr} = \frac{11,93}{15,5} = 0,769 = 76,9\%$$

Perhitungan rasio pembebanan saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$K = \frac{S}{Sr} = \frac{12,17}{15,5} = 0,785 = 78,5\%$$

Perhitungan rasio pembebanan saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB

$$K = \frac{S}{Sr} = \frac{12,08}{15,5} = 0,779 = 77,9\%$$

c. Rugi Tembaga

$$Pt_2 = K^2 \times Pt_1 \quad (3)$$

Keterangan :

Pt_2 = Rugi Tembaga (KW)

Pt_1 = Rugi Inti (KW)

K^2 = Rasio Pembebanan

Berdasarkan hasil perhitungan rasio pembebanan dengan perbandingan berbagai pembebanan, maka rugi tembaga dapat ditentukan dengan persamaan (3) dengan hasil sebagai berikut :

Perhitungan rugi tembaga saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$Pt_2 = K^2 \times Pt_1 = 0,769^2 \times 33 = 19,515 \text{ KW}$$

Perhitungan rugi tembaga saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$Pt_2 = K^2 \times Pt_1 = 0,785^2 \times 33 = 20,335 \text{ KW}$$

Perhitungan rugi tembaga saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB

$$Pt_2 = K^2 \times Pt_1 = 0,779^2 \times 33 = 20,026 \text{ KW}$$

d. Perbandingan Rugi Transformator

$$d = \frac{\text{Rugitembagapadadayapengenal}}{\text{Rugibebannol}} \quad (4)$$

Perhitungan saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$d = \frac{\text{Rugitembagapadadayapengenal}}{\text{Rugibebannol}} = \frac{19,515}{16} = 1,219$$

Perhitungan saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$d = \frac{\text{Rugitembagapadadayapengenal}}{\text{Rugibebannol}} = \frac{20,335}{16} = 1,271$$

Perhitungan saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB

$$d = \frac{\text{Rugitembagapadadayapengenal}}{\text{Rugibebannol}} = \frac{20,026}{16} = 1,251$$

e. Kenaikan Temperatur *Ultimate* Minyak Atas

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

Keterangan :

$\Delta\theta_{ou}$ = Kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas

$\Delta\theta_{br}$ = 40°C (OF), 55°C (ON)

d = Perbandingan rugi trafo

k = Rasio pembebanan

x = 0,9 (ONAN / ONAF) , 1,0 (OFAF / OFWF)

Berikut salah satu contoh perhitungan kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas dengan menggunakan persamaan (5), beban yang digunakan sebagai contoh perhitungan yaitu 11,55 MW pada jam 07.00 WIB, yaitu :

$$\Delta\theta_{ou} = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x = 55 \left(\frac{1+(1,219)(0,769)^2}{1+1,219} \right)^{0,9} = 43,7^\circ\text{C}$$

Tabel 2. Kenaikan Temperatur *Ultimate* Minyak Atas

Kenaikan Temperatur <i>Ultimate</i> Minyak Atas	
Waktu dan beban	Hasil
07.00 WIB (11,55 MW)	43,7°C
13.00 WIB (11,93 MW)	44,2°C
19.00 WIB (11,70 MW)	44,1°C

Pada tabel 1 terlihat hasil dimana kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas tertinggi terjadi pada jam 13.00 WIB dengan beban yang dipakai 11,93 MW yaitu 44,2°C dan yang terendah terjadi pada jam 07.00 WIB dengan beban yang dipakai 11,55 MW yaitu 43,7°C.

f. Kenaikan Temperatur Minyak Atas

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

Keterangan :

- $\Delta\theta_{on}$ = Kenaikan temperatur minyak atas
 $\Delta\theta_{o(n-1)}$ = Kenaikan temperatur awal minyak
 $\Delta\theta_{ou}$ = Kenaikan temperatur *ultimate* minyak atas
 t = Waktu dalam jam
 τ = Konstanta minyak dalam jam
= 3 (ONAN / ONAF)
= 2 (OFAF / OFWF)

Berikut salah satu contoh perhitungan kenaikan temperatur minyak atas pada saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB, yaitu :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{on} &= \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_{ou} - \Delta\theta_{o(n-1)}) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \\ &= 43,7^{\circ}\text{C} + (43,7^{\circ}\text{C} - 43,7^{\circ}\text{C}) (1 - e^{-\frac{1}{3}}) \\ &= 43,7^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Tabel 3. Kenaikan Temperatur Minyak Atas

Kenaikan Temperatur Minyak Atas	
Waktu dan beban	Hasil
07.00 WIB (11,55 MW)	43,7°C
13.00 WIB (11,93 MW)	44,2°C
19.00 WIB (11,70 MW)	44,1°C

- g. Selisih Antara Kenaikan Rata – Rata Temperatur pada Minyak dengan Temperatur pada Kumparan

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

Keterangan :

- $\Delta\theta_{wo}$ = Selisih rata – rata temperatur pada minyak dengan kumparan
 $\Delta\theta_k$ = Rata – rata kenaikan temperatur kumparan
 $\Delta\theta_m$ = Rata – rata kenaikan temperatur minyak

Tabel 4. Data Temperatur Pada Transformator

Beban	11,55MW	11,93MW	11,70MW
Rata – rata kenaikan temperatur	65°C	71°C	65°C

kumparan			
Kenaikan temperatur minyak atas ($\Delta\theta_{br}$) menurut publikasi IEC 76	55°C	55°C	55°C
Rata – rata kenaikan temperatur minyak	53°C	58°C	53°C

Perhitungan saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m = 65^\circ\text{C} - 53^\circ\text{C} = 12^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m = 71^\circ\text{C} - 58^\circ\text{C} = 13^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m = 65^\circ\text{C} - 53^\circ\text{C} = 12^\circ\text{C}$$

h. Kenaikan Temperatur *Hot Spot* dengan Sirkulasi Minyak Alami

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

Perhitungan saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,2\Delta\theta_{wo} = 55^\circ\text{C} + 1,2(12) = 69,4^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,2\Delta\theta_{wo} = 55^\circ\text{C} + 1,2(13) = 70,6^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,2\Delta\theta_{wo} = 55^\circ\text{C} + 1,2(12) = 69,4^\circ\text{C}$$

i. Kenaikan Temperatur *hot spot* dengan Sirkulasi Minyak Paksaan

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

Perhitungan saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$\Delta\theta_{cr(paksa)} = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr(alami)} - \Delta\theta_b) = 40^\circ\text{C} + (69,4^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}) = 69,4^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$\Delta\theta_{cr(paksa)} = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr(alami)} - \Delta\theta_b) = 40^\circ\text{C} + (70,6^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}) = 70,6^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB

$$\Delta\theta_{cr(paksa)} = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr(alami)} - \Delta\theta_b) = 40^\circ\text{C} + (69,4^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}) = 69,4^\circ\text{C}$$

j. Selisih Temperatur *Hot Spot* dengan *Top Oil*

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

Keterangan :

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan temperatur *hot spot* dengan sirkulasi minyak paksaan

K = Rasio pembebanan

$\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan temperatur *top oil* dengan standar IEC76 (40°C)

y = 0,8 pada ONAN dan ONAF

Perhitungan saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} = (69,4 - 40) \times 0,769^{2(0,8)} = 19,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,93 MW pada jam 13.00 WIB

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} = (70,6 - 40) \times 0,785^{2(0,8)} = 20,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Perhitungan saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} = (69,4 - 40) \times 0,779^{2(0,8)} = 19,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

k. Temperatur *Hot Spot*

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

Keterangan :

θ_a = Temperatur lingkungan sekitar (°C)

$\Delta\theta_{on}$ = Kenaikan temperatur *top oil* (°C)

$\Delta\theta_{td}$ = Selisih antara temperatur *hot spot* dengan *top oil*

Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan guna mendapatkan hasil temperatur *hot spot*, beban yang digunakan sebagai contoh yaitu saat beban 11,55 MW pada jam 07.00 WIB

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} = 24^\circ\text{C} + 43,7^\circ\text{C} + 19,4^\circ\text{C} = 87,1^\circ\text{C}$$

Tabel 5. Hasil Perhitungan Temperatur *Hot Spot*
dengan Perbandingan Suhu dan Pembebanan

Temperatur Hot Spot (°C)			
Beban	11,55 MW	11,93 MW	11,70 MW
Suhu Lingkungan / Sekitar	87,1°C	97°C	89,7°C
Menurut Standart IEC = 20°C	83,1 °C	85°C	83,7°C
Menurut Standart IEEE = 30°C	93,1°C	95°C	93,7°C

l. Laju Penuaan *Thermal*

$$X = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} \quad (12)$$

Keterangan :

θ_c = Temperatur *hot spot* (°C)

θ_{cr} = Kenaikan temperatur *hot spot* (°C)

Salah satu contoh perhitungan guna mendapatkan hasil laju penuaan *thermal* dengan beban yang digunakan saat beban 11,70 MW pada jam 19.00 WIB sebagai berikut :

$$X = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} = 2^{(89,7 - 98)/6} = 0,38 \text{ jam}$$

Tabel 6. Hasil Perhitungan Laju Penuaan *Thermal* dengan Perbandingan Suhu dan Pembebanan

Laju Penuaan <i>Thermal</i> (jam)			
Beban	11,55 MW	11,93 MW	11,70 MW
Suhu Lingkungan / Sekitar	0,28 jam	0,89 jam	0,38 jam
Menurut Standart IEC = 20°C	0,18 jam	0,22 jam	0,19 jam
Menurut Standart IEEE = 30°C	0,56 jam	0,7 jam	0,61 jam

m. Susut Umur Transformator

$$\text{Susut Umur 24 Jam} = \frac{(t_1 \cdot x_1) + (t_2 \cdot x_2) + (t_3 \cdot x_3)}{24 \text{ jam}} \quad (13)$$

Keterangan :

X_1 = Laju penuaan *thermal* saat beban 11,55 MW

X_2 = Laju penuaan *thermal* saat beban 11,93 MW

X_3 = Laju penuaan *thermal* saat beban 11,70 MW

t_1 = periode waktu saat beban 11,55 MW (07.00 WIB – 13.00 WIB)

t_2 = periode waktu saat beban 11,93 MW (13.00 WIB – 19.00 WIB)

t_3 = periode waktu saat beban 11,70 MW (19.00 WIB – 07.00 WIB)

Salah satu contoh perhitungan guna mendapatkan hasil susut umur transformator di suhu lingkungan sekitar selama 24 jam sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Susut Umur 24 Jam} &= \frac{(t_1 \cdot x_1) + (t_2 \cdot x_2) + (t_3 \cdot x_3)}{24 \text{ jam}} \\ &= \frac{(6 \times 0,28) + (6 \times 0,89) + (12 \times 0,38)}{24 \text{ jam}} = 0,4825 \text{ atau } 48,25\% \end{aligned}$$

Tabel 7. Hasil Perhitungan Susut Umur Transformator dengan Perbandingan Suhu dan Pembebanan

Susut Umur Transformator (jam)	
Suhu Lingkungan / Sekitar	0,4825 (48,25%)

Menurut Standart IEC = 20°C	0,195 (19,5%)
Menurut Standart IEEE = 30°C	0,62 (62%)

n. Perkiraan Sisa Usia Transformator

$$n = \frac{\text{umurdasar} - \text{periodepemakaian}}{\text{susutumur}} \quad (14)$$

Periode pemakaiannya yaitu terhitung dari tahun 2018 sesuai data pembebanan dan suhu yang didapat penulis yaitu data tahun 2018, maka periode pemakaian transformator daya sebesar 36 tahun, berikut salah satu contoh perhitungan perkiraan sisa usia transformator :

$$n = \frac{\text{umurdasar} - \text{periodepemakaian}}{\text{susutumur}} = \frac{40 - 36}{0,4825} = \mathbf{8,3} \text{ tahun}$$

Tabel 8. Hasil Perhitungan Perkiraan Sisa Usia Transformator dengan Perbandingan Suhu dan Beban

Perkiraan Sisa Usia Transformator (tahun)	
Suhu Lingkungan / Sekitar	8,3 tahun
Menurut Standart IEC = 20°C	20,51 tahun
Menurut Standart IEEE = 30°C	6,45 tahun

4. PENUTUP

Hasil penelitian perihal kualitas dan perkiraan sisa usia pakai transformator daya di PLTA Wonogiri akibat pembebanan didapat kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Terlihat sangat jelas bahwa suhu lingkungan sekitar dioperasikannya transformator tersebut mempengaruhi percepatan susut umur transformator dan sisa usia transformator, dengan perbandingan suhu sekitar di Wonogiri, suhu standart IEC = 20°C maupun standart IEEE = 30°C. Selain pengaruh suhu lingkungan sekitar, pembebanan maksimum juga membawa pengaruh yang paling besar akan susut umur transformator dan sisa usia pakai transformator, karena apabila pembebanan semakin besar maka suhu *hot-spot* pada transformator juga semakin besar.
- 2) Temperatur *hot spot* tertinggi pada saat menggunakan suhu lingkungan sekitar dengan hasil 97°C pada jam 13.00 WIB, hal itu terjadi karena puncak suhu lingkungan sekitar tertinggi yaitu 32°C. Kualitas transformator tersebut masih terbilang baik dan aman untuk dioperasikan karena temperatur *hot spot* terdapat dibawah batas maksimum yang telah ditetapkan publikasi IEC76 tahun 1994 yaitu suhu sebesar 140°C dan publikasi IEC345 tahun 1991 yaitu suhu sebesar 98°C.

- 3) Suhu lingkungan paling baik sekitar 20°C-30°C dari pembebanan transformator maksimal antara 70% hingga 80%.
- 4) Perkiraan sisa usia pakai transformator dengan pengaruh suhu sekitar dan pembebanan antara 76,9% - 78,5% yaitu 8,3 tahun lagi terhitung dari tahun 2018 sesuai data pembebanan dan suhu yang didapat penulis yaitu data tahun 2018, dengan mendapatkan hasil perkiraan sisa usia pakai transformator tersebut maka dapat dicegah kerusakan atau penggunaan dapat lebih lama lagi hendaknya pembebanan tetap stabil dan tidak melebihi batas pembebanan yaitu 80% keatas dari kapasitas transformator itu terpasang. Selain itu selalu memperhatikan kondisi (kualitas) sistem pendingin dan dilakukan pemeliharaan secara rutin agar transformator daya tidak terbebani dengan temperatur yang dapat mempengaruhi susut umur transformator itu sendiri sehingga kontinuitas pelayanan akan tetap berjalan dan tetap beroperasi.
- 5) Perkiraan sisa usia pakai transformator paling lama dari berbagai perbandingan baik suhu lingkungan sekitar, suhu standart IEC dan suhu standart IEEE yaitu 20,51 tahun lagi terhitung dari tahun 2018 sesuai data pembebanan dan suhu yang didapat penulis yaitu data tahun 2018 dengan menggunakan standart IEC suhu 20°C dari pembebanan sebesar 76,9% - 78,5%.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat – hidayahNya dan berterimakasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penyelesaian penelitian tugas akhir dan menyusun naskah publikasi ini kepada :

- 1) Ayah, Mama, Flavio, David, Kahiyang dan keluarga besar yang tidak bisa disebut satu persatu oleh penulis yang selalu mendoakan, menasehati dan memberi dukungan penuh dalam penyelesaian tugas akhir dan menjadi sarjana Strata-1.
- 2) Bapak Umar, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang memberikan arahan dan bimbingan akan penyelesaian tugas akhir.
- 3) Bapak Anang selaku kepala PLTA Wonogiri dan semua teknisi PLTA Wonogiri yang telah membantu penulis mencari data yang dibutuhkan dan ilmu yang bermanfaat untuk penyelesaian tugas akhir.
- 4) Ibu dan Bapak dosen Teknik Elektro UMS yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu yang bermanfaat selama perkuliahan.

- 5) Dika, Nila, Arinda, Yesi dan teman – teman masa SMA penulis yang sudah memberi semangat, dukungan, menemani penulis menyelesaikan tugas akhir, dan mendengar keluh kesah penulis.
- 6) Agita, Puri, Gita, Nata, Fahmi, Satrio dan teman – teman seperjuangan kuliah lainnya yang sudah memberi semangat, dukungan dan berbagi ilmu.
- 7) Agus Suprpto yang sudah memberi dukungan dan tetap setia mendengarkan keluh kesah penulis selama penyelesaian tugas akhir.
- 8) Serta pihak lainnya yang tidak bisa disebutkan penulis satu persatu yang telah memberikan motivasi, dukungan, bantuan, doa dan setia mendengarkan keluh kesah penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhie S. G., Chairul G., & Darto, G. (2015). *Perhitungan Penurunan Umur Transformator akibat Pengaruh Suhu Lingkungan*. Jetri: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, 13(1).
- Hamles, L. L. (2018). *Analisa Umur Pakai Transformator Distribusi 20 Kv di PT. PLN Cabang Ambon* (Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ambon, Vol.8, No.2).
- Harlow, James H. 2011. *Electrical Power Transformer Engineering*. Volume 01, CRC Press, LLC, US, Page 12-20.
- Hilshey, A. D., Hines, P. D., Rezaei, P., & Dowds, J. R. (2012). *Estimating the impact of electric vehicle smart charging on distribution transformer aging*. IEEE Transactions on Smart Grid, 4(2), 905-913.
- IEC. (2005). *Loading guide for oil-immersed Power Transformers*, IEC Standart 60076-7, International Electrotechnical Commission, 2000-04 Edition : 12
- IEEE. (1995). *Loading Guide for Oil Immersed Transformer*, IEEE Standard C57.91, Institute of 16 Electrical and Electronic Engineering, New York.
- Irine, K. F. (2017). *Analisa Penurunan Faktor Kerja Transformator Daya 30 Mva*. Jurnal Ampere, 2(1), 18-22.
- Priyo, U. (2019) *Studi Analisis Kualitas Transformator Daya Gardu Induk 150 Kv Siantan*. Universitas Tanjungpura.
- Ramadan Dofan, J. A. (2011). *Study on thermal model for calculating transformer hot spot temperature* (Doctoral dissertation, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia).
- Sigit, P., Sukamdi, T., & Karnoto, K. (2011). *Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga* (Doctoral dissertation, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip).
- Situmorang, B. M. (2011). *Analisis Biaya Trafo Akibat Rugi-Rugi Daya Total dengan Metode Nilai Tahunan (Annual Worth Method)*. Universitas Indonesia.
- Wuwung, J. O. (2010). *Pengaruh pembebanan terhadap kenaikan suhu pada belitan transformator daya jenisterendam minyak*. TEKNO, 8(52).
- Yang, L., Liao, R., Caixin, S., & Zhu, M. (2011). *Influence of vegetable oil on the thermal aging of transformer paper and its mechanism*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 18(3), 692-700.