

Analisis Susut Umur Transformator Tenaga Akibat Pengaruh Penggunaan Penyaluran Listrik di Gardu Induk 150 kV Jajar

Irsandi Yoga Nugraha¹, Supriyana Nugroho², Cicilia Puji Rahayu³, Ari Wibowo⁴

^{1,2,3,4}Fakultas Teknik Elektro dan Informatika Universitas Surakarta
email: ¹yoga4209@gmail.com, ²supriyananugroho@gmail.com, ³ciciliapuji2@gmail.com,
⁴wibowo1984.ari@gmail.com

ABSTRACT

A transformer that operates continuously in the distribution of electric power can cause an increase in the rate of aging of the insulation on the transformer, increasing the age shrink of the transformer. One of the factors that cause an increase in the aging rate of the insulation is the transformer loading which varies according to the distribution needs and the ambient temperature of the transformer it is located. Real loading data that has been taken through field observations are used as the basis for calculating the analysis. The data will be analyzed by comparison experiments and using various loading experiments. Then analyzed based on IEC 354 the year 1972 and IEEE Loading Guide. The calculation of transformer life loss is focused on transformer II at the 150 kV Jajar substation with a capacity of 60 MVA. The results of the calculation of transformer life losses during the period of 1 year of operation (January 2019 to December 2019) obtained a result of 0.36 p.u with the remaining transformer life of 16.6 years. Based on the analysis of transformer II, the 150 kV Jajar substation is still relatively safe to operate because the hotspot temperature on the transformer is below the specified temperature threshold of 98°C and the loading value is less than 81.9%.

Keywords : Transformer age shrink, 150 kV Jajar Substation

INTISARI

Transformator yang beroperasi secara terus menerus dalam penyaluran kelistrikan dapat menyebabkan bertambahnya laju penuaan isolasi pada transformator sehingga mengakibatkan bertambahnya susut umur pada transformator. salah satu faktor yang menyebabkan bertambahnya laju penuaan isolasi adalah pembebanan transformator yang bervariasi sesuai kebutuhan penyaluran dan suhu lingkungan transformator itu berada. Data pembebanan riil yang sudah diambil melalui observasi di lapangan digunakan sebagai dasar perhitungan analisis. Data akan dianalisis dengan percobaan perbandingan serta menggunakan percobaan pembebanan yang di buat bervariasi. Kemudian dianalisis dilakukan berdasarkan IEC 354 tahun 1972 dan IEEE Loading Guide. Perhitungan susut usia transformator difokuskan pada transformator II pada Gardu Induk 150 kV Jajar dengan kapasitas sebesar 60 MVA. Hasil perhitungan susut usia transformator selama periode 1 tahun pengoperasian (Januari 2019 sampai Desember 2019) didapatkan hasil sebesar 0,36 p.u dengan sisa usia transformator adalah sebesar 16,6 tahun. Berdasarkan analisis transformator II Gardu Induk 150 kV Jajar masih terbilang aman beroperasi karena temperature suhu hotspot pada transformator terdapat di bawah ambang batas suhu yang ditentukan 98°C dan nilai pembebanan kurang dari 81,9 %.

Kata Kunci : Susut umur transformator, Gardu Induk 150 kV Jajar

I. Pendahuluan

Pada era sekarang listrik mempunyai peran yang sangat penting dalam kehidupan, semakin berkembangnya teknologi yang semakin pesat juga harus dibarengi pasokan listrik yang cukup untuk memenuhi kebutuhan. Salah satu peralatan yang sangat penting dalam menyalurkan listrik ialah tranformator.

Transformator tenaga adalah suatu peralatan yang sangat vital pada sistem tenaga listrik. Fungsi utama transformator yaitu mengubah tegangan tinggi ke rendah maupun sebaliknya. Transformator pada Gardu Induk 150 kV Jajar memiliki kapasitas sebesar 60 MVA. Transformator tenaga memiliki bagian-bagian utama yaitu inti besi, belitan transformator, bushing, tangki konservator, dan pendingin. Transformator tenaga menggunakan minyak sebagai media isolasi untuk menahan tegangan tembus dan meredam panas akibat pembebanan. Transformator yang beroperasi secara terus menerus dapat mengalami penurunan isolasi atau penuaan isolasi sehingga tidak dapat berkerja

secara maksimal. Akibat dari penurunan isolasi tersebut dapat mempengaruhi kualitas transformator dalam penyaluran listrik dan mengalami susut umur transformator. Jika kualitas transformator mengalami penurunan maka energi listrik yang dihasilkan akan tidak maksimal atau kurang handal. Faktor – faktor yang menyebabkan hal ini bisa dipengaruhi oleh gangguan yang pernah dialami transformator, suhu thermal yang tinggi, suhu sekitar, kualitas minyak transformator, cuaca, kelembapan udara dan pembebanan yang terlalu tinggi. Saat transformator di beri pembebanan yang tinggi dapat menimbulkan panas yang menyebabkan teruarnya zat zat yang ada di dalam transformator sehingga dapat mempercepat proses penuaan pada transformator. Analisis penuaan isolasi untuk mendapat nilai susut usia dan batas pemakaian transformator sangat penting dilakukan, untuk mengantisipasi usia pemakaian transformator serta dapat memperkirakan batas dari *life time* transformator tersebut.

Hal tersebut memberikan motivasi bagi penulis untuk menganalisis susut umur transformator berdasarkan dua

variabel yaitu pembebanan dan suhu lingkungan dengan mengacu pada standar IEC 354 tahun 1972.

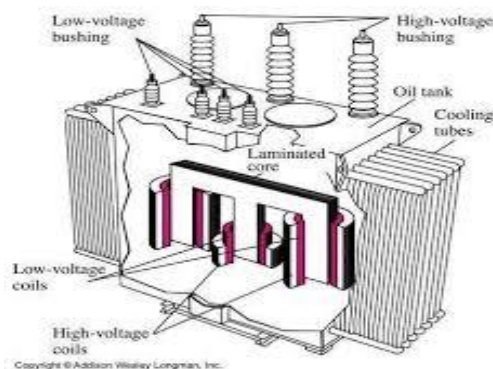
II. Landasan Teori

A. Transformator Tenaga

Investasi modal terbesar di gardu induk transmisi dan distribusi yaitu transformator. Transformator sebagai bagian peralatan termahal dalam sistem tenaga listrik mempunyai dampak ekonomi yang besar jika terjadi pemadaman transformator pada pengoperasian sistem tenaga listrik. (Susa, 2005).

B. Bagian-bagian transformator

Transformator memiliki bagian-bagian utama yaitu :



Gambar 1. Bagian-bagian transformator

1. Inti besi

Inti besi dibentuk dari lempengan besi tipis berisolasi yang bertujuan untuk mengurangi *eddy current* yaitu arus sirkulasi pada inti besi. Arus sirkulasi tersebut sebagai hasil induksi medan magnet yang mengakibatkan rugi-rugi (*losses*). Inti besi berfungsi sebagai media mengalirnya flux, dimana flux ini ditimbulkan akibat induksi arus bolak balik kumparan yang mengelilingi inti besi sedemikian sehingga bisa menginduksi kumparan lainnya. (PLN, 2010)

2. Belitan transformator (*winding*)

Lilitan kawat berisolasi membentuk suatu gulungan atau kumparan disebut *belitan* transformator. Kumparan ini dibagi menjadi dua yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan-kumparan tersebut diisolasi terhadap inti besi maupun antar kumparan dengan isolasi padat seperti pertinak dan karton. Kumparan ini berfungsi sebagai transformasi arus dan tegangan. *Belitan* primer terhubung langsung dengan sumber dan *belitan* sekunder terhubung langsung dengan beban. Jika salah satu belitan di beri sumber tegangan maka belitan tersebut akan mengalirkan fluks medan magnet, dan fluks tersebut akan menginduksi belitan lainnya sehingga dapat menimbulkan tegangan pada belitan lainnya (Solikhudin, 2010)

3. Bushing

Penghubung antara *belitan* dengan jaringan luar disebut *bushing*, yang terdiri dari sebuah konduktor dan diselubungi isolator. Isolator berfungsi sebagai penyekat konduktor *bushing* dengan *body main tank* trafo. (PLN, 2010)

4. Minyak transformator

Minyak transformator adalah salah satu bahan isolasi berbentuk cair yang berfungsi sebagai isolasi serta pendingin pada transformator.

Minyak transformator dikatakan baik jika memenuhi syarat yaitu :

- Memiliki kekuatan isolasi tinggi
- Tidak merusak bahan padat
- Memiliki titik nyala tinggi dan tidak mudah menguap
- Memiliki viskositas rendah agar mudah bersirkulasi sehingga kemampuan pendinginan menjadi baik.

5. Tangki transformator

Tangki transformator bermanfaat sebagai penampung minyak cadangan serta udara/uap yang diakibatkan oleh pemanasan trafo karena arus beban. Untuk dapat menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak maka dipasang relai *buchholz* di antara tangki dan trafo.

6. Tap changer

Tap changer berfungsi untuk mengubah perbandingan tranformasi dengan tujuan menambahkan nilai tegangan operasi sekunder yang lebih baik akibat tegangan primer yang selalu berubah-ubah (PLN, 2010). Ada 2 jenis pengoperasian *tap changer* yaitu :

- On load tap changer*
Perubahan nilai *tap changer* saat keadaan berbeban
- Off load tap changer*
Perubahan nilai *tap changer* saat keadaan tidak berbeban.

7. Pendingin transformator

Akibat rugi-rugi besi dan tembaga dapat menimbulkan panas pada kumparan dan inti besi. Apabila panas itu menaikkan suhu yang berlebihan, maka dapat mengakibatkan kerusakan pada isolasi di dalam transformator. Tindakan yang dilakukan untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan dengan melengkapi alat/sistem pendingin yang dapat menyalurkan panas keluar transformator.

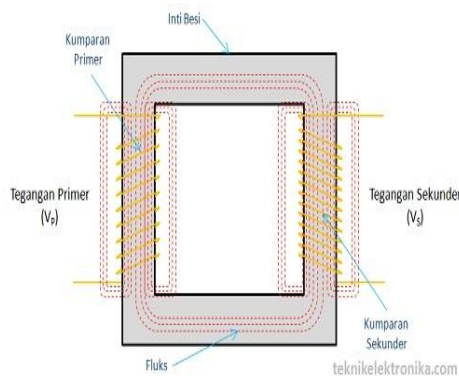
Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa gas/udara, air, dan minyak. Sedangkan pengalirannya (sirkulasi) dapat dilakukan dengan cara alamiah (*natural*) atau paksaan/tekanan.

Tabel 1. Macam spesifikasi sistem pendingin

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OWWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OWWF	Kombinasi 3 dan 7			

C. Prinsip Dasar Transformator

Pada dasarnya transformator sederhana terdiri dari 2 (dua) kumparan atau lilitan kawat yang terisolasi yakni kumparan primer dan sekunder. Secara umum kumparan kawat terisolasi itu dililitkan pada inti besi (*core*). Pada saat kumparan primer dialiri arus AC (bolak balik), menimbulkan fluks magnetik atau medan magnet di sekitarnya. Kekuatan medan magnet yang timbul dipengaruhi besar arus listrik yang mengalir. Aliran arus listrik yang semakin besar mengakibatkan medan magnet yang semakin besar pula. Fluktuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumparan primer akan menginduksi GGL (Gaya Gerak Listrik) dalam kumparan sekunder. Hal tersebut juga mengakibatkan terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Sehingga terjadi pengubahan taraf tegangan listrik dari rendah menjadi lebih tinggi maupun dari tinggi menjadi rendah.



Gambar 2. Kumparan Transformator

D. Pengaruh Pembebanan dan Suhu Lingkungan pada Transformator Tenaga

1. Kenaikan Beban

Transformator dalam keadaan berbeban dapat menimbulkan rugi-rugi oleh aktivitas pembebanan yang menimbulkan panas pada transformator. Ketika pembebanan pada transformator nilainya semakin besar, maka panas yang dihasilkan pembebanan semakin tinggi. Jika terjadi secara terus menerus maka dapat merusak isolasi pada transformator. Untuk mengurangi panas yang ditimbulkan akibat pembebanan maka perlu dipasang sistem pendingin yang berfungsi mereduksi panas yang timbul akibat dari aktivitas pembebanan.

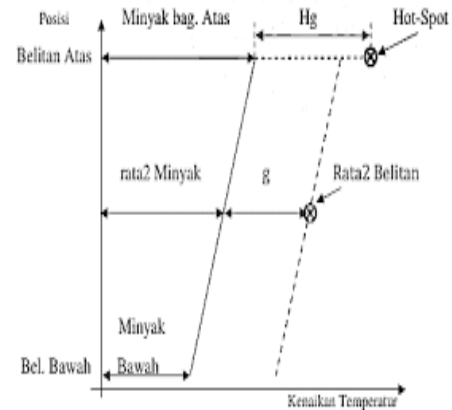
2. Kenaikan Suhu

Isolasi pada transformator rentan mengalami terjadinya kerusakan jika suhu yang diterima oleh bahan isolator melebihi dari standard yang telah ditentukan. Transformator tidak boleh bersuhu lebih dari 98°C menurut standar IEC 354 tahun 1972, jika suhu pada transformator melebihi batas tersebut maka isolasi transformator akan cepat mengalami kerusakan. Suhu 98°C dapat ditahan dalam waktu singkat (tidak terus menerus) dan hubungan antara waktu dan suhu tidak dapat ditentukan.

Untuk transformator yang menggunakan media air sebagai pendingin, batas suhu air yang diperbolehkan adalah tidak boleh lebih dari 25°C. Untuk transformator yang menggunakan media udara sebagai pendingin, suhu udara

yang diizinkan adalah tidak boleh lebih dari 40°C dan tidak boleh di bawah -25°C untuk jenis pemasangan luar dan -5°C untuk jenis pemasangan dalam. Suhu yang tinggi pada transformator juga dapat menyebabkan perubahan reaksi kimia pada minyak transformator.

E. Penentuan Kenaikan Temperatur



Gambar 3. Penentuan Kenaikan Temperatur

Selama pengujian kenaikan temperature, kenaikan temperatur *top oil* yang diukur, berbeda dengan minyak yang meninggalkan kumparan. Minyak pada *top oil* merupakan campuran dari sebagian minyak yang bersirkulasi pada sepanjang kumparan.

Diagram *thermal* pada Gambar 3. menjelaskan tentang kenaikan temperatur minyak di dalam transformator sebagai berikut :

1. Sebenarnya minyak di dalam transformator itu tidak merata dari atas sampai ke bawah. Temperatur pada bagian atas biasanya lebih tinggi daripada bagian bawah. Pelan-pelan temperatur minyak akan bertambah secara linier dari bawah ke atas sesuai dengan perubahan suhu di kumparan, tanpa dipengaruhi jenis pendingin transformator tersebut.
2. Temperatur kumparan secara linier akan bertambah dari bawah ke atas sesuai dengan pertambahan kenaikan temperatur minyak.
3. Perbedaan temperatur antara minyak yang berada di dasar kumparan dengan minyak pada puncak kumparan adalah sama untuk semua bagian kumparan. Indikator pertama bahwa kenaikan temperatur tembaga pada posisi di atas kumparan meningkat secara linier seiring sejalan dengan kenaikan temperatur minyak dan mempunyai selisih konstan $\Delta\theta_{wo}$ antara dua garis lurus. Kenaikan temperatur rata-rata puncak kumparan merupakan kenaikan temperatur rata-rata minyak ditambah $\Delta\theta_{wo}$.
4. Kenaikan temperatur *hotspot* lebih tinggi dibandingkan dengan kenaikan temperatur rata-rata puncak kumparan. Perbedaan antara kedua kenaikan temperatur ini dapat dihitung dengan $\Delta\theta_{wo}$. Jadi kenaikan temperatur *top oil* ditambah $1,1 \Delta\theta_{wo}$ [2].

Metode yang digunakan dalam menganalisis permasalahan dan melakukan perhitungan suhu *hotspot* untuk

menentukan usia pemakaian transformator dengan menggunakan metode yang terdapat pada IEE *loading guide* yang disebut *clausul 7 method*. Metode ini digunakan untuk menghitung nilai suhu hotspot berdasarkan jenis minyak pada transformator dengan nominal MVA tertentu. Selain Menggunakan standar IEE, dalam melakukan perhitungan beserta penentuan parameter lainnya, menggunakan standar IEC 354 tahun 1972.

1. Rasio Pembebanan

$$K = \frac{S}{S_r}$$

Dimana :

K = Rasio Pembebanan

S = Daya Semu Transformator (MVA)

S_r = Daya Nominal Transformator (MVA)

Dengan nilai S (Daya Semu) Dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Dimana :

S = Daya Semu

P = Daya aktif (MW)

Q = Daya reaktif (MVAR)

2. Penentuan kenaikan temperatur top oil

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

Dimana :

$\Delta\theta_b$ = Kenaikan temperatur *top oil* (°C)

d = Konstanta

K = Rasio Pembebanan

x = Nilai Ketetapan

= 0,9 (Untuk jenis pendingin ONAF dan ONAN)

= 1 (Untuk jenis pendingin OFAF dan OFWF)

$\Delta\theta_{br}$ = suhu minyak atas pada rating beban (°C)

Kenaikan suhu minyak atas pada rating transformator sebesar 55°C untuk ON dan 40°C untuk OFF.

3. Penentuan kenaikan suhu belitan

$$\Delta\theta_{cr} = \Delta\theta_{br} + 1,1 \Delta\theta_{wo}$$

Dimana :

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan suhu belitan dan minyak (°C)

$\Delta\theta_{br}$ = Suhu minyak atas pada rating beban (°C)

$\Delta\theta_{wo}$ = Selisih suhu antara belitan dan minyak pada ranting beban (°C)

4. Penentuan kenaikan temperatur hotspot

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

Dimana :

$\Delta\theta_{td}$ = Kenaikan temeperatur hotspot

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan suhu belitan dan minyak (°C)

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

K = Rasio pembebanan

Y = Nilai ketetapan

= 0,9 (Untuk jenis pendingin ONAF dan ONAN)

= 1 (Untuk jenis pendingin OFAF dan OFWF)

5. Penentuan temperatur hotspot

$$\theta_c = \Delta\theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{td}$$

Dimana :

θ_c = Temperatur Hotspot (°C)

$\Delta\theta_a$ = Suhu Ambient (°C)

$\Delta\theta_b$ = kenaikan temperature top oil (°C)

$\Delta\theta_{td}$ = Kenaikan temperaatur hotspot (°C)

F. Penuaan Isolasi Belitan Transformator Tenaga

1. Perhitungan nilai relatif usia pemakaian

$$v = \frac{\text{laju penuaan umur saat } \theta_c}{\text{laju penuaan umur saat } \theta_{cr}}$$

$$v = 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19,93}$$

Dimana :

V = Nilai relatif usia pemakaian

θ_c = Suhu hotspot

θ_{cr} = 98°C (menurut IEC 76)

2. Perhitungan pengurangan usia transformator

$$L = \frac{h}{3T} (V_0 + \sum 4 V_{odd} + \sum 2 V_{even})$$

Dimana :

L = Susut Umur (p.u)

h = konstanta = 1

T = waktu

V = Nilai relative pemakaian

V_{ood} = laju penuaan termal relative ganjil

V_{even} = laju penuaan termal relative genap

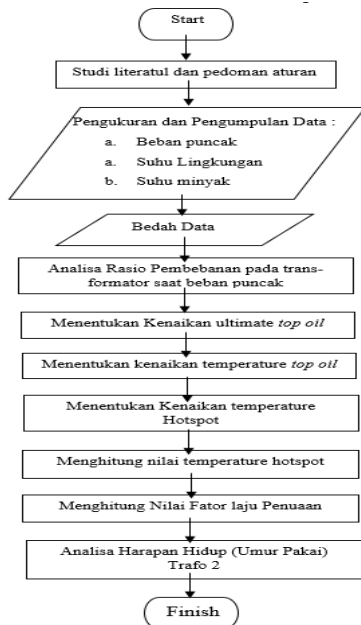
3. Perhitungan perkiraan masa beroperasi tranformator

$$n = \frac{\text{umur dasar (tahun)} - \text{lama trafo sudah dipakai (tahun)}}{\text{susut umur transformator}}$$

Umur dasar merupakan perkiraan umur dari transformator dapat dilihat dari jurnal manual book transformator. Lama trafo dipakai dapat dihitung dari mulai awal dipakai sampai sekarang.

III. Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur yang digambarkan melalui bagan berikut.



Gambar 4. Flowchart

Adapun data-data yang digunakan untuk perhitungan nilai lifetime atau usia pemakaian transformator sebagai berikut:

Merk	= Xian
Rating daya MVA	= 36/60
Frekuensi	= 50 Hz
Tegangan Primer	= 150 kV
Tegangan Sekunder	= 20 kV
Jenis Pendingin	= ONAN/ONAF
Manufacture	= 1995

IV. Pengolahan Data

Data yang diperoleh di tempat penelitian kemudian diolah menggunakan rumus :

- Berdasarkan beban riil lapangan
Tabel 2 Data Beban Riil Lapangan

Data	Waktu	
	Pagi	Malam
Data Aktif (MW)	43	45
Daya Reaktif (MVAR)	17	15
Suhu Oil	50	55
Suhu Winding	74	75
Suhu Lingkungan	35	23

Perhitungan pagi hari

- Menentukan rasio pembebanan
- $$S = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{43^2 + 17^2}}$$

$$K = \frac{46,2 \text{ MVA}}{\frac{S}{Sr}} = \frac{46,2}{60} = 0,77$$

(Transformator beroperasi pada beban 77%)

- Menentukan temperatur top oil

$$\begin{aligned} \Delta\theta_b &= \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x \\ &= 55^\circ\text{C} \left(\frac{1+5 \times 0,77^2}{1+5} \right)^{0,9} \\ &= 55 (0,662)^{0,9} \\ &= 55 \times 0,688 \\ &= 37,8^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- Menentukan Kenaikan Suhu dan minyak

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_{br} + 1,1 \Delta\theta_{wo} \\ &= 55^\circ\text{C} + 1,1 \times 24^\circ\text{C} \\ &= 55^\circ\text{C} + 26,4^\circ\text{C} \\ &= 81,4^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- Menentukan kenaikan hotspot

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{td} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \\ &= (81,4^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) 0,77^{2 \times 0,8} \\ &= (26,4^\circ\text{C}) 0,77^{1,6} \\ &= 26,4^\circ\text{C} \times 0,66 \\ &= 17,42^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- Menentukan temperatur hotspot

$$\begin{aligned} \theta_c &= \Delta\theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{td} \\ &= 35^\circ\text{C} + 37,8^\circ\text{C} + 17,42^\circ\text{C} \\ &= 90,22^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- Menentukan nilai relatif pemakaian

$$\begin{aligned} V &= 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19,93} \\ &= 10^{(90,22 - 98)/19,93} \\ &= 0,41 \end{aligned}$$

- Menghitung pengurangan umur transformator

$$\begin{aligned} L &= \frac{h}{3T} (V + \sum 4V_{ood} + \sum 2V_{even}) \\ &= \frac{1}{3 \times 24} \{0,41 + 4(12 \times 0,41) + 2(12 \times 0,41)\} \\ &= \frac{1}{72} \{0,41 + 4(4,92) + 2(4,92)\} \\ &= \frac{1}{72} \{0,41 + 19,68 + 9,84\} \\ &= \frac{1}{72} \{29,93\} \\ &= 0,42 \end{aligned}$$

- Menghitung masa perkiraan transformator

$$\begin{aligned} n &= \frac{\text{Umur Dasar} - \text{Lama Trafo pakai}}{\text{susut umur}} \\ &= \frac{30 - 24}{0,42} \\ &= 14,2 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Perhitungan malam hari

- Rasio pembebanan

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\
 &= \sqrt{45^2 + 15^2} \\
 &= 47,4 \text{ MVA} \\
 K &= \frac{S}{S_r} \\
 &= \frac{47,4}{60} \\
 &= 0,79
 \end{aligned}$$

- b. Menentukan temperatur top oil

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_b &= \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x \\
 &= 55^\circ\text{C} \left(\frac{1+5 \times 0,79^2}{1+5} \right)^{0,9} \\
 &= 55 (0,687)^{0,9} \\
 &= 55 \times 0,713 \\
 &= 39,2^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- c. Menentukan kenaikan suhu dan minyak

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_{br} + 1,1 \Delta\theta_{wo} \\
 &= 55^\circ\text{C} + 1,1 \times 23^\circ\text{C} \\
 &= 55^\circ\text{C} + 25,3^\circ\text{C} \\
 &= 80,3^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- d. Menentukan kenaikan hotspot

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_{td} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \\
 &= (80,3^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) 0,79^{2 \times 0,8} \\
 &= (25,3^\circ\text{C}) 0,79^{1,6} \\
 &= 25,3^\circ\text{C} \times 0,69 \\
 &= 17,5^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- e. Menentukan temperatur hotspot

$$\begin{aligned}
 \theta_c &= \Delta\theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{td} \\
 &= 24^\circ\text{C} + 39,3^\circ\text{C} + 17,5^\circ\text{C} \\
 &= 80,7^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- f. Menentukan nilai relatif pemakaian

$$\begin{aligned}
 V &= 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19,93} \\
 &= 10^{(80,6 - 98)/19,93} \\
 &= 0,14
 \end{aligned}$$

- g. Menghitung pengurangan umur transformator

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{h}{3T} (V + \sum 4V_{ood} + \sum 2V_{even}) \\
 &= \frac{1}{3 \times 24} \{0,14 + 4(12 \times 0,14) + 2(12 \times 0,14)\} \\
 &= \frac{1}{72} \{0,14 + 4(1,68) + 2(1,68)\} \\
 &= \frac{1}{72} \{0,14 + 6,72 + 3,36\} \\
 &= \frac{1}{72} \{10,22\} \\
 &= 0,14
 \end{aligned}$$

- h. Menghitung masa perkiraan transformator

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{\text{Umur Dasar} - \text{Lama Trafo pakai}}{\text{susut umur}} \\
 &= \frac{30 - 24}{0,14} \\
 &= 42,8 \text{ tahun}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut didapatkan hasil bahwa transformator mengalami susut sebesar 0,42 p.u pada pagi hari dan 0,14 p.u pada malam hari, sehingga pada tanggal 25

September 2019 transformator mengalami susut usia sebesar 0,42 p.u

2. Berdasarkan variasi beban

- a. Rasio pembebanan

Rasio pembebanan untuk beban stabil adalah sama dengan jumlah persen pembebanan harus sama yaitu 80 % maka nilai K adalah 0,8

- b. Menentukan temperatur top oil

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_b &= \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x \\
 &= 55^\circ\text{C} \left(\frac{1+5 \times 0,8^2}{1+5} \right)^{0,9} \\
 &= 55^\circ\text{C} (0,7)^{0,9} \\
 &= 55^\circ\text{C} \times 0,725 \\
 &= 39,88^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- c. Menentukan kenaikan suhu dan minyak

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_{br} + 1,1 \Delta\theta_{wo} \\
 &= 55^\circ\text{C} + 1,1 \times 21^\circ\text{C} \\
 &= 55^\circ\text{C} + 23^\circ\text{C} \\
 &= 78^\circ\text{C} \text{ (beban stabil)}
 \end{aligned}$$

- d. Menentukan kenaikan hotspot

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta_{td} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \\
 &= (78^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) 0,8^{2 \times 0,8} \\
 &= (23^\circ\text{C}) 0,70 \\
 &= 23^\circ\text{C} \times 0,70 \\
 &= 16,1^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- e. Menentukan temperatur hotspot

$$\begin{aligned}
 \theta_c &= \Delta\theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{td} \\
 &= 31^\circ\text{C} + 39,88^\circ\text{C} + 16,1^\circ\text{C} \\
 &= 86,98^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- f. Menentukan nilai relatif pemakaian

$$\begin{aligned}
 V &= 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19,93} \\
 &= 10^{(86,98 - 98)/19,93} \\
 &= 0,28
 \end{aligned}$$

- g. Menghitung pengurangan umur transformator

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{h}{3T} (V + \sum 4V_{ood} + \sum 2V_{even}) \\
 &= \frac{1}{3 \times 24} \{0,28 + 4(12 \times 0,28) + 2(12 \times 0,28)\} \\
 &= \frac{1}{72} \{0,28 + 4(3,36) + 2(3,36)\} \\
 &= \frac{1}{72} \{0,28 + 13,44 + 6,72\} \\
 &= \frac{1}{72} \{20,44\} \\
 &= 0,28
 \end{aligned}$$

V. Pembahasan

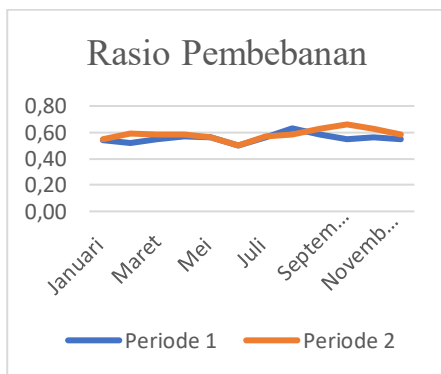
1. Hasil perhitungan selama periode Januari 2018 sampai Desember 2019

Tabel 3. Hasil perhitungan selama periode Januari 2018 sampai Desember 2019

Periode	Daya Semu (MVA)	K	θ_c ($^{\circ}\text{C}$)	L(p.u)/ Bulan	L(p.u)/ tahun
Jan 18 s/d Des 18	33,22	0,56	59,72	0,02	0,24
Jan 19 s/d Des 19	35	0,58	62	0,03	0,36

dapat diketahui bahwa besar susut usia transformator yang dihasilkan pada pengoperasian Januari 2018 hingga Desember 2018 menghasilkan nilai susut usia transformator sebesar 0.24 p.u. hasil tersebut lebih kecil dibandingkan periode selanjutnya (Januari 2019 hingga desember 2019, hal tersebut terjadi karena pada periode selanjutnya pembebanan mengalami kenaikan dari 33,22 MVA menjadi 35 MVA. Dari hasil perhitungan dihasilkan grafik sebagai berikut :

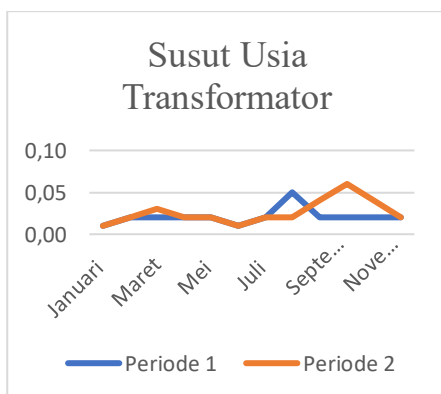
a. Grafik rata-rata rasio pembebanan



Gambar 5. Rasio Pembebanan

Grafik rata-rata pembebanan transformator II gardu induk 150 kV Jajar, dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa transformator bekerja pada beban yang tidak stabil pada tiap bulannya, terdapat kenaikan dan penurunan beban yang dihasilkan

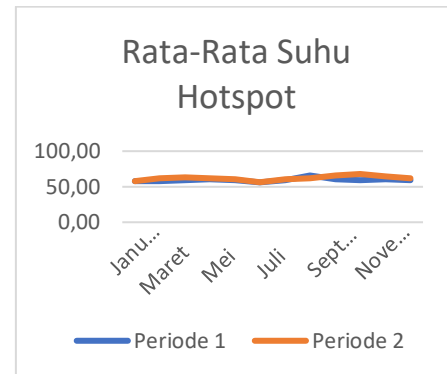
b. Grafik rata-rata Susut umur transformator



Gambar 6. Susut Usia Transformator

dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa susut usia transformator dipengaruhi oleh besarnya pembebanan yang dihasilkan transformator, maka susut usia yang dihasilkan akan semakin besar. Demikian pula sebaliknya jika pembebanan yang dihasilkan kecil maka susut usia transformator akan semakin kecil.

c. Grafik Rata-rata suhu hotspot



Gambar 7. Rata-rata Suhu Hotspot

Grafik suhu hotspot yang dihasilkan transformator II dimana suhu hotspot dipengaruhi oleh suhu lingkungan, temperature *top oil* dan kenaikan temperature hotspot. Suhu hotspot yang dihasilkan transformator II masih dalam batas standar yang baik karena suhu yang dihasilkan kurang dari 98°C .

2. Hasil Perhitungan berdasarkan variasi pembebanan

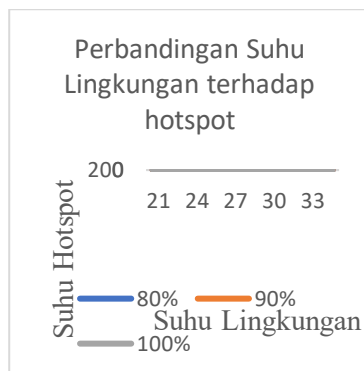
Tabel 4. Hasil Perhitungan berdasarkan variasi pembebanan

Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	80%		90%		100%	
	θ_c ($^{\circ}\text{C}$)	L (p.u)	θ_c ($^{\circ}\text{C}$)	L (p.u)	θ_c ($^{\circ}\text{C}$)	L (p.u)
21	76,98	0,09	87,07	0,28	99	1,14
22	77,98	0,10	88,07	0,33	100	1,28
23	78,98	0,11	89,07	0,37	101	1,43
24	79,98	0,12	90,07	0,41	102	1,61
25	80,98	0,14	91,07	0,46	103	1,80
26	81,98	0,16	92,07	0,51	104	2,03
27	82,98	0,18	93,07	0,58	105	2,28
28	83,98	0,2	94,07	0,65	106	2,56
29	84,98	0,22	95,07	0,72	107	2,87
30	85,98	0,25	96,07	0,81	108	3,22
31	86,98	0,28	97,07	0,91	109	3,61
32	87,98	0,31	98,07	1,02	110	4,06
33	88,98	0,35	99,07	1,15	111	4,55
34	89,98	0,41	100,07	1,29	112	5,11
35	90,98	0,45	101,07	1,45	113	5,74

dapat diketahui bahwa antara besar pembebanan, suhu lingkungan dan suhu hotspot terhadap nilai besar kecilnya susut usia transformator adalah berbanding lurus. Menurut standard IEC 354 tahun 1972, suhu hotspot pada transformator tidak boleh lebih dari 98°C , maka diperlukan

nilai pembebanan dan suhu lingkungan se efektif mungkin agar tidak memperbesar nilai suhu hotspot dan susut usia transformator. Dari hasil perhitungan Tabel 4. dapat dihasilkan grafik sebagai berikut :

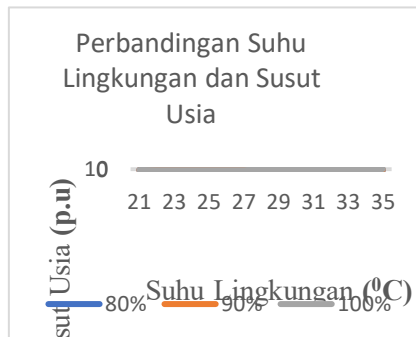
- a. Grafik hubungan antara suhu lingkungan dengan suhu hotspot



Gambar 8. Perbandingan Suhu lingkungan dengan Suhu Hotspot

Grafik hubungan antara suhu lingkungan dengan suhu hotspot, dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa hubungan suhu lingkungan dan hotspot berbanding lurus untuk beban konstan 80%, 90%, 100%. Jika suhu lingkungan semakin tinggi maka suhu hotspot juga akan semakin tinggi.

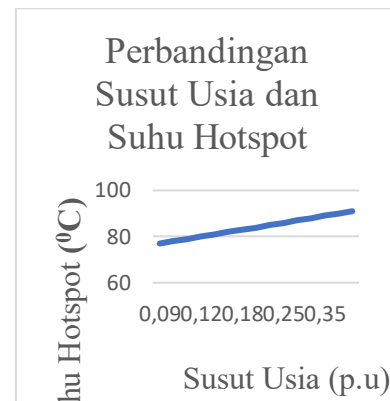
- b. Grafik hubungan antara suhu lingkungan dengan susut usia



Gambar 9. Perbandingan Suhu lingkungan dengan Susut Usia

Grafik hubungan antara suhu lingkungan dengan susut usia transformator, dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa hubungan suhu lingkungan dan susut usia transformator berbanding lurus untuk beban konstan 80%, 90%, 100%. Untuk beban 100% mengalami susut usia yang tinggi, hal ini disebabkan faktor rasio pembebanan yang sangat berpengaruh terhadap susut usia yang dihasilkan. Semakin besar rasio pembebanan semakin besar pula kenaikan temperature *top oil* dan suhu hotspot yang dihasilkan.

- c. Grafik hubungan antara susut usia dan suhu hotspot



Gambar 10. Perbandingan Susut Usia dengan Suhu Hotspot

Grafik hubungan antara susut usia dan suhu hotspot, dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa hubungan susut usia dan suhu hotspot berbanding. dimana suhu hotspot yang dihasilkan akan menjadi faktor pangkat dari persamaan laju thermal, jika faktor pangkat bernilai besar maka laju thermal yang dihasilkan juga akan bernilai besar pula. Demikian sebaliknya jika faktor pangkat memiliki nilai kecil maka laju thermal juga akan bernilai kecil.

3. Cara memperpanjang usia transformator

- a. Faktor beban

Transformator merupakan peralatan yang dirancang untuk menyalurkan beban dari nilai terkecil hingga nilai besar, beban merupakan faktor penting laju penuaan transformator. Transformator dikatakan baik dan handal jika transformator bekerja di bawah kapasitas yang telah ditentukan. Transformator II Gardu Induk 150 kV Jajar memiliki kapasitas sebesar 60 MVA, maka dapat dikatakan handal dan baik jika bekerja di bawah 60 MVA. Dari hasil Tabel 4.1 kita dapat mengetahui transformator II bekerja di bawah kapasitas beban yang ditentukan, yaitu rata-rata berkisar 30 MVA sampai 37 MVA.

Besar kecilnya pembebanan yang diberikan kepada transformator juga akan berpengaruh kepada suhu belitan dan minyak yang dihasilkan, karena pembebanan akan menghasilkan rugi-rugi pada transformator yang dapat menimbulkan panas. Bila semakin kecil rasio pembebanan yang diberikan pada transformator, maka rugi-rugi yang ditimbulkan akan semakin kecil pula sehingga suhu belitan dan suhu minyak yang dihasilkan bernilai rendah. Sebaliknya jika rasio pembebanan yang diberikan pada transformator semakin besar, maka rugi-rugi yang ditimbulkan juga semakin besar sehingga suhu belitan dan suhu minyak bernilai besar. Dari perhitungan yang dilakukan bahwa nilai rasio pembebanan (K) mempengaruhi besarnya nilai kenaikan *top oil* dan suhu hotspot

- b. Faktor Pendingin

Selain besar pembebanan, pendingin merupakan salah satu faktor penentu laju usia transformator. dengan pendingin transformator yang mengalami kenaikan suhu dapat di dinginkan, hal ini terbukti

pada Gambar 4.6 dimana suhu dapat mempengaruhi besar kecilnya susut usia transformator. beberapa faktor yang dapat menyebabkan tingginya suhu pada transformator, antara lain : meningkatnya lingkungan (ambient), suhu winding dan minyak akibat pembebanan transformator.

Jika pengurangan pembebanan sulit untuk menekan laju susut usia karena alasan permintaan konsumen akan kebutuhan energi yang semakin besar, maka dengan menambah pendingin pada transformator dapat menjadi solusi alternatif dalam menekan laju susut usia transformator. jenis pendingin yang dapat digunakan adalah jenis pendingin udara alami dengan cara menambahkan kipas pada radiator transformator. dengan menambahkan pendingin maka dapat menurunkan suhu kumpalan, suhu minyak serta suhu lingkungan.

VI. Penutup

Berdasarkan perhitungan variasi pembebanan pada transformator ketika diberi beban 80 %, 90% dan 100 % maka nilai susut usia transformator juga akan semakin besar. Dapat dilihat pada Tabel 4. saat beban 80 % nilai susut usia transformator 0,28 p.u. selanjutnya transformator diberi beban 90 % maka nilai susut usia transformator 0,91 p.u dan saat transformator diberi beban 100% nilai susut usia transformator 3,61 p.u. Dapat disimpulkan bahwa pembebanan sangat berpengaruh terhadap susut usia transformator. jika beban yang diberikan pada transformator besar maka nilai susut usia transformator yang dihasilkan juga bernilai besar begitu pula sebaliknya jika transformator diberi pembebanan yang kecil maka susut usia transformator bernilai kecil.

Berdasarkan perhitungan variasi data pembebanan dan suhu lingkungan (ambient) mendapatkan hasil bahwa ketika transformator diberi beban 80 % maka susut usia yang dihasilkan 0,09 p.u dengan suhu lingkungan 21°C dan apabila suhu lingkungan mencapai 35 °C maka susut usia transformator sebesar 0,45 p.u, kemudian bila transformator diberi beban 90 % maka susut usia yang dihasilkan 0,28 p.u dengan suhu lingkungan 21 °C dan saat suhu lingkungan mencapai 35°C maka susut usia transformator bernilai 1,45 p.u. dan saat transformator diberi beban 100 % susut usia yang dihasilkan bernilai 1,14 p.u dengan suhu lingkungan 21 °C. Saat suhu lingkungan mencapai 35°C maka susut usia transformator bernilai 5,74 p.u. maka dapat disimpulkan pengaruh suhu lingkungan terhadap susut usia transformator berbanding lurus. Semakin besar suhu lingkungan semakin besar susut usia transformator.

Berdasarkan dari hasil analisis, cara untuk memperpanjang usia transformator dengan melakukan pengurangan pembebanan dan penambahan pendingin pada transformator Solusi tersebut bisa menjadi salah satu alternatif menekan laju susut usia transformator. Jenis pendingin yang dapat digunakan adalah jenis pendingin udara alami dengan cara menambahkan kipas pada radiator transformator. dengan menambahkan pendingin maka dapat menurunkan suhu kumpalan, suhu minyak serta suhu lingkungan.

Berdasarkan data pembebanan rill pada bulan Januari 2018 hingga Desember 2019 susut usia transformator yang dihasilkan adalah sebesar 0,24 p.u dengan sisa usia transformator adalah sebesar 29 tahun. Berdasarkan data pembebanan rill pada bulan Januari 2019 hingga Desember 2019 susut usia transformator yang dihasilkan adalah sebesar 0,36 p.u dengan sisa usia transformator adalah sebesar 16, 6 tahun. Atau dibulatkan menjadi 17 tahun. Analisis ini dapat diterapkan pada transformator yang sudah lama dan memiliki pembebanan yang tinggi dan suhu lingkungan sekitar yang tinggi sehingga dapat meningkatkan keandalan dalam sistem tenaga listrik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ketua LP2M Universitas Surakarta yang telah memberikan dukungan moral dan ijin untuk mempublikasikan karya ilmiah ini. Taklupa juga penulis mengucapkan terima kasih kepada Tim Pengelola Jurnal Nasional Politeknosains telah berkenan memproses karya ilmiah ini sampai penerbitan.

REFERENSI

- Gunawan, diki candra, & Jamaaluddin, 2020, *Transformator listrik*, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo.
- IEC. 1991. *IEC 60354 2001 Loading guide for oil-immersed power transformers*. 1992, 13.
- International Electrotechnical Commission, 1972, *Loading Guide For Oil Immersed Transformer IEC Publication*.
- Harlow, James H. 2011. *Electrical Power Transformer Engineering. Volume 01*, CRC press, LCC, US, Page 12 - 20.
- PLN, P. 2010. Buku Pedoman Trafo Tenaga. *Trafo Tenaga*, i-142.
- Purnama, S, *Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga (Studi Kasus Trafo Gtg 1.3 Pltgu Tambak Lorok Semarang)*, Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro Universitas Diponegoro.
- Susa, D., Lehtonen, M., & Nordman, H. (2005). *Dynamic thermal modelling of power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 20*.
- Solikhudin, M, 2010, *Studi Gangguan Pada Transformator*, Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.