

ANALISIS SUSUT UMUR TRANSFORMATOR AKIBAT BEBAN LEBIH DENGAN PENAMBAHAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI SISIPAN

A.Sofwan¹⁾, R.Dayang Tias²⁾ dan N.Lubis³⁾

Program Studi Teknik Elektro, Fak.Teknologi Industri, Institut Sains dan Teknologi Nasional,
Jl. PLN Duren Tiga Pasar Minggu Jakarta, 12760, Telp. (021) 7919 1327

1) E-mail: asofwan@istn.ac.id, 2) rossydayangtias@rocketmail.com dan 3) nlubis@istn.ac.id

Abstract

The transformer load above 80% is continuously for long periods, it will reduce its age, this occurs because of the increased temperature of hot spot transformer oil is influenced by the increase in the load. The transformer is expected to operate for 30-year-old. PLN Rayon in Lubuk Basung there are 2 pieces of transformers with a load of > 80% (A and B). To avoid loss of life 2 pieces of the transformer then inserts the addition of a transformer (C) on the same feeder. A distribution transformer overload of 27% and 31% on the transformer B, is moved to the transformer C. So, load of transformer C is 58% of rated power capacity. Load of transformer A and transformer B which has transferred it should not over 80% of the rated power capacity of the transformer C (50kVA). After the addition of inserts transformers C, load of transformer A previously 81% decrease 27% to 48%, while the transformer B which was 84% decrease 31% to 47%. In addition to reduced loading, the age transformer A which was reduced by 3 years to 0.13 years as well as with the age distribution transformer B which had been reduced by 5 years to 0.13 years.

Kata kunci : 20kV distribution transformers, loading of transformer, distribution transformer inserts, temperature hot spots, reduction of age.

Jika transformator dibebani di atas 80 % secara terus menerus dalam waktu yang lama maka akan meningkatkan susut umurnya. Hal ini disebabkan karena peningkatan suhu hot spot minyak trafo distribusi yang dipengaruhi oleh kenaikan beban. Transformator diharapkan dapat beroperasi selama 30 tahun. Di PLN Rayon Lubuk Basung terdapat 2 transformator dengan beban >80 %, yaitu transformator A dan transformator B. Untuk menghindari terjadinya penyusutan umur pakai 2 buah transformator tersebut maka dilakukan penambahan transformator sisipan (transformator C) pada feeder yang sama. Kelebihan beban 27 % pada transformator A dan 31 % pada transformator B dipindahkan ke transformator C. Sehingga transformator C sekarang dibebani 58 % dari kapasitas daya pengenalnya. Beban transformator A dan B yang dipindahkan tersebut tidak boleh melebihi 80% dari kapasitas daya pengenal transformator C (50 kVA). Setelah dilakukan penambahan transformator distribusi sisipan beban transformator distribusi A yang tadinya 81% sekarang berkurang menjadi 48%, dan transformator distribusi B yang tadinya 84% sekarang berkurang menjadi 47%. Selain beban yang berkurang, susut umur transformator distribusi A juga berkurang dari 3,3 tahun menjadi 0,13 tahun begitupun dengan susut umur transformator distribusi B juga berkurang dari 5 tahun menjadi 0.13 tahun.

Kata Kunci: Transformator distribusi, pembebanan, transformator sisipan, hot spot, susut umur.

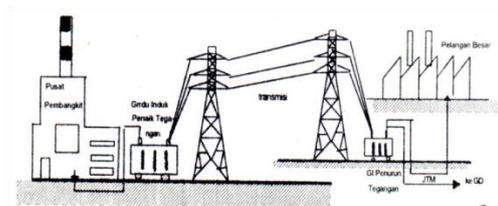
I. Pendahuluan

Menurut SPLN 17,1979, transformator distribusi dikatakan beban lebih apabila beban transformator melebihi 80% dari kapasitas daya pengenalnya atau arus nominalnya (I_n). Ketentuan tersebut telah diterapkan di PLN seluruh Indonesia salah satunya di PLN Area Bukittinggi Rayon Lubuk Basung. Rayon Lubuk Basung terdiri dari beberapa feeder/penyulang. Salah satu feedernya, yaitu feeder-7 TIKU terdapat 2 buah transformator distribusi yang beban lebih, masing-masing transformator A sebesar 81% dan transformator B sebesar 84% dari kapasitas daya pengenalnya (50 kVA) pada semester I, 2016. Hal tersebut berpengaruh terhadap susut umur kedua transformator distribusi tersebut, yang mana saat beban transformator A 81 % umur transformator A mengalami penyusutan sebesar 0,13 tahun dan pada saat beban transformator B 84% mengalami penyusutan umur 0,2 tahun dari sisa umur pakai transformator 21 tahun yang seharusnya.

Salah satu cara untuk mengatasi masalah susut umur akibat kelebihan persentase pembebanan oleh transformator distribusi tersebut adalah dengan penambahan transformator distribusi sisipan 50 kVA (transformator C) pada feeder yang sama di antara transformator A dan B. Transformator C mengurangi beban transformator A 27% dan 31% dari beban transformator B.

2.1. Sistem Ketenagalistrikan

Energi listrik sebagai salah satu bentuk energi yang paling efektif dan efisien, keberadaannya sangat dibutuhkan oleh masyarakat. Untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan, diperlukan berbagai peralatan listrik. Peralatan tersebut dihubungkan satu sama lain sehingga membentuk suatu sistem tenaga listrik.



Gambar 2.1. Skema penyaluran energi listrik ke pelanggan ^[2]

Pada **Gbr 2.1.** di atas menunjukkan suatu sistem tenaga listrik yang pada umumnya terdiri atas empat unsur yaitu, pembangkitan, transmisi, distribusi dan pemakaian tenaga listrik. Pada pusat listrik tegangan generator dinaikkan di gardu induk dari tegangan generator menjadi tegangan transmisi. Setibanya di pinggir kota, tegangan transmisi diturunkan lagi menjadi tegangan menengah.

2.1.1 GI (Gardu Induk)

Secara umum gardu induk dapat dibedakan dua macam, yaitu: 1) GI penaik tegangan, 2) GI penurun tegangan. *GI penaik tegangan* berfungsi sebagai pengumpul daya dan menyalurkannya melalui suatu tegangan tinggi. GI ini dapat dibangun bersama-sama dengan pusat pembangkit. Sedangkan *GI penurun tegangan* ditempatkan pada pusat beban yang disalurkan melalui distribusi primer, daya disalurkan dengan tegangan yang lebih rendah daripada tegangan masuk.

2.1.2 Saluran Transmisi dan Distribusi

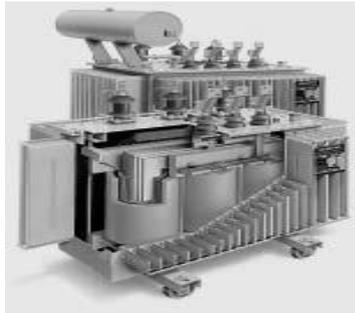
Energi listrik dibawa oleh konduktor, yaitu melalui saluran transmisi dari pusat-pusat pembangkit tenaga listrik kepada para pelanggan. Sistem distribusi tenaga listrik didefinisikan sebagai bagian dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan gardu induk/pusat pembangkit listrik dengan konsumen. Sedangkan jaringan distribusi adalah sarana dari sistem distribusi tenaga listrik di dalam menyalurkan energi ke konsumen.

2.2 Transformator Distribusi

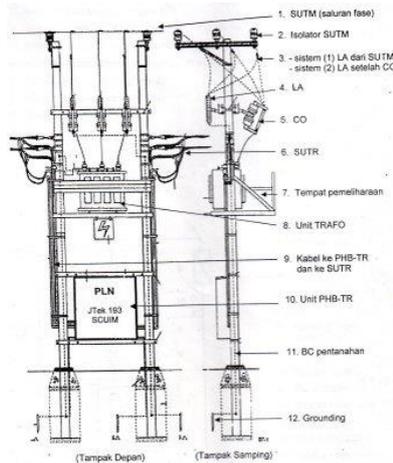
Pada sistem distribusi, transformator digunakan untuk menurunkan tegangan penyaluran 20 kV ke tegangan pelayanan 380/220 Volt. Untuk fungsi tersebut, transformator dapat berupa transformator satu fase (**Gbr 2.2**) atau tiga fase (**Gbr 2.3**) dengan berbagai Kelompok Vektor.



Gambar 2.2. Transformator Distribusi 1 Fasa ([https:// wordpress.com/](https://wordpress.com/))



Gambar 2.3. Transformator Distribusi 3 Fasa (Buku PLN ed ke - 4:2010)



Gambar 2.4. Gardu Distribusi Tiang Portal

Gambar 2.4. menunjukkan konfigurasi Gardu Tiang Portal pada umumnya yang dicatu dari Jaringan Tegangan Menengah 20 kV yang terdiri dari peralatan pengaman Pengaman Lebur *Cut-Out* (FCO) sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur (*pengaman lebur link type expulsion*) dan *Lightning Arrester* (LA) sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada transformator akibat surja petir.

2.2.1 Prinsip Kerja Transformator

Pada dasarnya transformator terdiri dari kumparan primer dan sekunder yang dibelitkan pada inti ferromagnetik. Berdasarkan letak kumparan terhadap inti , transformator terdiri dari dua macam konstruksi, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

Transformator terdiri atas kumparan primer dan sekunder. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan

bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).^[1, 5, 6]

$$e = - N \frac{d\Phi}{dt} \text{ (Volt)} \tag{1.1}$$

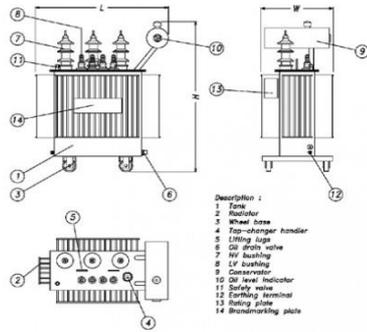
Dimana: e = Gaya gerak listrik (V), N = Jumlah lilitan, $\frac{d\Phi}{dt}$ = Perubahan fluks magnetik (Weber/detik)

2.2.2 Sistem Pendingin Transformator

Minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah, sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi (dalam transformator). Maka untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan system pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa: Udara/gas, Minyak, Air. Sedangkan pengalirannya (sirkulasi) dengan cara: 1) Alami dan 2) Tekanan/paksaan. Sistem pendingin transformator berdasarkan media dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan pada 11 cara Sistem Pendingin Transformator^[10]. Salah satu bagian trafo distribusi yang berperan sebagai pernapasan trafo adalah radiator yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5.** No. 2. Radiator meningkatkan luas permukaan pendinginan tangki transformator.^[14]

Salah satu kerugian pada saat transformator beroperasi pada kondisi temperatur lebih adalah terjadinya penuaan isolasi. Komponen yang paling penting dari sistem isolasi adalah isolasi kertas pada belitan dan coil yang tidak mudah diganti. maka dari itu, umur isolasi kertas (cellulosic material) menjadi faktor pembatas dalam operasi transformator.[11]



Gambar 2.5. Konstruksi bagian - bagian Trafo Distribusi
(sumber : www.wikipedia.org)

2.2.3 Trafo Distribusi Sisipan

Transformator sisipan merupakan gardu tambahan yang dipasang oleh PT. PLN (Persero) untuk menanggulangi berbagai kerugian yang ditimbulkan oleh transformator pada gardu sebelumnya. Salah satu faktor yang dipertimbangkan oleh PT. PLN (Persero) untuk menambah transformator sisipan adalah transformator sebelumnya sudah *overload*. *Overload* terjadi karena beban yang terpasang pada transformator melebihi kapasitas maksimum ($\geq 80\%$ dari kapasitas daya pengenalnya) dimana arus beban melebihi arus beban penuh (*full load*) dari transformator. *Overload* akan menyebabkan trafo menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan transformator. [1, 5, 6]

3. Pengaruh Pembebanan dan Suhu Terhadap Susut Umur

3.1 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator Distribusi

Untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus: [12]

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}xV} \quad (3.1)$$

Keterangan:

I_{FL} = arus beban penuh (A)

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (V)

Sedangkan untuk menghitung pembebanan transformator distribusi dapat menggunakan rumus dibawah ini: [11]

KVA beban =

$$(I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{S-N}) \quad (3.2)$$

Keterangan :

I_R = arus fase R

V_{R-N} = tegangan fase R terhadap netral

I_S = arus fase S

V_{S-N} = tegangan fase S terhadap netral

I_T = arus fase T

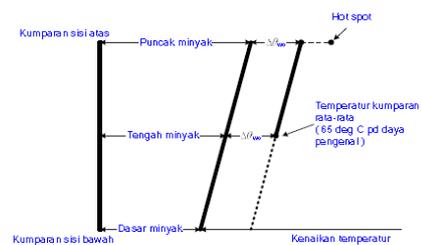
V_{T-N} = tegangan fase T terhadap netral

$$\% \text{ Beban Trafo} = \frac{KVA \text{ Beban}}{KVA \text{ Trafo}} \times 100 \% \quad (3.3)$$

3.2 Pengaruh Pembebanan dan Suhu pada Trafo Distribusi

Akibat utama dari penuaan adalah menurunnya kekuatan mekanis dan elektrik dari isolasi belitan transformator. Efek suhu, air dan oksigen adalah faktor penting dalam penuaan kertas isolasi dan minyak. [13]

Kenaikkan temperatur dapat diasumsikan dengan diagram thermal sederhana, seperti ditunjukkan Gambar 3.1. Gambar ini dapat dipahami karena merupakan diagram penyederhanaan dari distribusi yang lebih rumit. Kenaikkan temperatur *top oil* yang diukur selama pengujian kenaikan temperatur, berbeda dengan minyak yang meninggalkan kumparan, minyak pada *top oil* adalah campuran sebagian dari minyak yang bersirkulasi pada sepanjang kumparan. [11] Secara alami kenaikan temperatur hot spot adalah sepadan dengan kenaikan temperatur top oil ditambah $1,1 \Delta\theta_{wo}$.



Gambar 3.1. Diagram Thermal [IEC 1972]

Pengaruh pembebanan dan suhu pada transformator distribusi terdapat pada berbagai kondisi yaitu kondisi dengan nilai daya tertentu, kondisi dengan beban stabil, dan kondisi dengan beban yang berubah-ubah. [10, 11, 12]

1) Kondisi dengan nilai daya tertentu terdiri dari :

a. Sirkulasi minyak alami (ONAN dan ONAF).

Kenaikkan suhu rata-rata kumparan (diukur tahanan) = 65 °C

Kenaikkan suhu top oil ($\Delta\theta_{br}$) = 55 °C

Kenaikkan suhu rata-rata oil = 44 °C

Perbedaan antara kenaikan suhu rata-rata kumparan dan kenaikan rata-rata suhu minyak $\Delta\theta_{wo} = 21$ °C

Kenaikkan temperatur *hot spot* ($\Delta\theta_{cr}$) disusun sebagai berikut :

$$\Delta\theta_{cr} = \Delta\theta_b + 1,1 \Delta\theta_{wo} \quad (3.4)$$

$$= 55 + 23 = 78 \text{ }^\circ\text{C}$$

b. Sirkulasi minyak paksaan (OFAF, OFAN, dan OFWF)

Kenaikkan temperatur *hot spot* ($\Delta\theta_{cr}$) disusun sebagai berikut ;

$$\Delta\theta_{cr} = \Delta\theta_b + (\theta_{cr} - \theta_b) \quad (3.5)$$

$$= 40 + 38 = 78 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Untuk kondisi dengan beban stabil:

a. Kenaikkan temperatur *top oil*

Kenaikkan temperatur ini sepadan dengan kenaikan temperatur *top oil* pada nilai daya yang dikalikan ratio dari total kerugian dengan eksponen x:

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right)^x \quad (3.6.)$$

Keterangan :

d : perbandingan rugi tembaga pada daya pengenal dengan rugi beban nol (SPLN 50 : 1997; spesifikasi trafo distribusi 3 fasa)

x : konstanta, 0,9 (ONAN dan ONAF)**

x : 1,0 (OFAF dan OFWF)**

$\Delta\theta_{br}$: Kenaikkan temperatur top oil (°C)

Untuk $\Delta\theta_{br} = 55$ °C (ON), dan

$\Delta\theta_{br} = 40$ °C (OF)

**spesifikasi dalam sub bab 41.7.1 publikasi IEC 76 (1967), karena mengikuti tabel tunggal yang diatur untuk digunakan pada kedua jenis pendinginan dengan kesalahan yang tidak lebih dari ±2 %.

b. Kenaikkan temperatur *hot spot*
Kenaikkan temperatur *hot spot* $\Delta\theta_c$ untuk beban yang stabil dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right) + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \quad (3.7)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{cr} = 78$ °C

θ_a : temperature sekitar (°C)

y : konstanta

y : 0,8 (ONAN dan ONAF)**

y : 0,9 (OFAF dan OFWF)**

$\Delta\theta_{br}$: Kenaikkan temperatur top oil (°C)

Untuk $\Delta\theta_{br} = 55$ °C (ON), dan

$\Delta\theta_{br} = 40$ °C (OF)

3) Sedangkan kondisi dengan beban yang berubah – ubah terdiri dari :

a. Kenaikkan temperatur *top oil*

Kenaikkan temperatur *top oil* $\Delta\theta_{on}$ pada waktu t setelah pemberian beban adalah mendekati untuk kenaikan eksponensial, sebagai berikut :

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_b - \Delta\theta_{o(n-1)}) (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.8)$$

$\Delta\theta_{o(n-1)}$: kenaikan suhu awal minyak.

$\Delta\theta_b$: kenaikan suhu akhir minyak yg distabilkan.

τ : konstanta waktu minyak dalam jam

3 (ONAN- ONAF), 2 (OFAF OFWF)

t : waktu dalam jam

b. Kenaikkan temperatur *hot spot*

Kenaikkan temperatur *hot spot* pada waktu tertentu sebelum kondisi distabilkan adalah mendekati perkiraan dengan asumsi bahwa kenaikan temperatur *hot spot* di atas adalah kenaikan temperatur *top oil* yang terbentuk dengan seketika. Kenaikkan temperatur *hot spot* pada waktu tertentu sama dengan:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right) + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) K^{2y} \quad (3.9)$$

3.3 Nilai Relatif Dari Umur Pemakaian Trafo Distribusi

Dalam menentukan nilai relatif dari umur pemakaian sebuah transformator daya dapat menggunakan hubungan Montsinger. Hubungan Montsinger sekarang telah digunakan untuk memperoleh nilai relatif dari

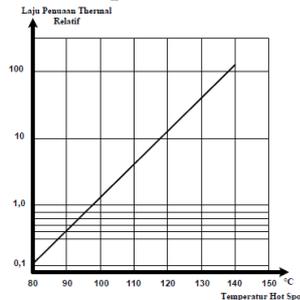
umur pemakaian pada temperatur θ_c , dibanding dengan nilai normal dari umur pemakaian pada temperatur θ_{cr} . [10, 11, 12]

$$X = \frac{\text{Laju penggunaan umur saat } \theta_c}{\text{Laju penggunaan umur saat } \theta_{cr}}$$

$$X = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} \quad (3.10)$$

X : nilai relatif dari umur pemakaian trafo Distribusi

θ_{cr} : 98 °C menurut publikasi IEC 76 (1967).



Gambar 3.2. Garis Umur Trafo Distribusi

Setelah diperoleh harga hot-spot yang terjadi akibat pembebanan pada transformator dan bila nilai suhu ini dihubungkan dengan faktor penuaan isolasi maka dapat diketahui bentuk kurva faktor penuaan dari isolasi belitan yang dipergunakan seperti pada gambar 3.2.

Memang belum ada ketentuan yang diperoleh untuk perhitungan umur perkiraan yang lebih baik dari yang lainnya. Namun perhitungan ini didasarkan pada jurnal-jurnal terkait dari studi kasus yang sama yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya yang memberikan hasil yang berlainan. Ini disebabkan karena penelitian sebelumnya memiliki ukuran nilai akhir umur harap yang berbeda-beda.

4. Analisis Pengaruh Penambahan Transformator Distribusi Sisipan Terhadap Susut Umur Transformator Distribusi yang Overload

4.1 Lokasi Pengambilan Data

Data di ambil di PT. PLN (Persero) Area Bukittinggi, Rayon Lubuk Basung, tepatnya pada salah satu feeder/penyulang, yaitu Feeder-7 TIKU (Kp.TIKU). Data tersebut adalah data Semester II tahun 2016. Feeder tersebut merupakan lokasi penambahan transformator distribusi sisipan (transformator

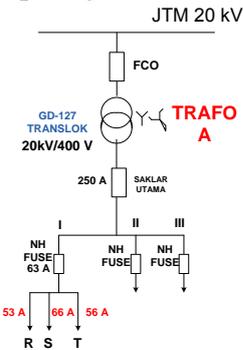
C). Transformator C tersebut di pasang dikarenakan adanya 2 buah transformator yang dibebani lebih > 80% dari kapasitas daya pengenalnya. Menurut aturan di PLN transformator tersebut masuk ke dalam kategori transformator *overload*. Kedua transformator yang dimaksud adalah transformator distribusi A dan transformator distribusi B.

4.2 Data Transformator Distribusi A

Data Spesifikasi (nameplate) Trafo A;

Merk : VOLTRA
 Hubungan : Yzn5
 Tahun operasi : 2007
 Daya pengenal : 50 KVA, 3 phase
 Jenis pendingin : ONAN
 Tegangan primer : 20 KV
 Tegangan sekunder: 400 V
 Temperatur maksimal semester I tahun 2016 : 32 °C
 Temperatur rata-rata bulanan (θ_a) : 25 °C

Data Beban semester I Tahun 2016 : 81 %
 Dapat dilihat pada gambardi bawah ini :



Gambar 4.2. Single Line Diagram Transformator A

Perhitungan Susut Umur Trafo A :

1. Perhitungan *Ratio* Pembebanan (K)

$$K = \frac{\% \text{ Suplay Beban}}{\% \text{ Rating Beban}}$$

$$K = \frac{81 \%}{100 \%}$$

$$K = 0,81$$

2. Perhitungan Perbandingan Rugi-Rugi (d)

$$d = \frac{\text{Rugi belitan pada daya pengenal}}{\text{rugi beban nol}}$$

$$d = \frac{800}{150} = 5$$

3. Perhitungan Kenaikan Temperatur *Ultimate Top Oil* ($\Delta\theta_{ou}$)

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{ou} &= \Delta\theta_{br} \left[\frac{1 + dK^{21}}{1 + d} \right]^x \\ &= 55 \left[\frac{1 + (5)(0,81)^{21}}{1 + 5} \right]^{0,9} \\ &= 55 \left[\frac{4,3}{6} \right]^{0,9} \\ &= 55 [0,7]^{0,9} \\ &= 40,59 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

4. Perhitungan Kenaikan Temperatur Top Oil ($\Delta\theta_{on}$)

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{on} &= \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_{ou} - \Delta\theta_{o(n-1)})(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}) \\ \Delta\theta_{on} &= 40,59 + (40,59 - 40,59)(1 - e^{-1/3}) \\ \Delta\theta_{on} &= 40,59 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

5. Perhitungan selisih Temperatur antara Hot Spot dengan Top Oil ($\Delta\theta_{otd}$)

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{otd} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} \\ \Delta\theta_{otd} &= (78 - 55)0,81^{(2 \times 0,8)} \\ \Delta\theta_{otd} &= 16,4 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

6. Perhitungan Temperatur Hot Spot ($\Delta\theta_h$)

$$\begin{aligned} \theta_h &= \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{otd} \\ \theta_h &= 25^\circ\text{C} + 40,59 \text{ }^\circ\text{C} + 16,4 \text{ }^\circ\text{C} \\ \theta_h &= 81,99 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

7. Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif (X)

$$\begin{aligned} X &= 2^{(\theta_h - 98)/6} \\ X &= 2^{(81,99 - 98)/6} \\ X &= 2^{(-16,01)/6} \\ X &= 2^{(-2,67)} \\ X &= 0,157 \end{aligned}$$

Karena bebanya konstan maka besarnya laju penuaan relatif untuk tiap jam per hari sama.

8. Perhitungan Susut/Pengurangan Umur (L)

$$\begin{aligned} L &= \frac{h}{3T} \left\{ V_0 + \sum 4V_1 + \sum 2V_2 + V_n \right\} \\ L &= \frac{1}{3 \times 24} \{ 0,35 + 4(0,157 \times 12) \\ &\quad + 2(0,157 \times 12) \} \end{aligned}$$

$$L = 0,157 \text{ h/hari}$$

Dimana h = hour (jam)

Dengan asumsi bahwa umur dasar transformator distribusi adalah **30** tahun, dan diketahui transformator distribusi A telah beroperasi selama **9** tahun (2007 s.d 2016), maka perhitungan sisa umur pakai transformator distribusi yang seharusnya adalah sebagai berikut :

Umur dasar transformator distribusi - lama transformator distribusi A telah beroperasi = 30 tahun - 9 tahun = **21** tahun.

Namun dikarenakan pembebanan yang berlebih pada transformator distribusi A maka terjadilah kenaikan temperatur pada transformator tersebut. Kenaikan temperatur pada transformator distribusi A mengakibatkan terjadinya penyusutan umur pada transformator tersebut, sehingga umur transformator distribusi A akan berkurang dari **21** tahun.

Pengurangan Umur transformator distribusi A tersebut dapat dihitung menggunakan rumus perhitungan sebagai berikut :

$$L = 0,157 \times 21 \text{ tahun} = 3,3 \text{ tahun}$$

Jadi sisa umur (life time) transformator distribusi A menjadi sebagai berikut :

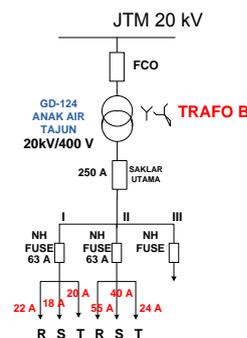
Sisa umur transformator distribusi A yang seharusnya - susut umur transformator distribusi A (L) = 21 tahun - 3,3 tahun = **13,6** tahun.

Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa karena pengaruh kenaikan temperatur akibat beban lebih transformator distribusi A mengalami pengurangan umur pakai sebesar 7,4 tahun, sehingga sisa umur pakai transformator distribusi A menjadi **17,7** tahun.

4.3 Data Transformator Distribusi B

Data Spesifikasi (nameplate) Trafo B;
Merk: Trafoindo, Yzn5, Tahun operasi: 2007
Daya pengenal : 50 KVA, 3 phase
Jenis pendingin : ONAN
Teg primer: 20 KV, Teg. sekunder: 400V

Suhu maksimal semester I tahun 2016 : 32 ⁰C
Suhu rata-rata bulanan (θ_a): 25 ⁰C
Data Beban semester I Tahun 2016 : 84%
Dapat dilihat pada gambardi bawah ini :



Gambar 4.3. Single Line Diagram Transformator B

Perhitungan Susut Umur Trafo B sama halnya dengan Trafo A, sehingga diperoleh hasil perhitungannya sebagai berikut :

$$L = 0,225 \times 21 \text{ tahun} = 4,7 \text{ tahun} = 5 \text{ tahun hasil pembulatan}$$

Jadi sisa umur (life time) transformator distribusi B menjadi **16** tahun.

Pengaruh kenaikan temperatur akibat beban lebih transformator distribusi B mengalami pengurangan umur pakai sebesar 5 tahun, sehingga sisa umur pakai transformator distribusi B menjadi **16** tahun.

4.4 Perhitungan Susut Umur Transformator A, Transformator B Saat Beban 80%, 90% dan 100%

Dengan menggunakan rumus yang sama, diperoleh hasil perhitungan yang dapat dilihat pada tabel 4.3. di bawah ini :

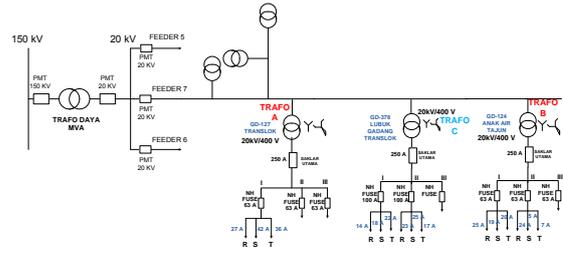
Tabel 4.3. Hasil Perhitungan Susut Umur

Saat Pembebanan (%)	Trafo A dan Trafo B		
	Susut Umur (Tahun)	Sisa Umur Pakai (Tahun)	Temperatur Hot Spot (°C)
80	3	18	80,99
90	9,4	10,6	91,5
100	15	4	96

4.5 Data Transformator Distribusi Sisipan (Transformator C)

Data Spesifikasi (nameplate) Trafo A;
 Merk : PT.Mastergreen Electric, Yzn-5
 Tahun operasi : 2016
 Daya pengenal : 50 KVA, 3 phase
 Jenis pendingin : ONAN
 Teg. primer: 20 KV, Teg sekunder: 400 V
 Suhu maksimal semester I, 2016 : 32 °C
 Suhu rata-rata bulanan (θ_a): 25 °C

Data Beban semester II Tahun 2016 : 58%
 Dapat dilihat pada gambardi bawah ini :



Gambar 4.5. Single Line Diagram Trafo C

4.6 Perhitungan Susut Umur Transformator A dan B setelah Penambahan Transformator C

Dengan menggunakan rumus perhitungan yang sama diperoleh hasil perhitungan susut umur transformator A dan B setelah penambahan transformator C sebagai berikut :

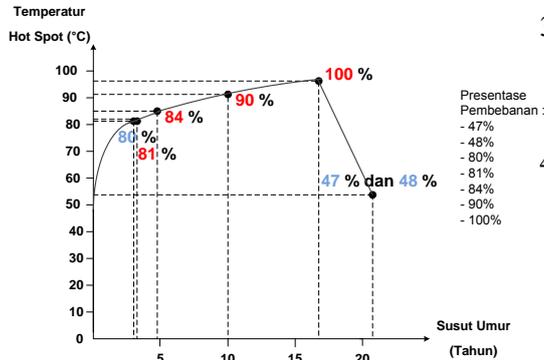
Transformator A : susut umurnya 0,13 tahun, dan Transformator B : susut umurnya 0,13 tahun

4.7 Analisis Hasil Perhitungan

Susut umur dan sisa umur pakai transformator A dan B setelah dilakukan penambahan transformator distribusi sisipan (transformator C), transformator distribusi A yang tadinya dibebani 81% berkurang menjadi 48 dari kapasitas daya pengenalnya (50 kVA). Begitu pula dengan transformator distribusi B, transformator distribusi B yang tadinya dibebani sebesar 84% berkurang menjadi 47% dari kapasitas pengenal (50kVA).

Selain beban lebih yang berkurang, susut umur transformator distribusi A dan B pun berkurang. Saat beban transformator distribusi A 81% susut umurnya 3,3 tahun sehingga sisa umur pakai transformator A menjadi 17,7 tahun, setelah bebanya berkurang menjadi 48% susut umurnya berkurang menjadi 0,13 tahun sehingga sisa umur pakai transformator A naik menjadi 20,87 tahun. Sama halnya dengan transformator distribusi A, beban transformator B 84% berkurang 47% begitupun susut umurnya dari 5 tahun menjadi 0,13 tahun sehingga sisa umur pakai transformator B yang tadinya 16 tahun naik menjadi 20,87

tahun. Dengan kata lain transformator distribusi A dan B mengalami penyusutan umur yang sangat kecil sehingga sisa umur transformator distribusi tersebut hampir mendekati sisa umur transformator distribusi yang seharusnya, yaitu 21 tahun.



Gambar 4.6. Garfik Kenaikan Susut Umur Transformator A dan B terhadap Pengaruh Temperatur dan Pembebanan

Pada **Gambar 4.6.** di atas menunjukkan kenaikan susut umur transformator A dan transformator B yang konstan terhadap presentase pembebanan dan temperatur *hot spotnya*. Semakin naik pembebanan transformator, semakin naik pula temperatur *hot spotnya* begitu pula susut umur transformator tersebut. Namun dengan upaya penambahan transformator distribusi sisipan (transformator distribusi C), sisa umur transformator distribusi A maupun B akan kembali normal atau tidak berkurang jauh dari sisa umur transformator distribusi yang diharapkan (21 tahun).

5. Kesimpulan

Setelah dilakukan pengolahan data-data yang ada dan perhitungan berdasarkan teori-teori terkait, kemudian hasilnya dianalisis, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Setelah dilakukan penambahan transformator distribusi sisipan (transformator C), beban transformator A berkurang menjadi 48% dan beban transformator distribusi B berkurang

menjadi 47% dari kapasitas daya pengenalnya (50 kVA).

2. Sisa umur transformator distribusi yang seharusnya, yaitu 21 tahun namun, karena beban transformator distribusi A 81 %, susut umurnya menjadi 3,3 tahun, sehingga sisa umur pakai transformator A menjadi 17,7 tahun.
3. Karena beban Transformator distribusi B 84%, susut umurnya menjadi 5 tahun, sehingga sisa umur pakai transformator B menjadi 16 tahun
4. Setelah dilakukan penambahan transformator distribusi sisipan (transformator C), sisa umur transformator distribusi A dan B naik menjadi 20,87 tahun, yang mana hampir mendekati sisa umur transformator distribusi yang seharusnya, yaitu 21 tahun.
5. Jika transformator distribusi A & B dibebani 80%, susut umurnya menjadi 3 tahun sehingga sisa umur pakai transformator A dan B menjadi 18 tahun.
6. Apabila tidak dilakukan penambahan transformator distribusi sisipan (transformator distribusi C), maka :
 - Jika tahun 2017 transformator distribusi A & B bebannya mencapai 90%, susut umurnya naik menjadi 9,4 tahun sehingga sisa umur pakai transformator menjadi 10,6 tahun dari yang seharusnya (20 tahun)
 - Jika 2 tahun kemudian (2018) transformator distribusi A & B bebannya mencapai 100% susut umurnya naik menjadi 15 tahun sehingga sisa umur pakai transformator tersebut semakin berkurang menjadi 4 tahun dari yang seharusnya (19 tahun).

6. Daftar Pustaka

[1] Djoekardi, Djuhana. (1983). "Transformator". ISTN: Jakarta.
 [2] Basri, Hasan. (1997). "Sistem Distribusi Daya Listrik". ISTN: Jakarta.
 [3] Pandapotan, Junedy dan Warman, Eddy. (2013). "Studi Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya". Jurnal USU. <https://jurnal.usu.ac.id>, 14 Oktober 2016.
 [4] SPLN No. 1 (1995), "Standar Tegangan Menengah".

- [5] Bahri, Syamsul, dkk. (2015).”*Studi Pertambahan Beban Transformator Daya Pada Gardu Induk Parit Baru PT. PLN (Persero) Cabang Pontianak*”. Jurnal Universitas Tanjungpura. <https://jurnal.ut.ac.id>. 21 Januari 2017.
- [6] SPLN No. 50 (1997), “*Spesifikasi Transformator Distribusi 20 kV*”.
- [7] SPLN No. 17 (1979), “*Pedoman Pembebanan Transformator Distribusi Terendam Minyak*”.
- [8] IEC No. 60076-1, 2, 3, 7 (2011), “*Power Transformer*”. IEC Publication.
- [9] IEC No. 354 (1991), “*Loading Guide for Oil Immersed Transformer*”, IEC Publication.
- [10] Sigit, Purnama. (2008).”*Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga*”.Jurnal Undip. <http://jurnal.undip.ac.id>. 11 Januari 2017.
- [11] Kurniawan, dan Firdaus. (2016).”*Studi Analisa Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Lingkungan Terhadap Susut Umur Transformator Daya pada GI Garuda Sakti*”.Jurnal Universitas Riau. <http://jurnal.unsri.ac.id>. 13 Januari 2017.
- [12] Zaim, Muhammad Rif’at. (2014).”*Analisis Transformator Daya 3 Fasa 150 kV/20 kV pada GI Ungaran*”. Edu Elektrikal Jurnal Universitas Semarang.<http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/eduael>. 13 Januari 2017.
- [13] Perera KBMI, (2001).”*Estimation of Optimum Transformer Capacity Based on Load Curve*”, Vol 3, NO 1, Transactions of IEE Sri Lanka.
- [14] Wuwung, Janny Olny. (2010).”*Pengaruh Pembebanan Terhadap Kenaikan Suhu pada Belitan Transformator Daya Jenis Terendam Minyak*”. Jurnal. 13 Januari 2017.