

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh pembebanan berlebih (overloading) terhadap kinerja dan umur transformator distribusi. Pembebanan yang melebihi kapasitas nominal secara berkelanjutan diketahui menyebabkan kenaikan temperatur minyak dan titik panas (hot-spot temperature) pada belitan transformator, yang berdampak langsung terhadap percepatan degradasi isolasi dan peningkatan laju susut umur transformator [1]

Penelitian lain mengenai estimasi umur transformator distribusi berdasarkan pertumbuhan beban dan temperatur lingkungan dilakukan pada beberapa unit trafo dengan kapasitas berbeda. Hasil kajian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan beban dan suhu lingkungan memiliki korelasi yang kuat terhadap percepatan susut umur transformator. Transformator yang dioperasikan mendekati atau melebihi kapasitas nominal cenderung mengalami penurunan umur yang lebih cepat dibandingkan dengan transformator yang beroperasi dalam kondisi pembebanan normal. Analisis tersebut menegaskan bahwa faktor pembebanan merupakan parameter utama dalam menentukan umur teknis transformator distribusi [2]

Kajian mengenai pengaruh pembebanan sebagai dasar penjadwalan pemeliharaan transformator juga menunjukkan bahwa peningkatan beban yang signifikan dapat memicu kenaikan temperatur hotspot dan mempercepat penuaan isolasi. Meskipun standar internasional menetapkan umur rata-rata transformator, hasil penelitian membuktikan bahwa umur operasional aktual masih dapat diperpanjang melalui strategi pengelolaan beban dan pemeliharaan yang tepat [3].

Pengaruh pembebanan dan temperatur terhadap susut umur transformator tenaga telah dikaji pada Transformator 60 MVA Unit 1 dan Unit 2 di Gardu Induk 150 kV Kaliasri. Hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat pembebanan dan temperatur hotspot kedua unit transformator masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan standar, dengan nilai maturitas dan estimasi sisa umur yang berbeda pada masing-masing unit [4].

Penelitian pada transformator tenaga berkapasitas besar menunjukkan bahwa selain pembebanan, sistem pendinginan turut memengaruhi laju penyusutan umur transformator. Transformator dengan sistem pendinginan alami (ONAN) memiliki laju penuaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan transformator yang menggunakan sistem pendinginan paksa. Temuan ini memperkuat ketentuan standar nasional dan internasional terkait pengaruh temperatur dan sistem pendinginan terhadap umur transformator [5].

2.2 Landasan Teori

Dalam penelitian ini yang menjadi landasan teori untuk penulisan maupun analisa yang dilakukan berdasarkan referensi yang ada sebagai berikut:

2.2.1 Transformator

Transformator merupakan peralatan listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk memindahkan energi listrik antar rangkaian melalui kopling magnetik, serta berfungsi menurunkan tegangan distribusi 20 kV menjadi tegangan pelayanan 380/220 Volt[1]. Secara umum, transformator terdiri atas inti besi berlapis serta kumparan primer dan sekunder yang dililitkan pada inti tersebut. Perbedaan jumlah lilitan memungkinkan transformator menaikkan atau menurunkan tegangan, di mana kumparan sekunder terhubung langsung ke beban, sedangkan inti besi berfungsi mengarahkan fluks magnet dari primer ke sekunder [6] . Gambar sederhana dari sebuah transformator dapat dilihat pada gambar 2.1:



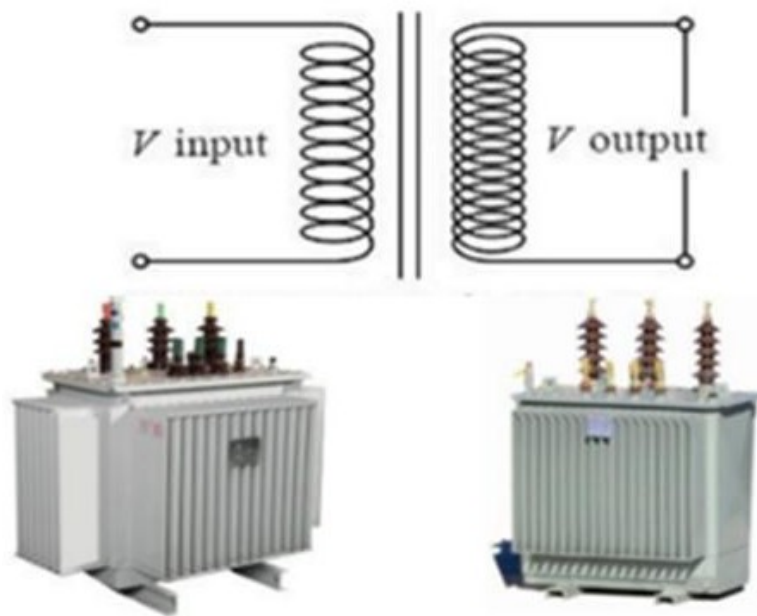
Gambar 2.1 Transformator Distribusi[6]

2.2.2 Jenis Transformator

2.2.2.1 Transformator Berdasarkan Level Tegangan

a. Transformator *Step-UP*

Jenis trafo yang dikenal sebagai trafo step-up memiliki kumparan sekunder atau keluaran dengan belokan tambahan. Trafo jenis ini memiliki terminal output yang dapat menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dari tegangan terminal input. Transformator ini juga dikenal sebagai transformator step-up sebagai hasilnya [7] . Bahkan ketika tegangan naik pada trafo ini, daya dan frekuensi listrik tetap sama.

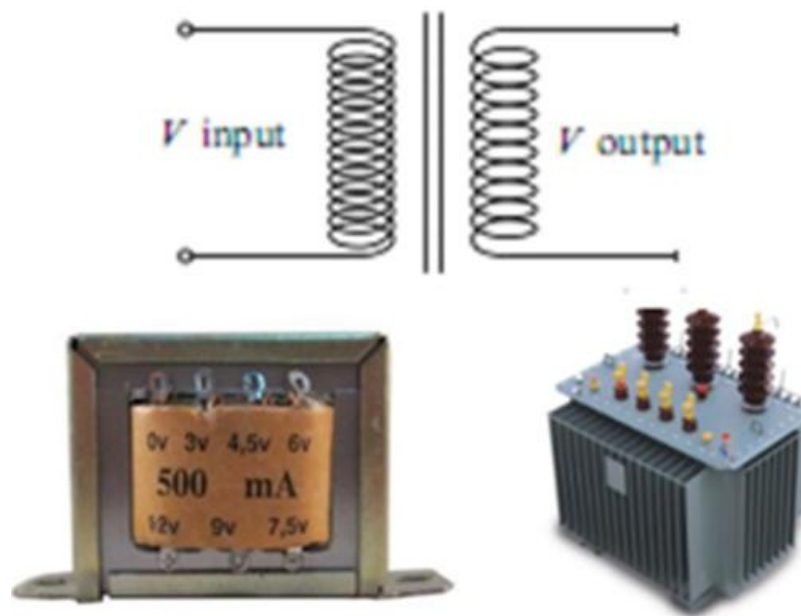


Gambar 2.2 Transformator Step-up

Sumber : Mikmar Gracindo (2023)

b. Transformator *Step-Down*

Salah satu jenis trafo yang paling sering digunakan dalam berbagai aplikasi rangkaian listrik adalah trafo step down. Gulungan kumparan utama dan sekunder dari transformator step down dililitkan pada inti besi yang sama. Jumlah belitan pada kumparan utama transformator step-down lebih tinggi daripada kumparan sekunder[7].



Gambar 2.3 Transformator Step-down

Sumber : Mikmar Gracindo (2025)

2.2.2.2 Transformator Berdasarkan Bahan Inti (Core) Yang Digunakan

a. Transformator Berinti Udara (Air Core Transformer)

Trafo inti udara memiliki inti yang terbuat dari bahan non-magnetik dan berbentuk seperti tabung berongga. Udara berfungsi sebagai saluran alami untuk fluks pada belitan primer dan sekunder transformator ini. Kertas atau karton sering menjadi bahan inti trafo. Trafo inti udara memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan trafo inti besi, antara lain :

- Kerugian dari *eddy current* atau kerugian histerisis dapat dihilangkan
- Tingkat Induktansi mutual antara belitan Transformator lebih kecil
- Transformator jenis ini biasanya digunakan pada sistem dengan frekuensi tinggi.

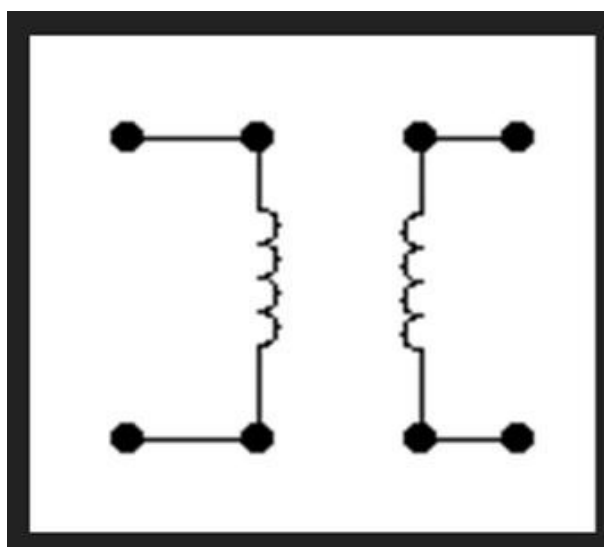


Gambar 2.4 Simbol Berinti Udara

Sumber : Kainemo (2014)

b. Transformator Inti Ferit

Transformator Inti Ferrit adalah transformator yang menggunakan bahan ferrit sebagai inti magnetiknya, yaitu material keramik yang terdiri dari campuran oksida besi (Fe_2O_3) dengan logam lain seperti mangan, seng, atau nikel. Bahan ini bersifat ferromagnetik namun tidak konduktif, sehingga sangat cocok digunakan pada aplikasi frekuensi tinggi.

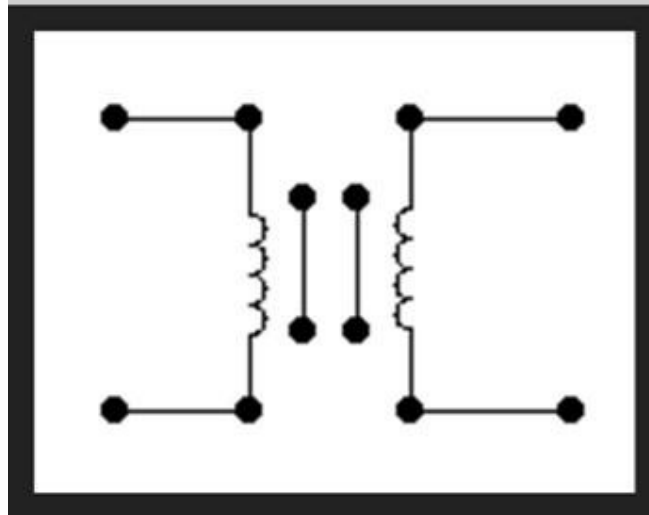


Gambar 2.5 Simbol Inti Ferit

Sumber : Kainemo (2014)

c. Transformator Berinti Besi (Iron Core Transformer)

Inti trafo ini tersusun dari beberapa lapisan plat besi lunak. Untuk mempromosikan induksi elektromagnetik dan meningkatkan efisiensi, zat tersebut ditambahkan ke magnet. Inti besi transformator tersedia dalam berbagai ukuran dan bentuk. Ada yang berbentuk E, L, U, dan I. Fakta bahwa trafo ini terdiri dari besi berkontribusi pada bobotnya yang tinggi.



Gambar 2.6 Transformator Berinti Besi

Sumber : Kainemo (2014)

2.2.2.3 Transformator Berdasarkan Penggunaannya.

a. Transformator daya (*Power Transformer*)

Transformator daya atau yang biasa dikenal dengan trafo adalah suatu alat yang mengubah energi listrik dari tegangan satu ke tegangan yang lain, baik dari tegangan rendah ke tegangan tinggi maupun dari tegangan tinggi ke tegangan rendah. Untuk memenuhi persyaratan proteksi, titik netral transformator daya dengan tegangan operasi sedang ditanahkan; misalnya, titik netral transformator 150/75 kV 150 kV segera ditanahkan untuk memenuhi kebutuhan proteksi.



Gambar 2.7 Transformator Daya

Sumber : GoodTransformer (n.d.)

b. Transformator Distribusi (*Distribution Transformer*)

Transformator distribusiumumnya digunakan adalah transformator step-down 20kV/400V 3 fasa dan satu fasa, dan ada juga yang menggunakan 3 buah transformator satu fasa. Tegangan fasa ke fasa system jaringan tegangan rendah adalah 380 V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada tegangan rendahnya dibuat diatas 380V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380V[8].



Gambar 2.8 Transformator Distribusi

Sumber : Daelim Transformer. (n.d.)

c. Transformator Pengukuran (*Measurement Transformer*)

Transformator pengukuran adalah salah satu jenis trafo yang berfungsi sebagai alat dalam alat ukur. Beroperasi dengan mengubah energi listrik agar dapat mengukur besar arus, tegangan, dan daya listrik. Transformator pengukur ini sering dibagi menjadi dua kategori : transformator potensial (Potential Transformer/PT) dan transformator arus (Current Transformer / CT).



Gambar 2.9 Transformator Pengukuran

Sumber : Carailmu.com (2021)

d. Transformator Proteksi (*Protection Transformer*)

Perangkat perlindungan listrik seperti PMT (pemutus) dan PMS (pemisah), yang biasanya aktif saat terjadi gangguan, menggunakan jenis trafo yang disebut trafo proteksi untuk mengubah energi listrik. Karena trafo proteksi yang memberi daya pada relai proteksi pemicu (priming) alat pelindung (PMT), ini lebih akurat daripada trafo daya. Gardu induk dan sistem tenaga listrik lainnya mungkin memiliki transformator proteksi (GI).



Gambar 2.10 Transformator Proteksi

Sumber : Carailmu.com (2021)

2.2.2.4 Transformator Berdasarkan Penggunaannya.

Penggolongan Trafo dibagi menjadi dua kategori yang berdasarkan tempat penggunaannya yaitu terdiri dari trafo indoor (dalam ruangan) trafo outdoor (luar ruangan). Trafo Indoor adalah trafo yang harus dipasang di dalam ruangan dan ditutup dengan atap seperti yang digunakan dalam pelanggan bisnis dan industri, sedangkan trafo udara terbuka adalah trafo yang dapat dipasang di luar ruangan, seperti trafo diseminasi yang dipasang di gardu induk dan sebagainya.

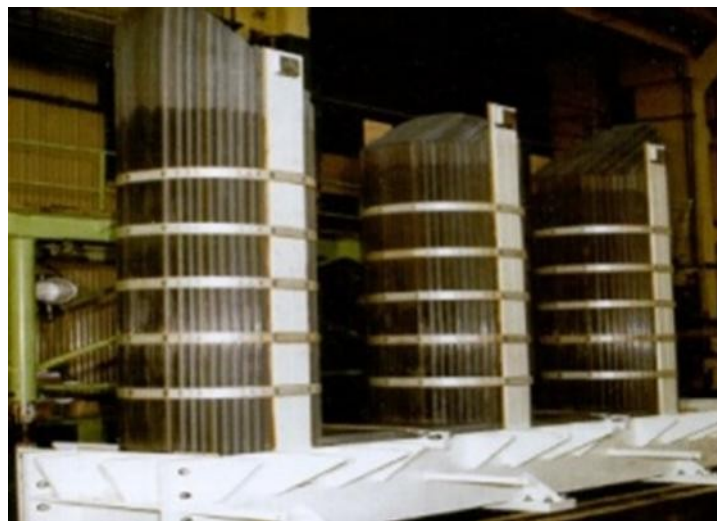
2.2.2.5 Berdasarkan Kapasitas dan tegangan Kerja Transformator

- a. Transformator besar : Tegangan lebih besar atau sama dengan 70 kV dengan daya lebih besar atau sama dengan 10 MVA
 - b. Transformator sedang : Tegangan antara 30 kV sampai 70 kV dengan daya antara 1 MVA sampai 10 MVA
 - c. Transformator kecil : Tegangan kurang dari 30 kV dengan daya kurang dari 1 MVA
- Semua Transformator memiliki prinsip dasar yang sama serta memiliki kekhususan dalam perencanaan dan pembuatan yang disesuaikan dengan pemakaiannya.

2.2.3 Komponen Utama Transformator Distribusi

2.2.3.1 Inti Besi (Elektromagnetic Circuit)

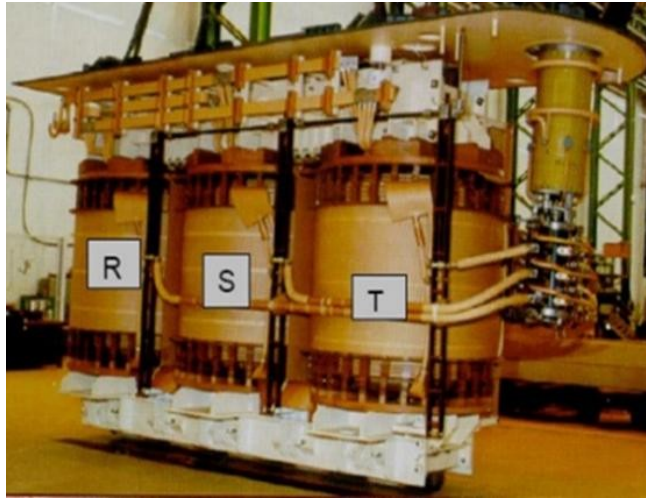
Kumparan yang menyelubungi inti besi digunakan sebagai saluran untuk aliran fluks yang dihasilkan dari induksi arus bolak-balik sehingga dapat diinduksi kembali ke kumparan lainnya. Inti besi dibentuk dari laminasi baja silikon (cold-rolled grain oriented) atau baja amorphous (amorphous steel) [9] . Dibentuk dari pelat besi tipis berisolasi yang telah dirancang mengurangi panas yang dihasilkan Arus Eddy (sebagai rugi-rugi besi).



Gambar 2.11 Inti Besi[7], [10]

2.2.3.2 Belitan Transformator (*Current Carrying Circuit*)

Saat arus bolak-balik mengalir melalui belitan tembaga, inti besi diinduksi dan menghasilkan fluks magnet. Belitan terdiri dari batang tembaga berinsulasi yang melingkari inti besi. Jika rangkaian sekunder tertutup saat ada rangkaian beban, fluks ini akan menginduksi tegangan dan menghasilkan arus pada kumparan ini. Konduktor belitan sekunder dapat berbentuk segi empat (rectangular) atau lembaran (sheet/foil). Bahan isolasi dari konduktor belitan harus sesuai dengan suhu kerja transformator dan tahan minyak[9]. Karenanya, kumparan atau belitan berfungsi sebagai perangkat untuk mengubah tegangan dan arus. Isolasi padat, termasuk karton, pertinax, dan bahan lainnya, sering digunakan untuk mengisolasi inti besi.



Gambar 2.12 Belitan Transformator[7], [10]

2.2.3.3 Bushing

Bushing adalah metode menghubungkan jaringan luar ke satu set belitan. Sebuah konduktor dan isolator membentuk busung. Antara konduktor busung dan badan tangki utama trafo, isolator bertindak sebagai isolator.



Gambar 2.13 Bushing Transformator[7], [10]

2.2.3.4 Pendingin (Radiator)

Ketika kualitas tegangan jaringan, kerugian internal pada trafo, dan suhu luar diperhitungkan, suhu trafo yang sedang berjalan akan berubah. Insulasi kertas trafo akan

rusak pada suhu operasi yang tinggi. Oleh karena itu, pendinginan yang efisien diperlukan.

Selain berfungsi sebagai media isolasi, minyak isolasi trafo juga berfungsi sebagai pendingin. Panas dari belitan dibawa oleh oli yang bergerak di sepanjang rute sirkulasinya dan didinginkan pada sirip radiator saat cairan bersirkulasi. Kipas dan pompa sirkulasi dapat membantu proses pendinginan untuk meningkatkan efektivitas pendinginan.

Media sistem pendingin yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Minyak
2. Air
3. Udara / gas

Sedangkan pengalirannya (siklus dapat dengan cara :

1. Alamiah (Natural)
2. Paksaan/Tekanan

Area perpindahan panas antar media (Minyak, Gas, dan Air) yang lebih besar diperlukan dalam sistem pendinginan alami karena perpindahan panas melalui sirip radiator untuk mempercepat laju perpindahan panas dari media ke udara luar. Itu dapat dilengkapi dengan teknologi yang mempercepat proses pendinginan, terkadang dikenal sebagai pendinginan paksa, dengan mensirkulasikan cairan pendingin melalui pompa yang mengalirkan air, oli, dan udara

Jenis-jenis sistem pendinginan dari Transformator berdasarkan media dan cara pengalirannya adalah sebagai berikut:

1. *Oil Natural Air Natural (ONAN)* :

Transformator dengan koil pendingin berpendingin oli yang bersirkulasi secara alami dengan udara sebagai pendingin luar Transformator.

2. *Oil Natural Air Forced (ONAF)* :

Transformator didinginkan secara alami dengan oli, kemudian didinginkan secara eksternal menggunakan sirkulasi udara paksa/buatan.

3. *Oil Forced Air Forced (OFAF)* :

Transformator yang memiliki minyak sebagai pendingin kumparan dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa/buatan.

4. *Oil Forced Water Forced (OFWF)* :

Transformator dengan koil pendingin berbahan oli Transformator yang bersirkulasi secara paksa / tidak wajar dan menggunakan air sebagai pendingin eksternal.



Gambar 2.14 Radiator Transformator

Sumber : Lumbanraja Teddy Weblog (2012)

2.2.3.5 Konservator (Oil Perservation & Expansion)

Minyak tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholz yang akan menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak[7]. Bentuk tangka dan konsevator dapat dilihat pada gambar 2.15:



Gambar 2.15 *Konservator*[10]

2.2.3.6 *Dielectric* (Minyak Isolasi Transformator & Isolasi Kertas)

a. Minyak Isolasi Trafo

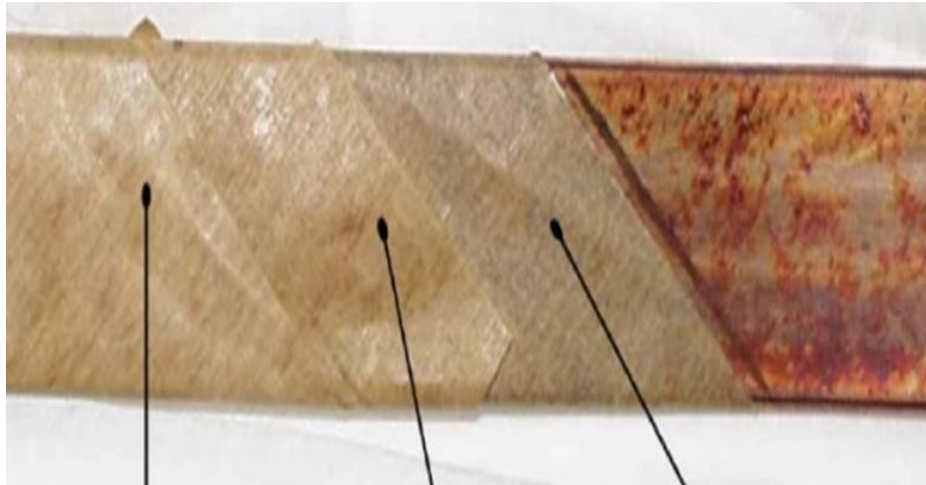
Minyak isolasi trafo berfungsi sebagai pendingin, media isolasi, dan perlindungan oksidasi untuk belitan. Minyak sebagai media pendingin dan isolasi transformator adalah jenis mineral dan tidak beracun[9]. Minyak mineral, seperti minyak isolasi trafo, secara luas dapat dikategorikan menjadi tiga jenis: parafinik, naptanik, dan aromatik. Karena ketiga jenis minyak dasar yang berbeda memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda, pencampurannya tidak dianjurkan. Parameter oli isolasi dengan batas minimal untuk oli isolasi yang baru ditambahkan ke peralatan sebelum diaktifkan adalah bagian dari standar *IEC 60422*.



Gambar 2.16 Minyak Isolasi Transformator[10]

b. Kertas Isolasi Trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak, dan memiliki kemampuan mekanis. Kertas isolasi transformator merupakan isolasi padat berbahan selulosa yang digunakan pada belitan untuk memisahkan antar lilitan dan lilitan terhadap inti besi. Material ini memiliki kekuatan dielektrik dan mekanik yang tinggi serta berperan penting dalam menjaga keandalan sistem isolasi transformator.



Gambar 2.17 Tembaga Dilapisi Kertas Isolasi

Sumber : Lumbanraja Teddy Weblog (2012)

2.2.3.7 Pengubah Tegangan (*Tap Changer*)

Tap changer merupakan salah satu faktor yang dipertimbangkan dalam menentukan kualitas tegangan dalam suatu jaringan. Karena besarnya tegangan input berfluktuasi, transformator harus memiliki nilai tegangan output yang stabil. Untuk memodifikasi tegangan keluaran/sekunder sesuai dengan persyaratan sistem, terlepas dari tegangan masukan/primer, perubahan jumlah belitan pada sisi primer diantisipasi akan mengubah rasio antara belitan primer dan sekunder.

Ada dua cara kerja tap changer :

1. Mengubah tap dalam keadaan trafo tanpa beban. Tap changer yang hanya bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban, disebut “*Off Load Tap Changer*”.
2. Mengubah tap dalam keadaan trafo berbeban. Tap changer yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator, dalam keadaan transformator berbeban, disebut “*On Load Tap Changer (OLTC)*”.

2.2.4 Permodelan dan Simulasi

Model merupakan representasi sistem dalam kehidupan nyata yang menjadi fokus perhatian dan menjadi pokok permasalahan. Pemodelan dapat didefinisikan sebagai proses pembentukan model dari sistem tersebut dengan menggunakan bahasa formal tertentu .

Simulasi adalah sebuah model matematika yang menjelaskan tingkah laku sebuah sistem dalam beberapa waktu dengan mengobservasi tingkah laku sebuah model matematika, untuk beberapa waktu seseorang analist bisa mengambil kesimpulan tentang tingkah laku dari sistem dunia nyata yang disimulasikan .

2.2.5 Langkah - langkah Simulasi

Dalam melakukan simulasi terdapat beberapa langkah yang perlu dilakukan agar hasil yang diperoleh sesuai dengan tujuan analisis :

1. Pendefinisian sistem. Langkah ini meliputi : penentuan batasan sistem dan identifikasi variabel yang signifikan.
2. Formulasi model : merumuskan hubungan antar komponen-komponen model.
3. Pengambilan data : identifikasi data yang diperlukan oleh model sesuai dengan tujuan pembuatan model.
4. Pembuatan model. Dalam penyusunan model perlu disesuaikan dengan jenis bahasa simulasi yang akan digunakan.
5. Verifikasi model : proses pengecekan terhadap model apakah sudah bebas dari error
Validasi model merupakan proses pengujian terhadap model apakah model yang dibuat sudah sesuai dengan sistem nyatanya

2.2.6 Rugi - Rugi Pada Transformator

Kerugian Dalam proses transformasi transformator daya terdapat kerugian internal transformator. Kerugian tersebut berupa kerugian akibat kawat tembaga dan inti besi dalam sebuah transformator [11] . Kerugian inti, juga dikenal sebagai kerugian besi dan tembaga, adalah kerugian pada kumparan primer dan sekunder. Sebuah penampang yang cukup besar untuk fluks magnet mengalir dengan mudah melalui itu diadopsi untuk mengurangi kehilangan besi. Perlu menggunakan kawat tembaga dengan penampang yang cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan untuk mengurangi rugi-rugi tembaga. Kerugian arus Eddy dan kerugian histeris membentuk kerugian inti. Arus eddy di inti menyebabkan panas yang dihasilkan, yang menyebabkan kerugian arus eddy. Tegangan induksi di inti, yang menyebabkan variasi fluks magnet, mengontrol arus eddy inti.

Rugi-rugi arus eddy disebabkan oleh arus eddy yang diinduksi dalam laminasi

inti, dan nilainya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1):

$$P_{ed} = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot B_m^2 \cdot V \cdot k \quad (2.1)$$

Dimana :

P_{ed} = rugi-rugi arus eddy (Watt)

ω = frekuensi (Hertz)

B_m = kecepatan fluks maksimum (Tesla)

k = konstanta

Rugi-rugi histerisis dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.2)

$$P_h = h \cdot f \cdot B_m^2 \cdot V \cdot k_h \quad (2.2)$$

Dimana :

P_h = rugi-rugi arus *histerisis* (Watt)

f = frekuensi (Hertz)

B_m = kecepatan fluks maksimum (Tesla)

k_h = konstanta

Jumlah kehilangan inti dipengaruhi oleh variasi fluks inti sebagai fungsi waktu; ini cukup besar, terutama ketika melakukan pengujian laboratorium pada transformator kapasitas besar. Sedangkan Rugi-rugi pada transformator terdapat rugi tembaga (P_{cu}) dan rugi besi (P_i). Penentuan efisiensi transformator untuk mengetahui presentasi kelayakan suatu transformator [11]. Rugi-rugi tembaga dibangkitkan oleh jumlah arus beban berikut yang melewati kawat tembaga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.3)[11][12]:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \quad (2.3)$$

Dimana:

P_{cu} = Rugi pada kawat tembaga (Watt)

I = Arus primer dan sekunder (A)

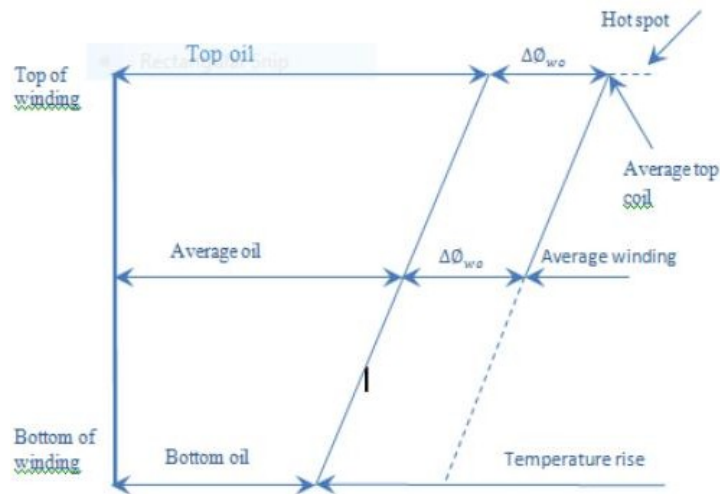
R = Tahanan primer dan sekunder (Ω)

Karena arus beban selalu berubah-ubah rugi pada tembaga juga tidak tetap tergantung pada bebannya.

2.2.7 Penentuan Kenaikan Temperatur

Diagram termal sederhana, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18 dapat digunakan untuk memperkirakan kenaikan suhu. Diagram representasi sederhana dari

distribusi yang lebih canggih ditunjukkan pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Diagram Thermal Transformator[13]

Jika dilakukan pengujian terhadap kenaikan suhu minyak pada bagian atas seperti pada diagram hasilnya akan mengalami perbedaan terhadap kenaikan suhu minyak yang jauh dari koil tersebut. Oli di bagian atas adalah campuran dari siklus oli di sepanjang koil dari oli di bagian bawah. Perubahan ini dianggap tidak signifikan untuk tujuan memvalidasi pendekatan. Maka prosedur berikut akan disederhanakan:

1. Dari bawah ke atas, temperatur minyak di dalam kumparan akan naik secara linier.
 2. Kenaikan suhu rata-rata tembaga pada bagian atas kumparan meningkat secara linier terhadap kenaikan suhu minyak, dengan selisih konstan di antara keduanya.
 3. Kenaikan suhu di hotspot lebih besar daripada kenaikan suhu di rata-rata peak coil.
- Pada temperatur rata-rata harian dan tahunan sebesar 30 °C serta temperatur sekitarnya

2.2.8 Dasar Perhitungan

Sebagai dasar untuk melakukan perhitungan pembebanan digunakan karakteristik termal dari transformator distribusi dengan pendinginan ONAN, seperti terdapat pada tabel 2.1[2].

Tabel 2.1 Karakteristik Thermal Transformator ONAN[2]

Karakteristik Thermal Transformator		Pendingin ONAN
Eksponen Minyak	x	0,8
Eksponen Belitan	y	1,6
Perbandingan Rugi	r	5,0

Konstanta Waktu Minyak	τ_0 (h)	3,0
Suhu Sekitar	θ_a (C)	20
Kenaikan Suhu Titik Panas	$\Delta\theta_{hr}$ (C)	78
Gradient Titik Panas ke Minyak (dalam tangki) pada Arus Pengenal	H_{gr} (C)	23
Kenaikan Suhu Minyak Rata – Rata	$\Delta\theta_{imr}$ (C)	44
Kenaikan Suhu Minyak Atas	$\Delta\theta_{ir}$ (C)	55
Kenaikan Suhu Bawah	$\Delta\theta_{br}$ (C)	33
Kenaikan Suhu Belitan Rata – Rata	$\Delta\theta_{hr}$ (C)	65

Perbedaan antara kenaikan suhu belitan rata-rata kumparan terhadap kenaikan rata-rata suhu minyak adalah $(\Delta\theta_{w0}) = 21^{\circ}\text{C}$. Jadi kenaikan temperature hot-spot $(\Delta\theta_{cr})$ dengan menggunakan persamaan (2.4)[5] :

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_{br} + 1.1 \Delta\theta_{w0} \dots\dots\dots 2.4 \\ &= 55^{\circ}\text{C} + 1.1 (21^{\circ}\text{C}) \\ &= 78^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Dimana :

- $\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan Temperatur Hotspot ($^{\circ}\text{C}$)
- $\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan Temperatur Top Oil ($^{\circ}\text{C}$)
- $\Delta\theta_{w0}$ = Perbedaan kenaikan suhu belitan rata-rata dan kenaikan suhu minyak rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)

Untuk menghitung perbandingan pembebanan terhadap rating dengan menggunakan persamaan (2.5) [4][12]:

$$K = \frac{S}{Sr} \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana :

- K = Perbandingan antara pembebanan terhadap rating (ratio pembebanan)
- S = Beban Transformator (kVA)
- Sr = Kapasitas Transformator (kVA)

Terjadinya perbedaan kenaikan temperatur minyak antara inlet dan outlet umumnya akan lebih kecil dibandingkan dengan sirkulasi minyak secara alami sesuai SPLN 17 a.

2.2.9 Kondisi Beban Stabil

2.2.9.1 Kenaikan Temperatur Top Oil

Kenaikan temperature top oil sepadan dengan kenaikan temperature pada nilai daya yang dikalikan ratio dari total kerugian dengan eksponen x[3], [6][6].

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2 + 1}{R + 1} \right]^x \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana :

$\Delta\theta_{br}$ = kenaikan suhu rated = 55 °C untuk ON (Minyak Natural)

θ_b = Kenaikan temperature Top oil (°C)

R = Ratio rugi [4]

$$= \frac{\text{Rugi tembaga pada daya pengenal}}{\text{Rugi beban nol}} \dots\dots\dots 2.7$$

X = Konstanta, bernilai 0.8 untuk ONAN

2.2.9.2 Kenaikan Temperatur *Hotspot*

Kenaikan hot-spot $\Delta\theta_c$ pada pemakaian beban stabil dapat dihitung menggunakan persamaan (2.8) [1], [5]:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^y \dots\dots\dots 2.8$$

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2 + 1}{R + 1} \right] (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y}$$

Dimana :

$\Delta\theta_{cr}$ = 78 °C

y = Konstanta (0.8 ONAN)

$\Delta\theta_{br}$ = suhu (Dasar SPLN 17a untuk suhu $\Delta\theta_{br}$ = 55 °C untuk Oil Natural (ON)

k = Perbandingan antara pembebanan terhadap rating (Ratio pembebanan)

2.2.10 Kondisi Beban Berubah – Ubah

2.2.10.1 Kenaikan Temperatur *Top Oil*

Kenaikan temperatur *Top Oil* pada waktu t setelah diberi beban adalah mendekati kenaikan eksponensial sebagaimana dijelaskan menggunakan persamaan (2.9)[4]:

$$\Delta\theta_{on} = (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0 \dots\dots\dots 2.9$$

Dimana :

- $\Delta\theta_0$ = Kenaikan dari temperatur awal minyak.
- $\Delta\theta_b$ = Kenaikan dari temperature akhir minyak setelah di stabilkan
- τ = Konstanta waktu minyak dalam jam τ (3 untuk pendingin ONAN)
- t = Waktu dalam Jam

2.2.10.2 Kenaikan Temperatur *Hotsport*

Kenaikan temperatur hotspot pada kondisi sebelum distabilkan dengan menggunakan persamaan (2.10)[1] :

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})^y \dots\dots\dots 2.10$$

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2 + 1}{R + 1} \right] (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y}$$

Dimana :

- $\Delta\theta_c$ = Kenaikan *hots pot*
- $\Delta\theta_b$ = Kenaikan dari temperature akhir minyak setelah di stabilkan
- $\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan suhu rated = 55 °C untuk ON (Minyak Natural)
- $\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan temperatur *hotspot* (*hots pot temperature rise*)
- y = Konstanta bernilai (0.8) (*ONAN* dan *ONAF*)
- y = Konstanta bernilai (1.0) (*OFAF* dan *OFWF*)

Temperatur hotspot pada waktu tertentu sama dengan menggunakan persamaan (2.11)[4]:

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{otd} \dots\dots\dots 2.11$$

- θ_a = Rata-rata suhu harian kabupaten sumba barat daya
- $\Delta\theta_b$ = Kenaikan temperatur stabil *Top oil*
- $\Delta\theta_{otd}$ = Selisih antara kenaikan *Hot spot* dengan *Top oil*

2.2.11 Penuaan Isolasi Belitan Transformator

Hubungan Penuaan isolasi belitan transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi temperatur operasi, khususnya temperatur hotspot. Pemburukan isolasi akan semakin cepat apabila isolasi tersebut bekerja dengan suhu yang melebihi dari batas yang diizinkan (dalam hal ini adalah suhu hot spot). Menurut standar IEEE C57.914 Per unit life merupakan ukuran umur relatif terhadap kondisi referensi (110 °C) dengan

persamaan :

$$\text{Per unit life} = A \times 10^{-18} \exp \left(\frac{15000}{\theta_H + 273} \right) \dots\dots\dots 2.12$$

Dimana :

- $A \times 10^{-18}$ = adalah konstanta (berdasarkan kurva standar)
- θ_H = Suhu titik panas belitan $^{\circ}\text{C}$
- 273 = konversi ke Kelvin

Formula ini pada intinya menurunkan umur isolasi secara eksponensial saat suhu titik panas belitan meningkat di atas 110°C .

Menurut standar *IEEE C57.914* yang juga telah menjadi standar PLN saat ini (SPLN 17 A: 1979), sebuah transformator akan mengalami umur yang normal pada kondisi “suhu hot spot 98°C pada pembebanan yang terus - menerus” dengan suhu sekitar (ambient temperature) 20°C [13]. Nilai ini digunakan untuk memperkirakan seberapa cepat umur transformator berkurang akibat pengaruh termal dengan menggunakan persamaan (2.13)[3][6]: $V = (\theta - \theta_c) / \dots\dots\dots 2.13$

Dimana :

- V = Nilai relatif dari umur pemakaian (p.u)
- $\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan temperatur *hotspot/ hotspot temperature rise* 98°C

Laju penuaan sangat rentan terhadap suhu panas lokal. Masa pakai transformator dapat dinyatakan dalam bulan, hari, atau jam sebagai akibat dari operasi harian atau bulanan pada suhu lokal 98°C .

Susut umur dapat dinyatakan dalam penurunan usia (dengan asumsi satu siklus terdiri dari 20 jam beban siang dan 4 jam beban malam). Pembebanan Transformator akan berpengaruh pada kualitas hidup di masa depan. Analisis membuat asumsi bahwa pola tegangan yang diterapkan adalah konstan sepanjang hari dan hanya mempertimbangkan efek dari penurunan isolasi belitan.

$$V \text{ (Berdasarkan satu siklus 24 jam)} = \frac{(20 \times V_{siang}) + (4 \times V_{malam})}{24} \dots\dots\dots 2.14[6]$$

Susut umur Waktu Beban Puncak (WBP) diukur pada saat beban pada pukul 19.00 WITA pada malam hari, sedangkan susut umur Waktu Beban Puncak Luar (*LWBP*) diukur pada saat beban pada pukul 10.00 WITA pada pagi hari. Dianggap bahwa untuk

pembebanan selama 24 jam atau sehari, waktu beban puncak adalah 4 jam setelah beban malam dan waktu beban puncak luar adalah 20 jam setelah beban siang. Mengingat beban trafo pada tugas akhir ini adalah rumah, maka beban harian pada trafo distribusi adalah sama.

2.2.12 Umur Transformator

Menurut *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers(IEEE) C57.914*, transformator yang dioperasikan pada kondisi pembebanan nominal dengan suhu lingkungan tertentu memiliki umur teknis rata-rata yang telah ditetapkan. apabila transformator diberi beban maksimal (100%) dari kapasitas daya transformator maka transformator akan memiliki umur 20 tahun pada suhu sekitar 20 °C. Penurunan umur transformator dipengaruhi oleh besarnya suhu. Selama rentang suhu titik panas 80 °C–140 °C laju penuaan transformator mengganda untuk setiap kenaikan suhu titik panas sebesar 6 °C [2]. Pembebanan terhadap suatu transformator akan mengakibatkan kenaikan suhu yang ditimbulkan oleh panas. Untuk setiap kenaikan sekitar 6°C dari batas yang diizinkan akan mengakibatkan berkurangnya umur [8]. Kenaikan temperatur hotspot diketahui memiliki pengaruh eksponensial terhadap laju penuaan isolasi belitan transformator dan nilai susut umur karena suhu titik panas dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai Susut Umur akibat Kenaikan Suhu[2/

Suhu Lilitan (°C))	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
Susut Umur (p.u)	0,125	0,25	0.5	1	2	4	8	16	32	64	128
Perkiraan Umur (th)	>20	>20	>20	20	10	5	2,5	1,25	0,625	0,5125	0,15625

2.2.13 Perhitungan-Trend-Linear (Semi Rata - Rata)

Metode Trend Linear (Semi Rata-Rata) merupakan analisis satistika yang memodelkan hubungan beberapa variabel menurut bentuk hubungan persamaan linier eksplisit [14] . Regresi linear merupakan metode prediksi atau peramalan yang menggunakan garis lurus untuk menggambarkan hubungan antara dua atau lebih variabel. Metode ini digunakan untuk memperkirakan nilai suatu variabel berdasarkan variabel lain melalui model hubungan numerik. Selain itu, regresi linear memungkinkan

analisis keeratan hubungan antarvariabel yang dapat diketahui melalui nilai koefisien korelasi[15]. Metode untuk memodelkan hubungan antara satu variabel independen dan satu variabel dependen. Hubungan kedua variabel tersebut bersifat linear, di mana perubahan pada variabel independen akan diikuti oleh perubahan pada variabel dependen secara proporsional. Nilai hasil peramalan selanjutnya ditentukan menggunakan rumus berikut [16] . Salah satu metode analisis deret waktu (time series) yang digunakan untuk menentukan kecenderungan (trend) data jangka panjang dengan cara membagi data historis menjadi dua kelompok waktu yang sama, kemudian menghitung nilai rata-rata masing-masing kelompok tersebut. Garis trend linear diperoleh dari garis lurus yang menghubungkan kedua titik rata-rata tersebut. Metode ini sederhana, mudah diterapkan, dan sesuai digunakan ketika data menunjukkan kecenderungan meningkat atau menurun secara relatif linier.

2.2.13.1 Langkah-Langkah Perhitungan

a. Pembagian Data

Data deret waktu sebanyak n periode dibagi menjadi dua bagian yang sama:

- Kelompok I : periode awal
- Kelompok II : periode akhir

Jika jumlah data ganjil, maka data tengah diabaikan agar kedua kelompok memiliki jumlah data yang sama.

b. Perhitungan Nilai Rata-Rata

Nilai rata-rata masing-masing kelompok dihitung sebagaimana dijelaskan menggunakan persamaan (2.15) dan persamaan (2.16):

$$\bar{Y}_1 = \frac{\sum Y_1}{n_1} \dots\dots\dots 2.15$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{\sum Y_2}{n_2} \dots\dots\dots 2.16$$

Dimana :

$\bar{Y}_1$ = Rata-rata data kelompok pertama

$\bar{Y}_2$ = Rata-rata data kelompok kedua

Y_1, Y_2 = Nilai data pada masing-masing kelompok

n_1, n_2 = Jumlah data pada masing-masing kelompok

c. Penentuan Titik Tengah Waktu

Masing-masing rata-rata ditempatkan pada titik tengah periode waktu kelompoknya, yaitu:

- t_1 = titik tengah waktu kelompok Pertama
- t_2 = titik tengah waktu kelompok kedua

d. Penentuan Persamaan Trend Linear

Analisis trend linear adalah analisa data deret waktu yang hasilnya berupa persamaan trend yang dapat digunakan untuk peramalan kedepan (forecasting). Berikut persamaan trend linear yang digunakan untuk peramalan beban transformator sesuai persamaan 2.17 [2]

$$Y = a + bX \dots\dots\dots 2.17$$

Dimana :

Y = nilai trend pada periode ke-

a = konstanta (intersep)

b = koefisien arah (kemiringan trend)

Nilai b dihitung menggunakan[15]:

$$b = \frac{\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1}{X_2 - X_1} \dots\dots\dots 2.18$$

Sedangkan nilai a diperoleh dari[15]:

$$a = \bar{Y}_1 - bX_1 \dots\dots\dots 2.19$$

2.2.13.2 Peramalan (Forecasting)

Setelah persamaan trend diperoleh, nilai pada periode mendatang dapat diperkirakan dengan memasukkan nilai X sesuai periode yang diinginkan ke dalam persamaan trend[15]:

$$Y_t = a + bX_t \dots\dots\dots 2.20$$

Dimana :

Y_t = nilai hasil peramalan pada periode ke-

t = indeks waktu periode ke-