



## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Sistem tenaga listrik adalah sarana yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari pembangkit listrik sampai ke peralatan milik konsumen. Salah satu peralatan yang penting dipenyuluran tenaga listrik yaitu transformator daya. Transformator tenaga didesain dengan suhu sekitar 20°C tetapi beroperasi pada suhu lingkungan 30°C di Indonesia, jadi trafo disesuaikan pada beban yang diberikan. Penelitian ini difokuskan dengan mengetahui susut umur trafo pada unit 4 PLTU Muara Karang akibat pembebanan suhu sekitar. Penelitian ini mengacu pada standar IEC 354 tahun 1972 dengan menghitung temperatur top oil, kenaikan temperatur *hot spot*, serta nilai relatif penuaan umur trafo. Adapun dengan data dari pembebanan yang diberikan setiap jamnya dan suhu rata-rata harian sepanjang tahun 2016. Jadi didapatkan hasil untuk pembebanan konstan 100% yaitu 411%, dan untuk suhu lingkungan dengan 20°C- 38°C didapatkan susut umur dari 100%-800% untuk pembebanan 100%. Lalu untuk pembebanan tahun 2016 didapatkan susut umur 79,39% (Itho Zainal, 2017).

Pada transformator memiliki isolasi belitan trafo dan minyak trafo. Kegagalan isolasi diminyak trafo diakibatkan oleh beban atau suhu lingkungan ditransformator tenaga yang terendam minyak. Penelitian bertujuan mengetahui akibat pembebanan dan suhu lingkungan terhadap susut umur trafo PLGU Tambok Lorong Semarang. Adapun perhitungan untuk susut umur trafo ialah rasio pembebanan, perbandingan rugi, kenaikan temperatur *top oil*, kenaikan *temperature hotspot* beserta perbandingan dengan *temperature top oil*, dan laju penuaan thermal relatif. Kemudian dapat diketahui susut umur dari trafo tersebut. Hasil penelitian diketahui dengan beban yang diberikan menghasilkan susut umur minimal 0,24 pu/hari dengan dibebani 80% pada transformator.



Pada standar IEC 354 suhu lingkungan 20°C mendapatkan susut minimal 1 pu/hari dibeban 100%. Berdasarkan data beban tahun 2008 susut umur trafo tenaga GTG 1. 3 PLGU Tambak Lorok Semarang dengan pembebanan maksimum tanggal 6 September menghasilkan susut umur 0,1268 pu/hr **(Purnama Sigid, 2009)**

Transformator tenaga merupakan peralatan yang menyalurkan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Transformator ialah alat yang diusahakan untuk berusia panjang dan bisa lama digunakan. Umur trafo dapat berkurang dikarenakan pembebanan yang mempengaruhi temperatur minyak dan dapat merusak belitan isolasi transformator. Penelitian ini berada di Gardu Induk Serang pada Transformator 60 MVA. Berdasarkan data rata-rata pembebanan tahun 2018 trafo tenaga unit 1 dan 2 GI Serang dengan pembebanan bulan Januari hingga Desember maka susut umur terburuk dibulan Februari 2018 0,0291 untuk trafo 1 dan bulan November 2018 ialah 0,0071 ditrafo Susut umurnya tidak melebihi 100% pada transformator unit 1 GI Serang dengan pembebanan optimum adalah 90,96% atau 54,576 MVA. **(Muhammad Kahfi.F, 2019)**

## **2.2. Teori Pendukung**

### **2.2.1 Sistem interkoneksi**

Sistem interkoneksi merupakan jaringan pada pengoperasian tenaga listrik, yang menghubungkan pembangkit dengan beberapa gardu induk. Dimana saluran transmisi sebagai perantaranya, yang nantinya disalurkan ke konsumen. Sistem interkoneksi berguna menjaga keandalan sistem pengoperasian tenaga listrik, supaya gangguan yang terjadi disatu pembangkit tidak menghalangi penyediaan sistem tenaga listrik. Kemudian, sistem interkoneksi memiliki sistem koordinasi yang dimana semuanya saling terhubung antar pembangkit. Tujuannya untuk menjaga kestabilan frekuensi dan tegangan yang dioperasikan.



### 2.2.2 Transformator Daya

Transformator daya merupakan mesin listrik statis dengan dua atau lebih gulungan dengan prinsip induksi elektromagnetik yang memiliki frekuensi sama. Transformator bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik dengan mengubah level tegangan. Hukum-hukum yang ada pada prinsip kerja transformator yaitu hukum Oersted, hukum Maxwell dan induksi Faraday. Adapun bunyi daripada hukum-hukum tersebut ialah apabila pada suatu kumparan dialiri arus listrik maka timbul medan magnet, dan arah fluks tersebut disimbolkan dengan cross dan dot. Ketika kumparan primer transformator dialiri arus listrik maka akan menginduksi kumparan sekunder dan timbulah gaya gerak listrik sesuai dengan Hukum Faraday. Adapun jenis transformator berdasarkan lokasi dan fungsinya, yaitu

#### 1. Sistem Penyaluran Tenaga Listrik

##### A.) Transformator *Step Up*

Trafo *Step Up* merupakan mesin listrik mengubah level tegangan dari tegangan yang rendah menjadi level tegangan yang tinggi. Adapun caranya ialah dikumparan sekunder memiliki belitannya lebih banyak dibandingkan belitan primer. Ini umumnya dari pembangkit yang dinaikan tegangannya untuk ke saluran transmisi 150 kV.



Gambar 2.1 Transformator Daya



### B.) Transformator *Step Down*

Trafo *Step Down* merupakan mesin listrik mengubah level tegangan tinggi menjadi level tegangan rendah. Adapun caranya ialah dikumparan primer memiliki belitan yang lebih banyak dibandingkan belitan sekunder. Ini umumnya dari level tegangan saluran tegangan menengah yang diturunkan ke saluran tegangan rendah yaitu konsumen.

## 2.) Berdasarkan Lokasi Pemasangan

### A. Pemasangan dalam (*Indoor*)

Pemasangan transformator yang berada didalam ruangan agar terhindar dari cuaca lingkungan

### B. Pemasangan luar (*Outdoor*)

Pemasangan transformator yang berada diluar ruangan, seperti switchyard.

## 3. Berdasarkan Kapasitas dan Tegangan Kerja

- a. Transformator yang mempunyai tegangan lebih dari 70 kV dan daya lebih dari 10 mVA disebut transformator besar.
- b. Transformator yang mempunyai tegangan 30 kV sampai 70 kV dan daya 1 mVA sampai 10 mVA disebut transformator sedang.
- C. Transformator yang mempunyai tegangan 30 kV dan daya kurang dari 1 mVA disebut transformator kecil.

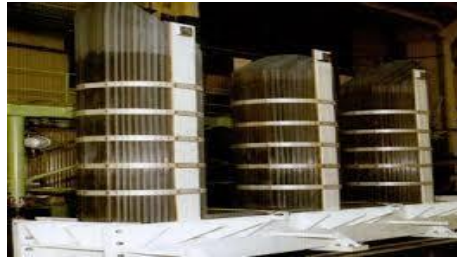
## 2.3 Komponen Utama Transformator

Komponen utama transformator adalah bagian yang penting dalam sebuah transformator yang memiliki fungsinya masing - masing adapun komponen tersebut tersebut yaitu:



### 2.3.1 Inti Besi

Inti besi ialah media untuk fluks mengalir yang menyebabkan arus induksi timbul dikumparan yang mengelilingi inti besi, jadi dapat menginduksi kembali belitan lainnya. Inti besi berasal dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi agar mengurangi rugi-rugi inti besi.



Gambar 2.2 Inti Besi

### 2.3.2 Kumbaran Transformator

Kumbaran transformator yaitu lilitan kawat berisolasi berbentuk kumbaran, terdiri dari kumbaran primer dan kumbaran sekunder. Belitan diisolasi di inti besi dan diantara belitan menggunakan isolasi padat seperti kertas, pertinak dan lain-lain. Ketika kumpran primer diberikan tegangan maka timbul medan magnet, dan menginduksi kumbaran sekunder. Oleh karena itu, timbulah tegangan dikumbaran sekunder. Kumpran primer dan kumbaran sekunder memiliki panjang dan luas penampang yang menimbulkan rugi tembaga.



Gambar 2.3 Kumbaran Transformator



### **2.3.3 Minyak Transformator**

Belitan dan inti besi ditransformator direndam pada minyak transformator. Minyak ini berguna untuk media pendinginan dan bersifat isolasi. Minyak transformator memiliki persyaratan, yaitu:

- a. Kekuatan isolasi tinggi.
- b. Penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- c. Visikositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- d. Titik nyala yang tinggi (minimum 140°C), penentuan batas titik nyala adalah untuk mencegah terlalu banyak hilangnya minyak menjadi gas dan dapat menimbulkan bahaya kebakaran.
- e. Tidak bereaksi terhadap material yang lain sehingga tidak merusak bahan isolasi padat.



Gambar 2.4 Minyak Transformator



#### 2.3.4 Bushing

*Bushing* yaitu komponen untuk menghubungkan kumparan ke jaringan luar. Komponen ini adalah konduktor yang dilengkapi dengan isolator. Isolator menjadi pembatas antara konduktor *bushing* dan *body main tank* trafo.



Gambar 2.5 *Bushing*

#### 2.3.5 Tangki konservator

Tangki memiliki fungsi yaitu menampung minyak cadangan sebagai tempat pemuai dan penyusutan minyak transformator. Ketika suhu operasi naik maka minyak transformator akan mengalami pemuaiian yang berdampak pada kenaikan volume dalam tangki konservator. Namun sebaliknya, dengan suhu operasi yang menurun maka mengalami penyusutan yang berdampak pada penurunan volume dalam tangki konservator. Kemudian bertambahnya atau berkurangnya udara pada tangki konservator berhubungan langsung dengan udara diluar transformator. Cara mencegah minyak agar tidak terkontaminasi dengan udara luar dengan memasang siligacel.



Gambar 2.6 Tangki Konsevator



### 2.3.6 Pendingin Transformator

Sistem pengoperasian transformator dapat menimbulkan rugi-rugi berupa rugi inti besi dan rugi tembaga. Rugi-rugi pada transformator menyebabkan kenaikan temperatur sehingga merusak isolasi transformator. Oleh karena itu, transformator dilengkapi pendingin yang berfungsi membuang panas ditransformator. Media untuk sistem pendinginan, yaitu:

1. Air
2. Udara
3. Minyak

Sistem pendingin transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut :

#### A. Tipe Kering

##### 1. AN (*Air Natural*)

Sistem pendinginan secara alami dengan memanfaatkan udara di lingkungan sekitar, dan digunakan oleh transformator berkapasitas s.d. 1,5 mVA.

##### 2. AF (*Air Force*)

Sistem pendinginan dengan cara meniupkan angin secara paksa dengan alat bantu kipas angin, dan kipas angin di nyalakan saat temperatur transformator meningkat.

#### B. Tipe Basah

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

Sistem pendinginan minyak secara alami dengan memanfaatkan udara di lingkungan sekitar, dan digunakan oleh transformator berkapasitas s.d. 30 mVA

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

Sistem pendinginan minyak secara alami dengan menghembuskan udara dari kipas angin, dan kipas angin hanya dinyalakan pada saat pembebanan yang berat, digunakan oleh transformator berdaya 30-60mVA.





### 3.OFAF (*Oil Force Air Force*)

Sistem pendinginan minyak disirkulasikan dengan pompa minyak, dan di hembuskan udara dari kipas angin, digunakan oleh transformator berdaya di atas 60 mVA. Sistem pendingin ini pun memiliki 2 jenis yaitu gabung (biasa) dan terpisah.

### 4.OFWF(*Oil Force Water Force*)

Sistem pendinginan minyak disirkulasikan dengan pompa minyak, dan air disirkulasikan melalui saluran pembuangan panas melalui pompa air.

Tabel 2.1 Macam – Macam Pendingin

NO	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Trafo		Luar Trafo	
		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	OFWF		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/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			



1. Transformator ONAN adalah transformator dengan minyak sebagai pendinginan kumparan transformator yang bersirkulasi secara alami dan udara sebagai pendingin luar transformator yang bersirkulasi secara alami pula
2. Transformator ONAF ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin kumparan transformator yang bersirkulasi secara alami dan dengan udara sebagai pendingin luar transformator yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.
3. Transformator OFAF ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin kumparan transformator yang bersirkulasi secara paksa/buatan dengan udara sebagai pendingin luar transformator yang bersirkulasi secara paksa/buatan.
4. Transformator OFWF ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin kumparan transformator yang bersirkulasi secara paksa/buatan dan dengan air sebagai pendingin luar transformator secara paksa/buatan.

### 2.3.7 Tap Changer

Tap *changer* merupakan komponen pengubah untuk perbandingan transformator berguna memperoleh tegangan sekunder yang diinginkan dengan masukan tegangan primer diubah-ubah. Tap *changer* terdiri dari *off load tap changer* dan *on load tap changer*. Perbedaannya pada kedua jenis tap *changer* tersebut ialah *off load tap changer* bekerja pada saat tidak berbeban, dan *on load tap changer* bekerja pada saat tidak berbeban.

Pada umumnya dipembangkit menggunakan tap *changer* yang tanpa beban, dan pada gardu induk memakai tap *changer* yang berbeban. OLTC memiliki bagian, yaitu:

1. Transisi resistor
2. *Selector switch*
3. *Diverter switch*

OLTC akan direndam pada minyak isolasi pada saat perpindahan tap. Minyak isolasi tersebut terpisah dengan minyak isolasi transformator. Ini disebabkan minyak mengalami fenomena panas, elektris, mekanis dan kimia.



Gambar 2.7 *Tap Changer*

### 2.3.8 Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Temperatur minyak dapat berubah-ubah dikarenakan temperatur lingkungan dan beban yang mempengaruhi alat pernapasan. Pernapasan ditransformator mengalami pemuaiian saat temperatur minyak meningkat, dan penyusutan saat temperatur minyak menurun. Keadaan tersebut menyebabkan minyak terkontaminasi dengan udara luar yang lembab yang menyebabkan tegangan tembus minyak menurun. Oleh karena itu, transformator dipasang alat pernapasan berisi kristal zat hygroskopis dengan bentuk tabung.



Gambar 2.8 Alat Pernafasan Trafo



### **2.3.9 Indikator**

Indikator pengawasan yang digunakan saat transformator beroperasi, yaitu:

- Indikator suhu belitan
- Indikator kedudukan tap
- Indikator suhu minyak
- Indikator permukaan minyak, dan lain-lain

### **2.4 Sistem Proteksi**

Proteksi transformator daya terutama berfungsi mengantisipasi kerusakan transformator akibat gangguan yang ditransformator. Kemudian berfungsi memisahkan bagian yang terganggu dengan tak terganggu ditransformator.

Penggunaan rele ditransformator berfungsi, yaitu:

1. Memisahkan bagian yang memiliki gangguan dan yang tidak terganggu.
2. Mengantisipasi kerusakan transformator akibat gangguan.
3. Menjaga keandalan sistem pengoperasian listrik.
4. Mendeteksi keadaan abnormal pada peralatan.

Syarat sistem proteksi, yaitu:

- 1.) Sensitif berarti peka terhadap segala gangguan yang terjadi.
- 2.) Andal berarti bekerja saat dibutuhkan dan sebaliknya.
- 3.) Selektif berarti memisahkan bagian terganggu dengan yang tidak terganggu.
- 4.) Cepat berarti mengatasi gangguan secara langsung.



## **2.5 Peralatan Proteksi Transformator**

### **2.5.1 Rele *Bucholz***

Relai Buchholz adalah perangkat keamanan yang biasanya digunakan dalam transformator serapan minyak besar. Ini adalah semacam estafet keamanan yang diaktifkan minyak dan gas. Tujuan estafet Buchholz adalah untuk memberikan perlindungan kepada transformator dari kesalahan yang berbeda yang terjadi di transformator seperti sirkuit pendek, inter-turn, inti, baru jadi, dll. Relai ini akan merasakan kesalahan ini dan menutup sirkuit alarm.

*Rele Bucholz* berfungsi meminimalisir gangguan pada transformator akibat gas.

Adapun penyebabnya, yaitu:

- a. Hubung singkat karena kontak yang kurang baik
- b. Hubung singkat antar laminasi
- c. Hubung singkat antar lilitan (dalam fasa)
- d. Busur api listrik antar fasa

### **2.5.2 Pengaman Tekanan Lebih (*Explosive Membrane*)**

Alat untuk mengamankan tangki konservator dari tekanan gas yang meningkat.

Pengaman ini terbuat dari plastik, katup pegas, kaca, dan tembaga.

### **2.5.3 Rele Tekanan Lebih (*Sudden Pressure Relay*)**

Rele untuk mengatasi keadaan hubung singkat dan dapat membuat tekanan meningkat, sehingga membuka PMT secara langsung. Adapun tipe-tipe relai sebagai berikut:

#### *1. Type Membran*

Berupa plat tipis yang di desain sedemikian rupa yang akan pecah apabila menerima tekanan melebihi desainnya. Membrane ini hanya sekali pakai sehingga jika pecah harus diganti yang baru.



## 2. Type Valve

Berupa suatu katup yang ditekan oleh sebuah pegas yang di desain sedemikian rupa sehingga apabila terjadi tekanan di dalam trafo melebihi tekanan pegas maka akan membuka dan membuang tekanan keluar bersama sama sebagian minyak.

Apabila tekanan di dalam trafo sudah turun atau lebih kecil dari tekanan pegas maka valve akan menutup kembali.

### 2.5.4 Rele Differensial (*Differential Relay*)

Rele yang berguna sebagai pengaman *flash over* antar kumparan maupun belitan yang saling berhubungan, dan tangki konsevator dengan kumparan.

### 2.5.5 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Rele yang berguna sebagai pengaman cadangan atau utama untuk hubung singkat diluar transformator maupun antar fasanya.

### 2.5.6 Rele Hubung Tanah (*Ground Fault Relay*)

Rele yang mengatasi gangguan satu fasa ke tanah.

### 2.5.7 Rele Thermis (*Thermal Relay*)

Rele yang berfungsi mengantisipasi panas yang berlebih pada transformator agar tidak merusak isolasi belitan transformator.

### 2.5.8 *Arrester*

*Arrester* berguna mengamankan surja petir dengan mengalirkannya ke tanah. *Arrester* memiliki dua sifat yaitu isolator dan konduktor. Ketika normal akan menjadi isolator, dan saat tegangan berlebih menjadi konduktor.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Kadir, Abdul. Transformator edisi ketiga, 2010. Jakarta : UI Press



### 2.5.9 Relay Suhu

Berfungsi untuk melindungi trafo dari temperature yang berlebih. Apabila temperature trafo melebihi batas yang ditentukan maka relay suhu akan bekerja. Besar kenaikan suhu adalah sebanding dengan factor pembebanan dan suhu udara luar trafo

## 2.6 Prinsip Kerja Transformator

Transformator dikatakan ideal apabila perbandingan belitan dan tegangan sama antara primer maupun sekunder. Kumbaran primer terhubung ke sumber tegangan dan kumbaran sekunder terhubung ke beban. Adapun prinsip kerja ditransformator ialah saat belitan primer diberikan sumber tegangan AC sehingga timbul fluks atau medan magnet sesuai dengan Hukum Oersted. Kemudian arah fluks diatur Hukum Maxwell yang nantinya akan menginduksi kumbaran sekunder, sehingga timbulah gaya gerak listrik sesuai dengan Hukum Faraday. Lalu menghasilkan tegangan pada kumbaran sekunder. ada kebanyakan Transformator, kumbaran kawat terisolasi ini dililitkan pada sebuah besi yang dinamakan dengan Inti Besi (Core). Ketika kumbaran primer dialiri arus AC (bolak-balik) maka akan menimbulkan medan magnet atau fluks magnetik

Kekuatan Medan magnet (densitas Fluks Magnet) tersebut dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang dialirinya. Semakin besar arus listriknya semakin besar pula medan magnetnya. Fluktuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumbaran pertama (primer) akan menginduksi GGL (Gaya Gerak Listrik) dalam kumbaran kedua (sekunder) dan akan terjadi pelimpahan daya dari kumbaran primer ke kumbaran sekunder. Dengan demikian, terjadilah pengubahan taraf tegangan listrik baik dari tegangan rendah menjadi tegangan yang lebih tinggi maupun dari tegangan tinggi menjadi tegangan yang rendah. Sedangkan Inti besi pada Transformator atau Trafo pada umumnya adalah kumpulan lempengan-lempengan besi tipis yang terisolasi dan ditempel berlapis-lapis dengan kegunaanya untuk mempermudah jalannya Fluks Magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik kumbaran serta untuk mengurangi suhu panas yang ditimbulkan.



Apabila kumparan pada sisi primer trafo dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak-balik sinusoidal ( $V_p$ ), maka akan mengalir arus bolak-balik yang juga sinusoidal ( $I_p$ ) pada kumparan tersebut. Arus bolak-balik ini akan menimbulkan fluks magnetik ( $\Phi$ ) yang sefasa dan juga sinusoidal di sekeliling kumparan. Akibat adanya inti trafo yang menghubungkan kumparan pada sisi primer dan kumparan pada sisi sekunder, maka fluks magnetik akan mengalir bersama pada inti trafo dari kumparan primer menuju kumparan sekunder sehingga akan membangkitkan tegangan induksi pada sisi sekunder trafo:

$$V_s = - N_s \frac{d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

$V_s$  = Tegangan induksi pada sekunder

$N_s$  = Jumlah belitan pada sisi sekunder

$d\Phi/dt$  = Perubahan fluks terhadap waktu

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan trafo berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti trafo. Selain itu, tegangan induksi juga dapat terbangkitkan apabila ada perubahan fluks terhadap waktu, jika fluks yang mengalir adalah konstan maka tegangan induksi tidak dapat terbangkitkan.

## 2.7 Keadaan Pembebanan Pada Transformator

### 2.7.1 Keadaan Transformator Tanpa Beban

Hubungan belitan primer dengan sumber tegangan  $V_1$  yang sinusoidal dengan menganggap belitan  $N_1$  reaktif murni.  $I_0$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$ . Arus primer  $I_0$  menimbulkan fluks ( $\Phi$ ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal.





$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t \dots \dots \dots (2.2)$$

Fluks yang sinusoidal ini akan menghasilkan tegangan induksi  $e_1$  (Hukum Faraday).

$$e_1 = -N_1 \omega \phi_{max} \cos \omega t \text{ [Tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \phi] \dots \dots \dots (2.3)$$

Harga efektif nya

$$E_1 = 4,44 N_1 f \phi_{max} \dots \dots \dots (2.4)$$

### 2.7.2 Keadaan Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban ZL,  $I_2$  mengalir pada kumparan sekunder dengan mengalirnya  $I_2$  pada kumparan sekunder, maka pada kumparan primer akan mengalir  $I_2'$  sehingga arus yang mengalir secara keseluruhan pada kumparan primer adalah :

$$I_0 + I_2' \quad I_0 = I_i + I_m \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

$I_0$  = arus tanpa beban

$I_i$  = arus inti besi

$I_m$  = arus magnetisasi

Untuk arus berlaku hubungan

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (2.6)$$

### 2.8 Rugi-Rugi Pada Transformator

Transformator mempunyai rugi-rugi ialah rugi inti besi dan rugi tembaga. Rugi inti besi terbagi menjadi dua ialah rugi *Histerisis* dan rugi *Eddy Current*. Arus *Eddy* ialah arus yang bersirkulasi di dalam inti transformator yang diakibatkan oleh terjadinya perubahan fluks magnetik. Arus *Eddy* ini dapat dikurangi dengan jalan membuat inti dari lembaran besi yang terlamnasi dimana masing-masing laminasi inti diisolasi satu sama lainnya. Rugi-rugi besi



merupakan rugi-rugi yang sifatnya konstan dan tidak bergantung pada besarnya beban. Dalam kondisi tanpa beban ataupun berbeban penuh transformator akan memiliki rugi-rugi besi yang sama. Rugi-rugi besi terdiri atas rugi histerisis dan rugi arus eddy. Besarnya rugi-rugi histerisis bergantung pada jenis besi yang digunakan untuk inti transformator. Dengan demikian, dalam praktiknya pemilihan bahan inti harus dipertimbangkan dengan baik untuk menghindari rugi-rugi histerisis yang terlalu besar. Seperti telah disebutkan sebelumnya, transformator hanya bekerja untuk suplai tegangan bolak-balik. Jadi, arus yang digunakan untuk membangkitkan fluks inti akan berubah terus menerus dari nilai positif ke nilai negatif. Setiap saat terjadinya pembalikan arus akan terjadi pula pembalikan fluks magnetik. Akibat dari terjadinya fluks yang dibangkitkan dan kemudian runtuh secara berulang-ulang di dalam inti transformator inilah yang akan menimbulkan rugi-rugi histerisis.

Rumus rugi-rugi *Eddy Current*:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan :

$P_e$  = Rugi – rugi arus Eddy ( Watt )

$f$  = Frekuensi (Hertz)

$B_{maks}$  = Kepadatan fluks maksimum ( Tesla )

$K_e$  = Konstanta

Rumus rugi – rugi histerisis:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan :

$P_h$  = rugi – rugi Histerisis (Watt)

$K_h$  = Konstanta

$f$  = Frekuensi (Hertz)

$B_m$  = kepadatan fluks maksimum (Tesla)

Sedangkan rugi tembaga karena adanya arus yang mengalir dikawat tembaga,



<sup>3</sup>rumusnya:

$$P_{cu} = I^2.R \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan :

$P_{cu}$  = Rugi Tembaga

I = Arus (A)

R = Tahanan ( $\Omega$ )

## 2.9 Gangguan Pada Transformator

Transformator memiliki gangguan dalam pengoperasiannya yang menyebabkan terhambatnya kerja transformator itu. Adapun macam-macam gangguan dibagi beberapa kelompok yaitu :

### 1. Gangguan Dalam (*Internal Fault*)

*Internal Fault* adalah gangguan yang bersumber dari dalam transformator itu sendiri. Gangguan ini dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

A. Terjadi busur api yang kecil dan pemanasan lokal yang dapat disebabkan oleh cara penyambungan konduktor yang tidak baik partial discharge kerusakan isolasi pada baut – baut penjepit inti.

B. Gangguan pada sistem pendingin.

C. Arus sirkulasi pada trafo – trafo yang bekerja paralel

Semuanya ini menyebabkan pemanasan lokal, tetapi tidak mempengaruhi suhu trafo secara keseluruhan. Gangguan ini tidak dapat dideteksi dari terminal trafo karena besar dan keseimbangan arus serta tegangan tidak berbeda dengan kondisi pada operasi normal. Walaupun incipient faults merupakan gangguan yang kecil, tetapi jika tidak segera dideteksi akan membesar dan menimbulkan kerusakan yang lebih serius.

---

<sup>3</sup> <https://Teknik Elektro.com>



D. Gangguan hubung singkat di dalam transformator misalnya hubung singkat diantara gulungan belitan tegangan tinggi atau rendah.

## 2. Gangguan diluar (*External Fault*)

*External Fault* adalah gangguan yang bersumber dari luar transformator itu sendiri.

Gangguan ini dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

A. Gangguan hubung singkat antara fasa atau gangguan fasa ke tanah di luar transformator, misalnya di busbar atau di sisi penyulang tegangan menengah. Arus gangguan ini cukup besar dan dapat di deteksi.

## B. Beban lebih (*Over load*)

Transformator tenaga dapat beroperasi secara kontinu pada beban nominal. Bila beban lebih besar dari beban nominal, maka transformator akan berbeban lebih, akan menimbulkan arus lebih yang mengakibatkan pemanasan lebih. Ini akan menurunkan kemampuan isolasi.

## 2.10 Pemeliharaan Transformator

Pemeliharaan transformator merupakan tindakan menjaga kondisi transformator tetap stabil dari gangguan agar transformator bekerja dengan baik dan handal. Tujuan utama pemeliharaan yaitu:

- a.) Menjaga keamanan dari peralatan.
- b.) Mencegah terjadinya gangguan peralatan.
- c.) Memperpanjang umur peralatan.
- d.) Meningkatkan kualitas, efisiensi, dan keandalan.

Adapun macam-macam pemeliharaan transformator berdasarkan waktu pemeliharaannya dapat dibagi yaitu:

### A. Pemeliharaan Trafo Harian

Ada 3 pemeliharaan trafo yang perlu dilakukan setiap hari. Berikut ini 3 proses tersebut :

1. Selalu periksa Magnetic Oil Gauge (MOG) dari tangka utama dan tangki konservator.



2. Pastikan Magnetic Oil Gauge berada pada level yang tepat.
3. Cek silika gel dan ganti jika warnanya sudah berubah menjadi merah muda.

#### B. Pemeliharaan Trafo Bulanan

Perawatan trafo setiap bulannya juga perlu dilakukan melalui serangkaian proses berikut ini :

1. Periksa level minyak dalam tutupnya agar tidak turun dibawah batas yang disarankan. Proses ini berguna untuk mencegah kerusakan trafo listrik.
2. Periksa kebersihan silika gel untuk menjaga lubang ‘pernapasan’ di silika gel jika terdapat oil filling bushing pada trafo listrik Anda, pastikan selalu oil didalamnya berada di level yang benar. Proses ini sangat penting dan perlu dilakukan secara berkala setiap bulannya.

#### C. Pemeliharaan Trafo Tahunan

Proses perawatan trafo tahunan bisa dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Memeriksa kipas udara dan pompa oli yang berguna untuk mendinginkan trafo dan sirkuit kontrol
2. Membersihkan area bushing trafo dengan menggunakan kain katun lembut
3. Periksa kondisi minyak OLTC. Cara ini bisa dilakukan dengan mengambil sampel dari katup pembuangan. Kemudian uji kadar air dan kekuatan dielektriknya. Jika kekuatan dielektriknya rendah sementara kadar airnya tinggi, maka minyak OLTC perlu segera diganti.
4. Bersihkan semua kotak Marshalling dari dalam. Periksa juga penerangan dan pemanas ruangan apakah berfungsi dengan baik atau tidak. Kemudian, periksa koneksi terminal kontrol dan kabel relay serta kencangkan setiap setahun sekali.
5. Periksa area sakelar kontrol, Alarm dan relay beserta sirkuitnya. Bersihkan area tersebut dengan tepat.
6. Periksa indikator suhu dan pastikan berfungsi dengan benar
7. Periksa resistansi isolasi dan indeks polarisasi transformator dengan megger<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Krishadi, D.I. 2011. Analisis Pengaruh Temperatur Terhadap Masa Guna Dan Pembebanan Darurat Transformator Daya. Tesis. Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok



## 2.11 Umur Transformator

Transformator merupakan peralatan yang mempunyai batasan umur, dan berkurangnya atau panjangnya umur transformator dapat dipengaruhi beberapa hal. Salah satunya ialah pembebanan pada transformator. Beban yang berlebih dapat menyebabkan panas yang membuat temperatur pada transformator meningkat. Apabila ini terjadi secara terus-menerus dapat mengganggu fungsi transformator sebagai pengubah level tegangan dan transformator akan mengalami penuaan. Ketika terjadi penuaan pada transformator maka umur transformator juga akan berkurang.

Kemudian temperatur lingkungan adalah salah satu penyebab penuaan transformator juga. Ketika temperatur lingkungan meningkat maka menyebabkan temperatur minyak pada transformator juga meningkat yang berpengaruh ke umur transformator juga. Oleh karena itu, diperlukannya cara untuk menghitung umur transformator dengan pembebanan dan temperatur lingkungan.

### 2.11.1 Perhitungan Susut Umur Transformator

#### 2.11.1.1 Rasio Pembebanan

Rasio pembebanan adalah perbandingan daya semu didapatkan melalui hasil pengukuran setiap harinya dengan rating daya pengenal pada *nameplate* transformator. Rasio beban yang besar membuat pembebanan pada transformator besar juga dan dapat mendekati rating daya pengenalnya.

$$K = \frac{S}{S_r} \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan :

K : rasio pembebanan.

S : beban transformator ( mVA).

S<sub>r</sub> : kapasitas transformator ( mVA).

Dalam hal ini yang diketahui daya nyata maka harus diubah ke daya semu dengan menggunakan segitiga daya dengan persamaan sebagai berikut :

---



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

S = Daya Semu ( mVA)

P = Daya Nyata ( MW)

Q = Daya Reaktif ( MVAR)

### 2.11.1.2 Perbandingan Rugi Pada Transformator

Perbandingan rugi-rugi pada transformator yaitu rugi tembaga dan rugi beban nol.

Adapun perhitungan perbandingan rugi sebagai berikut :

$$R = \frac{\text{Rugi Tembaga}}{\text{Rugi Beban Nol}} \dots\dots\dots(2.12)$$

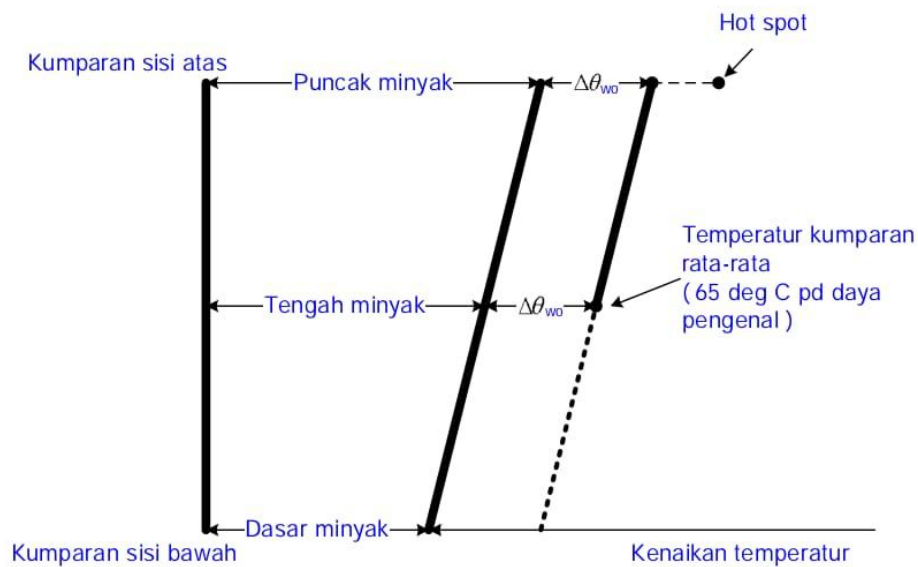
### 2.11.1.3 Pengasumsian Dengan Diagram Thermal

Temperatur yang naik dapat dianalogi sesuai diagram thermal sederhana. Kenaikkan temperatur *top oil* yang diuji pada kenaikan temperatur berbeda halnya pada minyak yang meninggalkan kumparan. Perpaduan yang berasal dari sebagian minyak yang bersirkulasi disetiap kumparan adalah minyak *top oil*. Namun perbedaan tersebut tidak signifikan sebagai pemvalidasi metode. Metode yang sudah disederhanakan menjadi asumsi seperti dibawah ini:

- 1.) Temperatur minyak bertambah secara linear sesuai kumparan.
- 2.) Kenaikkan temperatur rata-rata minyak adalah sama untuk semua kumparan dari kolom yang sama.
- 3.) Perbedaan temperatur antara minyak pada puncak kumparan (asumsinya sepadan dengan yang di puncak) dan minyak yang berada di dasar kumparan (asumsinya sepadan dengan yang di pendingin) adalah sama untuk semua bagian kumparan.
- 4.) Kenaikkan temperatur rata-rata dari tembaga pada setiap posisi di atas kumparan meningkat secara linear sejalan kenaikan temperature minyak yang mempunyai selisih kostan  $\Delta\theta w_0$  antara dua garis lurus ( $\Delta\theta w_0$

adalah selisih antara kenaikan temperatur rata-rata tahanan dan kenaikan temperatur rata - rata minyak.)

- 5) Kenaikkan temperatur rata-rata puncak kumparan adalah kenaikan temperatur rata-rata minyak ditambah  $\Delta\theta_{wo}$ .
- 6) Kenaikkan temperatur hot spot adalah lebih tinggi dibanding kenaikan temperatur rata-rata puncak kumparan. Untuk menghitung perbedaan antara kedua kenaikan temperatur ini, nilai  $\Delta\theta_{wo}$  diasumsikan 0,1 untuk sirkulasi minyak secara alami.<sup>5</sup>



Gambar 2.9 Diagram *Thermal*

<sup>5</sup> Wuwung, J. O. 2010. Pengaruh pembebanan terhadap kenaikan suhu pada belitan transformator daya jenis terendam minyak. 07(52), 2939.





#### 2.11.1.4 Kenaikan Awal Temperatur *Top Oil*

Kenaikan temperatur awal *top oil* merupakan nilai naiknya temperatur *top oil* yang dikali dengan rasio pembebanan dan perbandingan rugi:

$$\Delta\theta_{TO,i} = \Delta\theta_{TO,u} \left[ \frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right]^n \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

K = Rasio pembebanan (mVA)

R = Perbandingan rugi (kW)

$\Delta\theta_{TO,i}$  = Kenaikan awal temperatur *top oil* (°C)

$\Delta\theta_{TO,u}$  = Temperatur *rise oil* (°C)

n = 0,8 untuk (ONAN) dan 0,9 (ONAF)

#### 2.11.1.5 Kenaikan Temperatur *Top Oil*

Untuk menghitung kenaikan temperatur *top oil* setelah di dapatkan nilai kenaikan awal temperatur *top oil* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,u} + \theta_A - \Delta\theta_{TO,i}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau\theta}} \right) + \Delta\theta_{TO,i} \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{TO}$  = Kenaikan Temperatur *Top Oil* (°C )

$\Delta\theta_{TO,u}$  = Temperatur Minyak (°C )

$\Delta\theta_{TO,i}$  = Kenaikan Awal Temperatur *Top Oil* (°C )



$\theta_A$  = Temperatur Lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t$  = Konstanta.

### 2.11.1.6 Kenaikan Temperature *Hotspot*

Untuk menghitung kenaikan temperatur *hotspot* maka harus menentukan nilai  $g$ , yaitu selisih temperatur belitan dan temperatur minyak pada rating beban. Sehingga nilai kenaikan temperatur *hotspot* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta\theta_H = H.g. K^{2m} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

$H$  = Faktor *hotspot* (1,3)

$g$  = Selisih temperatur belitan dan temperatur minyak ( $^{\circ}\text{C}$ )

$K$  = Rasio pembebanan (mVA)

$m$  = Konstanta

$m = 0,8$  ( ONAN) dan  $0,8$  ( ONAF)

### 2.11.1.7 Temperatur *Ambient*

Temperatur *ambient* adalah temperatur lingkungan pada transformator. Transformator dengan pendinginan udara luar berarti pendinginan tersebut berasal dari suhu sekitar. Temperatur *ambient* mempengaruhi kemampuan transformator, ketika pembebanan yang membuat temperatur meningkat maka temperatur lingkungan ditingkatkan sebagai penentuan temperatur operasi.

---

<sup>6</sup> IEC, Loading Guide For Oil Immersed Transformer, IEC Publication, 1972.



### 2.11.1.8 Temperatur *Hotspot*

Transformator memiliki parameter untuk menentukan kemampuan thermal yaitu temperatur *hotspot* . Tiga aspek yang mempengaruhi temperatur *hot spot* transformator adalah pembebanan, temperatur lingkungan, dan karakteristik transformator. Pembebanan transformator berpengaruh dengan arus yang mengalir ke belitan transformator, yang dapat menyebabkan panas dan meningkatkan temperatur *hotspot*. Kemudian temperatur *ambient* dimana variabel bebas yang mempengaruhi temperatur *hotspot* secara linear.

Dalam IEEE 91 menetapkan besar temperatur *hotspot* yaitu sebesar 98°C. Cara mendapatkan *temperature hot spot* dipakai persamaan dibawah ini:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \dots \dots \dots (2.16)$$

Keterangan:

$\theta_H$  = Temperature *hotspot* (°C).

$\theta_A$  = Temperatur lingkungan (°C).

$\Delta\theta_{TO}$  = Kenaikan *temperature top oil* (°C).

$\Delta\theta_H$  = Kenaikan temperatur *hotspot* (°C)

### 2.11.1.9 Laju Penuaan *Thermal* Relatif

Hubungan montsinger sekarang dipakai guna memperoleh nilai relatif dari umur pemakaian ditemperatur  $\theta_H$ , dibandingkan pada nilai standar dari umur pemakaian pada temperatur *hotspot* maksimal.

$$V = 10^{(\theta_H - 98) / 19,93} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :



V = Laju penuaan thermal relatif

98 ° C = Nilai maksimum temperatur *hotspot*

θH = Temperature hotspot (°C )

### 2.11.1.10 Susut Umur Transformator

<sup>7</sup> Pengoperasian harian maupun bulanan berpengaruh pada umur transformator dengan temperatur panas sekitar 98 ° C bisa dinyatakan pada satuan bulanan, harian atau jam.

Pembebanan dan temperatur mempengaruhi laju umur relatif setelah kurun waktu

tertentu yaitu:  $L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V$  .....(2.18)

Keterangan:

L = Laju umur relatif (susut umur).

n = Konstanta.

N = Jumlah total waktu pembebanan.

V = Laju penuaan *thermal* relatif.

### 2.11.1.11 Perhitungan Perkiraan Umur Transformator

Perhitungan perkiraan umur transformator adalah nilai umur dasar dikurangi nilai susut umur dengan persamaan dibawah ini :

Perkiraan umur = Umur dasar - (n x susut umur ).....(2.19)

Dimana:

Umur dasar = sesuai dengan IEEE C57.91 tahun 2011 yaitu 20.55 tahun

n = Lama transformator sudah terpakai

<sup>7</sup> IEEE Std C57.91. 1995. IEEE Guide for Loading MineralOil-Immersed Transformers.



*Politeknik Negeri Sriwijaya*

---