

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian terhadap pengaruh pembebanan dan pengaruh suhu lingkungan transformator terhadap susut umur transformator di gardu induk pematangsiantar dengan berdasarkan standar IEC 354 Tahun 1972. Susut umur transformator daya di gardu pematangsiantar diperoleh 0,29 pu/hari pada pembebanan 80%, 0,96 pada pembebanan 90% dan 3,6 pu/hari pada pembebanan 100%. Pengaruh suhu sekitar kota Pematangsiantar yang berubah dari 20 °C sampai 32 °C mengakibatkan susut umur pada beban 80% sebesar 0,08 p.u sampai 0,31 p.u, pada beban 90% sebesar 0,26 p.u sampai 1,04 p.u sedangkan pada beban 100% sebesar 1 p.u sampai 3,98 p.u (Pandapotan & Warman, 2013).

Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Palindungan Gultom dkk. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui unit transformator yang beroperasi di kota Pontianak yang telah mengalami pembebanan berlebih dengan suhu lingkungan sebesar 30 °C di kota Pontianak. Dari hasil penelitian diketahui bahwa transformator yang beroperasi di kota Pontianak harus dibebani tidak lebih dari 91% dari daya pengenal transformator. Jika pemberian beban melebihi 91% maka akan membuat harapan hidup transformator berkurang secara signifikan. Perbedaan antara penelitian yang dilakukan oleh Palindungan Gultom dkk dengan penelitian yang akan dilakukan yaitu jenis transformator yang digunakan transformator distribusi 20 kVA, sedangkan pada penelitian yang akan dilakukan menggunakan transformator daya 60 MVA.

Penelitian untuk mengetahui perkiraan umur transformator di PLN area manado-rayon manado selatan. Penelitian yang dilakukan untuk menganalisa pengaruh pembebanan pada transformator yang dapat menyebabkan panas pada transformator. Jika transformator dibebani 100% dari daya pengenal transformator maka suhu lilitan dapat mencapai 98°C dengan kondisi suhu

lingkungan 20°C - 40°C maka harapan hidup transformator dapat mencapai 20 tahun atau sama dengan 7300 hari dengan pengurangan umur normal 0,0137%/hari. Perbedaan antara penelitian yang dilakukan oleh (Kodoati dkk, 2015) dengan penelitian ini yaitu jenis transformator yang digunakan jenis transformator distribusi sedangkan penelitian ini menggunakan transformator daya (Kodoati dkk, 2015).

Penelitian yang dilakukan oleh Purnama Sigid. Penelitian terhadap pengaruh pembebanan dan pengaruh suhu lingkungan terhadap susut umur transformator tenaga PLGU Tambak Lorok di Kota Semarang mengacu pada standar IEC 354-1972. Hasil dari penelitian didapatkan susut umur transformator pada pembebanan 80 % sebesar 0,24 pu/hari, pada pembebanan 100 % sebesar 1 pu/hari dan berdasarkan data pembebanan tahun 2008 diperoleh susut umur 0,1268 pu/hr.

Penelitian untuk mengetahui pengaruh pembebanan terhadap transformator daya 150 KV di Gardu Induk Palur. Hasil dari penelitian perkiraan umur transformator pada suhu sekitar Indonesia dapat berkurang mencapai 70 sampai 85% untuk siang hari dan 40 sampai 55% untuk malam hari karena suhu rata-rata sekitar Indonesia 33 ketika siang dan 24 ketika malam, hal ini berbeda dengan standard IEC yaitu 20 suhu yang paling baik supaya transformator dapat berumur panjang. Perkiraan umur yang rata-rata relatif rendah terjadi pada beban puncak yaitu 100%. Dengan demikian semakin besar faktor beban dan suhu lingkungan menyebabkan laju penuaan transformator semakin besar dan umur transformator berkurang seiring transformator bekerja (Andika, 2018).

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gardu Induk

Gardu Induk (GI) berfungsi sebagai komponen utama yang berperan sangat penting dalam penyaluran listrik ke konsumen dalam sistem tenaga listrik (Zainuddin, 2016). Gardu Induk merupakan kumpulan dari alat listrik yang dirancang dengan pertimbangan teknis, ekonomis dan estetika. Dalam istilah lain Gardu Induk (GI) merupakan sistem transmisi atau sistem pembangkitan sebagai stasiun pengumpul energi listrik yang terdiri dari alat-alat transformator daya, pemutus tenaga, saklar pemisah, bus station, reaktor pembatas arus, transformator arus, transformator tegangan, kapasitor kopling, transformator tegangan kapasitor, *lightning arrester*, rele proteksi, baterai, dan alat pendukung lainnya. (Syahputra, 2017)

Gardu Induk dapat dibagi menjadi 5 jenis berdasarkan konstruksi pemasangannya (Syahfitra, 2015) yaitu :

- a. Gardu induk pemasangan luar (*outdoor*), adalah gardu induk yang peralatannya sebagian besar dipasang di luar atau di ruang terbuka kecuali peralatan kontrol, proteksi, kendali dan alat-alat bantu lain di dalam bangunan
- b. Gardu induk pemasangan dalam (*indoor*), adalah gardu induk dimana hampir sebagian besar peralatannya mulai dari *switchgear*, peralatan kontrol, peralatan kontrol, proteksi dan lainnya dipasang di dalam suatu gedung tertutup.
- c. Gardu induk pemasangan bawah tanah (*underground*), adalah gardu induk yang peralatannya sebagian besar ditempatkan di bawah tanah. kecuali beberapa peralatan yang ditempatkan di atas permukaan tanah seperti alat pendingin dan peralatan control.

d. Gardu induk pasangan sebagian bawah tanah (*semi underground*), adalah gardu induk yang sebagian peralatannya seperti transformator daya ditempatkan di bawah tanah dan sebagian lain peralatan ditempatkan di atas tanah.

e. Gardu induk mobil (*mobile*), adalah gardu induk yang semua peralatannya dipasang di atas truck, supaya gardu induk ini bisa dipindahkan ke tempat yang membutuhkan secara *mobile*.

2.2.2. Peralatan dan Fungsinya dari Gardu Induk

1. Transformator Daya

Transformator daya merupakan instrument yang digunakan untuk mentransformasikan daya listrik dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan listrik dengan nilai frekuensi yang tetap berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik (Abdul Kadir, 2011:43). Pada sebuah transformator daya dilengkapi dengan *Neutral Current Transformer* (NCT) yang berfungsi untuk mendapatkan titik netral dari transformator.

2. *Neutral Grounding Resistance* (NGR)

NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan neutral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke tanah. NGR berfungsi untuk memperkecil arus gangguan yang terjadi. Ketika ada gangguan maka selain meredam gangguan tersebut NGR tadi menganalisa besar arus gangguan dan mengirimkan sinyal melalui *current transformer* ke *ground fault relay* yang akan memutuskan *circuit breaker* bila arus gangguannya melebihi yang diperbolehkan. Diperlukan proteksi yang praktis dan biasanya tidak terlalu mahal, karena karakteristik relay dipengaruhi oleh sistem pentanahan neutral.

3. *Circuit Breaker* (CB)

CB adalah peralatan pemutus, yang berfungsi untuk memutus aliran arus listrik dalam keadaan berbeban jika ada gangguan dan akan beroperasi jika

tidak ada masalah. CB dapat dioperasikan pada saat jaringan dalam kondisi normal maupun pada saat terjadi gangguan. CB akan mengeluarkan busur api pada saat bekerja, maka pada CB dilengkapi dengan pemadam busur api.

4. *Disconnecting Switch (DS)*

DS adalah peralatan pemisah, yang berfungsi untuk memisahkan rangkaian listrik dalam keadaan tidak berbeban dan didesain tidak dapat terbuka pada saat jaringan berbeban. Karena DS didesain tidak dapat dioperasikan pada saat jaringan tidak berbeban, maka DS dapat dioperasikan setelah CB memutuskan arus pada jaringan. Dalam GI, Disconnecting Switch terpasang di : *Transformer Bay (TR Bay)*, *Transmission Line Bay (TL Bay)*, Busbar, Bus Couple

5. *Lightning Arrester (LA)*

Piranti ini berfungsi untuk melindungi komponen listrik di gardu induk dan jaringan transmisi dari tegangan lebih akibat terjadinya sambaran petir maupun disebabkan oleh surya hubung. LA akan bersifat isolatif pada kondisi normal (tidak terjadi gangguan) sehingga tidak bisa menyalurkan arus listrik dan LA akan bekerja pada saat terjadi gangguan maka LA akan bersifat konduktif sehingga menyalurkan arus listrik ke bumi.

6. *Current Transformer (CT)*

Current transformer adalah peralatan pada sistem tenaga listrik yang mengubah besaran arus skala besar ke skala kecil atau memperkecil arus listrik sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan (Laughton & Warne, 2003)..

7. *Potential Transformer (PT)*

Potential Transformer berfungsi untuk menurunkan besaran tegangan pada sistem tenaga listrik dengan rasio tertentu supaya menjadi tegangan rendah atau memperkecil besaran tegangan listrik, dan besaran tegangan tersebut

digunakan untuk pengukuran dan proteksi. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, dengan memisahkan instalasi pengukuran dan proteksi tegangan tinggi (Laughton & Warne, 2003).

8. Trafo Pemakaian Sendiri (TPS)

Pada umumnya trafo pemakaian sendiri memiliki prinsip kerja seperti trafo yaitu mentransformasikan besaran daya listrik dengan mengubah suatu rate tegangan ke rate tegangan lain. Trafo ini fungsinya sebagai penurun tegangan menjadi 220/380 volt AC. Sumber tegangan tersebut berfungsi sebagai penyuplai daya bagi peralatan- peralatan yang ada di dalam lingkup gardu induk seperti instalasi penerangan, pompa air dan air conditioner.

9. Rel (Busbar)

Rel (Busbar) digunakan sebagai titik temu atau penghubung (*connecting*) antara transformator daya, SUTT, SKTT serta komponen listrik lainnya yang ada pada gardu induk. Komponen rel (busbar) antara lain: Konduktor (AAAC, HAL, THAL, BC, HDCC), *Insulator String & Fitting (Insulator, Tension Clamp, Suspension Clamp, Socket Eye, Anchor Sackle, Spacer)*.

2.2.3 Transformator

Transformator atau biasa diistilahkan trafo merupakan suatu peralatan yang dapat menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai yang diperlukan. Trafo terdiri dari dua kumparan yaitu lilitan primer merupakan energi yang disatukan dengan lilitan dan lilitan sekunder diberikan pada beban dari lilitan yang lainnya. Jika trafo digunakan untuk menaikkan lilitan primernya sebagai lilitan tegangan rendah dan untuk menurunkan tegangan lilitan sekunder sebagai lilitan tegangan tinggi. Bagian Utama Transformator terdiri dari Inti Besi transformator, Belitan transformator, Minyak transformator, Bushing transformator dan Tangki konservator (Sulistyo, 2014)

2.2.4 Bagian- Bagian Transformator Daya

2.2.4.1 Peralatan Utama

1. Inti Besi

Pada salah satu sisi inti besi transformator dibuat dari lembaran yang berlapis-lapis pelat besi silikon dengan lapisan yang isolasinya sangat tipis, memiliki koefisien penyebaran panas yang rendah sehingga tahan terhadap panas tinggi, dengan mempunyai ketebalan yang tipis sehingga bisa memperkecil efek rugi-rugi inti. Disusun supaya membuat luasan inti magnetis yang kuat serta efisien.

Inti besi transformator digunakan untuk mempermudah jalan fluksmagnetik, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melewati kumparan. Inti besi dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi dengan tujuan untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh Eddy Current sebagai efek dari rugi-rugi besi (Wardi, 2015).

2. Belitan Transformator

Belitan transformator merupakan lilitan-lilitan kawat yang berisolasi yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk suatu Belitan. Belitan tersebut terdiri atas Belitan primer merupakan Belitan yang terhubung ke daya sumber dan Belitan sekunder merupakan Belitan yang terhubung ke beban. Kedua Belitan tersebut berisolasi padat, baik terhadap inti besi maupun terhadap antar Belitan. Belitan digunakan sebagai alat pemindah tegangan dan arus, maka jika salah satu Belitan tersebut diberikan tegangan, maka akan menimbulkan fluks di inti pada kumparan tersebut serta menginduksi Belitan lainnya sehingga pada Belitan sisi lain akan timbul tegangan (Wijonarko, 2018).

3. Minyak Transformator

Minyak transformator berfungsi sebagai pendingin yang peranannya sangat penting dalam sistem isolasi transformator yaitu untuk mengurangi panas yang disebabkan oleh rugi-rugi daya transformator. Minyak berfungsi sebagai pendingin dan isolasi. Dalam sebuah transformator terdapat dua komponen yaitu inti besi dan kumparan yang dapat menimbulkan energi panas, apabila tidak disalurkan sistem pendinginan maka energi panas tersebut akan mengakibatkan besi dan kumparan akan mencapai suhu tinggi sehingga merusak nilai isolasinya yang disebut sebagai bahan isolasi. Sebagai bahan pendingin, belitan dan inti besi diisi suatu jenis minyak yang dapat mengurangi panas secara baik pada inti besi maupun pada kumparan (Sadi,2015). Dengan demikian Minyak transformator harus memenuhi beberapa persyaratan, yaitu sebagai berikut :

- a. Kekuatan isolasi tinggi.
- b. Penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- c. Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- d. Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan bahaya.
- e. Tidak merusak bahan isolasi padat.

Dalam realitanya, suhu minyak akan naik akibat dari energi panas yang dibangkitkan baik dari inti maupun kumparan, oleh karena itu minyak transformator harus memiliki mutu yang tinggi. Selain, suhu minyak naik dapat mengakibatkan pula terjadinya perubahan-perubahan pada minyak transformator. Mutu minyak transformator akan menurun dalam jangka waktu yang akibat dari terbentuknya berbagai pengotoran pada minyak transformator. Hal-hal ini dapat menurunkan kemampuan isolasi maupun pendinginan minyak transformator.

Keuntungan penggunaan minyak transformator sebagai isolator adalah sebagai berikut :

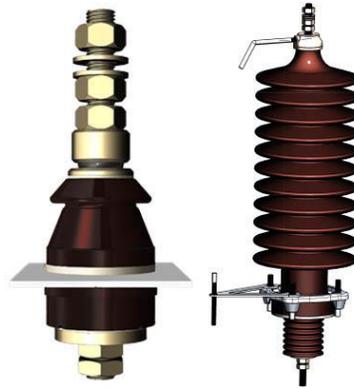
- a. Isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*).
- b. Isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi.
- c. Isolasi cair mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi daya.

Kekuatan dielektrik merupakan ukuran kemampuan elektrik suatu material sebagai isolator. Kekuatan dielektrik didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang dibutuhkan pada material untuk menimbulkan dielektrik breakdown yang dinyatakan dalam satuan Volt/m.

Semakin tinggi kekuatan dielektrik minyak trafo menunjukkan bahwa semakin bagus kualitas minyak tersebut sebagai isolator. Hasil uji kekuatan dielektrik yang rendah, menunjukkan bahwa terdapat benda-benda pengotor minyak seperti air atau partikel penghantar dalam minyak. Sebaliknya apabila hasil uji dielektrik tinggi, bukan berarti bahwa tidak terjadi pengotoran pada minyak tersebut. Berdasarkan SNI 04 – 6954.2 – 2004 batas kenaikan suhu minyak yang diperbolehkan adalah 60°K pada suhu lingkungan normal (25°C sampai 40°C).

4. Bushing

Bushing merupakan konduktor yang diselubungi isolator yang berfungsi sebagai penghubung antara kumparan transformator ke jaringan luar dan sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. Di dalam bushing biasanya dilengkapi dengan fasilitas untuk pengujian kondisi bushing yang disebut center tap (Syahfitra,2018).



Gambar 2.1 Bushing

(Sumber : <https://transformeraccessories.net/index.php/en/trafo-aksesuarlari.html>)

5. Tangki dan Konservator

Tangki Konservator berguna sebagai tempat penampung minyak cadangan dan uap/udara akibat transformator mengalami kenaikan suhu karena arus beban. Untuk menyerap gas produksi yang dapat merusak kualitas minyak maka dipasang relay bucholz di antara tangki dan trafo. Untuk menjaga kualitas minyak, maka udara yang masuk akan disaring terlebih dahulu melalui silika gel. Hal ini bertujuan agar minyak agar minyak trafo tidak terkontaminasi oleh kelembapan dan oksigen dari luar (Julianoor,2018).



Gambar 2.2. Konservator minyak trafo

(Sumber : <http://www.bloglistrik.com/2018/01/reaktor.html>)

2.2.4.2 Peralatan Bantu

1. Pendingin Transformator

Pendingin transformator sangat penting peranannya dalam suatu transformator karena panas yang ditimbulkan oleh inti besi dan kumparan pada transformator dapat menyebabkan kenaikan temperatur berlebihan yang disebabkan oleh rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga sehingga panas tersebut dapat disalurkan keluar transformator dan tidak akan merusak isolasi didalam transformator(Sadi,2015). Pada sistem pendingin menggunakan beberapa media berupa : udara / gas, minyak dan air.

Dilihat dari sirkulasi minyak dalam trafo, metode pendinginan dibagi atas dua jenis, yaitu :

a. Minyak bersirkulasi alamiah (*natural*). Dalam hal ini media yang digunakan untuk merendam inti dan belitan trafo berupa minyak (*oil immersed*). Panas yang ditimbulkan pada inti dan belitan transformator dapat menaikkan temperatur minyak, dan akibatnya minyak akan bersirkulasi secara alami (*natural*). Pada saat minyak bersirkulasi, panas tersebut dibawa ke permukaan tangki transformator.

b. Minyak bersirkulasi paksa (*forced oil*). Dalam hal ini, minyak bersirkulasi dengan bantuan sebuah pompa untuk mempercepat sirkulasi media pendingin didalam transformator. Oleh karena itu, cara ini memperoleh penyaluran panas sirkulasi minyak yang lebih baik daripada cara sikulasi alamiah.

Kualitas tegangan jaringan, losses dan suhu lingkungan pada transformator akan mempengaruhi suhu pada transformator yang sedang beroperasi. apabila Suhu operasi tinggi maka dapat menimbulkan kerusakan pada transformator itu sendiri. Oleh karna itu dibutuhkan pendinginan yang efektif dan efisien

Minyak isolasi transformator berfungsi sebagai media isolasi sekaligus sebagai media pendingin. Ketika minyak bersirkulasi, panas yang dihasilkan dari kumparan akan didinginkan pada sirip-sirip radiator yang dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya. Proses pendinginan tersebut bisa dibantu dengan hembusan kipas angin atau pompa sirkulasi untuk mempercepat penyaluran panas sehingga dapat meningkatkan efisiensi pendinginan.

Berikut adalah beberapa type pendinginan yang sering digunakan pada transformator.

1.) A.N (Air Natural)

Adalah pendingin yang menggunakan udara sekitar sebagai sistem pendingin. Metode ini biasanya digunakan untuk transformator type kering dengan kapasitas daya sampai 1,5 MVA.

2.) A.F (Air Force)

Metode ini juga digunakan pada transformator type kering. Udara ditiupkan paksa ke permukaan tangki untuk menambah laju desipasi panas. Kipas- kipas pendingin dinyalakan saat temperatur pada belitan meningkat diatas batas yang diperbolehkan.

3.) ONAN (Oil Natural Air Natural)

Merupakan pendingin yang menggunakan sirkulasi minyak dan udara dengan alami. Sirkulasi minyak dan udara dipengaruhi oleh suhu kumparan transformator dan dipasang radiator tipe sirip untuk sirkulasi udara dengan alami.

4.) ONAF (Oil Natural Air Force)

Merupakan pendingin yang menggunakan sirkulasi minyak dengan alami dan sirkulasi udaranya dengan buatan yaitu dibantu dengan kipas angin

5.) OFAF (Oil Force Air Force)

Merupakan pendingin kumparan dengan minyak yang bersirkulasi secara buatan yaitu sirkulasi minyaknya digerakkan oleh pompa dan sirkulasi udaranya dengan buatan yaitu dibantu dengan kipas angin.

6.) OFWF (Oil Force Water Force)

Merupakan pendingin kumparan dengan minyak yang bersirkulasi secara buatan yaitu sirkulasi minyaknya dibantu oleh kekuatan pompa dan air sebagai pendingin luar yang bersirkulasi dengan buatan yaitu dibantu dengan kipas angin.

Untuk lebih lengkapnya tipe pendingin yang dipergunakan pada transformator dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tipe pendingin pada transformator

No	Macam Sistem pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	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			

*)IEC tahun 1976

2. Tap Changer (Perubahan Tap)

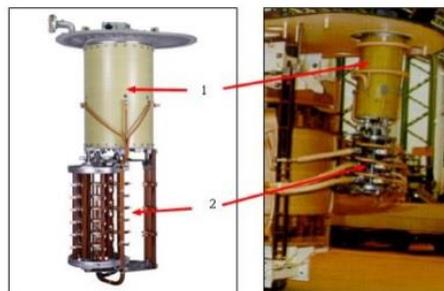
Tap changer adalah alat perubah perbandingan transformasi guna mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai yang diinginkan meskipun tegangan primer yang berubah-ubah (Kodoati dkk,2015). Ada dua cara pengoperasian tap changer yaitu :

- a. Tap changer yang dioperasikan secara manual pada kondisi transformator tidak berbeban (*Off Load Tap Changer*).
- b. Tap changer yang dioperasikan baik secara manual maupun secara otomatis dalam keadaan transformator berbeban (*On Load Tap Changer*)

Tap changer terdiri dari :

- a. *Selector Switch* adalah rangkaian mekanis yang tersusun atas terminal-terminal untuk menentukan posisi tap/ratio belitan primer.
- b. *Diverter Switch* adalah rangkaian mekanis yang didesain untuk melakukan atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.
- c. Tahanan transisi adalah tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.

kompertemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah dikarenakan oleh aktifitas tap changer yang lebih dinamis daripada belitan utama dan inti besi.



Gambar 2.3. Tap changer

(Sumber : <http://belajar-ilmu-listrik.blogspot.com/2017/12/tap-changer-trafo.html>)

Keterangan :

1. Kompartemen *Diverter Switch*
2. Selektor Switch

Media pendingin atau pemadam proses switching pada *diverter switch* tersusun atas dua jenis, yaitu media minyak dan media vaccum. Media pemadam minyak akan menghasilkan energi *arcing* yang membuat minyak terurai menjadi gas C₂H₂ dan karbon sehingga dibutuhkan penggantian minyak pada waktu tertentu. Sedangkan media pemadam vaccum proses pemadaman *arcing* pada saat switching akan dilokalisir dan tidak merusak minyak.

Tap changer yang terpasang di transformator gardu induk pada umumnya hanya bisa dioperasikan pada transformator dalam kondisi dan biasanya terpasang di sisi primer. Adapun tap changer yang digunakan pada transformator kapasitas kecil atau transformator penaik tegangan di pembangkit pada umumnya dioperasikan hanya pada saat trafo tenaga tanpa beban.

3. Alat Pernapasan (*Silicagel*)

Suhu minyak transformator dapat berubah-ubah yang disebabkan oleh pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar. Kenaikan suhu minyak akan menyebabkan minyak memuai sehingga udara dalam transformator terdesak keluar, sedangkan penurunan suhu minyak akan menyebabkan penyusutan volume minyak sehingga udara luar akan mengisi kekosongan dalam tangki. Proses diatas disebut sebagai pernapasan transformator (Wardi,2015).

Dalam proses pernapasan transformator, perlu adanya suatu alat penunjang pernapasan transformator tersebut berupa tabung berisi zat hyroskopis yang dipasang pada ujung pipa penghubung udara luar. Alat tersebut digunakan untuk mencegah singgungan antara minyak dengan udara luar yang dapat menyebabkan penurunan tegangan tembus minyak transformator.



Gambar 2.4. *Silicagel*

(Sumber : <http://meriwardana.blogspot.com/2013/10/prinsip-kerja-trafo-transformator-trafo.html>)

4. Indikator

a . Thermometer

Thermometer digunakan sebagai pengukur suhu dari transformator, baik suhu kumparan primer dan sekunder maupun suhu minyak transformator. Thermometer bekerja berdasarkan dasar air raksa (mercuri/Hg) yang tersambung dengan tabung pemuai dan jarum indikator derajat suhu.

Beberapa thermometer digabungkan dengan panas dari resistor khusus, yang tersambung dengan transformator arus dan ditempatkan pada salah satu fasa (fasa tengah) oleh karena itu hasil yang diperoleh merupakan relatif terhadap kebenaran dari panas yang terjadi.

b. Permukaan minyak

Alat ini digunakan untuk penunjukan tinggi permukaan minyak yang ada pada konservator. Ada banyak macam jenis penunjukan, yaitu seperti penunjukan langsung merupakan teknik memasang gelas penduga pada salah satu sisi konservator alhasil akan mudah mengetahui level minyak. Sedangkan penunjukan jenis lain apabila konservator didesain sedemikian rupa dengan

melengkapi seperti balon dari bahan elastis dan diisi oleh udara biasa dan dilengkapi alat pelindung seperti pada sistem pernapasan transformator sehingga proses pemuaian dan penyusutan minyak-udara yang masuk kedalam balon dalam keadaan kering dan aman.

2.2.5 Prinsip Kerja Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik elektromagnetik statis yang digunakan untuk mengubah dan memindahkan daya listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, menggunakan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana pada sisi primer dan sisi sekunder, perbandingan tegangan berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.

Transformator dapat digunakan secara luas baik dalam sistem tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam Sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap kebutuhan, misalnya keperluan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik dengan jarak jauh ke konsumen. Penggunaan transformator yang sangat sederhana dan handal merupakan salah satu alasan penting dalam pemakaiannya dalam penyaluran tenaga listrik bolak-balik, Karena arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Pada penyaluran tenaga listrik terjadi kerugian sebesar I^2R watt, kerugian ini akan banyak berkurang apabila tegangan dinaikkan. Dengan demikian saluran-saluran tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang tinggi

Transformator dapat dioperasikan baik sebagai transformator penaik tegangan maupun transformator penurun tegangan. Transformator penaik tegangan (*step up*) yaitu transformator yang menerima energi pada tegangan rendah dan mengubah tegangan bolak-balik rendah menjadi tinggi, transformator ini memiliki jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak dari pada jumlah

lilitan kumparan primer ($N_s > N_p$). Sedangkan transformator penurun tegangan (*step down*) yaitu transformator yang diberi energi tegangan tinggi dan mengubah tegangan bolak-balik tinggi menjadi rendah, transformator ini mempunyai jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak dari pada jumlah lilitan kumparan sekunder ($N_p > N_s$).

Hubungan antara jumlah lilitan kumparan primer, tegangan primer, jumlah lilitan kumparan sekunder dan tegangan sekunder, dapat diketahui dengan rumus berikut:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

V_P = Tegangan primer (Volt)

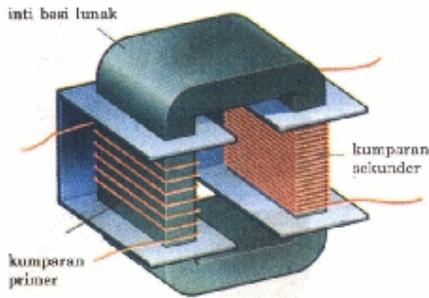
V_S = Tegangan sekunder (Volt)

N_P = Jumlah lilitan primer

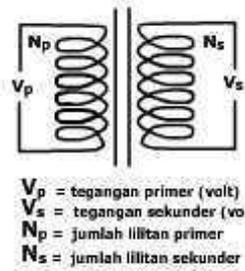
N_S = Jumlah lilitan sekunder

Dari rumus tersebut diketahui bahwa

1. Banyaknya lilitan primer sebanding dengan tegangan primer ($N_p \sim V_p$)
2. Banyaknya lilitan sekunder sebanding dengan tegangan sekunder ($N_s \sim V_s$)
3. Tegangan primer berbanding terbalik dengan jumlah lilitan sekunder
 $(V_p \sim \frac{1}{N_s})$
4. Sebaliknya Tegangan sekunder berbanding terbalik dengan jumlah lilitan primer
 $(V_s \sim \frac{1}{N_p})$



a.



V_p = tegangan primer (volt)
 V_s = tegangan sekunder (volt)
 N_p = jumlah lilitan primer
 N_s = jumlah lilitan sekunder

b.

Gambar 2.5 a. bagian-bagian trafo dan b. hubungan antara jumlah lilitan dan tegangan baik pada primer maupun sekunder

(Sumber : <http://duniaelektronika.blogspot.com/2013/02/prinsip-kerja-transformator-atau-trafo.html>)

2.2.6 Pengaruh Pembebanan pada Transformator Daya

2.2.6.1 Kenaikan Beban

Transformator dalam keadaan bertegangan dan belum dibebani akan timbul rugi-rugi yang dapat menimbulkan kondisi trafo tersebut panas, namun panas yang timbul kecil Transformator mempunyai batas panas yang diijinkan sesuai dengan klas isolasi spesifikasi trafo. Demikian juga minyak isolasi trafo mempunyai batas panas yang diijinkan. Apabila panas-panas tersebut dilampaui maka isolasi akan rusak dan secara keseluruhan transformator tersebut akan rusak. Panas tersebut harus direduksi dengan memasang sistem pendingin.

Untuk menentukan rasio pembebanan transformator, menurut IS : 6600 - 1972 dapat menggunakan persamaan dibawah ini :

$$k = \frac{S}{S_r} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

k = Rasio pembebanan

S = persentase pembebanan (%)

S_r = pembebanan penuh = 100 %

2.2.6.2 Kenaikan Suhu

Isolasi yang biasa dipakai dalam transformator bisa cepat sekali menjadi buruk apabila dikenai panas dengan suhu diatas 100^oC secara terus menerus. Suhu diatas 100^oC ini hanya dapat ditahan dalam selang waktu yang relatif singkat, namun efek komulatif dan hubungan antara suhu dengan waktu tidak dapat ditentukan.

Kenaikan suhu pada belitan, inti dan minyak trafo dirancang untuk pemakaian dengan ketinggian tidak lebih dari 1000 meter diatas permukaan laut. Untuk transformator yang menggunakan media pendingin air, maka suhu air tidak boleh lebih dari 25^oC, sedangkan untuk transformator yang menggunakan media pendingin udara, maka suhu udaranya tidak boleh lebih dari 40^oC dan tidak boleh dibawah -25^oC untuk pemasangan luar dan tidak boleh dibawah -5^oC untuk pemasangan dalam. Sebagai tambahan untuk pendinginan dengan udara, suhunya tidak melebihi:

1. Rata-rata 30^oC untuk satu hari
2. Rata-rata 20^oC untuk satu tahun

Kenaikan suhu belitan dapat diukur dengan metode Resistansi atau metode Thermometer. Dengan metode Resistansi kenaikan suhu dapat ditentukan dengan persamaan :

$$t_2 - t_1 = t_1 - t_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} 344,5 + t_1 \dots \dots \dots (2.3)$$

R₂ = Tahanan lilitan panas (ohm)

R₁ = Tahana lilitan dingin (ohm)

t₂ = Suhu panas lilitan (^oC)

t₁ = Suhu lilitan pada awal percobaan (^oC)

Di dalam transformator minyak timbulnya panas akibat rugi besi dan rugi tembaga di dinginkan dengan minyak transformator. Bila keadaan ini

berlangsung terus-menerus lama kelamaan minyak transformator akan menjadi panas. Dengan kenaikan suhu minyak, komposisi minyak transformator akan mengalami perubahan melalui reaksi kimia. Terjadinya reaksi tersebut akan menghasilkan zat (persenyawaan) lain dan akan mengubah sifat dari minyak transformator. Perubahan-perubahan itu antara lain :

- a. Warna coklat (hitam)
- b. Kadar asam tinggi
- c. Mengandung endapan (kotor)
- d. Kekuatan daya elektrik menurun
- e. Viskositas tinggi

Apabila perubahan-perubahan tersebut dibiarkan dapat menyebabkan turunnya nilai isolasi dari minyak.

2.2.6.3 Penuaaan Isolasi

Thermal stress, kandungan air dan oksigen mempengaruhi tingkat penurunan bahan isolasi. Komponen yang paling penting dari sistem isolasi kertas adalah yang membungkus lilitan konduktor tembaga atau aluminium yang tidak mudah diganti. Isolasi dari minyak mineral yang berkualitas baik diperkirakan berlangsung berumur 30 tahun atau lebih sebelum membentuk asam dan lumpur yang berlebihan.

Untuk minyak isolasi walaupun penting, tetapi tidak sebegitu penting seperti isolasi kertas karena mudah direkondisi, reklamasi ataupun diganti. Oleh karena itu, umur *cellulosic* material (isolasi kertas, menjadi faktor pembatas dalam operasi transformator. Sebagian besar isolasi padat yang digunakan di dalam transformator daya mempunyai karakteristik-karakteristik mekanis dan elektrik yang baik. Sifat ini akan berkurang apabila di pergunakan pada suhu yang tinggi dan untuk selanjutnya lama-kelamaan akan mengakhiri umur trafo.

Penurunan kemampuan suatu bahan isolasi akibat panas, biasa disebut dengan penuaan (*Ageing*) dan hal ini merupakan faktor utama yang membatasi

kemampuan pembebanan atau kemampuan mempertahankan umur perkiraan dari transformator tenaga.

Akibat utama dari penuaan adalah menurunnya kekuatan mekanis dan elektris dari isolasi belitan transformator. Biasanya penuaan ini terjadi secara perlahan-lahan. Artinya penuaan adalah akibat dari salah satu atau lebih dari reaksi kimia.

Karena terjadi penuaan pada isolasi, maka faktor disipasi tahanan listriknya akan berkurang. Hal ini akan menambah rugi-rugi dielektrik. Rugi-rugi akan menghasilkan panas yang selanjutnya akan menyebabkan suhu isolasi akan menjadi naik. Dengan naiknya suhu isolasi maka penuaan akan bertambah besar, yang selanjutnya akan memperbesar rugi-rugi dielektrik dan demikian untuk seterusnya.

Faktor penuaan isolasi kertas yaitu diantaranya efek suhu, air dan oksigen yang merupakan faktor penting dalam penuaan kertas isolasi (selulosa) dan minyak . proses penuaan telah dibahas secara luas melalui tes mempercepat penuaan dan pengalaman lapangan.

1. Efek dari suhu

Secara umum dapat dinyatakan bahwa penyebab utama kemunduran isolasi kertas adalah dari ketidakstabilan panas. Penurunan isolasi kertas menurut Arrhenius, ia mengungkapkan pengaruh suhu terhadap penuaan dengan persamaan bahwa untuk setiap kenaikan suhu 6 sampai 8 °C, umur isolasi kertas dibagi dua. Sebagai contoh, jika suhu operasi isolasi adalah 40 °C, masa pakai isolasi yang diperkirakan 110.000 tahun. Namun jika isolasi yang sama ini terkena suhu 140 °C maka diperkirakan masa pakainya hanya sekitar satu tahun. Apabila temperatur *hotspot* transformator melebihi 140 °C maka akan menimbulkan gelembung-gelembung gas pada minyak transformator.

2. Efek air

Efek air pada penuaan kertas adalah sangat signifikan dan merugikan. Tingkat penurunan kertas berbanding lurus dengan kadar. Sebagai contoh, mengurangi kadar air dalam kertas dari 1,0 % menjadi 0,5 % akan menggandakan umur kertas. Untuk isolasi kertas *thermal-upgrade* kurang sensitif terhadap efek air daripada kertas kraft.

3. Efek dari oksigen

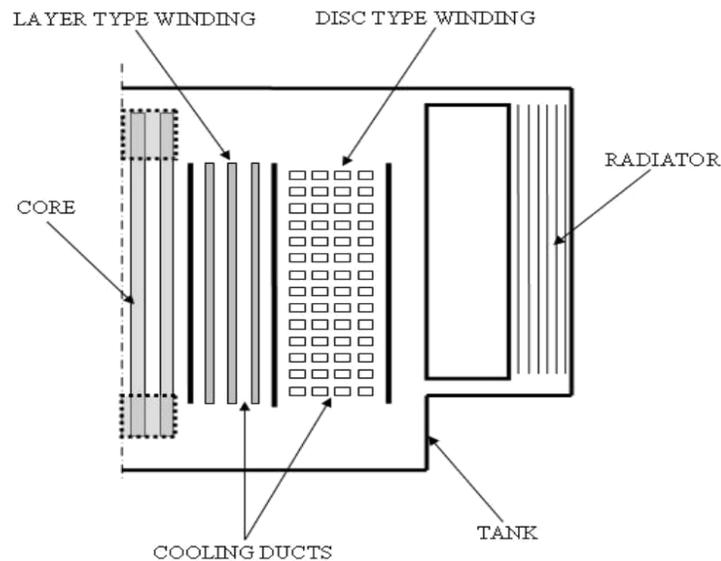
Penuaan kertas dipengaruhi oleh adanya oksigen meskipun tidak setingkat dengan minyak. Isolasi kertas *thermal-upgrade* bahkan kurang sensitif terhadap efek oksigen daripada kertas kraft. Perbandingan antara efek lingkungan yang mengandung oksigen tinggi dibandingkan dengan lingkungan oksigen rendah terhadap penuaan kertas kraft adalah 2,5 : 1.

Umur yang diharapkan saat kondisi kering (0,5 % air) kertas kraft biasa dalam lingkungan oksigen tinggi adalah sekitar 4 tahun melakukan operasi pada suhu 100°C (kenaikan suhu hotspot yang diharapkan pada name plate 55°C) sebaliknya umur yang diharapkan saat kondisi kering untuk kertas kraft *thermal-upgrade* dalam lingkungan oksigen rendah beroperasi pada suhu 110°C (kenaikan suhu hotspot yang diharapkan pada name plate 65°C) adalah sekitar 18 tahun.

Sistem isolasi pada transformator mempunyai tujuan untuk mengisolasi antar kumparan transformator dan mengisolasi kumparan transformasi dengan dinding transformator atau dengan ground. Isolasi merupakan bagian terpenting dari transformator yang harus dipelihara, umur isolasi merupakan umur dari transformator tersebut.

Kecepatan kerusakan isolasi akibat penuaan bahan isolasi selain ditentukan oleh besarnya panas yang terjadi juga lamanya panas yang dialaminya. Disamping itu adanya air, bocornya tangki transformator, adanya

oksigen diatas minyak transformator juga akan mempercepat proses penuaan transformator.



Gambar 2.6. Potongan melintang transformator terendam minyak
(Sumber : Sigid, 2009)

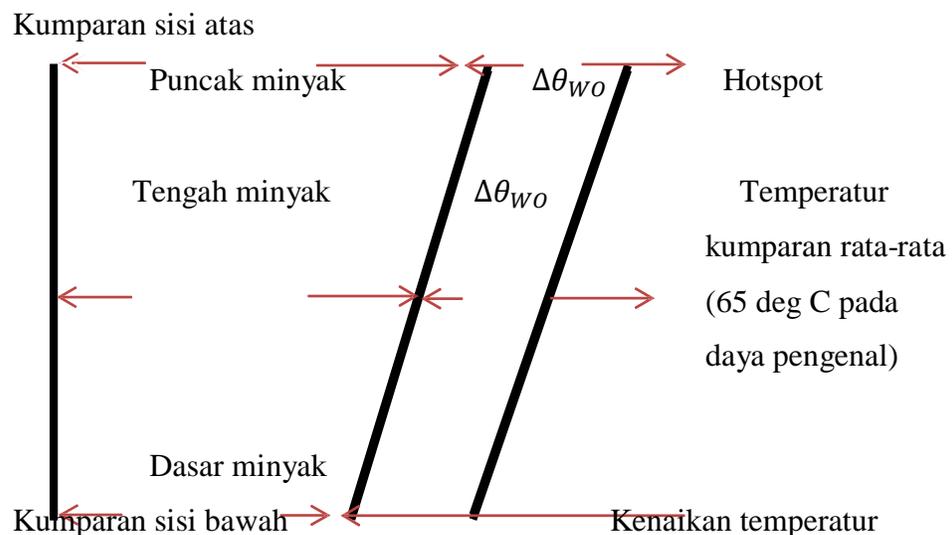
Untuk peralatan transformator yang direndamkan kedalam minyak dapat dilihat pada gambar diatas. Minyak juga berfungsi sebagai penghambat kerusakan isolasi yaitu dengan cara memperlambat terjadinya oksidasi pada isolasi dan penguraian. Apabila minyak bersenyawa dengan zat asam, yang secara keseluruhan cenderung akan mempercepat proses penuaan isolasi. Faktor lain yang mempengaruhi proses kerusakan yang berlangsung dengan bebas pada kecepatan berlainan sehingga kesulitan untuk menentukan penyebab kerusakan yang lebih dominan.

Untuk setiap peralatan yang mempunyai tugas memberikan pelayanan akan mempunyai suatu batas umur dimana suatu peralatan tersebut tidak dapat dipakai lagi. Umur perkiraan transformator daya disini didefenisikan dengan timbulnya panas yang diakibatkan karna adanya pembebanan, sehingga transformator tersebut mengalami kegagalan dalam melaksanakan fungsinya. Memang belum

diperoleh cara untuk menetapkan perhitungan umur perkiraan yang lebih baik dari yang lainnya. Dalam hal ini telah banyak percobaan-percobaan yang dilakukan untuk menentukan umur perkiraan tetapi mempunyai hasil yang berlainan. Ini disebabkan karna percobaan-percobaan yang dilakukan mempunyai ukuran nilai akhir umur yang berbeda-beda.

2.2.7. Penentuan Kenaikan temperatur

2.2.7.1 Pengasumsian dengan Diagram Thermal



Gambar 2.7. Diagram thermal

(Sumber : IS : 6600 – 1972)

Kenaikan temperatur dapat diasumsikan dengan diagram thermal sederhana seperti ditunjukkan gambar 2.7. 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. Tetapi perbedaan ini tidak dipertimbangkan dengan cukup signifikan untuk memvalidasi metode.

Metode ini disederhanakan sebagai asumsi yang telah dibuat sebagai berikut (Muzar, 2018):

- a. Temperatur minyak bertambah secara linear sesuai kumparan
- b. Kenaikan temperatur rata-rata minyak adalah sama untuk semua kumparan dari kolom yang sama
- c. Perbedaan temperatur antara minyak pada puncak kumparan (asumsinya sepadan dengan yang ada di puncak) dan minyak yang berada di dasar kumparan (asumsinya sepadan dengan yang di pendingin) adalah sama untuk semua bagian kumparan.
- d. Kenaikan temperatur rata-rata dari tembaga pada setiap posisi diatas kumparan meningkat secara linear sejalan dengan kenaikan temperatur minyak yang mempunyai selisih konstan $\Delta\theta_{WO}$ antara dua garis lurus ($\Delta\theta_{WO}$ adalah selisih antara kenaikan temperatur rata-rata tahanan dan kenaikan rata-rata minyak).
- e. Kenaikan temperatur rata-rata puncak kumparan adalah kenaikan temperatur rata-rata minyak ditambah $\Delta\theta_{WO}$.
- f. Kenaikan temperatur *hotspot* 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. Sehingga kenaikan temperatur *hotspot* adalah sepadan dengan kenaikan temperatur *top oil* $1,1 \times \Delta\theta_{WO}$.

2.2.7.2 Kondisi untuk Nilai Daya tertentu

1. Sirkulasi Minyak Alami

Transformator daya yang dipengaruhi oleh pembebanan dan suhu terdapat dalam berbagai macam kondisi salah satunya pada kondisi nilai daya tertentu. Nilai tersebut berupa kenaikan suhu rata-rata kumparan, kenaikan suhu rata-rata minyak, perbedaan antara kedua kenaikan suhu tersebut dan kenaikan suhu *top oil*. Nilai-nilai kenaikan tersebut dapat diketahui sebagai berikut :

Kenaikan temperatur rata-rata kumparan (diukur dengan tahanan) = 65⁰C

Kenaikan temperatur *top oil* ($\Delta\theta_{br}$) = 55⁰C

Kenaikan temperatur rata-rata minyak = 45⁰C

Perbedaan antara kenaikan temperatur rata-rata kumparan

Dengan kenaikan rata-rata temperatur minyak $\Delta\theta_{wo}$ = 21⁰C

Menurut (Sigid,2011) Kenaikan temperatur *hotspot* ($\Delta\theta_{cr}$) disusun sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_b + 1,1 \Delta\theta_{wo} \dots\dots\dots(2.4) \\ &= 55 + 23 \\ &= 78^\circ\end{aligned}$$

2. Sirkulasi minyak paksaan

Perbedaan kenaikan temperatur minyak antara inlet dan outlet akan terjadi, pada umumnya lebih kecil dibanding dengan sirkulasi minyak secara alami. Dengan 65⁰C kenaikan temperatur yang terukur oleh tahanan, kenaikan temperatur *hotspot* mungkin tidak melebihi 75⁰C. Bagaimanapun juga hal ini diperlukan untuk margin yang sama, yang masih diperbolehkan 13⁰C di atas kenaikan temperatur rata-rata kumparan 65⁰C, untuk mencapai kenaikan temperatur *hotspot* pada nilai daya tertentu.

Pada umumnya kerapatan arus kerja yang digunakan lebih tinggi dibandingkan dengan sirkulasi minyak alami dan lebih ekonomis untuk memperoleh kenaikan temperature rata-rata minyak dan nilai yang lebih tinggi dari $\Delta\theta_{wo}$. Oleh karenanya, kenaikan temperatur *top oil* dari 40⁰C dan kenaikan temperatur *hotspot* 78⁰C pada nilai daya tertentu telah diasumsikan

sebagai kondisi yang lebih sederhana. Menurut (Sigid,2011) Kenaikan temperatur hot spot ($\Delta\theta_{cr}$) disusun sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_b) \dots\dots\dots(2.5) \\ &= 40 + 38 \\ &= 78^\circ \end{aligned}$$

2.2.7.3 Kondisi untuk Beban Stabil

1. Kenaikan Temperatur Top Oil

Kenaikan temperatur ini sepadan dengan kenaikan temperatur *top oil* pada nilai daya yang dikalikan ratio dari total kerugian eksponen *x*. menurut (pandapotan dan warman, 2013) kenaikan temperatur ini dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1+dk^2}{1+d}\right)^x \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

k = ratio pembebanan

d = 5,

x = konstanta (ketetapan)

x = 0,9 (untuk ONAN dan juga ONAF)

x = 1,0 (untuk OFAF dan juga OFWF)

$\Delta\theta_{br}$ = temperatur (suhu)

Untuk $\Delta\theta_{br} = 55^\circ\text{C}$ untuk ON, dan $\Delta\theta_{br} = 40^\circ\text{C}$ untuk OF, spesifikasi dalam sub bab 41.7.1 publikasi IEC .76 (1967) dikarenakan mengikuti tabel tunggal yang diatur untuk digunakan pada kedua jenis pendinginan dengan kesalahan yang tidak lebih dari $\pm 2\%$.

Nilai *d* secara relatif tidak penting pada beban tinggi hanya memberikan secara garis besar tinggi atau rendahnya kenaikan temperatur. Lebih dari itu ini di kompensasi untuk seberapa besar korespondensinya dengan naik atau turunnya temperatur minyak pada beban rendah.

2. Kenaikan Temperatur *Hotspot*

Untuk mengetahui kenaikan temperatur *hotspot* $\Delta\theta_c$ untuk beban yang stabil, menurut (IS : 6600 – 1972) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})k^2y \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b \left(\frac{1+dk^2}{1+d}\right)^2 + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})k^2y \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

$$\Delta\theta_{cr} = 78^\circ\text{C}$$

$$d = 5$$

y = konstanta

y = 0,8 (untuk ONAN dan juga ONAF)

y = 0,9 (untuk OFAF dan juga OFWF)

$\Delta\theta_{br}$ = temperatur (suhu)

$\Delta\theta_{br} = 55^\circ\text{C}$ dalam keadaan ON sedangkan $\Delta\theta_{br} = 40^\circ\text{C}$ dalam keadaan OFF

3. Selisih temperatur antara *hotspot* dengan *top oil*

Untuk selisih temperatur antara *hot spot* dengan *top oil*, menurut (Sigid, 2011) dapat digunakan persamaan berikut :

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan :

$$\Delta\theta_{td} = \text{Selisih temperatur antara } \textit{hotspot} \text{ dengan } \textit{top oil} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\Delta\theta_{cr} = 78^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{br} = 55^\circ\text{C}$$

k = Ratio pembebanan

y = konstanta

y = 0,8 (Untuk ONAN dan juga ONAF)

y = 0,9 (Untuk OFAF dan juga OFWF)

2.2.8 Kondisi untuk Beban yang Berubah

1. Perhitungan Kenaikan Temperatur *Top Oil*

Menurut (Pandapotan dan Warman, 2013) Kenaikan temperatur *top oil* ($\Delta\theta_{on}$) pada waktu t setelah pemberian beban adalah sangat mendekati untuk kenaikan eksponensial berikut :

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_o (n - 1) + (\Delta\theta_b - \Delta\theta_o (n - 1))(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \dots \dots \dots (2.10)$$

Dengan :

$\Delta\theta_o$ adalah kenaikan temperatur awal minyak

$\Delta\theta_b$ adalah kenaikan temperatur akhir minyak yang telah di stabilkan, berhubungan dengan beban seperti dihitung dalam sub bab sebelumnya.

τ = konstanta waktu minyak dalam jam

$\tau = 3$ (ONAN dan ONAF)

$\tau = 2$ (OFAF dan OFWF)

t = waktu dalam jam.

2. Perhitungan Kenaikan Temperatur *Hotspot*

Kenaikan temperatur *hotspot* pada waktu tertentu sebelum kondisi distabilkan adalah mendekati perkiraan dengan asumsi bahwa kenaikan temperatur *hotspot* diatas adalah kenaikan temperatur *top oil* yang terbentuk dengan seketika.

Menurut IEEE C57.92-1981 Kenaikan temperatur *hotspot* pada waktu tertentu sama dengan :

$$\Delta\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana :

$\Delta\theta_c$ = Kenaikan temperatur *hotspot* ($^{\circ}\text{C}$)

θ_a = temperatur ambient (suhu lingkungan sekitar)

$\Delta\theta_{on}$ = kenaikan temperatur *top oil* ($^{\circ}\text{C}$)

$\Delta\theta_{td}$ = Selisih temperatur antara *hotspot* dengan *top oil* ($^{\circ}\text{C}$)

2.2.9 Penuaan Isolasi Belitan Transformator

2.2.9.1 Hukum *Deterioration*

Umur isolasi dipengaruhi oleh pemburukannya seiring dengan panas dan waktu, dijelaskan dalam hukum arhenius sebagai berikut :

$$D = e^{\alpha + \beta / T} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

D = Umur transformator yang diharapkan

α dan β konstan (diperoleh dari pengujian beberapa material isolasi yang tersedia)

T = temperatur mutlak dari temperatur *hotspot*.

Untuk level temperatur operasi transformator, *Montsinger* memberikan persamaan yang lebih sederhana.

$$D = ke^{-pv} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dengan :

v = temperatur *hotspot* dalam derajat celcius

k dan v = material konstan

Selama tidak disebutkan kriteria kapan umur isolasi akan berakhir tidak mudah menetapkan pernyataan tetap dalam persamaan 2.12 dan 2.13. Khusus untuk α dan k adalah valid, khusus untuk p dan β belum begitu diketahui. Hal tersebut merupakan alasan utama mengapa fungsi penuaan relatif diperkenalkan.

Umur yang diharapkan dinyatakan dalam nilai per unit terhadap nilai umur saat kondisi temperatur Vn dan θcr beban terpasang, dalam kenyataannya malah yang digunakan nilai umur relatif atau disebut juga penuaan thermal relatif dinyatakan V disebut juga susut umur relatif.

2.2.9.2 Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif

Dalam menentukan nilai relatif dari umur pemakaian sebuah transformator dapat menggunakan hubungan *Montsinger*. Hubungan *Monsinger* sekarang telah digunakan untuk memperoleh nilai relatif dari umur pemakaian pada temperatur θ_c , dibandingkan dengan nilai normal dari nilai normal dari umur pemakaian pada temperatur θ_{cr} . Menurut (IS :6600 -1972) untuk mengetahui laju penuaan Thermal Relatif dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V = \frac{\text{laju penggunaan umur saat } \theta_c}{\text{laju penggunaan umur saat } \theta_{cr}} \dots\dots\dots(2.14)$$

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

Persamaan diatas bila diubah kedalam bentuk Log10 akan menjadi :

$$V = 10^{(\theta_c - 98)/19,93} \dots\dots\dots(2.15)$$

Keterangan

V = nilai relatif dari umur pemakaian

$\theta_{cr} = 98^{\circ}\text{C}$ menurut publikasi IEC 76 (1967)

2.2.9.3 Perhitungan Pengurangan umur transformator

Besarnya susut umur pada transformator karena pengaruh penurunan isolasi belitan saja tanpa memperhitungkan pengaruh yang lain, menurut (Sigid, 2011) dapat dihitung sebagai berikut:

$$L = \frac{h}{3T} \{ VO + \sum 4 V_{odd} + \sum 2 V_{odd} + V_n \} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

L = Susut Umur (P.u)

h = Konstanta = 1

T = Waktu

Vodd, Veven = Laju penuaan thermal relatif.

Vodd untuk nilai V ganjil, Veven untuk nilai V genap.

2.2.9.4 Perhitungan Perkiraan Sisa Umur Transformator

Untuk menghitung perkiraan sisa umur transformator daya, menurut (pandapotan dan warman, 2013) dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$n = \frac{\text{umur dasar (tahun)} - \text{lama transformator sudah dipakai (tahun)}}{\text{susut umur transformator (pu)}} \dots(2.17)$$