

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tranformator Daya

Transformator adalah suatu alat untuk memindahkan daya listrik arus bolak-balik dari suatu rangkaian ke rangkaian lainnya secara induksi elektromagnetik[15]. Bentuk nyata dari transformator daya dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Transformator Daya

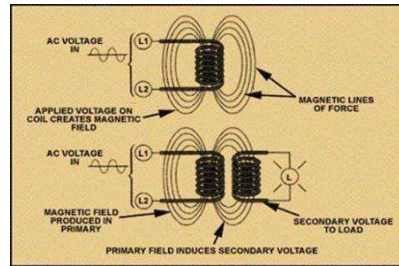
Dalam proses penyaluran energi listrik, transformator bisa dianggap sebagai pusat dari sistem transmisi dan distribusi[10]. Dalam konteks ini, transformator diharapkan dapat berfungsi dengan efisien (jika memungkinkan tanpa henti).

Mengingat beban kerja yang berat dari sebuah transformator seperti itu, perlu dipastikan bahwa transformator telah memenuhi syarat untuk dioperasikan pada standar yang berlaku

Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum-hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet atau fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.

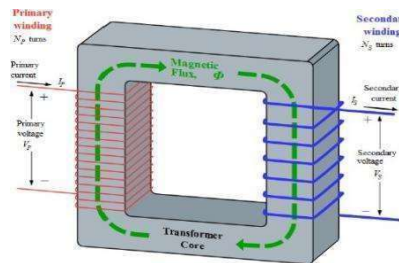
Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan fluks magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat di antara dua belitan tersebut,

fluks magnet tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial atau yang disebut dengan tegangan induksi[13]. Prinsip hukum elektromagnetik dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Prinsip Hukum Elektromagnetik

Gambaran elektromagnet yang terjadi pada transformator dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3 Elektromagnet pada Transformator

Ketika kumparan utama dihubungkan dengan tegangan (sumber), maka aliran arus bolak-balik I1 akan terjadi pada kumparan itu. Karena adanya inti pada kumparan, arus I1 akan menghasilkan fluks magnet yang bervariasi di dalam intinya. Perubahan fluks magnet ini akan menyebabkan terjadinya GGL Induksi pada kumparan primer (E1). Berdasarkan buku karangan Sumanto dengan judul “Teori Transformator” rumus perhitungan GGL induksi dapat dijabarkan pada poin berikut ini.

$$E1 = - N1 \frac{d\phi}{dt}$$

Keterangan:

E_1 = Tegangan induksi sisi primer (Volt)

N_1 = Total jumlah lilitan pada kumparan primer

$d\phi$ = Variasi garis-garis medan magnet dalam satuan Weber (1 Weber = 108 maxwell)

dt = Perubahan waktu dalam satuan detik

Fluks magnet yang menginduksi GGL induksi E_1 juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks). Dengan demikian fluks tersebut menginduksi GGL induksi E_2 pada kumparan sekunder.

Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah

$$E_2 = - N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

E_2 = GGL induksi di sisi sekunder (Volt)

N_2 = Jumlah lilitan kumparan sekunder

Dari persamaan (1) dan (2) didapatkan perbandingan lilitan berdasarkan perbandingan GGL induksi yaitu :

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

a = nilai perbandingan lilitan transformator (*turn ratio*)

Apabila transformator dianggap ideal, sehingga tidak terdapat kerugian-kerugian daya, maka daya input (P_i) dapat dianggap sama dengan daya output (P_o) maka :

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

U_1 = Tegangan yang terdapat
pada lilitan primer (Volt)

U_2 = Tegangan yang terdapat
pada lilitan sekunder (Volt)

I_1 = Arus yang mengalir di
lilitan primer (Ampere)

I_2 = Arus yang mengalir di lilitan sekunder (Ampere) [15]

IEC menentukan bahwa masa pakai transformator daya adalah 20 tahun, yang setara 7.300 hari, ketika beroperasi pada 100 % dari kapasitas daya yang tertera, dalam suhu sekitar 20°C[17].

2.2 Jenis Transformator

Transformator dapat dikategorikan berdasarkan fungsi atau penggunaannya, seperti :

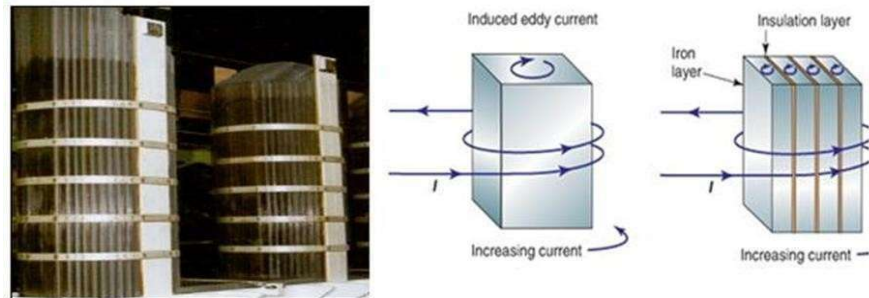
1. Transformator untuk mesin (pembangkit)
2. Transformator untuk Gardu Induk
3. Transformator untuk Distribusi[13]

2.3 Bagian-bagian Transformator dan Fungsinya

2.3.1 Electromagnetic Circuit (Inti Besi)

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya fluks yang timbul akibat induksi arus bolak-balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi, sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Inti besi dibentuk dari lempengan-lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi *eddy current* yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi-rugi (*losses*). Bentuk dari

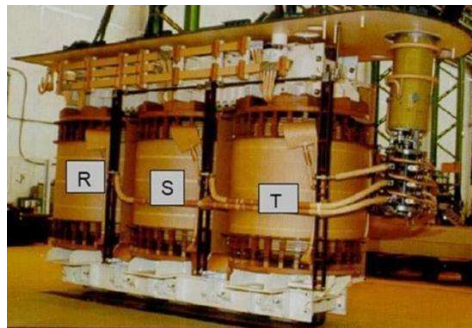
inti besi itu sendiri dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4 Inti Besi

2.3.2 Current Carrying Circuit (Winding)

Current carrying circuit atau yang lebih dikenal dengan belitan merupakan bagian transformator yang terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik (AC) mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan fluks magnetik. Bentuk nyata dari belitan transformator dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5 Belitan Transformator

2.3.3 Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. *Bushing* terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor *bushing* dengan *body main tank trafo*. Secara garis besar *bushing* dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu:

1. Isolasi

Berdasarkan pada jenis media isolasi yang digunakan dalam bushing, bushing transformator dapat dikategorikan menjadi dua tipe yaitu:

a. *Bushing Kondenser*

Bushing kondenser biasa digunakan untuk tegangan *rating* mulai dari 72,5 kV ke atas. Ada tiga jenis media isolasi yang terdapat dalam *Bushing kondenser*, yaitu:

1. *Resin Bonded Paper (RBP)*

Bushing dengan tipe *Resin Bonded Paper* atau RBP merupakan teknologi awal dalam *bushing kondenser* yang kini sudah ditinggalkan. Saat ini, pabrikan dan pengguna sudah tidak lagi menggunakan *Resin Bonded Paper* atau RBP.

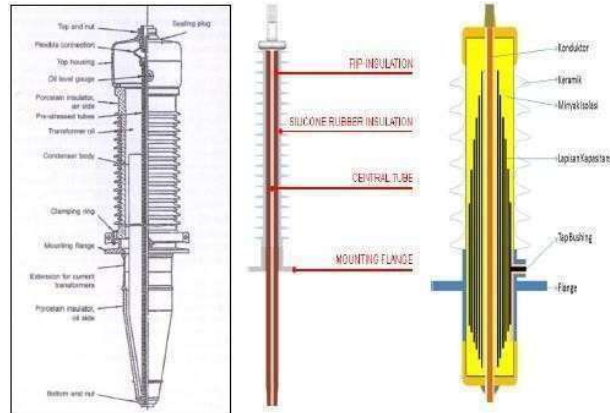
2. *Oil Impregnated Paper (OIP)*

Tipe *Oil Impregnated Paper* atau OIP menggunakan media isolasi berupa kertas yang terendam minyak, di mana minyak ini berfungsi untuk meresap kedalam kertas isolasi.

3. *Resin Impregnated Paper (RIP)*

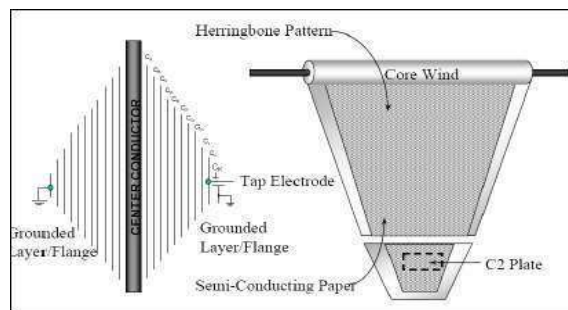
Untuk tipe *Resin Impregnated Paper* atau RIP, media isolasi yang digunakan pada tipe ini adalah kertas isolasi yang dicampurkan dengan resin.

Di dalam *bushing kondenser* terdapat banyak lapisan kapasitansi yang disusun secara seri berfungsi sebagai pembagi tegangan. Dalam *bushing* terdapat dua kapasitansi utama yang dikenal sebagai C1 dan C2. C1 merupakan kapasitansi antara konduktor dengan *tap bushing*, sedangkan C2 adalah kapasitansi dari *tap bushing* menuju *ground (flange bushing)*. Ketika beroperasi, *tap bushing* dihubungkan ke *ground*, sehingga pada saat itu C2 tidak ada nilainya ketika *bushing* operasi. Bagian-bagian dari *bushing* dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6 Bagian-bagian dari *Bushing*

Bentuk dari kertas isolasi pada *bushing* dengan jenis *oil impregnated paper* dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7 kertas isolasi pada *Bushing (oil impregnated paper bushing)*

Pada konduktor *bushing* yang dilapisi kertas isolasi dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8 konduktor *Bushing* dilapisi kertas isolasi

b. *Bushing non-Kondenser*

Bushing yang bukan jenis kondenser biasanya dipakai untuk tegangan yang memiliki rating maksimal 72,5. Bahan isolasi utama untuk *bushing non-kondenser* terdiri dari material padat seperti porselen atau

keramik.

2. Konduktor

Ada berbagai tipe konduktor yang digunakan dalam bushing transformator, seperti konduktor berongga yang memiliki besi penguat atau penegang ditengah lubang konduktor utama, serta konduktor yang padat dan fleksibel lead.

3. Klem Koneksi

Klem koneksi berfungsi sebagai penghubung antara stud bushing dan penghantar konduktor di luar bushing di luar bushing tersebut.

4. Aksesoris

Aksesoris untuk bushing mencakup indikator minyak, seal atau gasket, dan tap untuk pengujian. Seal atau gasket pada bushing ditempatkan di bagian bawah mounting flange.

2.3.4 Pendingin

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator tersebut. Oleh karena itu pendinginan yang efektif pada transformator sangat diperlukan. Pendingin atau yang biasa juga disebut radiator dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9 Radiator (pendingin)

Minyak yang digunakan untuk isolasi trafo tidak hanya berfungsi sebagai media isolasi, tetapi juga bertindak sebagai pendingin. Ketika minyak beredar, panas

yang dihasilkan dari lilitan trafo akan dibawa oleh minyak melalui jalur sirkulasinya dan didukung oleh sirip radiator untuk didinginkan. Proses ini dapat lebih efektif dengan bantuan kipas dan pompa sirkulasi untuk meningkatkan tingkat efisiensi pendingin, sistem pendingin trafo dibagi menjadi beberapa kategori sebagai berikut.

1. Tipe *Transformers* dengan pendingin kering

a. AN – *Air Natural* (Udara Alami)

Hanya dapat dipakai untuk tipe transformator kering (yaitu dengan balutan resin dan resin resapan).

b. AF – *Air Forced* (Udara Terpaksa)

Diterapkan pada jenis transformator Air Forced, di mana tekanan udara di dalam tangki tercapai secara paksa dengan menggunakan kipas yang diatur oleh sistem pengendali suhu pada tangki.

2. Pendinginan dengan minyak celup transformator

a. ONAN - *Oil Natural Air Natural*

Sistem pendingin ini mengandalkan sirkulasi minyak dan udara secara alamiah. Proses sirkulasi minyak terjadi karena perbedaan kerapatan antara minyak panas dan minyak dingin.

b. ONAF - *Oil Natural Air Forced*

Sistem ini menggunakan sirkulasi minyak yang bersifat alami, sementara sirkulasi udara dihasilkan secara paksa melalui hembusan kipas yang digerakan oleh motor listrik. Umumnya operasi trafo dimulai dengan ONAN atau ONAF, tetapi hanya sebagian dari kipas yang berfungsi. Ketika suhu trafo meningkat, kipas tambahan akan diaktifkan secara bertahap.

c. OFAN – *Oil Forces Air Natural*

dipaksa berlangsung dengan bantuan pompa, sedangkan sirkulasi udara bergerak cara alami.

d. OFAF - *Oil Forced Air Forced*

Untuk transformator dengan daya lebih 100 MVA, sistem pendingin ONAF tidak lagi memadai, sehingga aliran minyak bertekanan juga digunakan untuk meningkatkan efisiensi pendinginan selain aliran udara tekanan. Pompa berfungsi untuk memindahkan minyak dari bagian atas transformator (*outlet*) menuju *bank radiator* yang diletakan terpisah dari tangki dan terhubung melalui pipa keluar serta pipa masuk.

e. ONWF - *Oil Natural Water Forced*

Tipe ini merupakan sistem pendingin yang digunakan di lokasi-lokasi dengan ruang terbatas untuk minyak dan air yang bisa mengalir dengan bebas, dengan mengandalkan pompa untuk mendistribusikan air disekitar tabung radiator guna mendinginkan minyak transformator yang beredar melalui konveksi alami

f. OFWF - *Oil Forced Water Forced*

Metode ini mirip dengan pendekatan OFAF, namun dalam hal ini aliran air bertekanan digunakan untuk menghilangkan panas dari penukar panas. Minyak dipaksa mengalir melalui penukar panas dengan bantuan pompa, di mana energi panasnya dialihkan ke air yang juga digerakan secara paksa. Air panas kemudian diambil untuk didinginkan di perangkat pendingin terpisah. Tipe pendinginan ini diaplikasikan pada transformator yang sangat besar dengan peringkat beberapa ratus MVA.

Berbagai jenis pendingin yang tersedia pada transformator dapat dilihat pada tabel
Tabel 2 Jenis-jenis sistem Pendingin pada Transformator

No	Jenis Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Trafo		Diluar Trafo	
		Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alami	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.	ONWF	Minyak			Air
8.	OFWF		Minyak		Air
9.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
10.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
11.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
12.	ONAN/ONWF	Kombinasi 3 dan 7			
13.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 8			

2.1.2 *Oil Preservation dan Expansion (Konservator)*

Ketika suhu operasi pada trafo meningkat, minyak isolasi akan mengembang sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya ketika suhu operasi menurun, minyak akan menyusut dan volume minyak akan berkurang. *Konservator* berfungsi untuk menampung minyak pada saat trafo mengalami peningkatan suhu. Bentuk nyata dari konservator dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10 Konservator

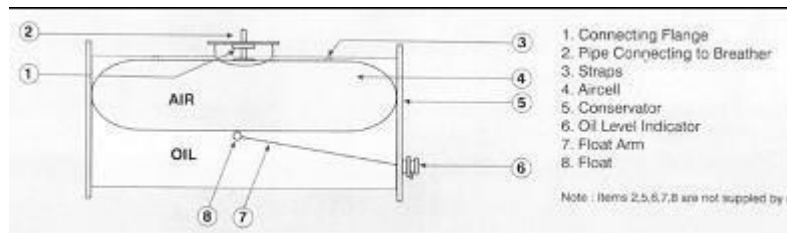
Sejalan dengan fluktuasi volume minyak dalam *konservator* yang disebabkan oleh pemuaian dan penyusutan akibat perubahan suhu pada trafo, jumlah udara di dalam konservator juga akan mengalami peningkatan dan penurunan. Penambahan atau pengeluaran udara dalam konservator akan berhubungan langsung dengan atmosfer di luar.

Untuk mencegah kontaminasi minyak isolasi trafo oleh kelembapan dan oksigen dari lingkungan, terutama pada tipe *konservator* yang tidak dilengkapi dengan *rubber bag*, udara yang masuk ke dalam *konservator* akan terlebih dahulu disaring melalui *silica gel* sehingga agar kadar uap dapat diminimalkan. Bentuk nyata dari *silica gel* yang terdapat pada transformator dapat dilihat pada gambar 11. Gambar 11 *Silica Gel*



Gambar 11 *Silica Gel*

Guna mencegah agar minyak dalam trafo tidak bersentuhan langsung dengan udara di sekitarnya atau udara luar, saat ini alat konservator telah dirancang dengan menggunakan kantong napas atau kantong karet, yaitu semacam balon karet yang di pasang di dalam wadah konservator. Konstruksi konservator dengan karet (rubber bag) dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12 Konstruksi Konservator dengan *Rubber Bag*

Silica gel itu sendiri memiliki keterbatasan dalam menyerap kadar uap air, sehingga pada waktu-waktu tertentu *silica* gel tersebut perlu dipanaskan bahkan bisa juga dilakukan penggantian. Untuk itu, pada transformator terdapat teknologi yang dikenal sebagai dehidrasi napas.

Dehidrasi Napas adalah teknologi yang dirancang untuk mempermudah perawatan *silica* gel pada transformator, di mana pada *dehidrasi napas* terdapat pemanasan otomatis yang akan aktif ketika *silica* gel

sudah mencapai tingkat kejenuhan tertentu. Bentuk nyata dari *dehydrating breather* dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13 *Dehydrating Breather*

2.1.3 *Dielectric* (Minyak Isolasi Trafo dan Isolasi Kertas)

1. Minyak Isolasi Trafo

Minyak isolasi pada trafo berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, napthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda. Bentuk nyata dari minyak transformator sendiri dapat dilihat pada gambar 14.



Gambar 14 Minyak Isolasi Trafo

2. Kertas isolasi trafo

Isolasi kertas berfungsi sebagai isolasi, pemberi jarak dan memiliki kemampuan mekanis[13]. Bentuk nyata dari kertas isolasi trafo dapat dilihat pada gambar 15.

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin, minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

Minyak transformator mempunyai unsur atau senyawa hidrokarbon, yang terkandung dalam minyak transformator ini adalah senyawa hidrokarbon parafinik, senyawa hidrokarbon naftenik dan senyawa hidrokarbon aromatik. Selain ketiga senyawa di atas minyak transformator masih mengandung senyawa yang disebut zat aditif meskipun kandungannya sangat kecil.

Minyak transformator adalah cairan yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak mentah. Selain itu, minyak ini juga berasal dari bahan organik, misalnya minyak piranol dan silikon, beberapa jenis minyak transformator yang sering dijumpai di lapangan adalah minyak transformator jenis Diala A, Diala B dan Mectrans.

Kenaikan suhu pada transformator akan menyebabkan terjadinya proses hidrokarbon pada minyak, nilai tegangan tembus dan kerapatan arus konduksi merupakan beberapa indikator atau variabel yang digunakan untuk mengetahui apakah suatu minyak transformator memiliki ketahanan listrik yang memahami persyaratan yang berlaku.

Secara analisis kimia, ketahanan listrik suatu minyak

transformator dapat menurun akibat adanya pengaruh asam dan pengaruh tercampurnya minyak dengan air. Untuk menetralkan keasaman suatu minyak transformator dapat menggunakan potas hidroksida (KOH). Sedangkan untuk menghilangkan kandungan air yang terdapat dalam minyak tersebut yaitu dengan cara memberikan suatu bahan higroskopis yaitu silika gel.

Dalam menyalurkan perannya sebagai pendingin, kekentalan minyak transformator ini tidak boleh terlalu tinggi agar mudah bersirkulasi, dengan demikian proses pendinginan dapat berlangsung dengan baik. Minyak transformator memiliki sifat semakin lama dan berat operasi suatu minyak transformator, maka minyak akan semakin kental. Bila kekentalan minyak tinggi maka sulit untuk bersirkulasi sehingga akan menyulitkan proses pendinginan transformator.

Sebagai bahan isolasi minyak transformator memiliki beberapa kekentalan, hal ini sebagai mana dijelaskan dalam SPLN (49-1:1980). Adapun persyaratan yang harus dipenuhi oleh minyak transformator adalah sebagai berikut.

1. Kejernihan

Kejernihan minyak isolasi tidak boleh mengandung endapan (sedimen).

2. Massa jenis

Massa jenis dibatasi agar air dapat terpisah dari minyak isolasi dan tidak melayang.

3. Viskositas kinematika

Viskositas memegang peranan penting dalam

pendinginan, yakni untuk menentukan kelas minyak.

4. Titik nyala

Titik nyala yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi zat gas yang mudah terbakar.

5. Titik tuang

Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi.

6. Angka kenetralan

Angka kenetralan merupakan angka yang menunjukkan penyusutan asam minyak dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, menunjukkan kecenderungan perubahan kimia atau indikasi perubahan kimia dalam bahan tambahan.

7. Korosi belerang

Korosi belerang kemungkinan dihasilkan dari adanya belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi.

8. Tegangan tembus

Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi seperti air, kotoran atau partikel konduktif dalam minyak.

9. Kandungan air

Adanya air dalam isolasi menyebabkan menurunnya tegangan tembus dan tahanan jenis minyak isolasi akan mempercepat kerusakan kertas pengisolasi[2].

2.1.4 Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan dianggap penting sebagai salah satu indikator kualitas tegangan. Trafo harus mampu menghasilkan tegangan *output* atau keluaran yang konsisten meskipun tegangan input atau masukan bervariasi. Dengan mengubah jumlah belitan, kita dapat mengatur *ratio* antara belitan primer dan sekunder, sehingga tegangan output atau sekunder dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, terlepas dari jumlah tegangan input atau primernya yang ada. Proses penyesuaian *rasio* belitan ini dikenal sebagai Tap Changer.

Modifikasi rasio dapat dilakukan pada saat trafo sedang beroperasi atau dikenal sebagai *On Load Tap Changer*, serta saat trafo tidak dalam kondisi beban (*Off Circuit tap changer/De Energize Tap Charger*).

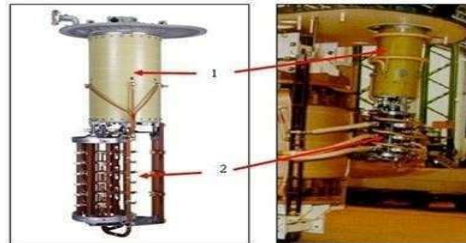
Tap *changer* terdiri dari:

- a. Pemilih saklar (*Selector Switch*)
- b. Saklar Pdiverter (*Diverter Switch*)
- c. Tahanan transisi (*Resistansi transisi*)

Karena aktivitas tap *changer* lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dan tap *changer* dipisahkan. Pemilih Saklar (*Selector switch*) adalah rangkaian mekanis yang mempunyai terminal untuk menentukan posisi tap atau *rasio* belitan primer.

Saklar diverter (*Diverter switch*) adalah mekanis yang dirancang untuk menghubungkan atau melepaskan hubungan dengan cepat.

Resistansi transisi berfungsi sebagai tahanan sementara yang akan dilalui oleh arus primer selama perubahan tap. Bentuk nyata dari OLTC pada transformator dapat dilihat pada gambar 16.



Gambar 16 OLTC pada Transformator

Keterangan:

1- Kompartemen *Diverter Switch*

2- Selektor *Switch*

Media pendingin atau pemadam proses *switching* pada *diverter switch* yang dikenal sampai saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu media minyak dan media *vaccum*. Jenis pemadaman dengan media minyak akan menghasilkan energi *arcing* yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2H_2 dan karbon sehingga perlu dilakukan penggantian minyak pada periode tertentu. Sedangkan dengan metode pemadam *vaccum* proses pemadaman *arcing* pada waktu *switching* akan dilokalisasi dan tidak merusak minyak[13].

Bentuk dari kontak *switching* pada *diverter switch* dapat dilihat pada gambar 17.

Gambar 17 Kontak *Switching* pada *Diverter Switch*



Pada gambar 17.a merupakan media pemadam *arcing* menggunakan minyak dan 17.b merupakan media pemadam *arcing* menggunakan kondisi *vaccum*.

Pada umumnya tap *changer* dihubungkan dengan kumparan sisi primer dengan pertimbangan lebih mudah cara penyambungan karena kumparan primer terletak pada belitan paling luar dan juga arus di sisi primer lebih kecil dari pada di sisi sekunder, tujuannya untuk memperkecil resiko bila terjadi los kontak dan dengan arus yang lebih kecil dapat dipergunakan ukuran atau jenis konduktor yang kecil.

Pemilihan *tapping* transformator berdasarkan pada penyesuaian besar tegangan primer transformator, besar tegangan yang diterima oleh kumparan primer transformator dipengaruhi oleh jatuh tegangan yang terjadi pada saluran[5].

Prinsip pengaturan tegangan sekunder didasarkan pada variasi jumlah lilitan primer atau sekunder yang diperoleh dari rumus (3) dan (4).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

V1 = Tegangan di belitan primer (Volt) V2= Tegangan di belitan sekunder (Volt)

N1 = Belitan primer

N2 = Belitan sekunder

I1 = Arus di belitan primer (Ampere)

I2 = Arus di belitan sekunder (Volt)

a = Perbandingan transformator [14]

Jika belitan primer berkurang tegangan per belitan akan bertambah, sehingga tegangan sekunder bertambah juga. Pengurangan belitan primer mempunyai pengaruh yang sama dengan penambahan belitan sekunder. Beberapa faktor akan dijelaskan di bawah ini yang

dapat dibuat jadi pertimbangan, saat memutuskan sisi yang mana yang akan dipasang *tapping*-nya :

1. Transformator dengan rasio belitan yang besar, disadap pada sisi tegangan tinggi, karena pengendalian tegangan keluaran lebih halus atau dengan kata lain sadapan pada belitan sisi tegangan tinggi memungkinkan merubah tegangan keluar dalam step yang cukup luas.
2. Penempatan *tapping* pada sisi tegangan tinggi hanya akan menangani arus yang kecil, walaupun isolasi diperlukan lebih banyak.

Pemasangan tap pada sisi sekunder cukup sulit karena pada umumnya belitan tegangan rendah dililit setelah intidan belitan tegangan tinggi dililit setelah belitan tegangan rendah. Oleh karena itu membuat *tapping* pada belitan tegangan tinggi lebih mudah[5].

2.3.8 NGR (Neutral Grounding Resistor)

Salah satu metoda yang digunakan untuk membumikan transformator dengan memanfaatkan NGR atau *Neutral Grounding Resistor*. NGR adalah komponen resistansi yang dipasang secara seri dengan netral sekunder pada transformator sebelum koneksi netral tersebut dilakukan ke grounding. Tujuan utama dari pemasangan NGR adalah untuk mengatur besarnya arus gangguan yang mengalir dari netral menuju tanah.

Ada dua kategori NGR yaitu:

1. Liquid

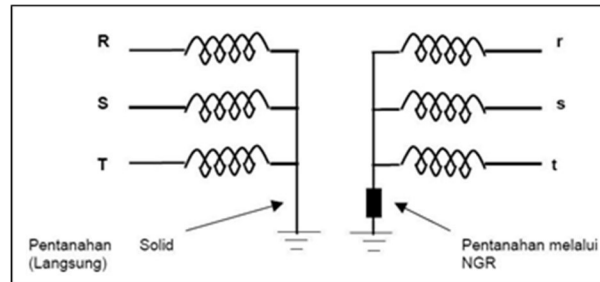
Ini berarti bahwa resistor tersebut menggunakan larutan air murni yang disimpan di dalam wadah dan ditambah garam (NaCl) untuk mencapai tingkat resistansi yang diinginkan.

2. Solid

Sementara itu, jenis NGR yang padat dibuat dari *Stainless Steel*,

FeCrAl, Cast Iron, Copper Nickel atau Nichrome yang dikonfigurasi sesuai dengan nilai tahanan yang ditentukan.

Bentuk dari NGR *liquid* dan solid dapat dilihat dapat pada gambar 18.



Gambar 18 Pentanahan Langsung dan Pentanahan melalui NGR

2.3.9 Proteksi Transformator

1. Relai Bucholz

Ketika transformator mengalami masalah pada bagian dalam yang menyebabkan suhu meningkat drastis dan pergerakan mekanis di dalam perangkat, tekanan yang tinggi akan muncul aliran minyak, menciptakan gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas ini akan naik menuju konservator melalui pipa penghubung dan relai bucholz.

Relay buchols akan mendeteksi adanya Tekanan minyak atau gelembung gas sebagai tanda bahwa telah terjadi gangguan di dalam trafo.

Relai bucholz berfungsi sebagai alat perlindungan utama transformator yang dipasang di bagian atas antara maintank dan konservator. Relai ini menggunakan alarm atau pemutus sirkuit untuk mendeteksi gas yang dihasilkan atau tekanan internal yang berpotensi berbahaya.

Relai ini beroperasi pada gas dan minyak yang digunakan pada transformator dengan (*rating* > 500 kVA).

Bentuk nyata dari relai bucholz dapat dilihat pada gambar 19.



Gambar 19 Relai Bucholz

2. Relai Jansen

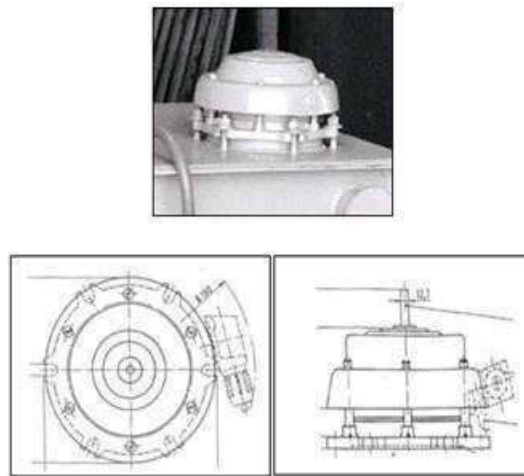
Sama halnya seperti relai bucholz yang memanfaatkan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya ketidaknormalan atau gangguan, hanya saja relai ini digunakan untuk memproteksi kompartemen OLTC. Relai ini juga dipasang pada pipa saluran yang menghubungkan kompartemen OLTC dengan konservator. Bentuk nyata dari relai jansen dapat dilihat pada gambar 20.



Gambar 20 Relai Jansen

3. Relai Sudden Pressure

Relai *sudden pressure* ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan di dalam trafo muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui *sudden pressure* dan tidak akan merusak bagian lainnya. Bentuk dari relai *sudden pressure* dapat dilihat pada gambar 21.



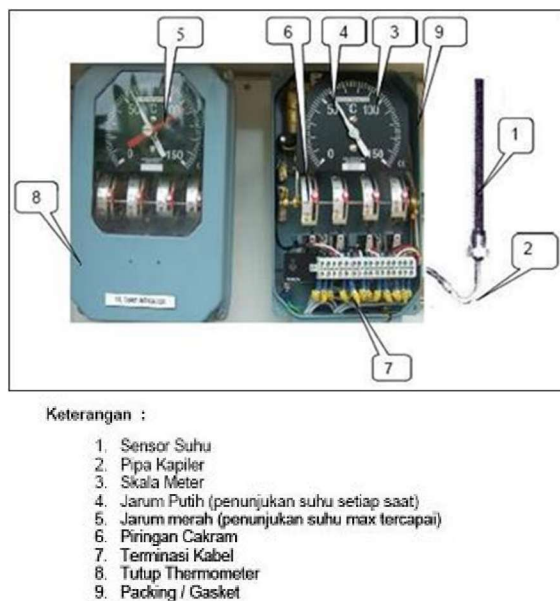
Gambar 21 Relai *Sudden Pressure*

4. Relai Thermal

Besaran nilai suhu pada transformator yang aktif akan dipengaruhi oleh kondisi tegangan jaringan, kerugian dalam trafo itu sendiri, dan suhu lingkungan di sekitar transformator. Suhu yang tinggi saat operasi dapat menyebabkan kerusakan pada isolasi kertas di dalam transformator.

Dalam rangka mengetahui suhu operasional dan tanda-tanda ketidak normalan atau anomali suhu pada transformator, digunakan perangkat pengaman suhu yang dikenal sebagai relai thermal. Relai *thermal* ini terdiri dari sensor suhu seperti *thermo couple*, pipa kapiler dan alat ukur penunjuk[13]. Bagian-bagian relai *thermal* dapat dilihat pada

gambar 22.



Gambar 22 Bagian-bagian dari Relai *Thermal*

2.4 Pengujian Tahanan Isolasi dan Polarisasi Indeks (PI)

Pengukuran resistansi isolasi belitan merupakan pengukuran yang dilakukan dari isolasi antara konduktor belitan dan inti besi pada trafo. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan *ground* atau antara dua belitan. Metode yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dc dan merepresentasikan kondisi isolasi dengan satuan Mega Ohm[13].

Berdasarkan IEEE Std. 43 – 2000 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), *Insulation Resistance* (IR) didefinisikan sebagai kemampuan isolator listrik pada sebuah lilitan dalam menahan aliran arus DC. Dengan definisi lain, IR atau tahanan isolasi adalah hasil bagi tegangan yang diinjeksikan ke sebuah isolator dengan arus bocor yang mengalir dalam tempo tertentu. Hal ini dapat dipahami karena standar tersebut dibuat untuk mesin berputar dan menggunakan tegangan injeksi searah.

Pada dasarnya, besarnya injeksi tegangan DC pada lilitan sebisa mungkin lebih rendah dari tegangan nominal operasi mesin. Hal ini akan lebih sensitif ketika

diaplikasikan pada mesin kecil, mesin tegangan rendah dan isolasi dalam keadaan lembab. Apabila tegangan terlalu tinggi, dikhawatirkan isolasi akan mengalami *stress* sehingga isolasi akan menjadi rusak. Tentu saja hal ini harus dihindari karena sifat dari IRT (*Insulation Resistance Test*) adalah *non- destructive test* (pengujian tidak merusak).

IRT biasanya dilakukan dengan menginjeksikan tegangan DC 500 – 10.000 Volt. Tegangan yang diinjeksikan bervariasi berdasarkan tabel 3 (berdasarkan IEEE Std. 43 – 2000). Lama waktu injeksi yang digunakan adalah 1 menit. Sebagai catatan, tegangan lilitan berarti tegangan *phase-to-phase* untuk mesin 3 fasa, sedangkan untuk mesin satu fasa atau DC berarti tegangan *line-to-ground*[7]. Besar tegangan injeksi yang dilakukan saat pengujian dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3 Tabel Tegangan Injeksi untuk Berbagai Tegangan Operasi [7]

<i>Winding Rated Voltage (V)</i>	<i>Insulation Resistance Test Direct Voltage (V)</i>
< 1.000	500
1.000 – 2.000	500 – 1.000
2.501 – 5.000	1.000 – 2.500
5.001 – 12.000	2.500 – 5.000
> 12.000	5.000 – 10.000

Polarisasi Indeks adalah pengukuran tahanan isolasi belitan. Tujuan dari pengujian Polarisasi Indeks (PI) adalah untuk memastikan peralatan tersebut (transformator daya) layak dioperasikan atau bahkan untuk dilakukan *over voltage test*. Pengujian berkelanjutan dilakukan dalam waktu 10 menit, tahanan isolasi

akan mempunyai kemampuan untuk mengisi kapasitansi tinggi ke dalam isolasi trafo dan pembacaan resistansi akan meningkat lebih cepat jika isolasi bersih dan kering. Berdasarkan IEEE C57.125-1991 rasio pembacaan 10 menit dibandingkan pembacaan 1 menit dikenal sebagai *Polarization Index* (PI) atau Polarisasi Indeks (PI) dengan rumus perhitungannya sebagai berikut[13].

$$PI = \frac{\text{Pengukuran Isolasi 10 Menit}}{\text{Pengukuran Isolasi 1 Menit}} \dots\dots\dots (6)$$

Nilai minimum untuk pengukuran tahanan isolasi yang dilakukan satu menit dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut ini yang mengacu kepada IEEE C57.125-1991:

$$R = \frac{CE}{\sqrt{kVA}} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :

R = tahanan isolasi minimum (MΩ)

C = konstanta *oil filled transformer* (1,5)
E = rating tegangan fasa-netral (V)

kVA = kapasitas pengenalan belitan yang diuji (kVA)

Selain perhitungan dengan menggunakan rumus di atas, standar nilai tahanan isolasi minimum pada transformator daya dapat mengacu kepada standar yang mengacu kepada CIGRE 445 yang dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 Nilai Minimum Tahanan Isolasi [3]

Tegangan Operasi Transformator	Nilai Minimum Tahanan Isolasi
> 69 kV	> 1 GΩ

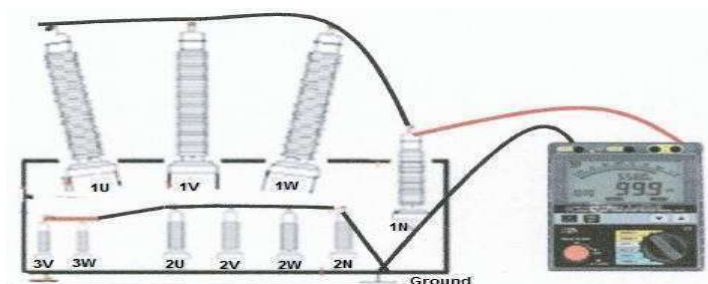
$\leq 69 \text{ kV}$	$> 500 \text{ M}\Omega$
----------------------	-------------------------

Pengategorian kondisi isolasi berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi dilihat dari nilai tahanan isolasinya itu sendiri dan indeks polarisasi. Kondisi isolasi berdasarkan indeks polarisasi ditunjukkan pada tabel 5 (berdasarkan IEEE C57.125-1991)[8].

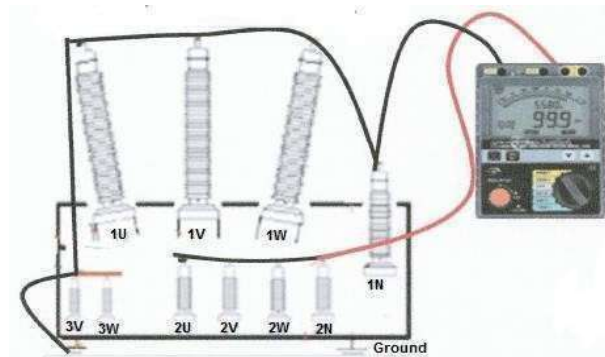
Tabel 5 Evaluasi dan Rekomendasi Metode Indeks Polarisasi Pada Pengujian

Polarisasi Indeks	Kondisi Isolasi
Kurang dari 1.0	Berbahaya
1.0 – 1.1	Jelek
1.1 – 1.25	Dipertanyakan
1.25 – 2.0	Aman
Lebih dari 2.0	Baik

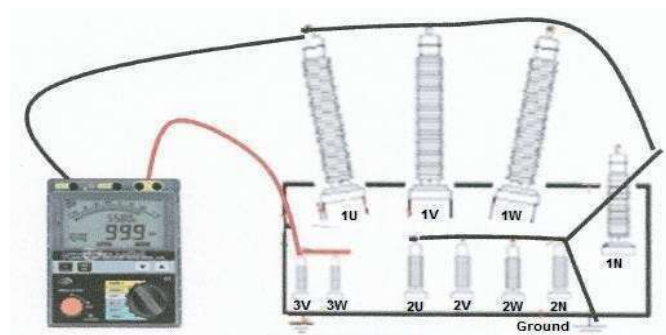
Rangkaian pengukuran yang dilakukan ialah rangkaian yang digunakan di UPT Padang ULTG Padang sesuai dengan instuksi kerja di PT. PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera (P3BS) dengan nomor dokumen IK-TRS-BOT-181. Macam-macam rangkaian pengukuran yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 23 – gambar 26.



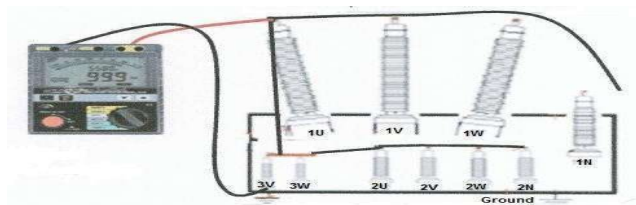
Gambar 23 Rangkaian Pengukuran Tahanan Isolasi dan IP Primer
(Sekunder + Tersier + *Ground*)



Gambar 24 Rangkaian Pengukuran Tahanan Isolasi dan IP Sekunder – (primer + Tersier + *Ground*)



Gambar 25 Rangkaian Pengujian Tahanan Isolasi dan IP Tersier – (Primer + Sekunder + *Ground*)

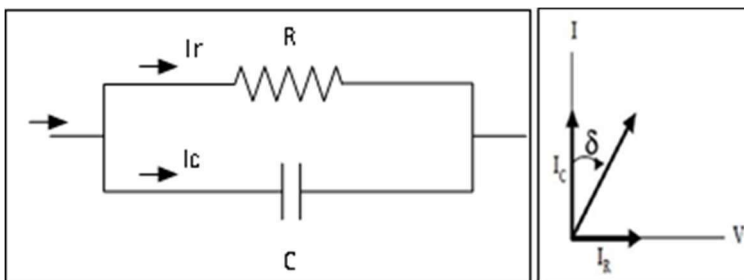


Gambar 26 Rangkaian Pengujian Tahanan Isolasi dan IP (Primer + Sekunder + Tersier) – *Ground*

2.5 Pengujian Tangen Delta

Delta menghasilkan sudut 90° bersifat kapasitif (IC), namun dalam realitanya terdapat arus yang bersifat resistif (IR) yang membuat sudut yang dihasilkan kurang dari 90° , dalam hal ini dapat dikatakan semakin tinggi nilai kapasitansi semakin bagus nilai isoalsi dari perangkat listrik dan tangen delta (δ) adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi sebuah isolasi dari perangkat listrik[1].

Isolasi yang efektif akan berfungsi seperti kapasitor yang ideal, sama halnya dengan suatu isolator yang terletak di antara dua elektroda pada sebuah kapasitor. Dalam kapasitor yang sempurna, terjadi pergeseran 90° antara tegangan dan arus fasa, dan arus yang melalui isolasi adalah bersifat kapasitif. Apabila terdapat cacat atau bahan pengotor pada isolasi transformator, maka nilai tahanan atau resistansi isolasi akan menurun, yang berujung pada meningkatnya arus resistif yang melewati isolasi tersebut. Akibatnya, isolasi itu tidak lagi berfungsi sebagai kapasitor yang ideal. Pergeseran tegangan dan arus tidak akan mencapai 90° lagi, melainkan kurang dari 90° . Perbedaan dalam pergeseran dari 90° menggambarkan tingkat kontaminasi pada isolasi tersebut[13]. Rangkaian ekivalen isolasi dan diagram phasor arus pengujian tangen delta dapat dilihat pada gambar 27.



Gambar 27 Rangkaian Ekivalen Isolasi dan Diagram Phasor Arus
Pengujian Tangen Delta

Gambar di atas merupakan gambar rangkaian ekivalen dari sebuah isolasi dan diagram phasor arus kapasitansi dan arus resistansi dari sebuah isolasi. Dengan mengukur nilai I_r/I_c dapat diperkirakan kualitas dari isolasi.

Sistem isolasi trafo secara garis besar terdiri dari isolasi antara belitan dengan *ground* dan isolasi antara dua belitan. Terdapat tiga metode pengujian untuk trafo di lingkungan PT PLN, yaitu metode trafo dua belitan metode trafo tiga belitan dan metode *autotrafo*.

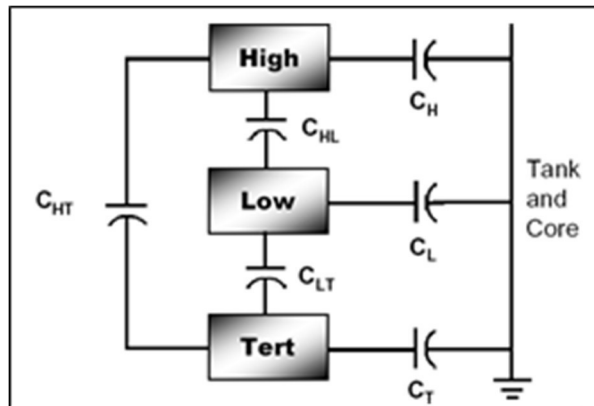
Titik pengujian trafo dua belitan yaitu:

1. Primer – *Ground* (CH)
2. Sekunder – *Ground* (CL)
3. Primer – Sekunder (CHL)

Untuk pengujian trafo tiga belitan titik pengujiannya adalah:

1. Primer – *Ground*
2. Sekunder – *Ground*
3. Tersier – *Ground*
4. Primer – Sekunder
5. Primer – Tersier
6. Sekunder – Tersier

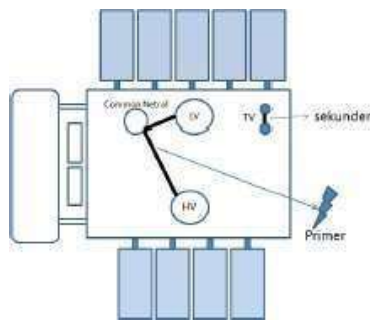
Rangkaian ekivalen isolasi transformator dapat dilihat pada gambar 28.



Gambar 28 Rangkain Ekivalen Isolasi Transformator

Untuk *autotrafo*, metode pengujian dilakukan sama dengan metode trafo dua belitan dengan perbedaan dan beberapa pertimbangan yaitu; sisi HV dan LV pada *autotrafo* dirangkai menjadi satu belitan yang tidak dapat dipisahkan, sehingga *bushing* HV, LV dan netral dijadikan satu sebagai satu titik pengujian (primer). Sisi belitan TV dijadikan sebagai satu titik pengujian (sekunder).

Skema pengujian tan delta pada *auto trafo* dapat dilihat pada gambar 29.



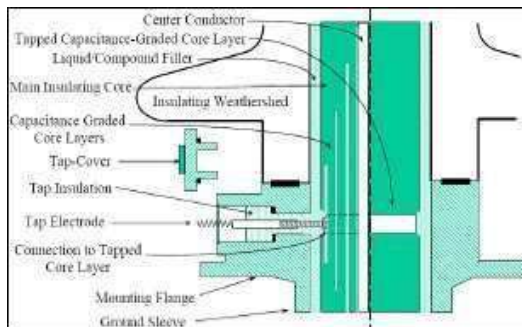
Gambar 29 Skema Pengujian Tan Delta pada *AutoTrafo*

Pengujian tangeen delta pada *bushing* bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi pada C1 (isolasi antara konduktor dengan *center tap*) dan C2 (isolasi antara *center tap* dengan *Ground*). Pengujian *hot collar* dilakukan untuk mengetahui kondisi keramik. Metode *hotcollar* hanya digunakan untuk

pengujian lanjut atau apabila *bushing* tidak memiliki tap pengujian. Apabila tap pengujian rusak maka *bushing* segera diusulkan untuk penggantian[13].

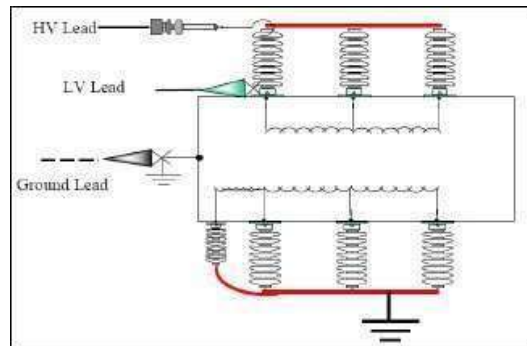
Pada pengujian tangen delta, sumber tegangan AC tegangan tinggi dihubungkan ke objek uji, pengujian ini dilakukan dengan tegangan uji sebesar 10 kV[3].

Struktur *bushing* transformator dapat dilihat pada gambar 30.

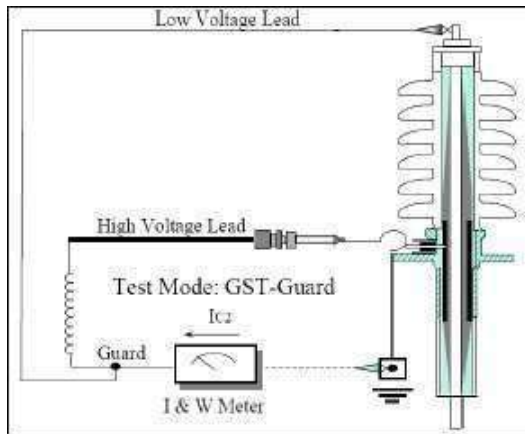


Gambar 30 Struktur *Bushing*

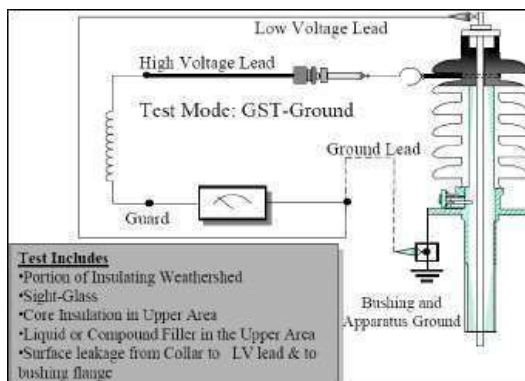
Rangkaian pengujian *bushing* transformator dapat dilihat pada gambar 31 sampai gambar 32. C1 adalah isolasi antara *tap electrode* dengan konduktor, C2 adalah isolasi antara *tap electrode* dengan *ground*.



Gambar 31 Diagram Pengujian Tangen Delta C1 pada *Bushing*



Gambar 32 Diagram Pengujian Tangen Delta C2 pada *Bushing*



Gambar 33 Diagram Pengujian Tangen Delta *Hot Collar* pada *Bushing*

2.5.1 Mode yang Digunakan pada Pengujian Tangen Delta

Pada pengujian tangen delta beberapa mode yang sering digunakan yaitu:

1. Mode GST (*Grounded Speciment Test*)

Mode GST adalah metode pengujian tangen delta yang menggunakan kapasitansi antara objek yang diuji dengan ground sebagai acuan dalam pengukuran nilai tangen delta.

2. Mode GSTg (*Grounded Speciment Test Guard*)

Mode GSTg merupakan metode pengujian tangen delta dengan kapasitansi antara objek uji dan ground sebagai referensi, disertai penggunaan guard untuk mengisolasi

atau membatasi pengaruh kapasitansi dari objek lain yang dapat memengaruhi hasil pengukuran. Mode ini umumnya diterapkan pada peralatan switchgear selain transformator, seperti lightning arrester, trafo arus (CT), trafo tegangan (VT/PT), dan pemutus tenaga (circuit breaker)

3. Mode UST (*Ungrounded Speciment Test*)

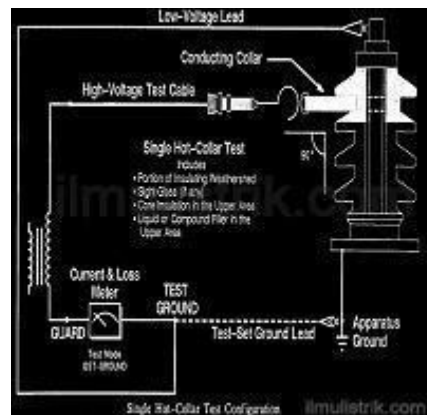
Mode UST adalah metode pengujian tangean delta yang menjadikan kapasitansi antara dua objek yang tidak terhubung ke ground sebagai referensi pengukuran. Mode ini biasanya digunakan dalam pengujian transformator.

4. Hot Collar

Metode pengukuran ini efektif untuk mendeteksi letak retakan pada porcelain serta mengidentifikasi adanya degradasi atau kontaminasi pada permukaan bushing, seperti lapisan tipis compound, cairan, atau sisa material yang menempel pada bushing.

Rangkain pengujian dengan metode *hot collar* dapat dilihat pada gambar 34.

Gambar 34 Skema Pengujian *Hot Collar*



Rekomendasi dari Doble untuk pengujian *Hot Collar* adalah *power dissipasi* kurang dari 0.1 watt dengan tegangan uji 10 kV, untuk pengujian beberapa *bushing* yang setipe arus pengujian diberikan sama. Apabila diperoleh disipasi daya naik maka mungkin terjadi kontaminasi pada *bushing*. Sedangkan bila arus mengalami penurunan maka kemungkinan penyebabnya adanya *void*

pada *bushing* atau tingkat minyak *bushing* terlalu rendah[11].

2.1.5 Perhitungan Nilai Tangen Delta

Berdasarkan rangkaian ekivalen isolasi gambar 27 yang bersumber dari CIGRE 445, perhitungan tangen delta dapat dilakukan secara manual menggunakan rumus berikut ini :

$$IR = \frac{V}{R} \dots\dots\dots (8)$$

$$IC = \omega CV \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan :

IR = arus resistif (A)

V = tegangan (V)

IC = arus kapasitif (A)

R = resistansi (Ω)

C = kapasitansi (F)

Untuk arus total I, yaitu arus yang diberikan sumber tegangan pada rangkaian adalah akar dari jumlah vektori kedua komponen arus di atas, yaitu seperti yang ditunjukkan pada gambar 35.

$$I = \sqrt{IR^2 + IC^2} \dots\dots\dots (10)$$

Arus IR menimbulkan rugi-rugi daya (P) pada resistor R. Rugi- rugi ini disebut rugi-rugi dielektrik. Rugi-rugi dielektrik ini adalah perkalian antara V dengan IR atau:

$$P = V \cdot IR = VI \cos \varphi = VI \sin \delta \dots\dots\dots (11)$$

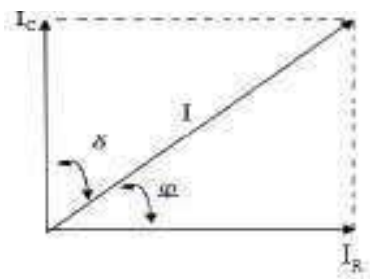
Menurut gambar 35, $\cos \delta = IC/I$, sehingga arus sumber dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I = \frac{IC}{\cos \delta} \dots\dots\dots (12)$$

Substitusi dari persamaan (8) dan (9) menghasilkan :

$$I = \frac{\omega CV}{\cos \delta} \dots\dots\dots(13)$$

Komponen arus berdasarkan rangkaian ekivalen isolasi dapat dilihat pada gambar 35.



Gambar 35 Komponen Arus Menurut Rangkaian Ekivalen Isolasi

Untuk substitusi persamaan (8) ke dalam persamaan (11) menghasilkan :

$$P = \frac{\omega CV}{\cos \delta} V \sin \delta = \omega CV^2 \tan \delta = 2\pi f CV^2 \tan \delta \dots\dots\dots(14)$$

Untuk menghitung tangendelta, persamaan (14) dapat diganti dan dikalikan 100 % (karena hasil pengukuran tan delta dalam satuan persen) menjadi :

$$\tan \delta = \frac{P}{V^2 2\pi f C} \times 100 \% \dots\dots\dots (15)$$

Keterangan

= Delta

= *Losses* Daya (Watt)

= Tegangan Uji (Volt)

= *Capacitance* (F)

P menyatakan rugi-rugi daya (power losses) yang disebabkan oleh arus resistif (I_R) akibat menurunnya kualitas tahanan isolasi, yang dapat dipicu oleh adanya corona, karbonisasi, serta kontaminasi pada media isolasi transformator daya yang diuji. Semakin

besar nilai tahanan (R) pada media isolasi peralatan, maka rugi-rugi daya yang muncul juga akan semakin besar. Peningkatan rugi-rugi daya tersebut menunjukkan bahwa kualitas isolasi peralatan semakin menurun[9].

2.1.5 Standar Nilai Pengujian Tangen Delta

Batas maksimum hasil pengujian tangen delta yang diperbolehkan untuk belitan transformator dan bushing ditampilkan pada tabel berikut. Apabila nilai pengujian melebihi batas tersebut, maka transformator dinyatakan mengalami gangguan. Dalam kondisi tersebut disarankan dilakukan perbaikan, atau jika perbaikan tidak memungkinkan, transformator harus diganti[13]. Batasan nilai maksimum tangen delta belitan dan *bushing* transformator dapat dilihat pada tabel 6 dan 7.

Tabel 6 Batasan Nilai Maksimum Tangen Delta Belitan Transformator [3]

NO.	Item	Batasan	Rekomendasi
1.	Trafo baru	<i>Max 0,5 %</i>	
2.	Trafo operasi	<i>Max 1 %</i>	Periksa kadar air pada minyak isolasi dan kertas isolasi

Tabel 7 Batasan Nilai Maksimum Tangen Delta *Bushing* [3]

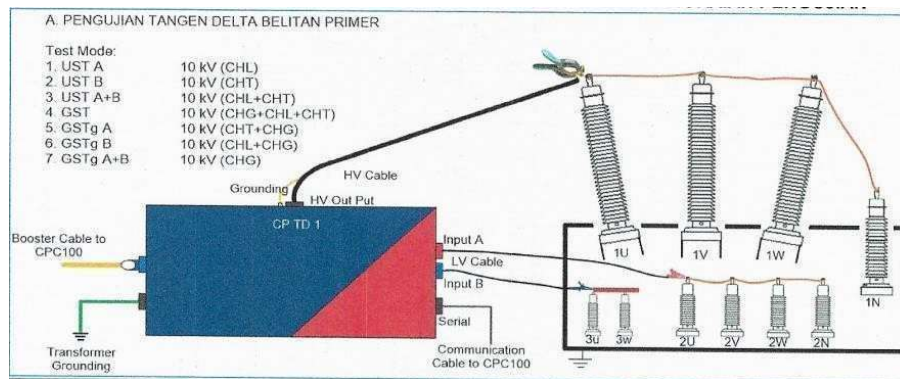
No.	Referensi	<i>Resin Impregnated Paper (RIP)</i>	<i>Oil Impregnated Paper (OIP)</i>	<i>Resin Bonded Paper (RBP)</i>
1.	IEC 60137 – DF Tan δ	< 0,7 %	< 0,7 %	< 1,5 %
2.	IEEE C57.19.01 – PF cos δ	< 0,85 %	< 0,5 %	< 2 %

3.	Kisaran Peralatan Baru	0,3 – 0,4 %	0,2 – 0,4 %	0,5 – 0,6 %
----	---------------------------	-------------	-------------	-------------

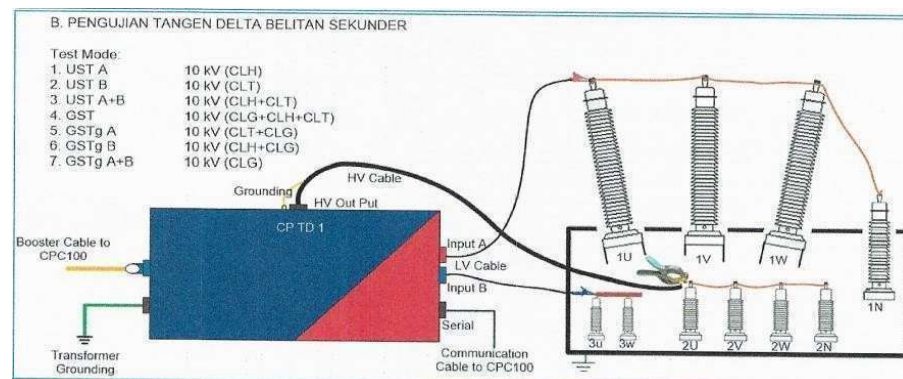
Catatan: 50/60 Hz pada 20°C

2.5.4 Rangkaian Pengukuran Tangen Delta Belitan dan *Bushing* transformator

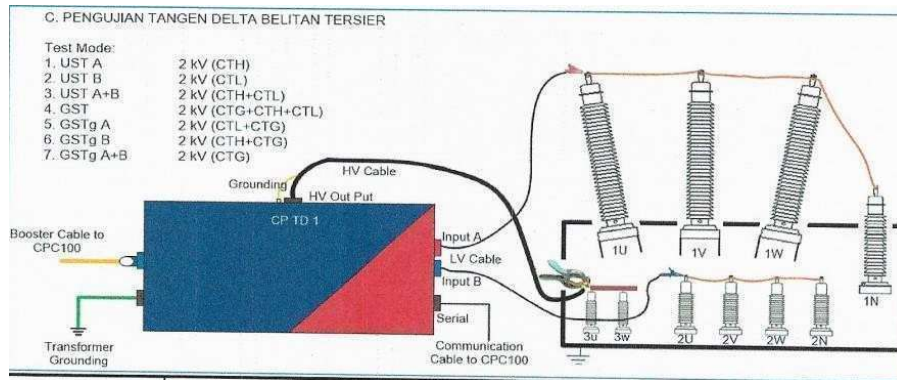
Rangkaian pengukuran yang dilakukan ialah rangkaian yang digunakan di UPT Padang ULTG Padang sesuai dengan instruksi kerja di PT PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera (P3BS) dengan nomor dokumen IK-TRS-BOT-148. Rangkaian pengukuran tangen delta belitan dan *bushing* transformator dapat dilihat pada gambar 36 sampai gambar 40.



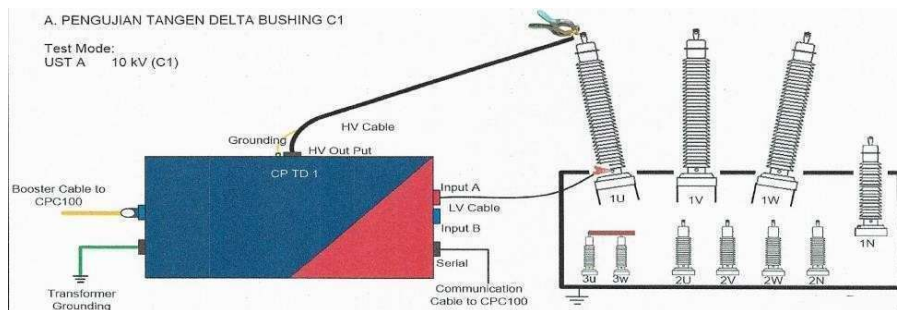
Gambar 36 Rangkaian Pengujian Tangen Delta pada Belitan Primer



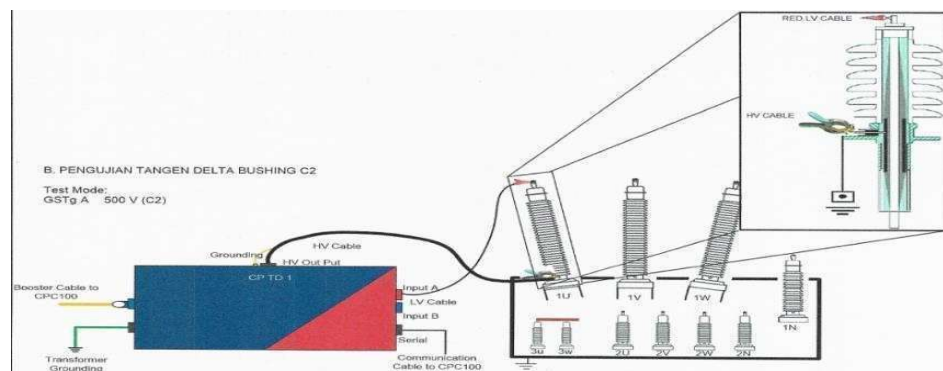
Gambar 37 Rangkaian Pengujian Tangen Delta pada Belitan Sekunder



Gambar 38 Rangkaian Pengujian Tangen Delta pada Belitan Tersier



Gambar 39 Rangkaian Pengujian Tangen Delta pada *Bushing* C1



Gambar 40 Rangkain Pengujian Tangen Delta pada *Bushing* C2

2.6 Pengujian Rasio Belitan Transformator

Pengujian rasio belitan transformator ini bertujuan untuk mendiagnosa adanya masalah antar belitan dan seksi-seksi sistem isolasi pada trafo. Pengujian ini akan mendeteksi adanya hubung singkat antar lilitan, putusnya lilitan, maupun ketidaknormalan pada tap *changer*.

Metode pengujiannya adalah dengan memberikan tegangan variabel pada sisi HV (*High Voltage*) dan melihat tegangan yang muncul pada sisi LV (*Low Voltage*). Dengan membandingkan tegangan sumber dengan tegangan yang muncul maka dapat diketahui rasio perbandingannya[13]. Tingginya nilai resistansi akibat lepasnya koneksi atau konduktor yang terhubung *ground* dapat dideteksi[5]. Konsep dasar untuk melakukan pengujian rasio mengacu pada rumus rasio transformator yang dapat dilihat pada persamaan (16).

2.6.1 Standar Nilai Deviasi Pengujian Rasio Belitan

Analisa hasil pengujian *ratio test* adalah membandingkan hasil pengukuran dengan *name plate ratio* tegangan pada trafo dengan batasan kesalahan sebesar 0,5 % (standar IEEE C57.125.1991)[8]. Jika hasil pengujian *ratio test* lebih dari 0,5 % maka disarankan untuk melakukan pengujian-pengujian lainnya[13].

2.6.2 Perhitungan Nilai Deviasi Pengujian Rasio Belitan

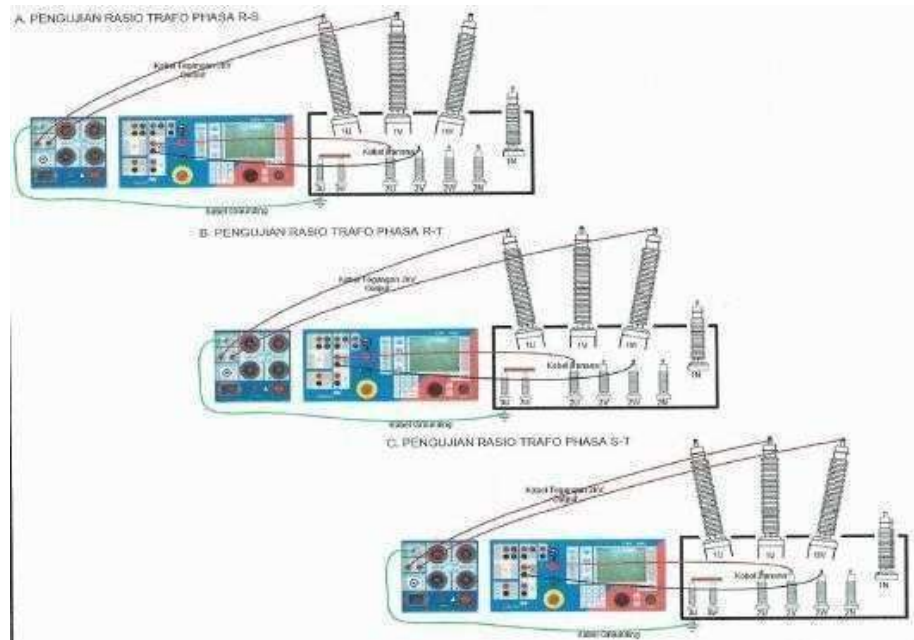
Berdasarkan IEEE C57.125-1991, parameter pengukuran toleransi *ratio test (deviation)* secara matematis dituliskan sebagai berikut ini :

$$\text{Ratio Error (deviation)} = \frac{\text{Rasio Pengukuran} - \text{Rasio Teor}}{\text{Rasio Pengukuran}} \times 100\% \dots\dots\dots (16)$$

2.6.3 Rangkaian Pengukuran Rasio Belitan Transformator

Rangkaian pengukuran yang dilakukan ialah rangkaian yang digunakan di UPT Padang ULTG Padang sesuai dengan instruksi kerja di PT PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera (P3BS) dengan nomor dokumen IK-TRS-BOT-160. Rangkaian pengukuran rasio belitan transformator

dapat dilihat pada gambar 41.



Gambar 41 Rangkaian Pengukuran Rasio Belitan Transformator

2.7 Pengujian Tegangan Tembus Minyak atau *Breakdown Voltage* (BDV)

Oksidasi dan kontaminan adalah hal yang dapat menurunkan kualitas minyak yang berarti dapat menurunkan kemampuannya sebagai isolasi. Oksidasi pada minyak isolasi trafo juga akan ikut andil dalam penurunan kualitas kertas isolasi trafo. Pada saat minyak isolasi mengalami oksidasi, maka minyak akan menghasilkan asam. Asam ini apabila bercampur dengan air dan suhu yang tinggi akan mengakibatkan proses *hydrolisis* pada isolasi kertas. Proses hidrolisis ini akan menurunkan kualitas kertas isolasi[13].

Untuk mengetahui adanya kontaminan atau proses oksidasi di dalam minyak, dilakukan pengujian *oil quality test* (karakteristik). Pengujian *oil quality test* meliputi beberapa pengujian yang metodanya mengacu pada standar IEC 60422. Adapun salah satu jenis pengujiannya adalah pengujian tegangan tembus.

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan *stress* tegangan. Minyak yang jernih dan kering akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Air bebas dan partikel solid, apalagi gabungan antara keduanya dapat menurunkan tegangan tembus secara dramatis. Dengan kata lain pengujian ini dapat menjadi indikasi keberadaan kontaminan seperti kadar air dan partikel. Rendahnya nilai tegangan tembus dapat mengindikasikan keberadaan salah satu kontaminan tersebut dan tingginya tegangan tembus belum tentu juga mengindikasikan bebasnya minyak dari semua jenis kontaminan.

Minyak yang sudah terkontaminasi atau teroksidasi perlu dilakukan *treatment* untuk mengendalikan fungsinya sebagai minyak isolasi. *Treatment* terhadap minyak isolasi dapat berupa filter atau reklamasi. Untuk menentukan kapan minyak tersebut harus di-*treatment* didasarkan atas perbandingan hasil uji terhadap batasan-batasan yang termuat pada standar IEC 60422 tahun 2013[13]. Kategori peralatan berdasarkan tegangan operasinya dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8 Kategori Peralatan Berdasarkan Tegangan Operasinya [6]

Kategori	Tipe Peralatan
O	Trafo daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal sama dengan dan di atas 400 kV.
A	Trafo daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal $170 \text{ kV} < U < 400 \text{ kV}$.
B	Trafo daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal di atas 72,5 kV dan sampai dan termasuk 170 kV.
C	Trafo daya/reaktor untuk aplikasi MV/LV misalnya sistem tegangan nominal sampai dengan termasuk 72,5 kV.
F	<i>Diverter tank</i> OLTC, termasuk <i>combined selector/diverter tank</i> .

Catatan:

Tank selector pada beban *tap-changer* termasuk dalam kategori yang sama seperti yang terkait trafo.

Metode pengukuran tegangan tembus pada minyak berdasarkan standar IEC 60156-02 Tahun 1995, dengan elektroda *mushroom* dengan jarak elektroda 2,5 mm.

Standar nilai hasil pengujian tegangan tembus minyak berdasarkan IEC 60422 dapat dilihat pada tabel 9. Tabel 9 Standar Nilai Hasil Pengujian Tegangan Tembus [6]

Kategori	Batasan Rekomendasi (kV/2,5 mm)			Tindakan Rekomendasi
	Baik	Sedang	Buruk	
O,A	> 60	50 – 60	< 50	Baik: Lanjutkan pengambilan <i>sample</i> sesuai waktu normal
B	> 50	40 – 50	< 40	
C	> 40	30 – 40	< 30	

F	< 30kV untuk OLTC pada aplikasi titik belitan bintang < 40kV untuk OLTC pada aplikasi belitan delta atau <i>line – end</i>	Sedang: Lakukan pengambilan <i>sample</i> lebih sering dan periksa parameter yang lain seperti kandungan air dan partikel, DDF/<i>resistivitas</i> dan keasaman Buruk: rekondisi minyak (rekondisi mengacu pada IEC 60422 11.2) atau jika lebih ekonomis karena pengujian yang lain mengindikasikan <i>ageing</i> parah, ganti minyak atau reklamasi (reklamasi mengacu pada IEC 60422 11.3) dengan mengkombinasikan dengan diikuti prosedur pengeringan
---	--	--

2.8 Dampak Apabila Hasil Pengujian Tidak Sesuai Standar

Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk menilai kondisi isolasi antara belitan dengan ground maupun antarbelitan pada transformator. Pengujian lanjutan dari tahanan isolasi adalah Indeks Polarisasi (IP), yang digunakan untuk memastikan apakah transformator layak dioperasikan atau bahkan aman untuk menjalani pengujian tegangan lebih (over voltage test)[11]. Selain itu, kondisi isolasi juga dapat dievaluasi melalui metode tangen delta. Pada transformator, pengujian tangen delta dilakukan pada dua bagian, yaitu belitan transformator dan bushing. Penurunan kualitas atau kegagalan isolasi dapat mengakibatkan gangguan operasi hingga kerusakan transformator. Jika nilai tahanan isolasi tidak memenuhi standar, hal tersebut dapat menyebabkan transformator mengalami trip akibat kenaikan suhu.

Selain itu, kegagalan isolasi juga dapat menimbulkan tegangan tembus pada bushing maupun pada belitan, yang memicu peningkatan temperatur dan berujung pada trip. Oleh karena itu, pengukuran parameter tahanan isolasi sangat penting untuk memastikan transformator daya dapat beroperasi sesuai fungsinya[11]. Apabila rasio transformator dalam kondisi baik, maka penurunan tegangan akan sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Namun, jika rasio tidak sesuai, tegangan keluaran transformator dapat menyimpang—biasanya lebih rendah dari nilai yang tertera pada nameplate—sehingga berpotensi mengganggu peralatan yang disuplai. Karena itu, pengujian rasio pada transformator daya perlu dilakukan untuk memastikan kondisinya baik dan layak digunakan[9].