



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Pengertian Transformator<sup>1</sup>

Pada sistem tenaga listrik, salah satu alat yang paling vital adalah transformator. Transformator merupakan alat elektromagnetik yang sederhana, andal dan efisien untuk mengubah tegangan AC dari satu tingkat ke tingkatan yang lain (Kadir, 2010: 1). Transformator berfungsi untuk menyalurkan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya serta digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan.

Transformator adalah suatu alat listrik yang dipergunakan untuk mengubah tegangan bolak – balik menjadi lebih tinggi atau lebih rendah dan digunakan untuk memindahkan energi dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya tanpa mengubah frekuensi. Transformator disebut peralatan statis karena tidak ada bagian yang bergerak atau berputar, tidak seperti motor atau generator.

Dalam bentukannya yang paling sederhana, transformator terdiri dari atas dua kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer adalah kumparan yang menerima daya dan dinyatakan sebagai terminal masukan dan kumparan sekunder adalah kumparan yang melepaskan daya dan sebagai terminal keluaran. Kedua kumparan ini dililitkan di dalam inti besi transformator.

Transformator atau trafo adalah komponen elektromagnet yang dapat merubah tegangan tinggi ke rendah atau sebaliknya dalam frekuensi sama. Trafo merupakan jantung dari distribusi dan transmisi yang diharapkan beroperasi maksimal (kerja terus menerus tanpa henti). Agar dapat berfungsi

---

<sup>1</sup> Kadir, Abdul.(2010). *Transformator*. Penerbit Universitas Indonesia : Jakarta ElektroIndonesia. 2009.



dengan baik, maka trafo harus dipelihara dan dirawat dengan baik menggunakan sistem dan peralatan yang tepat. Trafo dapat dibedakan berdasarkan tenaganya, trafo 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut trafo Interbus Transformator (IBT) dan trafo 150/20 kV dan 70/20 kV disebut trafo distribusi. Trafo pada umumnya ditanahkan pada titik netral sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan atau proteksi. Sebagai contoh trafo 150/20 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan trafo 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 20 kV.

Prinsip kerja dari transformator dalam menyalurkan daya menggunakan hukum induksi faraday, dimana arus bolak-balik yang mengalir mengelilingi inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet. Dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan atau kumparan maka pada kedua ujung kumparan menghasilkan beda potensial. Inti besi transformator akan terinduksi oleh arus yang mengalir pada kumparan primer sehingga didalam inti besi akan mengalir flux magnet dan kumparan sekunder akan terinduksi oleh flux magnet sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial

Transformator dapat dibagi menurut fungsi / pemakaian seperti:

- Transformator Mesin (Pembangkit )
- Transformator Gardu Induk
- Transformator Distribusi

Transformator dapat juga dibagi menurut Kapasitas dan Tegangan seperti:

- Transformator besar
- Transformator sedang
- Transformator kecil



## 2.2. Penyebab Gangguan Transformator

1. Tegangan Lebih Akibat Petir Gangguan ini terjadi akibat sambaran petir yang mengenai kawat fasa, sehingga menimbulkan gelombang berjalan yang merambat melalui kawat fasa tersebut dan menimbulkan gangguan pada trafo. Hal ini dapat terjadi karena *arrester* yang terpasang tidak berfungsi dengan baik, akibat kerusakan peralatan/pentanahan yang tidak ada. Pada kondisi normal, *arrester* akan mengalirkan arus bertegangan lebih yang muncul akibat sambaran petir ke tanah. Tetapi apabila terjadi kerusakan pada *arrester*, arus petir tersebut tidak akan dialirkan ke tanah oleh *arrester* sehingga mengalir ke trafo. Jika tegangan lebih tersebut lebih besar dari kemampuan isolasi trafo, maka tegangan lebih tersebut akan merusak lilitan trafo dan mengakibatkan hubungan singkat antar lilitan.
2. *Overload*, *overload* terjadi karena beban yang terpasang pada trafo melebihi kapasitas maksimum yang dapat dipikul trafo dimana arus beban melebihi arus beban penuh (*full load*) dari trafo. *Overload* akan menyebabkan trafo menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan trafo.
3. *Loss Contact* Pada Terminal *Bushing* Gangguan ini terjadi pada bushing trafo yang disebabkan terdapat kelonggaran pada hubungan kawat fasa (kabel schoen) dengan terminal bushing. Hal ini mengakibatkan tidak stabilnya aliran listrik yang diterima oleh trafo distribusi dan dapat juga menimbulkan panas yang dapat menyebabkan kerusakan belitan trafo.
4. Isolator Bocor/Bushing Pecah

Gangguan akibat isolator bocor/bushing pecah dapat disebabkan oleh :

- a. *Flash Over* dapat terjadi apabila muncul tegangan lebih pada jaringan distribusi seperti pada saat terjadi sambaran petir/surja hubung. Bila besar surja tegangan yang timbul menyamai atau melebihi ketahanan impuls isolator, maka kemungkinan akan terjadi *flash over* pada bushing. Pada system 20 kV, ketahanan impuls



isolator adalah 160 kV. *Flash over* menyebabkan loncatan busur api antara konduktor dengan bodi trafo sehingga mengakibatkan hubungan singkat fasa ke tanah.

- b. Bushing Kotor, Kotoran pada permukaan bushing dapat menyebabkan terbentuknya lapisan penghantar di permukaan bushing. Kotoran ini dapat mengakibatkan jalannya arus melalui permukaan bushing sehingga mencapai body trafo. Umumnya kotoran ini tidak menjadi penghantar sampai endapan kotoran tersebut basah karena hujan/embun.

#### 5. Kegagalan Isolasi Minyak Trafo/Packing Bocor

Kegagalan isolasi minyak trafo dapat terjadi akibat penurunan kualitas minyak trafo sehingga kekuatan dielektrisnya menurun.

Hal ini disebabkan oleh :

- a. Packing bocor, sehingga air masuk dan volume minyak trafo berkurang.
- b. Karena umur minyak trafo sudah tua.

## 2.3. Bagian – Bagian Transformator<sup>2</sup>

### 2.3.1 Inti Besi (*Electromagnetic Circuit / Core*)

Inti besi transformator sebagai media jalannya flux magnet yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada belitan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke belitan yang lain. Inti besi terbuat dari lempengan –lempengan besi tipis yang di susun sedemikian rupa. Inti besi diberi isolasi ataupunyekat untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh *Eddy Current*.

---

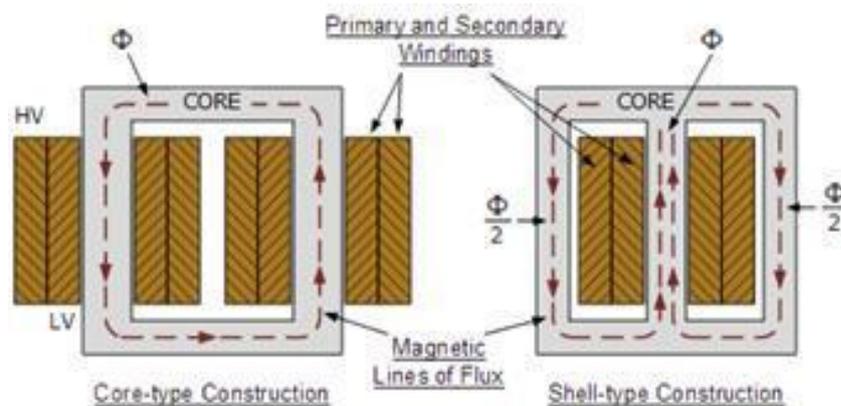
<sup>2</sup> <https://treatmentolitrafo.net/blog/detail/17/komponen-di-dalam-transformator.html>



Gambar 2.1 Inti Besi Transformator

Inti besi pada trafo dibedakan menjadi dua macam yaitu:

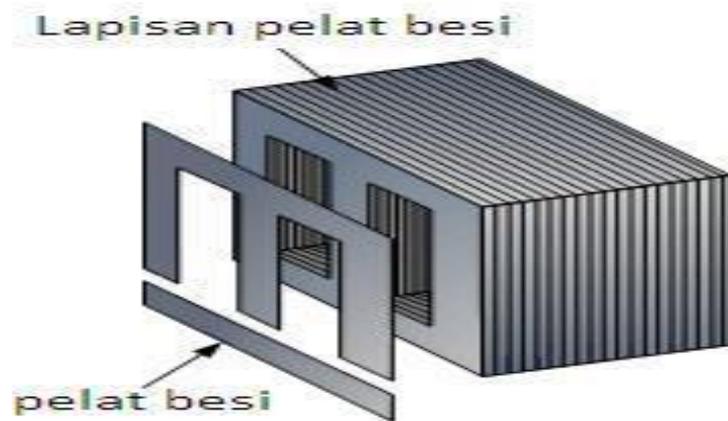
1. Inti besi tipe *shell* (*Shell Core Transformer*)
2. Inti besi tipe tertutup (*Closed Core Transformer*)



Gambar 2.2 Inti Transformator

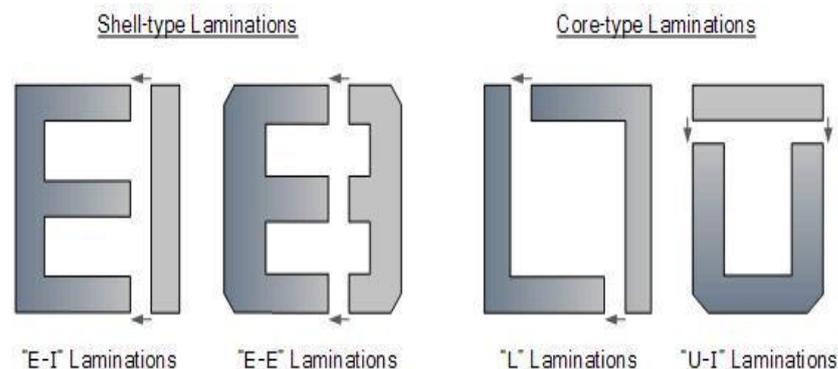
Pada trafo dengan inti besi berbentuk *shell*, kumparan dikelilingi oleh inti besi. Fluks magnetik pada inti besi tipe *shell* akan terbelah dua. Sementara kumparan primer dan kumparan sekunder digulung bersamaan. Untuk trafo yang memiliki inti besi tipe tertutup. Tidak ada pembagian fluks magnetik. Kumparan primer dan kumparan sekunder terpisah dan dihubungkan dengan inti besi.

Inti besi trafo tidak dibuat berbentuk besi tunggal, tetapi dibuat dari pelat besi yang berlapis-lapis. Bentuk lapisan pelat besi pada inti trafo dapat dilihat seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.3 Inti besi berlapis pada transformator

Cara menghubungkan lapisan inti besi juga bermacam-macam. Beberapa cara yang umum digunakan dapat dilihat seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.4 Cara menghubungkan lapisan inti besi pada transformator

### 2.3.2 Kumputan Transformator (*Winding*)

Kumputan atau lilitan adalah media tempat mengalirnya arus yang besarnya disesuaikan dengan kebutuhan. Kumputan kawat tembaga dilapisi isolasi email, penggunaan harus mempertimbangkan daya hantar arus yang tinggi, kemampuan menahan panas, dan tekanan elektromagnetis akibat pembebanan berlebihan dan sebagainya. Kumputan tersebut terdiri dari kumputan primer, dan kumputan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumputan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Lilitan pada transformator distribusi berfungsi



sebagai pembangkit fluks magnet pada rangkaian magnetik. Lilitan transformator distribusi terdiri dari lilitan primer (*High Voltage Winding*) dan lilitan sekunder (*Low Voltage Winding*). Transformator distribusi, lilitan primer dihubungkan tegangan input atau tegangan tinggi, dan lilitan sekunder dihubungkan dengan beban tegangan rendah. Arus yang keluar dari lilitan sekunder ini akan didistribusikan. Bila terminal kumparan di hubungkan dengan sumber arus bolak-balik dan karenanya pada kumparan tersebut timbul fluksi. Fluksi ini akan menginduksikan GGL (gaya gerak listrik) pada kumparan primer dan sekunder. Bila rangkaian sekunder ditutup (bila ada rangkaian beban) maka, akan menghasilkan arus pada kumparan ini. Jadi, kumparan merupakan sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.5 Kumparan atau Belitan Transformator

### 2.3.3 Bushing

*Bushing* adalah isolator yang digunakan untuk mengisolir badan suatu peralatan dengan konduktor bertegangan tinggi yang menerobos badan peralatan tersebut (Tobing, 2012:143). *Bushing* merupakan media penghubung antara kumparan dengan jaringan luar. *Bushing* terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dari *bushing* dengan tangki transformator.

Gambar 2.6. Bushing<sup>3</sup>

Secara garis besar bushing dapat dibagi dalam 4 bagian utama yaitu:

1) Isolasi

Berdasarkan media isolasi bushing terbagi menjadi 2 (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

A. Bushing kondensernya

Bushing kondenser umumnya dipakai pada tegangan rating bushing 72,5 kV ke atas. Bushing kondenser terdapat tiga jenis media isolasi (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

- a. Resin Bonded Paper (RBP) Bushing tipe RBP adalah teknologi bushing kondenser yang pertama dan sudah mulai ditinggalkan
- b. Oil Impregnated Paper (OIP) Pada tipe OIP isolasi yang digunakan adalah kertas dan minyak yang meredam kertas isolasi.
- c. Resin Impregnated Paper (RIP) Pada tipe RIP isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin. Didalam bushing kondenser terdapat banyak lapisan kapasitansi yang disusun secara seri sebagai pembagi tegangan. Pada bushing terdapat dua kapasitansi utama yang biasa disebut C1 dan C2. C1 adalah kapasitansi antara konduktor dengan tap bushing dan C2 adalah kapasitansi dari tap bushing ke ground (flange bushing). Dalam kondisi operasi tap bushing dihubungkan ke ground, sehingga C2 tidak ada nilainya ketika bushing operasi.

<sup>3</sup> [https://www.academia.edu/9900561/Bab\\_1\\_Tranformator\\_Daya](https://www.academia.edu/9900561/Bab_1_Tranformator_Daya)



## B. Bushing Non-kondenser

Bushing non condenser umumnya digunakan pada tegangan rating 72,5 kV kebawah. Media isolasi utama bushing non condenser adalah isolasi padat seperti porcelain atau keramik

### 2) Konduktor

Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu hollow conductor dimana terdapat besi pengikat

### 3) Klem koneksi

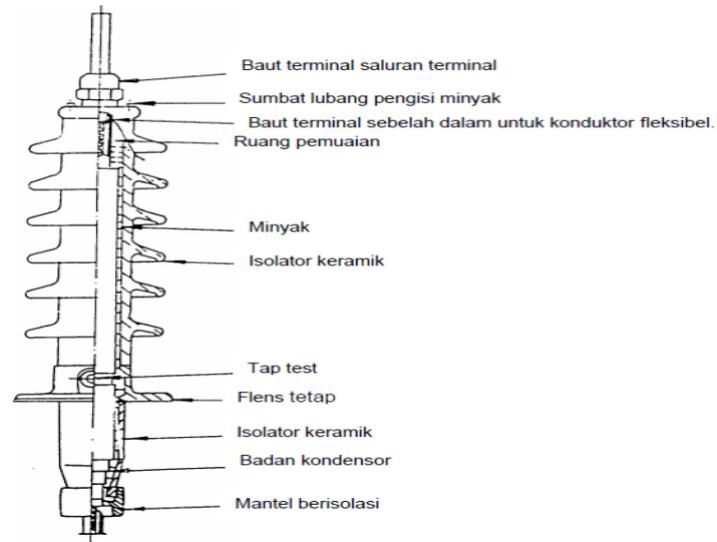
Sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar diluar bushing.

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi dan assesoris. Isolasi pada bushing terdiri dari 2 jenis yaitu *oil impregnated paper* dan *resin impregnated paper*. Pada tipe *oil impregnated paper* isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.



Gambar 2.7 Konduktor Bushing Dilapisi Kertas Isolasi

Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu *hollow conductor* dimana terdapat besi pengikat atau penengah ditengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan *flexible lead*. Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar diluar bushing. Assesoris bushing terdiri dari indikasi minyak, seal atau gasket dan tap pengujian. Seal atau gasket pada bushing terletak di bagian bawah *mounting flange*.



Gambar 2.8 Konstruksi Bushing Transformator

### 2.3.4 Minyak Transformator

Minyak transformator memiliki fungsi sebagai penyekat dan media pendingin pada transformator. Minyak transformator mempunyai sifat media pemindah panas (disirkulasi) dan harus mempunyai daya tegangan tembus tinggi. Kumparan-kumparan dan inti besi pada transformator tenaga yang berkapasitas besar direndam dalam minyak-transformator

Gambar 2.9 Minyak Transformator<sup>4</sup>

Minyak transformator juga harus diperhatikan keadaannya agar tidak mempengaruhi kualitasnya ketika dimasukkan kedalam bodi trafo dan gas apa saja yang terkandung didalam minyak transformator tersebut.

<sup>4</sup> Bongas L. Tobing, Peralatan Tegangan Tinggi, Penerbit Erlangga hal 228



Tabel 2.1 Keadaan Minyak Isolasi dengan Kandungan Gas

No	Nama Gas	Lambang Kimia
1.	Hidrogen	H <sub>2</sub>
2.	Metana	CH <sub>4</sub>
3.	Karbondioksida	CO <sub>2</sub>
4.	Etilena	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
5.	Ethana	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
6.	Asetilena	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
7.	Nitrogen	N <sub>2</sub>

Isolasi minyak transformator yang baik mempunyai karakteristik fisik diantaranya, yaitu :

- a. Kejernihan penampilan dilihat dari warna minyak, warna minyak yang baik memiliki warna yang jernih, bersih, dan bebas endapan. Selama transformator dioperasikan, isolasi minyak akan melarutkan suspensi atau endapan. Semakin banyak isolasi minyak mengalami endapan yang terlarut, maka warna minyak akan semakin gelap.
- b. Viskositas minyak adalah suatu hal yang sangat penting karena minyak transformator yang baik akan memiliki viskositas yang rendah, sehingga dapat bersirkulasi dengan baik dan akhirnya pendinginan inti dan belitan transformator dapat berlangsung dengan baik pula. Nilai viskositas untuk minyak baru harus  $\leq 18$  Cst. Uji viskositas hanya dilakukan untuk minyak isolasi baru. Metoda yang dipakai mengacu pada ISO 3104.
- c. Massa Jenis minyak transformator harus mempunyai massa jenis yang kecil, agar partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat. Massa jenis merupakan perbandingan massa suatu volume cairan pada suhu 15,56<sup>0</sup>C dengan massa volume air. Massa jenis isolasi minyak transformator harus lebih ringan dari pada massa jenis air.
- d. Titik nyala dari minyak transformator yang baru tidak boleh lebih kecil dari 135<sup>0</sup>C, sedangkan suhu minyak bekas tidak boleh kurang dari 130<sup>0</sup>C. Flash

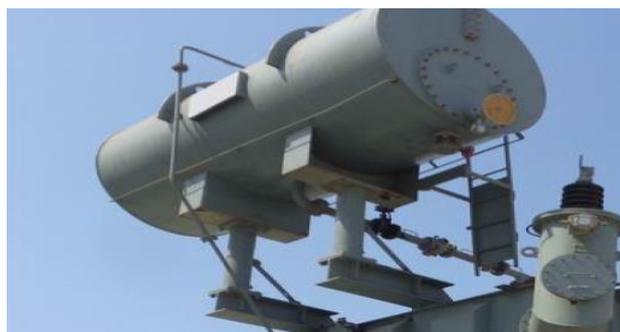


point (titik nyala) suatu minyak transformator perlu diketahui dengan pertimbangan keamanan. IEC menetapkan pengujian titik nyala minyak transformator dengan menggunakan metode pensky martin tertutup. Karakteristik titik nyala minyak menentukan terjadinya penguapan dalam minyak. Jika titik nyala minyak rendah, mengidentifikasi terdapat kandungan yang bersifat volatile combusite, sehingga minyak akan mudah menguap dan menyebabkan volume minyak akan berkurang yang pada akhirnya minyak semakin kental (viskositasnya semakin tinggi).

- e. Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi. Titik tuang merupakan nilai batas isolasi minyak akan terus mengalir saat didinginkan pada temperatur di bawah normal.

### **2.3.5 Tangki Konservator**

Ketika transformator mengalami kenaikan suhu operasi, minyak transformator akan memuai sehingga volumenya bertambah. Tangki konservator berfungsi sebagai tempat penampungan ketika terjadi pemuaian minyak transformator akibat peningkatan suhu operasi transformator.



Gambar 2.10 Tangki Konservator



### 2.3.6 Alat Pernafasan (*Silica Gel*)

*Silica gel* adalah alat pernafasan transformator dan berbentuk tabung berisi kristal zat hygroskopis. Karena adanya pengaruh naik turunnya beban transformator maupun udara luar, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernafasan.



Gambar 2.11 *Silica Gel*

### 2.3.7 Tap Changer

*Tap changer* adalah alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah. *Tap changer* yang hanya bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban disebut “*Off Load Tap Changer*” dan hanya dapat dioperasikan manual. *Tap changer* yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator, dalam keadaan transformator berbeban disebut “*On Load Tap Changer*” dan dapat dioperasikan secara manual atau otomatis.

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Trafo dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan sehingga dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/ sekunder



pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut tap changer.

Tap changer terdiri dari:

- a. Selector Switch
- b. Diverter Switch
- c. Tahanan transisi

Dikarenakan aktifitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah. Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal-terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer. Diverter switch merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi. Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.



Gambar 2.12 Tap changer

Tap changer transformator terdiri dari dua jenis yaitu:

a. *Off load tap changer*

Tipe tap changer yang dapat beroperasi hanya pada saat keadaan tidak berbeban. Tipe *off load* tap changer hanya bisa dioperasikan secara manual.



*b. On load tap changer*

Tipe tap changer yang dapat beroperasi pada saat keadaan berbeban dapat dioperasikan secara manual dan otomatis.

### **2.3.8 Sistem Pendingin**

Transformator dilengkapi dengan sistem pendingin yang bertujuan untuk membantu pendinginan pada saat kondisi transformator terjadi peningkatan suhu. Sistem pendinginan ini juga membantu minyak isolasi transformator yang selain sebagai penyekat juga sebagai media pendingin apabila tidak mampu menjalankan fungsinya sebagai pendingin. Tipe pendinginan transformator ada dua yaitu secara alami dan paksaan yaitu dengan sirip-sirip transformator (riben), radiator dan bantuan motor penggerak untuk menghembuskan udara.

### **2.3.9 Indikator**

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator sebagai berikut:

a. Indikator level minyak

Indikator level minyak berfungsi memberikan informasi mengenai level minyak pada tangki konservator. Setelah melihat level minyak, lalu melihat temperatur minyak isolasi. Setelah melihat dua variable tersebut, dapat dilihat apakah transformator dalam keadaan baik dengan melihat grafik hubungan antara level minyak dengan temperatur minyak.

b. Indikator temperatur minyak dan belitan

Indikator temperatur minyak dan belitan ini digunakan untuk mengindikasikan keadaan internal transformator. Indikator ini mengindikasikan titik terpanas pada minyak dan belitan berdasarkan tes temperatur yang dilakukan oleh pihak pembuat transformator. Pemeliharaan yang dilakukan berupa pengecekan jarum penunjuk angka temperatur. Pada indikator-indikator ini terdapat dua buah jarum



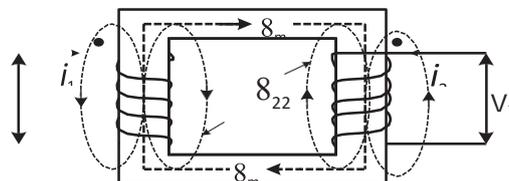
penunjuk angka, yaitu berwarna silver dan berwarna merah. Jarum penunjuk yang berwarna merah menunjukkan set point alarm, sedangkan jarum penunjuk yang berwarna silver menunjukkan pembacaan aktual saat itu. Jarum penunjuk pada indikator temperatur biasanya mempunyai kontak elektrik untuk memicu alarm dan memicu kipas pendingin apabila temperatur minyak dan belitan dirasakan oleh sensor suhu melebihi batas sensor suhunya.



Gambar 2.13 Indikator Temperatur Minyak dan Belitan

## 2.4 Prinsip Kerja Transformator<sup>5</sup>

Prinsip kerja transformator terdiri dari dua buah belitan atau kumparan yaitu primer dan sekunder yang terpisah secara elektrik namun terhubung dengan fluks atau medan magnet secara magnetic, dimana gaya gerak listrik diinduksikan pada suatu belitan yang melingkupi perubahan fluks seperti pada gambar dibawah ini.

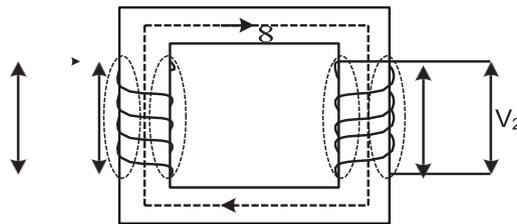


Gambar 2.14 Aliran Pada Transformator

<sup>5</sup> Suganda, Abdul Muis 2021 *Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator Daya* Institut Sains dan Teknologi Nasional Jalan Moh Kahfi II, Srengseng Sawah, Jagakarsa, Kota Jakarta Selatan, Jakarta 12630



Arus listrik bolak – balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet, dimana magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda tegangan, yang disebut tegangan induksi seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar. 2.15 Prinsip Transformator

Besar tegangan induksi ditentukan menurut hukum faraday yaitu :

$$E = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.1)$$

Bila kumparan sekunder dalam keadaan tidak dibebani maka di kumparan primer mengalir arus yang disebut dengan arus beban nol ( $I_0$ ). Arus ini akan membangkitkan fluks bolak – balik pada inti besi. Fluks bolak – balik ini dilingkupi oleh kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga pada kedua kumparan timbul gaya gerak listrik yang besarnya :

$$E_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$E_1 = -N_1 \frac{d\phi_m \sin \omega t}{dt} = -\omega N_1 \phi_m \cos \omega t$$

$$E_1 = -\omega N_1 \phi_m \cos \omega t = -\omega N_1 \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \dots\dots(2.2)$$

Dari persamaan (2) tegangan induksi sudut fasa tertinggal  $90^\circ$  maka :

$$E_1 = 2\pi f \phi_m \dots\dots\dots(2.3)$$



Maka tegangan efektif sisi primer yaitu :

$$E_1 = N_1 \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 f \Phi_m \text{ [Volt] } \dots\dots\dots(2.4)$$

Perbandingan transformator ;

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 N_1 f \Phi_m}{4,44 N_2 f \Phi_m} \rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{c}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = a \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

$E_1$  = Tegangan efektif pada kumparan sisi primer

$E_2$  = Tegangan efektif pada kumparan sisi sekunder

$N_1$  = Jumlah belitan kumparan primer

$N_2$  = Jumlah belitan kumparan sekunder

$f$  = Frekuensi tegangan sekunder (Hz)

$\Phi$  = Fluks magnetik pada inti (weber)

$a$  = Perbandingan transformator

## 2.5 Peralatan Proteksi

Proteksi atau pengaman sebuah transformator terhadap akibat gangguan yang terjadi pada transformator itu sendiri atau pada bagian lain dari sistem tenaga listrik bersangkutan, secara umum dapat digolongkan menjadi dua kelompok jenis pengaman yaitu:

- a. Pengaman obyek yaitu proteksi transformator maupun sistem terhadap gangguan yang terjadi di dalam transformator itu sendiri
- b. Pengaman sistem yaitu proteksi transformator terhadap gangguan yang terjadi dalam sistem listrik itu diluar transformator

Gangguan-gangguan yang terjadi misalnya berupa:

- a. Terjadi arus lebih karena arus hubung singkat atau beban lebih
- b. Terjadinya hubungan tanah

- c. Terjadinya gangguan didalam transformator
- d. Terjadinya gangguan disebabkan petir

Sebuah transformator distribusi dengan daya yang relatif kecil biasanya mendapatkan pengaman yang sederhana terhadap arus lebih atau arus hubung singkat dengan sekring saja. Proteksi yang lebih lengkap akan menjadi terlampau mahal untuk daya terpasang yang tidak begitu besar ini. Sebaliknya transformator daya yang besar pada umumnya dilengkapi dengan berbagai jenis pengaman untuk melindungi terhadap gangguan-gangguan yang dapat terjadi pada transformator itu sendiri maupun bagian lain dari sistem tenaga listrik.

## 2.6 Macam-macam Transformator

### 2.6.1 Letak kumparan terhadap inti transformator

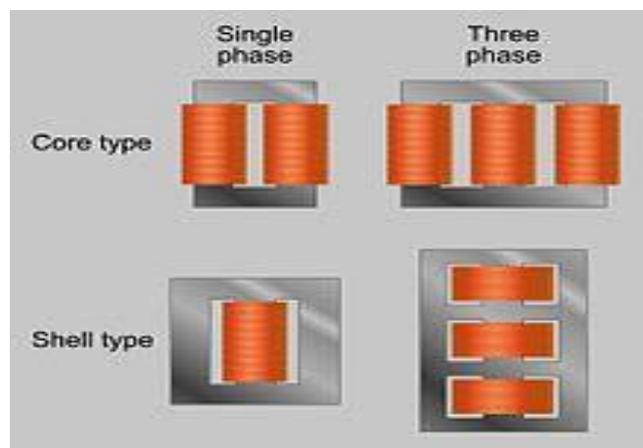
Berdasarkan kedudukan (letak) kumparan terhadap inti, maka jenis transformator ada 2 macam, yaitu :

#### 1. *Core Type* ( jenis inti ).

Pada transformator tipe inti, kumparan mengelilingi inti dan kontruksi dari intinya berbentuk huruf L atau huruf U.

#### 2. *Shell Type* ( jenis cangkang )

Pada transformator tipe cangkang, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti dan kontruksi intinya berbentuk huruf E, huruf I, dan huruf F.



Gambar 2.16 Core Type dan Shell Type



### 2.6.2 Jumlah fasa

Sebagaimana diketahui, bahwa fasa tegangan listrik yang umum digunakan adalah tegangan satu dan tiga fasa. Berdasarkan hal tersebut dikenal 2 jenis transformator yaitu :

1. Transformator satu fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga satu fasa.
2. Transformator tiga fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga tiga fasa.

Sebenarnya konstruksi satu fasa dan tiga fasa tidak mempunyai perbedaan yang prinsip, sebab tiga fasa adalah transformator satu fasa yang disusun dalam tata cara tertentu dari 3 buah transformator satu fasa.

### 2.7. Pengertian Tahanan Isolasi Transformstor<sup>6</sup>

Tahanan isolasi ( Insulation Resistence) adalah ukuran kebocoran arus yang melalui isolasi, yang bertujuan untuk mengetahui kondisi isolasi antara belitan dengan ground atau antara dua belitan. Metoda yang umum dilakukan adalah dengan memberikan tegangan dc dan mempresentasikan kondisi isolasi dengan satuan mega ohm. Tahanan isolasi yang diukur merupakan fungsi dari arus bocor yang menembus melewati isolasi atau melalui jalur bocor pada permukaan eksternal. Tahanan isolasi ndapat dipengaruhi oleh suhu, kelembapan dan jalur bocor pada permukaan eksternal seperti kotoran pada bushing atau isolator.

### 2.8. Metode pengujian Tahanan Isolasi Transformator<sup>7</sup>

Umumnya pengujian tahanan isolasi dilakukan dengan memberikan tegangan yang memiliki nilai yang lebih tinggi dari tegangan yang biasa

<sup>6</sup> Devianto, Alif Febriari.(2019). *Analisis Tahanan Isolasi Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Indeks Polarisasi, Tangen Delta dan Break Down Voltage di Gardu Induk 150 KV Kentungan*

<sup>7</sup> Koswara Ajang, A. Daryanto *Analisis Pengujian Transformator Distribusi Daya 160KVA – Tegangan 20KV/400V – 4,6A/231A Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Jakarta.*

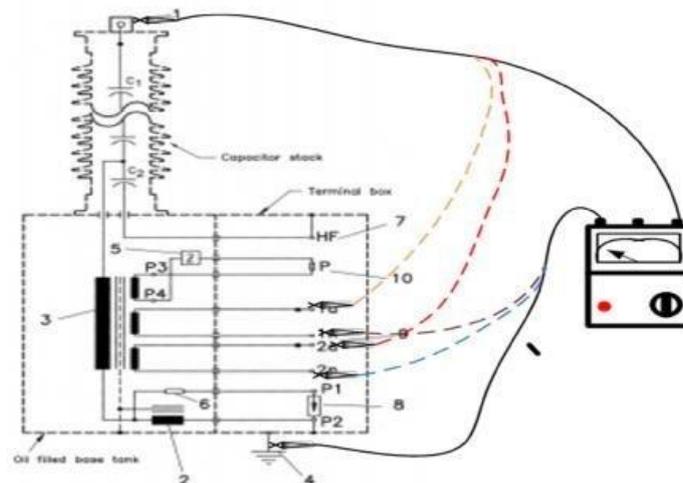
mengalir pada penghantar tersebut. Shutdown testing atau measurement adalah pengujian yang dilakukan pada saat transformator dalam keadaan padam. Pekerjaan ini dilakukan pada saat pemeliharaan rutin maupun pada saat investigasi ketidak normalan. Pada dasarnya pengujian tahanan isolasi belitan transformator adalah untuk mengetahui besar kebocoran arus atau leakage current yang terjadi pada isolasi peralatan listrik memang tidak dapat dihindari, oleh karena itu salah satu cara mendeteksi bahwa transformator cukup aman untuk diberi tegangan adaalah dengan mengukur tahanan isolasinya.

Standard : VDE ( catalogue 228/4 ) minimum besarnya tahnan isolasi kumparan transformator, pada suhu operasi dihitung 1 Kilo Volt = 1 MOhm.

Tabel 2.2 Standar Nilai Tahanan Isolasi Menurut VDE ( catalogue 228/4 )<sup>8</sup>

No	Hasil Uji	Kondisi	Keterangan
1	> 1 MOhm/1 kV	Baik	Normal
2	< 1 MOhm/1 kV	Jelek	Lakukan Pengujian Lebih Lanjut

Berikut gambar rangkaian pengujian tahanan isolasi pada transformator :



Gambar 2.17 Rangkaian Pengujian Tahanan Isolasi<sup>9</sup>

<sup>8</sup> PT. PLN (Persero).2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tegangan SK-DIR 0520.Jakarta*

<sup>9</sup> PT. PLN (Persero).2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tegangan SK-DIR 0520.Jakarta*



### 2.8.1 Metode Indeks Polarisasi<sup>10</sup>

Metode indeks polarisasi adalah metode yang umum dilakukan dengan memberikan tegangan DC dan dilakukan dengan mempresentasikan kondisi isolasi dengan satuan mega ohm. Pengujian tahanan isolasi pada transformator dapat dipengaruhi oleh suhu, kelembapan dan jalur bocor pada permukaan eksternal seperti kotoran pada bushing atau isolator.

Ada 3 arus yang mengalir saat sumber DC steadystate diberikan pada belitan, yaitu capacitive current, leakage current dan absorption current.

Tujuan dari pengujian indeks polarisasi adalah untuk memastikan peralatan tersebut layak dioperasikan dan bisa digunakan, dalam menunjukan pembacaan tahanan isolasi transformator dikenal sebagai dielectric absorption, yang diperoleh dari pembacaan berkelanjutan untuk periode waktu yang lebih lama dengan sumber tegangan yang konstan. Pengujian indeks polarisasi dilakukan dalam selama 10 menit, karena tahanan isolasi akan mempunyai kemampuan untuk mengisi kapasitansi tinggi ke dalam isolasi transformator, dan pembacaan resistansi akan meningkat lebih cepat jika isolasi bersih dan kering. Rasio pembacaan 10 menit dibandingkan pembacaan 1 menit. Besarnya indeks polaritas (IP) dapat dirumuskan sebagai berikut menurut standard IEEE 62-1995 mengenai evaluasi dari isolasi transformer pada persamaan dibawah ini :

$$I_p = \frac{R_{10}}{R_1} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

IP = Indeks Polaritas

<sup>10</sup> Robbani Muhammad Firdaus, Dedi Nugroho, Gunawan. 2020 *Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage* Universitas Islam Sultan Agung Semarang Jl. Raya Kaligawe Km.4 Po.Box 1054 Semarang 50112



$R_1$  = Nilai tahanan isolasi pengujian menit pertama

$R_{10}$  = Nilai tahanan isolasi pengujian menit ke-10

Jika nilai indeks polaritas (IP) terlalu rendah ini mengindikasikan bahwa isolasi telah terkontaminasi oleh kotoran, kelembapan, suhu dan arus bocor. Metode ini digunakan untuk mengetahui kondisi isolasi berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi. Kondisi isolasi berdasarkan indeks polarisasi ditunjukkan pada tabel 2.3 menurut standard IEEE 62-1995

Tabel 2.3 Standard Indeks Polarisasi Transformator<sup>11</sup>

Kondisi	Index Polarisasi
Berbahaya	<1
Jelek	1,0 - 1,1
Dipertanyakan	1,1 - 1,25
Baik	1,25 - 2,0
Sangat Baik	Diatas 2,0

Untuk isolasi belitan yang baik, nilai indeks polarisasi harus minimum 1,25 pada pengukuran di temperature 20°C.

- Nilai indeks polarisasi diantara 1,25-2,0 peralatan masih dapat dioperasikan, tapi perlu pengawasan dan pantauan berkala.
- Nilai indeks polarisasi dibawah 1,25 mengindikasikan isolasi belitan peralatan tersebut dalam keadaan basah, kotor atau sudah ada yang bocor. Sehingga perlu dilakukan pembersihan, pengeringan dan rekondisi apabila ditemukan kerusakan pada isolasinya.

<sup>11</sup> Robbani Muhammad Firdaus, Dedi Nugroho, Gunawan. 2020 *Penentuan Kelayakan Tahanan Isolasi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk 150 kV Tegal Dengan Menggunakan Indeks Polarisasi, Tangen Delta, Dan Breakdown Voltage* Universitas Islam Sultan Agung Semarang Jl. Raya Kaligawe Km.4 Po.Box 1054 Semarang 50112



Batasan tegangan untuk mengukur tahanan isolasi instalasi tegangan menengah maupun tegangan rendah adalah :

- a. Untuk instalasi tegangan menengah digunakan insulation tester dengan batas ukur mega ohm sampai giga ohm dan tegangan alat ukur antara 5.000 volt sampai dengan 10.000 volt arus searah
- b. Untuk instalasi tegangan rendah digunakan insulation tester dengan batas ukur sampai mega ohm dan tegangan alat ukur antara 500 sampai 1.000 volt arus searah.

Tabel 2.4 Standard Tegangan DC Pengujian Tahanan Isolasi

Tegangan (V)	Tegangan DC Tahanan isolasi (V)
<1.000	500
1.000-2,500	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

### 2.8.2 Pengujian Breakdown voltage

Pengujian kekuatan tarik digunakan untuk melihat tahanan minyak isolasi dalam menahan tegangan. Pengujian mengacu pada IEC 60156. Pengujian dilakukan saat menguji transformator dalam keadaan mati untuk menghemat waktu. Selama pengujian ini, oli juga diganti di tangki konservator. Oli transformator menerima tegangan frekuensi dari sistem menggunakan metode penempatan dua elektroda. Jarak elektroda tergantung pada standard yang digunakan, dalam hal ini 2,5 mm.

Perhitungan kekuatan dielektrik minyak trafo menggunakan rumus berikut :

$$E_{rata-rata} = \frac{V_b \text{ (rata-rata)}}{d} \text{ (kV/mm)} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

$V_b$  = Tegangan tembus (kV)

$E$  = kekuatan dielektrik (kV/mm)

$d$  = jarak sela (mm)

Tabel 2.5 Standar Kualitas Minyak Transformator Menurut IEC 60422<sup>12</sup>

No	Uraian	Kondisi	Keterangan
1.	Kategori D (>170 kV)		
	> 60 kV/2,5 mm	Good	Normal
	50 - 60 kV/2,5 mm	Fair	- Periksa apakah ada indikasi kebocoran VT dan perbaikan
	< 50 kV/2,5 mm	Poor	- Laksanakan penggantian minyak sesuai manual instruction atau hubungi pabrikan
2.	Kategori E (<170 kV)		
	> 50 kV/2,5 mm	Good	Normal
	40 - 50 kV/2,5 mm	Fair	- Periksa apakah ada indikasi kebocoran VT dan perbaikan
	< 40 kV/2,5 mm	Poor	- Laksanakan penggantian minyak sesuai manual instruction atau hubungi pabrikan

<sup>12</sup> PT. PLN (Persero).2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tegangan SK-DIR 0520*. Jakarta



## 2.9. Pengujian Ratio Transformator Distribusi<sup>13</sup>

Pengujian rasio adalah untuk mengetahui perbandingan jumlah kumparan sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah pada setiap tapping (Arif, 2015). Pengujian rasio adalah pengujian perbandingan jumlah lilitan sekunder terhadap lilitan primer pada transformator (Subekti, 2013).

Rasio perbandingan belitan trafo distribusi yang masih baik ditunjukkan dengan hasil pengukuran yang masih berada didalam batas toleransi yang diijinkan, yaitu  $\pm 0,5 \%$  dari rasio tegangan (standard IEC).

Berikut ini merupakan contoh perhitungan perbandingan rasio normal belitan trafo pada tap 1 pada trafo dengan acuan manufaktur SPLN 50 : 1997<sup>14</sup>.

$$\text{Tap 1} = \frac{22.000}{400\sqrt{3}} = 95,562$$

Kemudian dihitung besarnya toleransi perbandingan batas maksimal dan minimal trafo, batas maksimal dikalikan dengan 1,005 sedangkan batas minimal juga dikalikan dengan 0,995. Sehingga didapatkan:

- $95,262 \times 1,005 = 95,739$
- $95,262 \times 0,995 = 94,785$

Atau jika dinyatakan dalam persen, maka digunakan rumus:

$$\% \text{ Error teg. Sekunder} = \frac{\text{Error Tegangan}}{\text{Sekunder transformator}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.8)$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, sebuah Transformator Distribusi dapat dikatakan baik perbandingan belitannya apabila nilai rasionya berada diantara batas maksimal dan batas minimal pada masing-masing tap pada saat pengukuran.

<sup>13</sup> Makkulau, Andi; Nurmiati Pasra; Rifaldi Riska Siswanto.(2018) *Pengujian Tahanan Isolasi dan Rasio Pada Trafo PS T15 PT Indonesia Power up mrica* Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknik – PLN

<sup>14</sup> Harahap Raja, Julius Alfredo Pakpahan.2018 *Analisa Pengukuran Ratio Transformator Daya yang Menggunakan On Load Tap Changer (Aplikasi Pada Transformator Daya Paya Geli PLN Medan)* Universitas Sumatera Utara (USU) Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 Indo

Tabel 2.6 Standar Perbandingan Ratio<sup>15</sup>

SPLN 50:1982				
TRAFO 5 SADAPAN				
Tap	Tegangan	Rasio Normal / Phase	Persyaratan Standar	
			MIN	MAKS
1	21000	90.932625	90.47796188	91.38728813
2	20500	88.7675625	88.32372469	89.21140031
3	20000	86.6025	86.1694875	87.0355125
4	19500	84.4374375	84.01525031	84.85962469
5	19000	82.272375	81.86101313	82.68373688
SPLN 50 : 1997				
TRAFO 5 SADAPAN				
Tap	Tegangan	Rasio Normal / Phase	Persyaratan Standar	
			MIN	MAKS
1	22000	95.26275	94.78643625	95.73906375
2	21000	90.932625	90.47796188	91.38728813
3	20000	86.6025	86.1694875	87.0355125
4	19000	82.272375	81.86101313	82.68373688
5	18000	77.94225	77.55253875	78.33196125
SPLN 50 : 1997				
TRAFO 3 SADAPAN				
Tap	Tegangan	Rasio Normal / Phase	Persyaratan Standar	
			MIN	MAKS
1	21000	90.932625	90.47796188	91.38728813
2	20000	86.6025	86.1694875	87.0355125
3	19000	82.272375	81.86101313	82.68373688
SPLN D3.002-1 : 2007				
TRAFO 5 SADAPAN				
Tap	Tegangan	Rasio Normal / Phase	Persyaratan Standar	
			MIN	MAKS
1	21000	90.932625	90.47796188	91.38728813
2	20500	88.7675625	88.32372469	89.21140031
3	20000	86.6025	86.1694875	87.0355125
4	19500	84.4374375	84.01525031	84.85962469
5	19000	82.272375	81.86101313	82.68373688
SPLN D3.002-1 : 2007				
TRAFO 7 SADAPAN				
Tap	Tegangan	Rasio Normal / Phase	Persyaratan Standar	
			MIN	MAKS
1	21000	90.932625	90.47796188	91.38728813
2	20500	88.7675625	88.32372469	89.21140031
3	20000	86.6025	86.1694875	87.0355125
4	19500	84.4374375	84.01525031	84.85962469
5	19000	82.272375	81.86101313	82.68373688
6	18500	80.1073125	79.70677594	80.50784906
7	18000	77.94225	77.55253875	78.33196125

<sup>15</sup> Makkulau, Andi; Nurmiati Pasra; Rifaldi Riska Siswanto.(2018) *Pengujian Tahanan Isolasi dan Rasio Pada Trafo PS*