

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Transformator**

Pada sistem tenaga listrik, salah satu alat yang paling vital adalah transformator. Transformator merupakan 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.

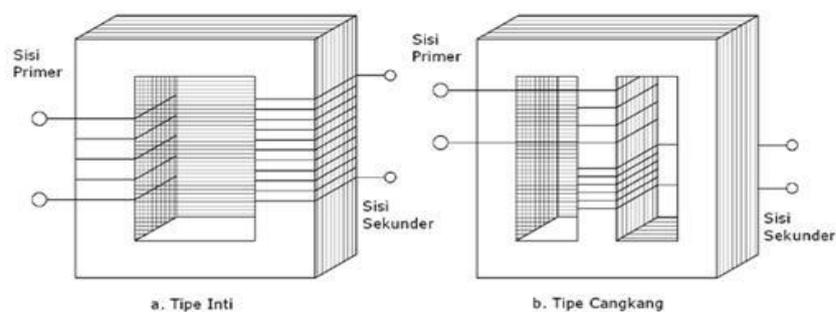
Dalam bentukannya yang paling sederhana, transformator terdiri dari atas dua kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer adalah kumparan yang menerima daya dan dinyatakan sebagai terminal masukan dan kumparan sekunder adalah kumparan yang melepaskan daya dan sebagai terminal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

Transformator adalah komponen elektromagnet yang dapat merubah tegangan tinggi ke rendah atau sebaliknya dalam frekuensi sama. Transformator merupakan jantung dari distribusi dan transmisi yang diharapkan beroperasi maksimal (kerja terus menerus tanpa henti). Agar dapat berfungsi dengan baik, maka transformator harus dipelihara dan dirawat dengan baik menggunakan sistem dan peralatan yang tepat. Transformator dapat dibedakan berdasarkan tenaganya, transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut transformator Interbus Transformator (IBT) dan transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut transformator distribusi. Transformator pada umumnya ditanahkan pada titik netral sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan

Transformator 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 dan hukum lorentz, 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.

Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder<sup>1</sup>. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kedua kumparan itu. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar kaki inti transformator. Secara umum dapat dibedakan dua jenis transformator menurut konstruksinya, yaitu tipe inti, dan tipe cangkang. Pada tipe inti terdapat dua kaki, dan masing – masing kaki dibelit oleh satu kumparan. Sedangkan tipe cangkang mempunyai tiga buah kaki, dan hanya kaki yang di tengah – tengah dibelit oleh kedua kumparan saling tergabung secara magnetik melalui inti. Kumparan – kumparan itu tidak tergabung secara elektrik. Bagian datar dari inti dinamakan pemikul.



**Gambar 2.1** tipe inti transformator<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Abdul Kadir, Transformator, Penerbit Universitas Indonesia, 2010, hal 1

## 2.2 Prinsip Kerja Transformator<sup>1</sup>

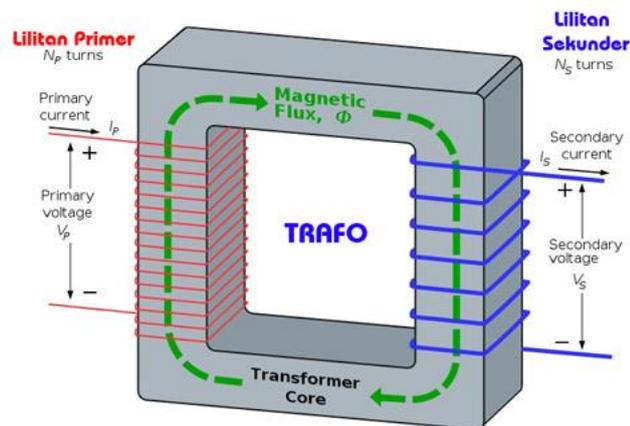
Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Berdasarkan pada hukum tersebut maka apabila sebuah kumparan (primer) dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik (AC) maka akan timbul fluks bolak-balik pada inti yang terbungkus kumparan. Kumparan tersebut membuat jaringan tertutup, sehingga mengalirlah arus primer. Karena adanya fluks pada kumparan primer, maka pada kumparan primer terjadi induksi sendiri (*self induction*). Pengaruh induksi dari kumparan primer membuat kumparan sekunder juga terjadi induksi. Transformator terdiri dari dua gulungan kawat yang terpisah satu sama lain, yang dibelitkan pada inti yang sama. Daya listrik dipisahkan dari kumparan primer ke kumparan sekunder dengan perantaraan garis gaya magnet (fluks magnet), yang dibangkitkan oleh aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer.

Untuk dapat membangkitkan tegangan listrik pada kumparan sekunder, fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan primer harus berubah-ubah. Untuk memenuhi hal ini, aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer haruslah aliran listrik bolak-balik. Saat kumparan primer dihubungkan ke sumber listrik AC, pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet bersama yang bolak-balik juga. Dengan adanya gaya gerak magnet ini, di sekitar kumparan primer timbul fluks magnet bersama yang juga bolak-balik. Adanya fluks magnet bersama ini pada ujung-ujung kumparan sekunder timbul gaya gerak listrik induksi sekunder yang mungkin sama, lebih tinggi, atau lebih rendah dari gaya gerak listrik primer. Hal ini tergantung pada perbandingan transformasi kumparan transformator tersebut.

Jika kumparan sekunder dihubungkan ke beban, maka pada kumparan sekunder timbul arus listrik bolak-balik sekunder akibat adanya gaya gerak listrik induksi sekunder. Hal ini mengakibatkan timbul gaya gerak magnet pada kumparan sekunder dan akibatnya pada beban timbul tegangan sekunder.

---

<sup>1</sup>Abdul Kadir, loc.cit.



**Gambar 2.2** Prinsip Kerja Transformator

Induksi pada kumparan sekunder biasa disebut induksi bersama (mutual induction). Induksi yang terjadi pada kumparan sekunder menyebabkan terjadinya fluks magnet. Fluks magnet pada kumparan sekunder menghasilkan gaya gerak listrik. Ketika rangkaian sekunder ini diberi beban maka mengalirlah arus sekunder akibat dari gaya gerak listrik yang terjadi. Bisa dikatakan transformator ini meneruskan tenaga listrik secara magnetik.

### 2.3 Penyebab Gangguan Transformator<sup>1</sup>

Transformator memiliki beberapa penyebab gangguan yaitu:

1. Tegangan Lebih Akibat Petir Gangguan ini terjadi akibat sambaran petir yang mengenai kawat fase, sehingga menimbulkan gelombang berjalan yang merambat melalui kawat fase tersebut dan menimbulkan gangguan pada transformator. Akibat kerusakan peralatan/pentanahan yang tidak ada. Pada kondisi normal arrester akan mengalirkan arus bertegangan lebih yang muncul akibat sambaran petir ke tanah.
2. Overload dan Beban Tidak Seimbang overload terjadi karena beban yang terpasang pada transformator melebihi kapasitas maksimum yang dapat dipikul transformator dimana arus beban melebihi arus beban penuh (full load) dari transformator.
3. Loss Contact Pada Terminal Bushing Gangguan ini terjadi pada bushing

<sup>1</sup>Ibid hal 3

transformator yang disebabkan terdapat kelonggaran pada hubungan kawat fasa (kabel schoen) dengan terminal bushing.

#### 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 transformator sehingga mengakibatkan hubungan singkat fasa ke tanah.
- b. Bushing kotor dapat menyebabkan terbentuknya lapisan penghantar di permukaan bushing. Kotoran ini dapat mengakibatkan jalannya arus melalui permukaan bushing sehingga mencapai body transformator. Umumnya kotoran ini tidak menjadi penghantar sampai endapan kotoran tersebut basah karena hujan/embun.

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

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

## 2.4 Bagian-bagian Transformator

### 2.4.1 Inti besi (*electromagnetic circuit / core*)

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, dan hal ini timbul karena adanya arus listrik yang melalui kumparan. Serta inti besi terbuat dari lempengan besi tipis yang berisolasi, guna untuk mengurangi panas pada inti besi tersebut. Inti besi, yang merupakan bahan ferro magnet berfungsi untuk melipatgandakan nilai atau mempermudah jalan fluk. Nilai induksi atau kerapatan fluksi di dalam inti besi jauh lebih besar dan nilai induksi kumparan yang sama

jika intinya terbuat dari bahan non ferro, karena nilai permeabilitas bahan ferro ribuan kali lebih besar dari nilai permeabilitas bahan non ferro magnet. Inti besi juga berfungsi menghantarkan dan mengarahkan arus magnet (fluksi), sehingga hampir seluruh fluksi yang dibangkitkan kumparan primer menerobos kumparan sekunder sehingga di kumparan sekunder terinduksi GGL yang selanjutnya memasok energi listrik ke beban. Dengan demikian, hampir seluruh energi listrik di kumparan primer dipindahkan dan diubah menjadi energi listrik dikumparan sekunder melalui medan magnet. Namun, inti besi juga memberikan efek negatif pada operasi transformator, yaitu menyebabkan timbulnya rugi-rugi energi yang disebut rugi besi yaitu :

- a. Rugi-rugi arus pusar, rugi-rugi ini timbul akibat fluksi bolak-balik menerobos inti besi sehingga timbul arus pusar yang mengalir di dalam inti besi tersebut sehingga mengakibatkan timbulnya panas.
- b. Rugi-rugi histerisis, rugi-rugi ini juga menimbulkan panas pada inti besi tersebut. Nilai rugi histerisis proporsional dengan luas lengkung kemagnetan inti besi tersebut.

Untuk menekan rugi besi akibat arus pusar, inti besi harus dibuat berlapis dengan dilaminasi antar lapis satu dengan lapis lain agar nilai arus pusar dapat ditekan. Dengan demikian, inti besi merupakan salah satu bagian yang paling utama, karena inti sebagai jalan sirkulasi fluks magnet, maka bahan yang digunakan pada inti besi harus dipilih yang mempunyai rugi histerisis rendah yang dikenal dengan nama besi lunak.

Luas penampang inti besi sangat menentukan terhadap desain transformator yang akan dibuat. Dimensi yang diinginkan baik itu lebarnya maupun tingginya dapat diatur melalui luas dan tinggi dari inti besi yang dibuat. Luas penampang dan tinggi inti besi mengikuti desain yang ada atau yang sudah didesain oleh pabrikan, hanya mengikuti desain yang ada dan menghitung ulang terhadap material yang

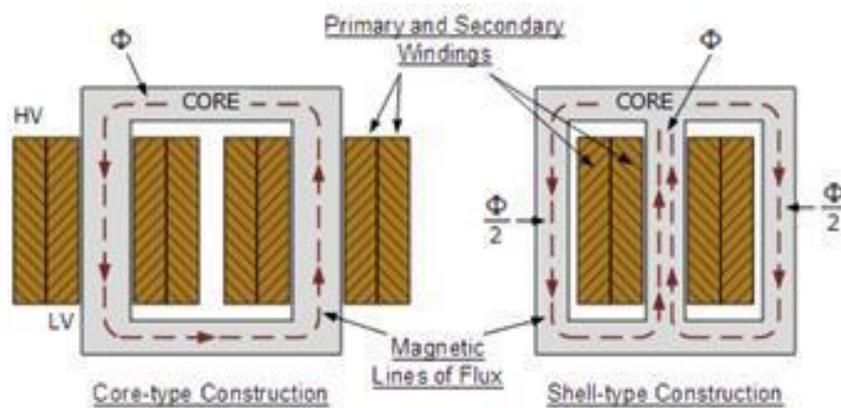
rusak untuk direkondisi supaya kembali ke spesifikasi semula seperti merekondisi kumparan primer yang sering mengalami kerusakan yang sangat parah sehingga diperlukan penggantian dan penggulangan ulang.



**Gambar 2.3** Inti Besi Transformator

Inti besi pada transformator dibedakan menjadi dua macam yaitu:

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

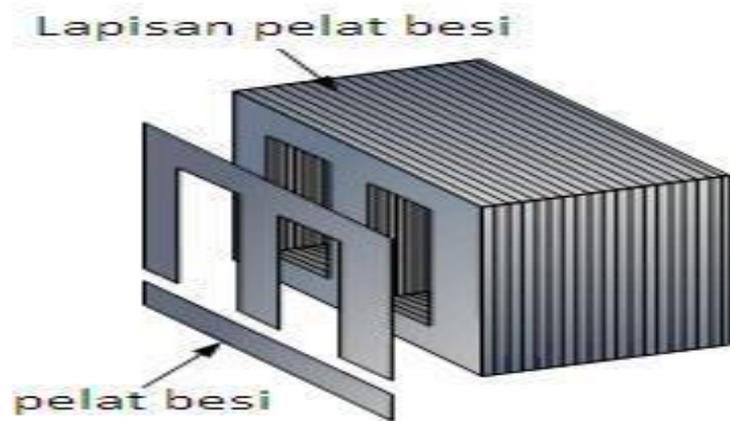


**Gambar 2.4** Inti Transformator<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Yaqob, Lilikwatil. Mesin-mesin Listrik. Deepublish. 2014. Hal 197

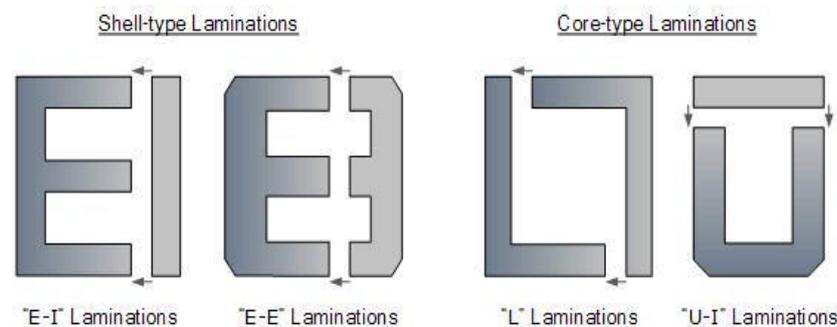
Pada transformator dengan inti besi berbentuk *shell*, kumparan dikelilingi oleh inti besi. Fluks magnetik pada inti besi tipe *shell* akan terbelah dua. Sementara kumparan primer dan kumparan sekunder digulung bersamaan. Untuk transformator yang memiliki inti besi tipe tertutup. Tidak ada pembagian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

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



**Gambar 2.5** Inti besi berlapis pada transformator<sup>2</sup>

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



**Gambar 2.6** Cara menghubungkan lapisan inti besi pada transformator

<sup>2</sup>Ibid Hal 206

#### 2.4.2 Kumparan transformator (*winding*)

Kumparan atau lilitan adalah media tempat mengalirnya arus yang besarnya disesuaikan dengan kebutuhan. Kumparan kawat tembaga dilapisi isolasi email, penggunaan harus mempertimbangkan daya hantar arus yang tinggi, kemampuan menahan panas, dan tekanan elektromagnetis akibat pembebanan berlebihan dan sebagainya. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer, dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan 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 2.7** Kumparan atau Belitan Transformator

### 2.4.3 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 transformator.



**Gambar 2.8** Bushing<sup>10</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 kondeser umumnya dipakai pada tegangan rating bushing 72,5 kV ke atas. Bushing kondeser terdapat tiga jenis media isolasi (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

- a. Resin Bonded Paper (RBP) Bushing tipe RBP adalah teknologi bushing kondeser 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

<sup>10</sup>[https://www.academia.edu/9900561/Bab\\_1\\_Transformator\\_Daya](https://www.academia.edu/9900561/Bab_1_Transformator_Daya)

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.

#### 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

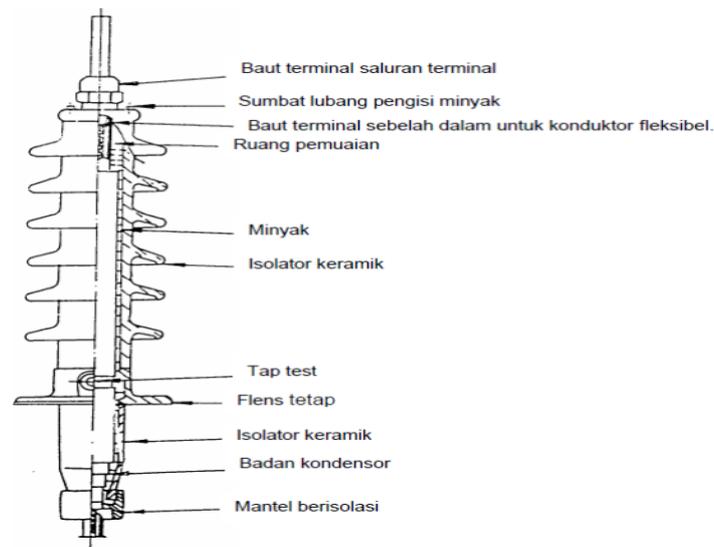
Sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar diluar bushing.

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi dan asesoris. 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 2.9** 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 2.10** Konstruksi Bushing Transformator

#### 2.4.4 Minyak transformator<sup>5</sup>

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. Kumputan-kumputan dan inti besi pada transformator tenaga yang berkapasitas besar direndam dalam minyak-transformator.

<sup>5</sup>Bongas L. tobing. Peralatan Tegangan Tinggi. Erlangga. 2012. Hal 235



**Gambar 2.11** Minyak transformator

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

Tabel 2.1 Keadaan Minyak Isolasi dengan Kandungan Gas<sup>4</sup>

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,

<sup>4</sup>Modul pembelajaran ilmu bahan listrik. Jakarta: Balai Pustaka

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  $\leq 18 \text{Cst}$ . 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  $15,56^{\circ}\text{C}$  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  $135^{\circ}\text{C}$ , sedangkan suhu minyak bekas tidak boleh kurang dari  $130^{\circ}\text{C}$ . 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 combustible, 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.

#### **2.4.5 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 2.12** Tangki Konservator

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara di dalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara di dalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe konservator tanpa *rubber bag*), maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel sehingga kandungan uap air dapat diminimalkan.

#### **2.4.6 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.

Untuk menghindari agar minyak transformator tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan *breather bag/ rubber bag*, yaitu sejenis balon karet yang dipasang di dalam tangki konservator



**Gambar 2.13** Silica Gel

#### **2.4.7 Tap changer**

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator 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 2.14** 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.

#### **2.4.8 Sistem pendingin**

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada transformator itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi mengakibatkan rusaknya isolasi kertas transformator. Pendinginan yang efektif sangat diperlukan. Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak

bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip –sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.



**Gambar 2.15 Radiator**

**Tabel 2.2** Macam-macam Pendingin Pada Transformator

No	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi paksa	Sirkulasi alamiah	Sirkulasi paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			

9.	ONAN/OFANN	Kombinasi 3 dan 5
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7

## 2.5 Isolasi Belitan Transformator

Isolasi belitan merupakan tempat terlemah, jika dibandingkan dengan bagian-bagian lainnya. Bahan isolasi akan berubah sifat karena kenaikan temperature. Maka dengan itu bahan-bahan isolasi yang dipergunakan untuk mengisolasi belitan memenuhi persyaratan:

- a. Kekuatan mekanis yang baik
- b. Kekuatan dielektrik yang tinggi
- c. Tidak larut dalam minyak transformator

Tabel 2.3 Standar Temperature Rise Pada Klas Isolasi<sup>10</sup>

No	Khas isolasi	Standar IEC (°C)
1.	A	60
2.	B	75
3.	C	80
4.	D	100
5.	E	125

## 2.6 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

---

<sup>10</sup> Ibid

- terhadap gangguan yang terjadi di dalam transformator itu sendiri
- b. Pengaman system yaitu proteksi transformator terhadap gangguan yang terjadi dalam system listrik itu diluar transformator

Gangguan-gangguan yang terjadi misalnya berupa:

- a. Terjadi arus lebih karena arus hubung singkat atau beban lebih
- b. Terjadiya hubungan tanah
- c. Terjadinya gangguan didalam transformator
- d. Terjadinya gangguan disebabkan petir

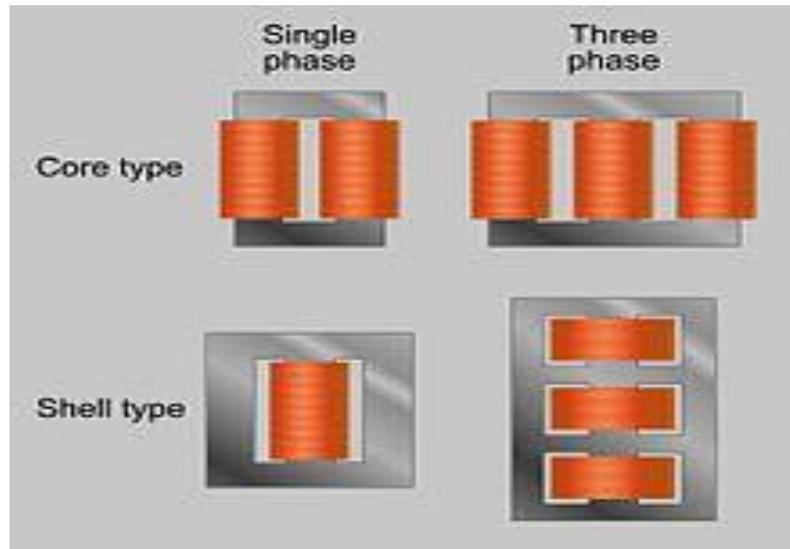
Sebuah transformator distribusi dengan daya yang relatif kecil biasanya mendapatkan pengaman yang sederhana terhadap arus lebih atau arus hubung singkat dengan sekring saja. Proteksi yang lebih lengkap akan menjadi terlampau mahal untuk daya terpasang yang tidak begitu besar ini. Sebaliknya transformator 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.

## **2.7 Macam-macam Transformator**

### **2.7.1 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

### 2.7.2 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.

### 2.8 Daya

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus dan tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak-balik satu fasa, maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak satu fasa sehingga selama siklusnya biasa terjadi arus negatif dan tegangan positif.

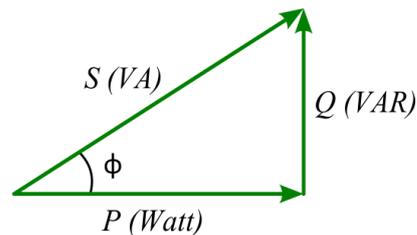
Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :

a. Daya aktif ( $P$ ) adalah daya yang diubah menjadi energy, persatuan waktu atau dengan kata lain adalah daya yang benar-benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adaah Watt ( $W$ ).

b. Daya reaktif ( $Q$ ) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi. Daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif ( $X_L$ ) dan reaktasi kapasitif ( $X_c$ ) , satuannya adalah Volt Ampere Reaktif ( $VAR$ ).

c. Daya semu ( $S$ ) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan Volt Ampere ( $VA$ ).

Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar sistem segitiga daya berikut ini :



**Gambar 2.17** Segitiga daya

$$P = V.I. \cos\phi \dots\dots\dots(2.1)$$

$$S = V.I \dots\dots\dots(2.2)$$

$$Q = V. I. \sin\phi \dots\dots\dots(2.3)$$

Untuk daya tiga phasa rumus daya aktif, daya reaktif, dan daya semu adalah seperti dibawah ini.

$$P = \sqrt{3}. V_l. I_l. \cos\phi \dots\dots\dots(2.4)$$

$$S = \sqrt{3}. V_l. I_l. \sin\phi \dots\dots\dots(2.5)$$

$$Q = \sqrt{3}. V_l. I_l \dots\dots\dots(2.6)$$

Daya memiliki hubungan dengan usaha yaitu daya merupakan usahayang dilakukan dalam satuan waktu, atau dengan kata lain daya berbanding terbalik dengan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana,

P = Daya mekanik (W)

W = Usaha (joule)

t = Waktu (s)

## 2.9 Hubungan Belitan Transformator<sup>8</sup>

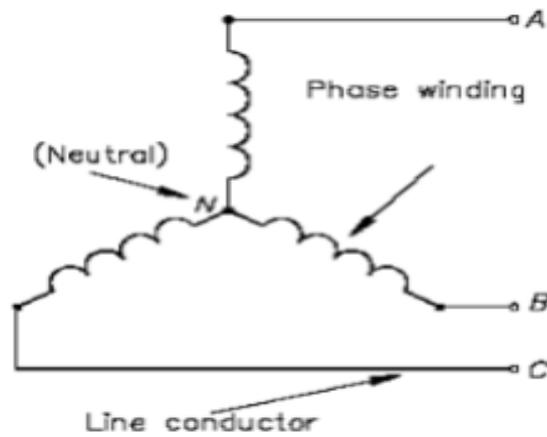
Didalam Pelaksanaannya, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam – macam hubungan, seperti bintang dan segitiga (delta), dengan kombinasi Y-Y, Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y,  $\Delta$ - $\Delta$ , bahkan untuk kasus tertentu lilitan sekunder dapat di hubungkan secara berliku-liku (zig-zag), sehingga didapatkan kombinasi  $\Delta$ -Z dan Y-Z. Hubungan zig – zag merupakan sambungan bintang “istimewa”, hubungan ini untuk mengantisipasi kejadian yang mungkin terjadi apabila dihubungkan secara bintang dengan beban setiap fasanya tidak seimbang.

### 2.9.1 Hubungan bintang

Pada hubungan bintang tiga ujung bersamaan dari ketiga kumparan dihubungkan pada apa yang dinamakan titik bintang. Simbol untuk sisi tegangan tingginya adalah Y (dengan huruf kapital), dan y untuk sisi tegangan rendahnya dengan huruf kecil.

---

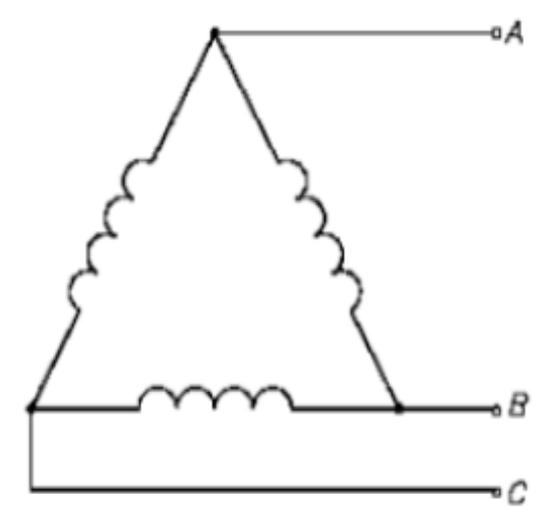
<sup>8</sup>Zuhal. Dasar Teknik tenaga listrik. PT Gramedia Pustaka Utama. 1991.Hal 38



**Gambar 2.18** Kumbaran Hubungan Bintang

### 2.9.2 Hubungan delta

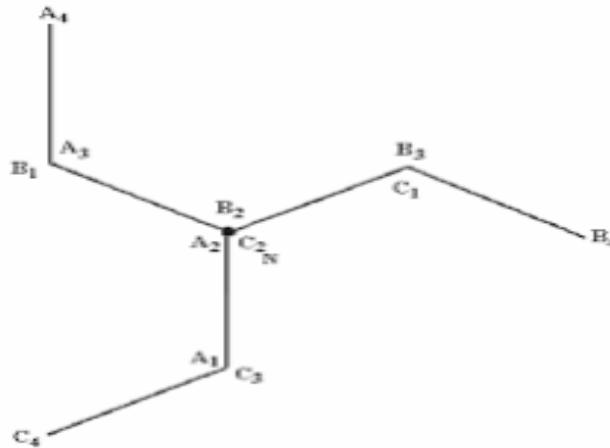
Dalam hubungan delta (segitiga) tiap ujung kumbaran disambung pada ujung yang berlainan kumbaran berikutnya, sehingga terbentuk semacam segitiga. Simbol untuk hubungan ini adalah  $\Delta$  untuk sisi tegangan tinggi, dan  $\delta$  untuk sisi tegangan rendah transformator.



**Gambar 2.19** Kumbaran Hubungan Delta

### 2.9.3 Hubungan zig zag

Hubungan ini adalah hubungan yang khusus. Simbol untuk hubungan ini adalah Z untuk sisi tegangan tinggi dan z untuk sisi tegangan rendah.



**Gambar 2.20** Kumpulan Hubungan Zig Zag<sup>8</sup>

## 2.10 Jenis-jenis hubungan transformator 3 fasa

Dalam pelaksanaannya, tiga buah lilitan phasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan, seperti bintang dan segitiga, dengan kombinasi Y-Y, Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y,  $\Delta$ - $\Delta$ , bahkan untuk kasus tertentu lilitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku-liku (zig-zag), sehingga diperoleh kombinasi  $\Delta$ -Z, dan Y-Z. Hubungan zig-zag merupakan sambungan bintang istimewa, hubungan ini digunakan untuk mengantisipasi kejadian yang mungkin terjadi apabila dihubungkan secara bintang dengan beban phasanya tidak seimbang.

### 2.10.1 Hubungan Wye-wye (Y-Y)

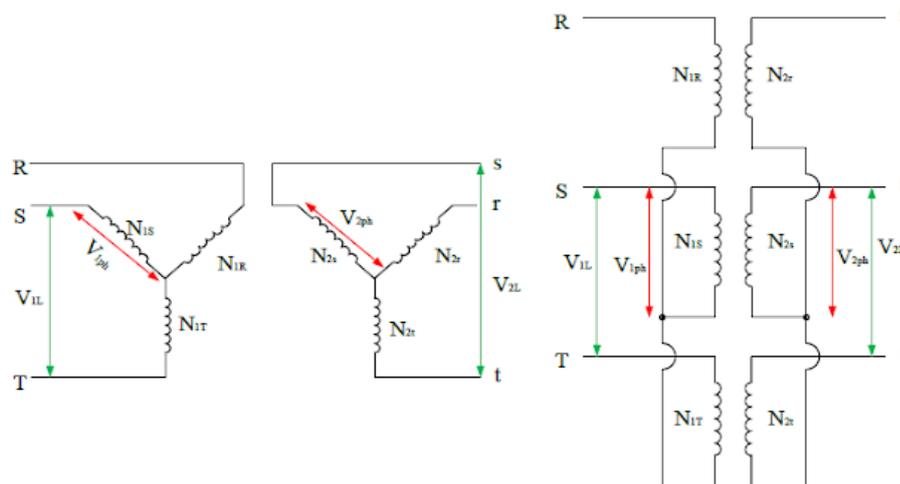
Pada hubungan bintang-bintang, rasio tegangan fasa-fasa (L-L) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap transformator. Sehingga,

<sup>8</sup>Ibid hal 59

terjadi pergeseran fasa sebesar  $30^\circ$  antara tegangan fasa-netral (L-N) dan tegangan fasa-fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya.

Hubungan bintang-bintang ini akan sangat baik hanya jika pada kondisi beban seimbang. Karena, pada kondisi beban seimbang menyebabkan arus netral (IN) akan sama dengan nol. Dan apabila terjadi kondisi tidak seimbang maka akan ada arus netral yang kemudian dapat menyebabkan timbulnya rugi-rugi.

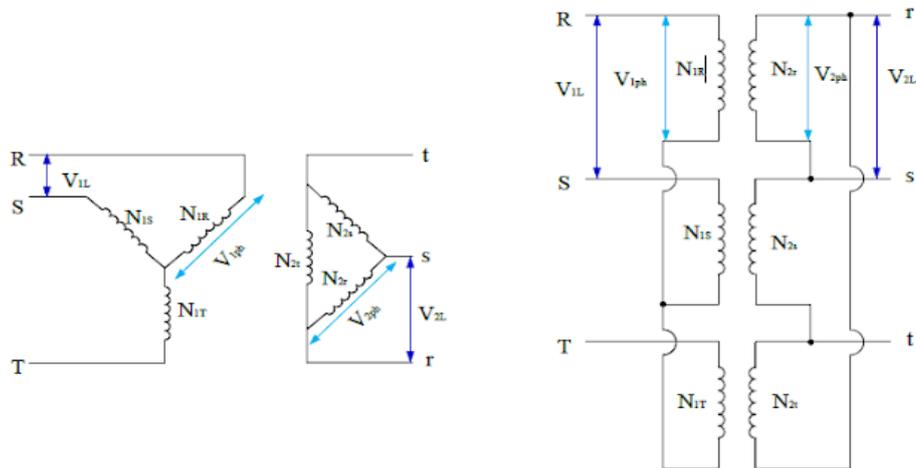
Tegangan fasa primer sebanding dengan tegangan fasa sekunder dan perbandingan belitan transformator maka, perbandingan antara tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan Y-Y



**Gambar 2.21** Transformator 3 fasa hubungan Y-Y

### 2.10.2 Hubungan Wye-delta (Y- $\Delta$ )

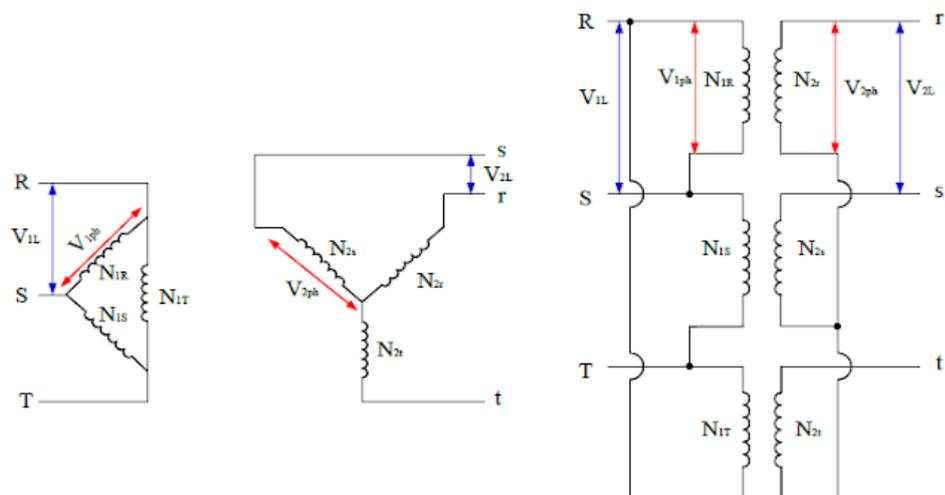
Transformator hubungan Y- $\Delta$ , digunakan pada saluran transmisi sebagai penaik tegangan. Rasio antara sekunder dan primer tegangan fasa-fasa adalah  $1/\sqrt{3}$  kali rasio setiap transformator. Terjadi sudut  $30^\circ$  antara tegangan fasa-fasa antara primer dan sekunder yang berarti bahwa transformator Y- $\Delta$  tidak bisa diparalelkan dengan transformator Y-Y atau transformator  $\Delta$ - $\Delta$ . Hubungan transformator Y- $\Delta$  dapat dilihat pada Gambar pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan fasa primer ( $V_{LP} = \sqrt{3} V_{PhP}$ ), dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa ( $V_{LS} = V_{PhS}$ ).



**Gambar 2.22** Transformator 3 fase hubungan Y-Δ

### 2.10.3 Hubungan Delta-wye (Δ-Y)

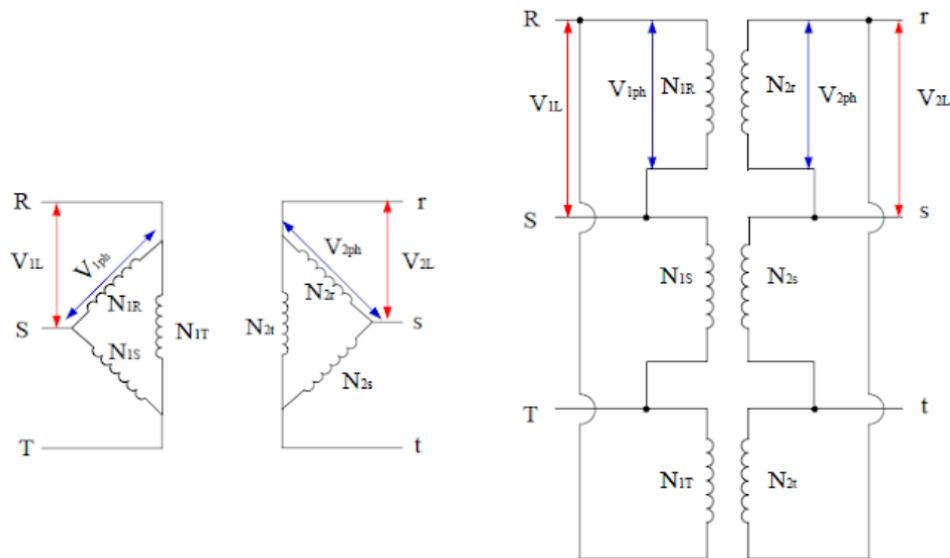
Transformator hubungan Δ-Y, digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan transmisi ke tegangan rendah. Transformator hubungan Δ-Y dapat dilihat pada Gambar Pada hubungan Δ-Y, tegangan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan fasa primer ( $V_{LP}=V_{phP}$ ), dan tegangan sisi sekundernya ( $V_{LS}=\sqrt{3}V_{phS}$ )



**Gambar 2.23** Transformator 3 fase hubungan Δ-Y.

**2.10.4 Hubungan Delta – delta ( $\Delta$ - $\Delta$ )**

Pada transformator hubungan  $\Delta$ - $\Delta$ , tegangan kawat ke kawat dan tegangan fasa sama untuk sisi primer dan sekunder transformator ( $V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_{LN}$ )



**Gambar 2.24** Transformator 3 fasa hubungan  $\Delta$ - $\Delta$

**2.11 Rangkaian Transformator Dengan Beban<sup>7</sup>**

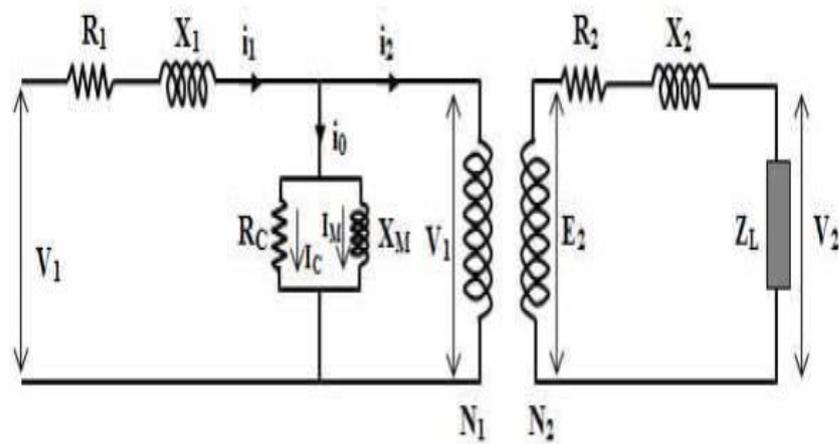
Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_L$ , maka  $I_2$  akan mengalir pada kumparan sekunder, dimana :

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_L} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

- $I_2$  = Arus sekunder (ampere)
- $V_2$  = Tegangan sekunder (volt)
- $Z_L$  = Beban (ohm)

<sup>7</sup>Zuhal. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. PT Gramedia Utama . Jakarta. 1995 Hal 44



**Gambar 2.25** Keadaan Transformator Berbeban<sup>8</sup>

Arus beban  $I_2$  ini menimbulkan gaya gerak magnet (ggm)  $N_2 I_2$  yang cenderung menentang fluks bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan  $I_M$ . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus  $I'_2$ , yang menentang arus yang dibangkitkan oleh beban  $I_2$ , sehingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$$I_1 = I_0 + I'_2 \dots \dots \dots (2.9)$$

Bila komponen arus rugi inti ( $I_c$ ) diabaikan, maka  $I_0 = I_m$ , sehingga:

$$I_1 = I_m + I'_2 \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:  $I_1$  = arus pada sisi primer (ampere)

$I'_2$  = arus yang menghasilkan  $\phi'_2$  (ampere)

$I_0$  = arus penguat (ampere)

$I_m$  = arus pemagnetan (ampere)

<sup>8</sup>ibid hal 21



$\omega$  = kecepatan sudut putar (rad/sec)

$\Phi$  = fluks magnetik (weber)

Pada rangkaian sekunder, fluks ( $\Phi$ ) bersama tadi menimbulkan:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$e_2 = N_2 \omega \Phi_{\max} \cos \omega t \text{ (volt)} \dots\dots\dots(2.15)$$

Harga efektifnya:

$$e_2 = 4,44 N_2 \omega f \Phi_{\max} \text{ (Volt)} \dots\dots\dots(2.16)$$

Bila rugi tahanan dan adanya fluks bocor diabaikan, maka akan terdapat

hubungan:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

$e_1$  = ggl induksi disisi primer (Volt)

$e_2$  = ggl induksi disisi sekunder (Volt)

$V_1$  = tegangan terminal disisi primer (Volt)

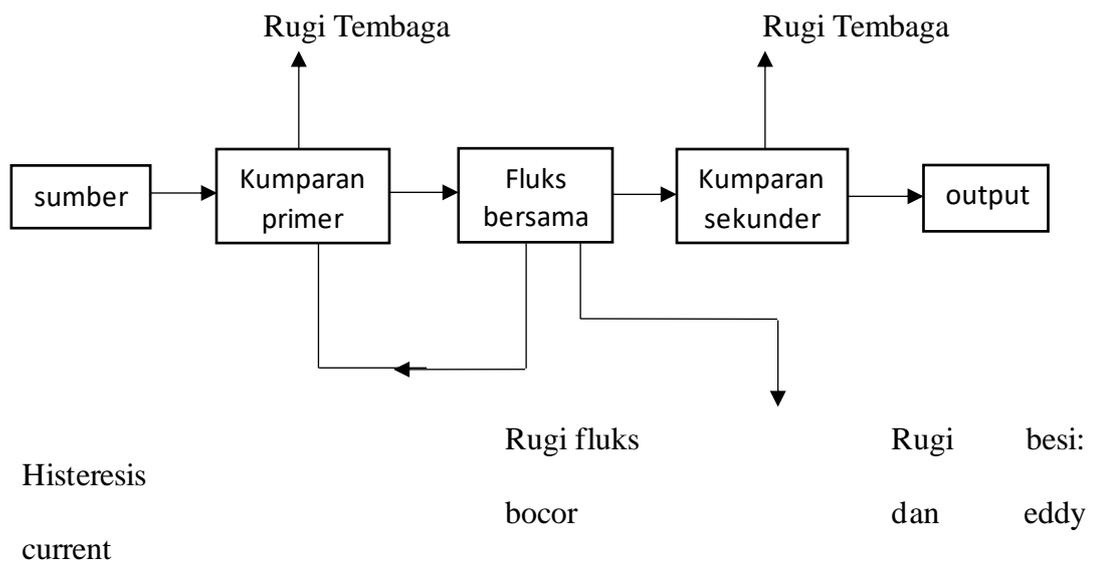
$V_2$  = tegangan terminal disisi sekunder (Volt)

$N_1$  = Jumlah lilitan disisi primer (turn)

$N_2$  = Jumlah lilitan disisi sekunder (turn)

## 2.13 Rugi-rugi Transformator

Berikut merupakan blok diagram rugi – rugi pada transformator:



**Gambar 2.27** Blok Diagram Rugi-rugi Transformator<sup>8</sup>

### 2.13.1 Rugi besi

Rugi besi terdiri atas, rugi histeresis dan rugi eddy current. Rugi histeresis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak – balik pada inti besi, yang di nyatakan sebagai berikut:

$$P_h = K_h f B_{maks}^{1.6} \text{ (watt) } \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana :

$K_h$ : Konstanta

$B_{maks}$ : fluks maksimum (weber)

---

<sup>8</sup>Ibid hal 34

f : frekuensi (Hz)

Sedangkan rugi eddy current yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi. dirumuskan sebagai berikut:

$$P_e = K_e f^2 B_{maks}^2 \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana :

$K_e$ : Konstanta

$B_{maks}$ : fluks maksimum (weber)

f: frekuensi (Hz)

### 2.13.2 Rugi tembaga ( $P_{cu}$ )

Rugi tembaga adalah rugi yang disebabkan oleh arus beban yang mengalir pada kawat tembaga, dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{cu} = I^2 R \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

I : Arus (ampere)

R: Resistansi (ohm)

Karena arus beban berubah – ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

### 2.14 Efisiensi Transformator<sup>8</sup>

Untuk menentukan rugi – rugi daya saat transformator diberi beban maka dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{daya keluar}}{\text{daya masuk}} = \frac{\text{daya keluar}}{\text{daya keluar} + \Sigma \text{rugi}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.21)$$

---

<sup>8</sup>Ibid hal 56

Dimana

$$\Sigma \text{rugi} = P_{cu} + P_i \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana :

$\Sigma \text{rugi}$  = rugi total

$P_{cu}$  = Rugi tembaga

$P_i$  = Rugi inti

Penentuan rendemen dapat dilakukan dengan dua cara yaitu cara tidak langsung dan cara langsung.

a. Cara tidak langsung<sup>4</sup>

Rumus umum untuk rendemen ini berbunyi sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P}{P + P_r} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.23)$$

Dimana :

$P$  : Daya yang dihasilkan oleh transformator (VA)

$P_r$  : Kerugian– kerugian transformator ( rugi tembaga dan rugi inti) (Watt)

b. Cara langsung

Penentuan rendemen dengan cara langsung adalah dengan memberikan beban nominal pada transformator, kemudian mengukur beban pada sisi primer, dan juga beban pada sisi sekunder, lalu menentukan besar rendemen dengan mempergunakan rumus sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_k}{P_m} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.24)$$

---

<sup>4</sup>Ibid Hal 52

Dimana :

$P_k$  : daya yang dikeluarkan pada sisi skunder (Watt)

$P_m$  : daya yang dimasukkan pada sisi primer (VA)