



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gendengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gendengan impedansi (*Input Impedance*) antara sumber dan beban, untuk menghambat arus searah DC (*Direct Current*) dan melewatkan arus bolak-balik, dan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan AC (*Alternating Current*).

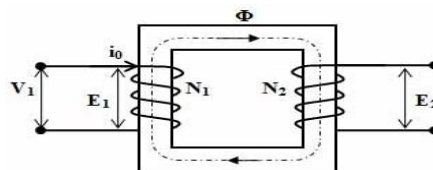
Pengelompokkan transformator di dalam bidang Tenaga Listrik, adalah sebagai berikut:

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran: yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

#### 2.2 Konstruksi Bagian – bagian Transformator

Pada prinsipnya konstruksi transformator dibedakan menjadi dua jenis yaitu sebagai berikut :

1. Konstruksi jenis inti (*core*), lilitan primer membelit salah satu kaki transformator dan lilitan sekunder membelit kaki transformator yang lain.
2. Konstruksi jenis cangkang (*shell*), lilitan primer dan lilitan sekunder membelit kaki yang sama (kaki tengah) pada transformator.



Gambar 2.1 Diagram dasar transformator

## 2.3 Prinsip Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan (sumber) maka akan mengalir arus bolak-balik  $I_1$  pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus  $I_1$  menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi  $e_p$ .

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah:

$$e_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana  $e_p$  : GGL induksi pada kumparan primer

$N_p$  : Jumlah lilitan kumparan primer

$d\Phi$  : perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

(1 weber =  $10^8$  maxwell)

$dt$  : perubahan waktu dalam satuan detik.

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi  $e_p$  juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (*mutual fluks*). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi  $e_s$  pada kumparan sekunder.

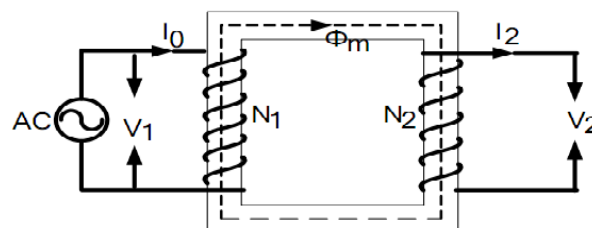
Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah :

$$e_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana  $N_s$  : Jumlah lilitan kumparan primer.

### 2.3.1 Transformator Tanpa Beban

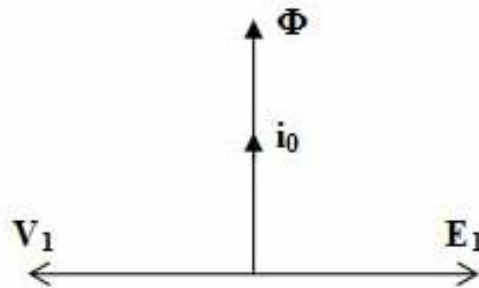
Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (Open Circuit) perhatikan gambar 2.2.



Gambar 2.2 Transformator Tanpa Beban

Dalam keadaan ini, arus  $i_0$  yang mengalir pada kumparan primer adalah sangat kecil. Arus ini disebut arus primer tanpa beban atau arus penguat. Arus  $i_0$  adalah terdiri dari arus pemagnet ( $i_M$ ) dan arus tembaga ( $i_c$ ).

Arus  $i_M$  inilah yang menimbulkan flux magnet bersama yang dapat mengakibatkan timbulnya rugi histerisis dan rugi *eddy current* (arus pusar). Rugi histerisis dan rugi eddy current inilah yang menimbulkan rugi inti sedangkan adanya arus tembaga akan menimbulkan rugi tembaga. Secara vektoris hubungan antara arus penguat, flux magnet bersama dan gaya gerak listrik primer ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Hubungan antara  $I_0\Phi$  dan  $E_1$

Adanya arus  $i_0 = I_M \cdot \sin \omega t$  yang mengalir melalui kumparan primer, pada kumparan primer timbul flux magnet yang sephase dengan  $i_0$  dan secara matematis dituliskan :

$$\Phi = \Phi_M \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(2.3)$$

Menurut Faraday, suatu kumparan ( $X_M$ ) yang mendapat pengaruh flux magnet yang berubah-ubah, maka di ujung-ujung kumparan tersebut akan timbul gaya gerak listrik ( $e$ ) yang menentang terhadap tegangan sumber, yaitu sebesar :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan adanya arus  $i_0$  yang mengalir melalui kumparan primer, pada kumparan primer akan timbul gaya gerak listrik sebesar :



$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\begin{aligned}
e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi_M \cdot \sin \omega t}{dt} \\
&= -N_1 \cdot \Phi_M \cdot \omega \frac{d \cdot \sin \omega t}{d\omega t} \\
&= -E_M \cdot \cos \omega t \\
&= -E_M \cdot \sin (90^\circ + \omega t) \dots \dots \dots (2.5)
\end{aligned}$$

Dimana :  $e_1$  = GGL primer

$$\begin{aligned}
E_1 &= E_{M1} = N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_M \\
&= \text{GGL Primer maksimum}
\end{aligned}$$

Besar tegangan efektif dari gaya gerak listrik Primer adalah :

$$\begin{aligned}
(E_{eff})_1 &= \frac{N_1 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}} \\
&= 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_M \dots \dots \dots (2.6)
\end{aligned}$$

Dimana :  $E_{eff}$  = satuan dalam volt

$f$  = satuan dalam Hertz atau Cps

$\Phi_M$  = satuan dalam Weber

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

$$\begin{aligned}
e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \\
&\text{atau} \\
e_2 &= -E_M \cdot \sin (90^\circ + \omega t) \dots \dots \dots (2.7)
\end{aligned}$$

Harga efektifnya :

$$\begin{aligned}
(E_{eff})_2 &= \frac{N_2 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}} \\
&= 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_M \dots \dots \dots (2.8)
\end{aligned}$$

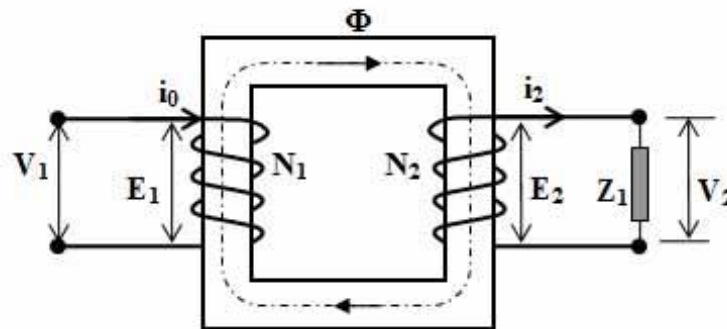
Dengan demikian perbandingan transformasi antara kumparan primer dan sekunder adalah :

$$a = \frac{(E_{eff})_1}{(E_{eff})_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.9)$$

Harga  $a > 1$  disebut trafo *step down*, dan  $a < 1$  disebut trafo *step up*.<sup>1</sup>

### 2.3.2 Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_L$ ,  $I_2$  mengalir pada kumparan sekunder, dimana  $I_2 = V_2 / Z_L$  dengan  $\theta_2 =$  faktor kerja beban.



Gambar 2.4 Transformator Berbeban

Arus beban  $I_2$  ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm)  $N_2 I_2$  yang cenderung menentang fluks ( $\Phi$ ) 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 fluks yang dibangkitkan oleh arus beban  $I_2$ , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I'_2 \dots\dots\dots(2.10)$$

Bila rugi besi diabaikan  $I_C$  diabaikan maka  $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots\dots\dots(2.11)$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan  $I_M$  saja, berlaku hubungan :

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

<sup>1</sup>Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI Yogyakarta, 2004, Hal 6-13

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.12)$$

Hingga  $N_1 I'_2 = N_2 I_2$

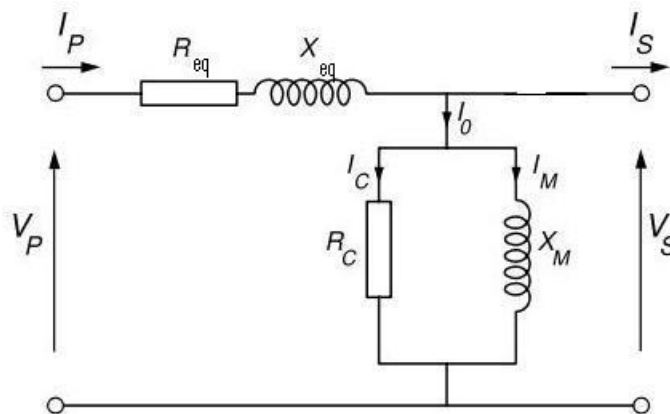
Karena nilai  $I_M$  dianggap kecil maka  $I'_2 = I_1^2$

$$\text{Jadi, } N_1 I_1 = N_2 I_2 \text{ atau } I_1 / I_2 = N_2 / N_1 \dots \dots \dots (2.13)$$

### 2.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik yang digunakan untuk mengubah energi listrik bolak-balik dari satu level tegangan ke level tegangan yang lain. Dapat menaikkan, menurunkan atau hanya untuk mengisolasi sistem satu dengan yang lainnya. Transformator terdiri atas sisi primer dan sisi sekunder. Keduanya terhubung dengan inti besi. Dalam kondisi ideal, tanpa rugi-rugi, perbandingan lilitan antara keduanya merupakan perbandingan tegangan antara kedua sisinya.

Namun pada kenyataannya, daya masukan tidak pernah sama dengan daya keluaran. Terdapat rugi-rugi yang terjadi di inti besi dan lilitan. Rugi-rugi tersebut terjadi akibat histeresis, arus eddy, resistansi belitan dan fluks bocor. Dari pengetahuan tersebut, transformator dapat dimodelkan dengan rangkaian elektrik seperti di bawah ini:



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Transformator

<sup>2</sup>Zuhal, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995, Hal 46-47

Dimana,

$$R_{eq} = R_p + (N_p/N_s)^2 \cdot R_s$$

$$X_{eq} = X_p + (N_p/N_s)^2 \cdot X_s$$

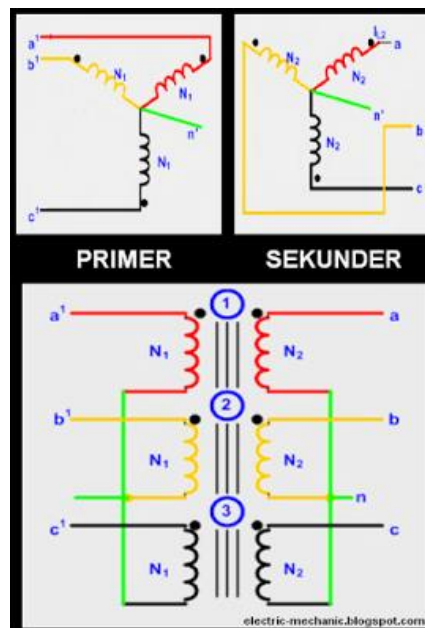
Setelah kita memahami, rangkaian pengganti ini, kita dapat menentukan nilai  $R_{eq}$ ,  $X_{eq}$ ,  $R_c$  dan  $X_m$  dengan pengujian rangkaian tanpa beban dan hubung singkat. Yang diukur adalah daya (Watt), tegangan (V) dan arus (I) di sisi primer.

## 2.5 Hubungan Transformator 3 Fase

Yang dimaksud di sini adalah cara penyambungan gulungan masing-masing fase. Pada sisi primer dan sekunder dari transformator 3 fase masing-masing mempunyai 3 buah gulungan kawat email. Gulungan tersebut pada umumnya dihubungkan secara bintang (*wye*) atau segitiga (*delta*).

### 2.5.1 Transformator Hubungan Bintang (Wye)

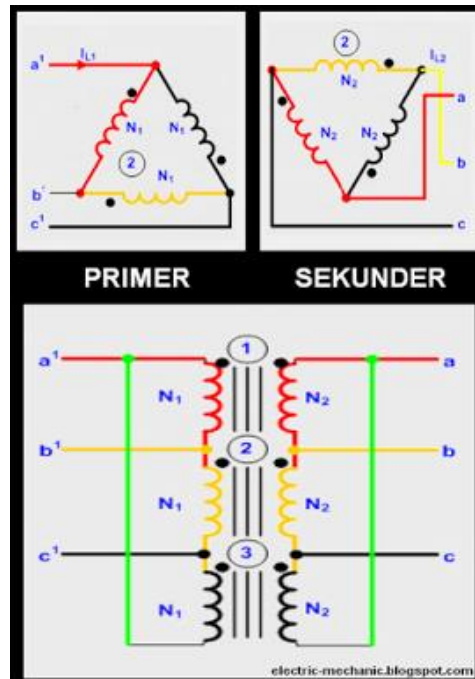
Pada jenis ini ujung-ujung pada masing-masing terminal dihubungkan secara bintang. Titik netral dijadikan menjadi satu. Hubungan dari tipe ini lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil, pada transformator tegangan tinggi.



Gambar 2.6 Transformator 3 Fase Hubungan Bintang

### 2.5.2 Transformator Hubungan Segitiga (*Delta*)

Cara penyambungan segitiga pada transformator 3 fase adalah seperti gambar di bawah ini.

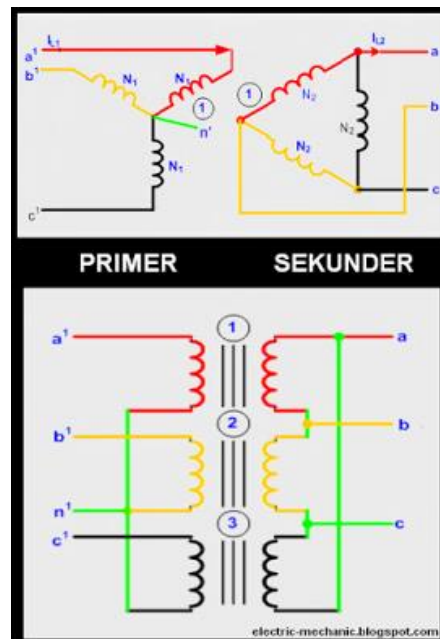


Gambar 2.7 Transformator 3 Fase Hubungan Segitiga

### 2.5.3 Transformator Hubungan Bintang Segitiga (Y - $\Delta$ )

Pada hubung ini, kumparan pafa sisi primer dirangkai secara bintang (wye) dan sisi sekundernya dirangkai delta. Umumnya digunakan pada trafo untuk jaringan transmisi dimana tegangan nantinya akan diturunkan (Step- Down). Perbandingan tegangan jala- jala  $1/\sqrt{3}$  kali perbandingan lilitan transformator. Tegangan sekunder tertinggal 300 dari tegangan primer.

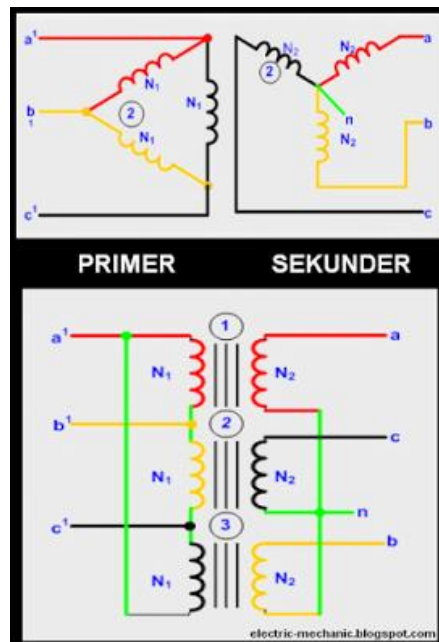




Gambar 2.8 Transformator Hubung Bintang Segi tiga ( Y -  $\Delta$ )

#### 2.5.4 Transformator Hubungan Segitiga Bintang ( $\Delta$ - Y)

Pada hubung ini, sisi primer trafo dirangkai secara delta sedangkan pada sisi sekundernya merupakan rangkaian bintang sehingga pada sisi sekundernya terdapat titik netral. Biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan (Step -up) pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini perbandingan tegangan 3 kali perbandingan lilitan transformator dan tegangan sekunder mendahului sebesar  $30^\circ$  dari tegangan primernya.



Gambar 2.9 Transformator Hubungan Segitiga Bintang ( $\Delta$  - Y)

## 2.6 Komponen Utama Transformator

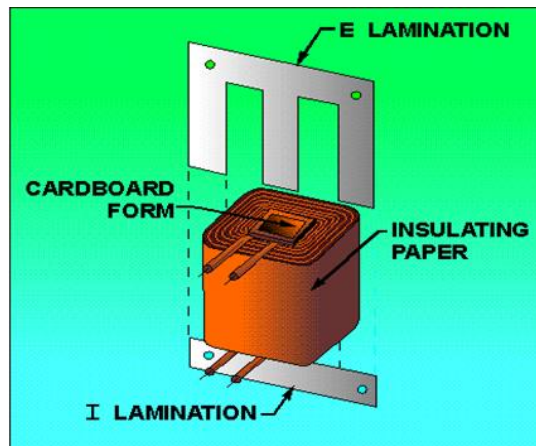
Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, peralatana Bantu pendinginan transformator, tap changer dan alat pernapasan (*de hydrating breather*).

### 2.6.1 Inti Besi

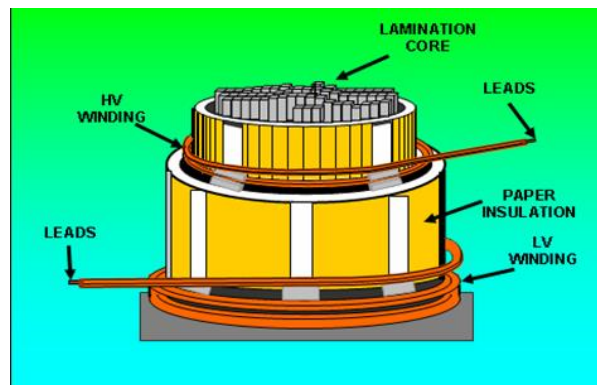
Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan- lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh *Eddy Current*.

### 2.6.2 Kumparan Transformator

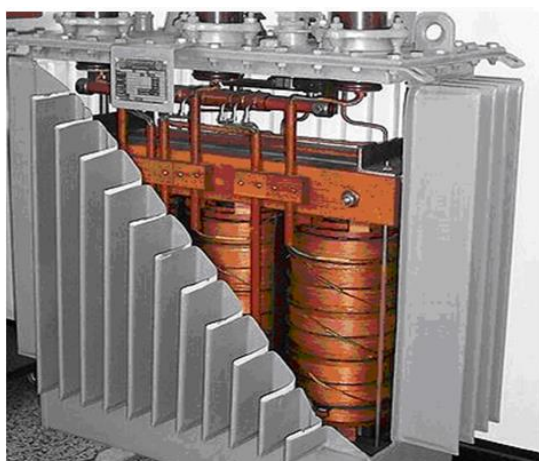
Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.10 Konstruksi belitan transformator



Gambar 2.11 Gambaran fisik belitan transformator tenaga



Gambar 2.12 Komponen-komponen internal transformator

### 2.6.3 Minyak Transformator

Minyak Transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bagian dari 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

### 2.6.4 Bushing

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat/isolator antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.13 Bushing Transformator

### 2.6.5 Tangki Konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasang relai bucholz yang akan menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak. Untuk menjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udara melalui saluran pelepasan/venting dilengkapi media penyerap uap air pada udara, sering disebut dengan silica gel dan dia tidak keluar mencemari udara disekitarnya.



Gambar 2.14 Tangki Konvensator

### 2.6.6 Peralatan Bantu Pendinginan Transformator

Peralatan bantu pendinginan transformator berfungsi untuk menjaga agar transformator bekerja pada suhu rendah. Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Secara alamiah media pendingin (minyak isolasi) mengalir karena perbedaan suhu tangki minyak dan sirip-sirip transformator (Radiator). Untuk mempercepat pendinginan transformator dilengkapi dengan kipas yang dipasang di radiator transformator dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal.<sup>3</sup>



Gambar 2.15 Pendingin Transformator

<sup>3</sup>M. Solikhudin. 2010. Studi Gangguan. Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 2010 Hal 4-6

Tabel 2.1 Klasifikasi Pendinginan Transformator

<b>CARA PENDINGINAN</b>	<b>JENIS</b>
Pendinginan Alam	<i>Air Natural Colling (AN)</i> <i>Oil – Immersed Natural Colling (ON)</i> <i>Oil Natural Air Natural (ONAN)</i> <i>Oil – Immersed Forced – Oil Circulation (OFN)</i>
Pendinginan Buatan (Udara)	<i>Oil – Immersed Forced – Oil Circulation with</i> <i>Air – Blast Colling (OFB)</i> <i>Oil – Immersed Air – Blast Colling Or Oil</i> <i>Natural Air Force (OB/ONAF)</i> <i>Air – Blast Colling (AB)</i>
Pendinginan buatan (Air)	<i>Oil – Immersed Water Colling (OW)</i> <i>Oil – Immersed Forced – Oil Circulation with</i> <i>Water (OFW)</i>

### 2.6.7 Tap Changer

Tap changer berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran yang diinginkan dengan input tegangan yang berubah-ubah. Kualitas operasi tenaga listrik jika tegangan nominalnya sesuai ketentuan, tapi pada saat operasi dapat saja terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya menurun, untuk itu perlu alat pengatur tegangan agar tegangan selalu pada kondisi terbaik, konstan dan berkelanjutan.

Ditinjau dari cara pengoperasiannya, tap changer terdiri dari dua tipe yaitu on- load yang bekerja secara otomatis jika merasakan tegangan kurang atau lebih dan off-load yang dapat dipindah tap hanya jika trafo tidak berbeban atau bertegangan.



## 2.7 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif

### 2.7.1 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan  $VI \cos \theta$  dengan simbol P dalam satuan watt (W), kilo watt (KW), mega watt (MW). Jadi,

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \dots \dots \dots (2.14)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots \dots \dots (2.15)$$

### 2.7.2 Daya Semu

Perkalian tegangan V dengan arus I dalam kedua besaran ini dalam bentuk bilangan kompleks adalah  $VI^*$  yang dinamakan daya semu dengan simbol S dalam satuan volt ampere (VA), kilo volt ampere (KVA), mega volt ampere (MVA). Arus  $I^*$  adalah arus konjugate dari I. Jadi,

$$S = \sqrt{3} \cdot V.I \dots \dots \dots (2.16)$$

### 2.7.3 Daya Reaktif

Daya reaktif atau daya khayal dirumuskan dengan  $S \sin \theta$  atau  $VI \sin \theta$  dengan simbol Q, dalam satuan volt ampere reaktif (VAR), kilo volt ampere reaktif (KVAR), mega volt ampere reaktif (MVAR). Jadi,

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots \dots \dots (2.17)^4$$

## 2.8 Rugi-rugi Transformator

Rugi – rugi transformator terbagi menjadi dua antara lain sebagai berikut:

### 2.8.1 Rugi Variabel

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga  $P_{CU} = I^2R$ . Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots \dots \dots (2.18)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.19)$$

<sup>4</sup>Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI YOGYAKARTA, 2013, Hal 74

Dengan demikian rugi tembaga total :

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2}$$

$$= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.20)$$

Karena  $I_2 = a I_1$ , maka persamaan dapat juga ditulis dengan

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + (a I_1)^2 R_2$$

$$= I_1^2 (R_1 + a^2 R_2)$$

$$= I_1^2 R_{ek1}$$

atau dapat ditulis

$$P_{cu} = I_2^2 R_{ek2} \dots \dots \dots (2.21)$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

$$P_{rugi\ total} = P_{rugi\ rugi\ Cu} + P_{rugi\ inti} \dots \dots \dots (2.22)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.23)$$

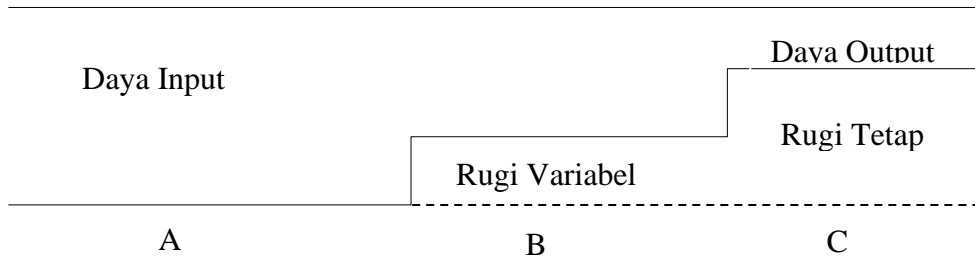
Keterangan:

$P_{t2}$  = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu.

$P_{t1}$  = Rugi-rugi tembaga beban penuh.

$S_2$  = Beban yang dioperasikan

$S_1$  = Nilai pengenal



Gambar 2.16 Rugi-rugi Transformator

$$\eta_{listrik} = \frac{C}{B} \times 100\% \dots \dots \dots (2.24)$$



$$\eta_{mekanik} = \frac{B}{A} \times 100\% \dots \dots \dots (2.25)$$

$$\eta_{Trafo} = \eta_{listrik} \times \eta_{mekanik} = \frac{C}{B} \times \frac{B}{A} = \frac{C}{A} = \frac{P_o}{P_{in}} \dots \dots \dots (2.26)$$

**2.8.2 Rugi Tetap**

Rugi tetap terdiri atas :

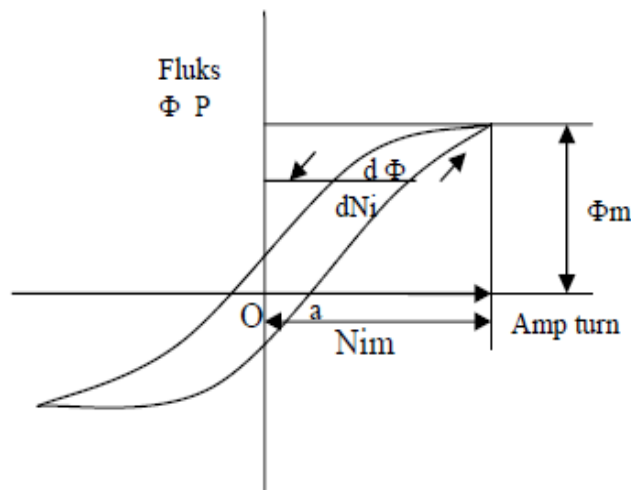
**a. Rugi histerisis**, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \text{ watt} \dots \dots \dots (2.27)$$

Dimana :

$K_h$  = konstanta

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



Gambar 2.17 Lingkaran Histerisis

**b. Rugi ‘Arus Eddy’**, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada besi inti.

$$P_e = K_e^2 \cdot f^2 \cdot B_{mak} \dots \dots \dots (2.28)$$

Jadi, rugi besi (rugi inti)  $P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.29)$



### 2.9 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara keluaran daya yang berguna dan masuk daya total. Karena masukan ke transformator sama dengan keluaran daya yang berguna ditambah kerugiannya, maka persamaan efisiensi dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Daya keluaran} &= \text{daya input} - \text{kerugian} \\ \text{Persen efisiensi} &= \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{daya masukan} - \text{kerugian}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.30) \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas, jelaslah bahwa efisiensi transformator dapat ditentukan untuk setiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.

#### 2.9.1 Efisiensi Terhadap Perubahan Beban

$$\eta = \frac{V_2 \cos \varphi}{V_2 \cos \varphi + I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}} \dots\dots\dots(2.31)$$

Agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dI_2} \left( I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2} \right) = 0 \dots\dots\dots(2.32)$$

$$\text{Jadi, } R_{2ek} = \frac{P_i}{I_2}$$

$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{cu}$$

Artinya, untuk beban tertentu efisiensi maksimum terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti.

Untuk menentukan besarnya beban yang dioperasikan pada saat efisiensi maksimum, berlaku:

$$W_{ef \text{ maks}} = \sqrt{\frac{\text{Rugi-rugi besi}}{\text{Rugi-rugi tembaga beban penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots\dots\dots(2.33)$$

### 2.9.2 Perubahan Efisiensi Terhadap Faktor Kerja ( $\cos\Phi$ ) Beban

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma r_{ugi}}{V_2 I_2 \cos\phi + \Sigma r_{ugi}} \dots\dots\dots (2.34)$$

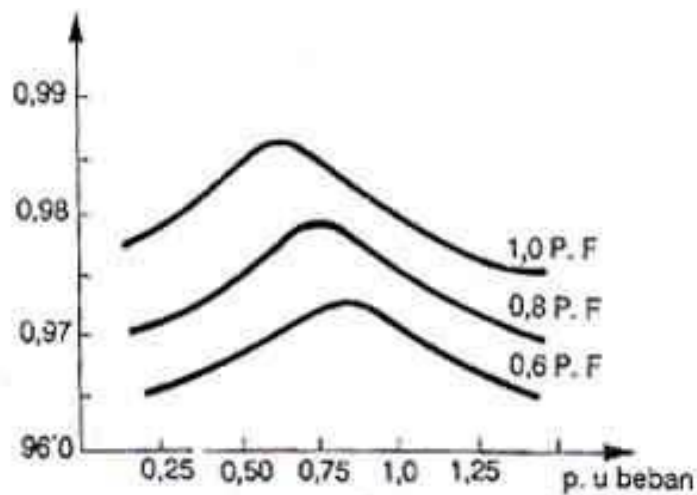
$$\eta = 1 - \Sigma r_{ugi} / V_2 I_2^2 \dots\dots\dots (2.35)$$

Bila  $\Sigma r_{ugi} / V_2 I_2 = x = \text{konstanta}$

$$\text{Maka } \eta = 1 - \frac{x}{\cos\phi + x} \dots\dots\dots (2.36)$$

$$\eta = 1 - \frac{x / \cos\phi}{1 + x \cos\phi} \dots\dots\dots (2.37)$$

Hubungan antara efisiensi dengan beban pada  $\cos\Phi$  yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 2.18 Hubungan antara efisiensi dengan beban pada  $\cos\Phi$  yang berbeda-beda<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Zuhal, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995, Hal 35