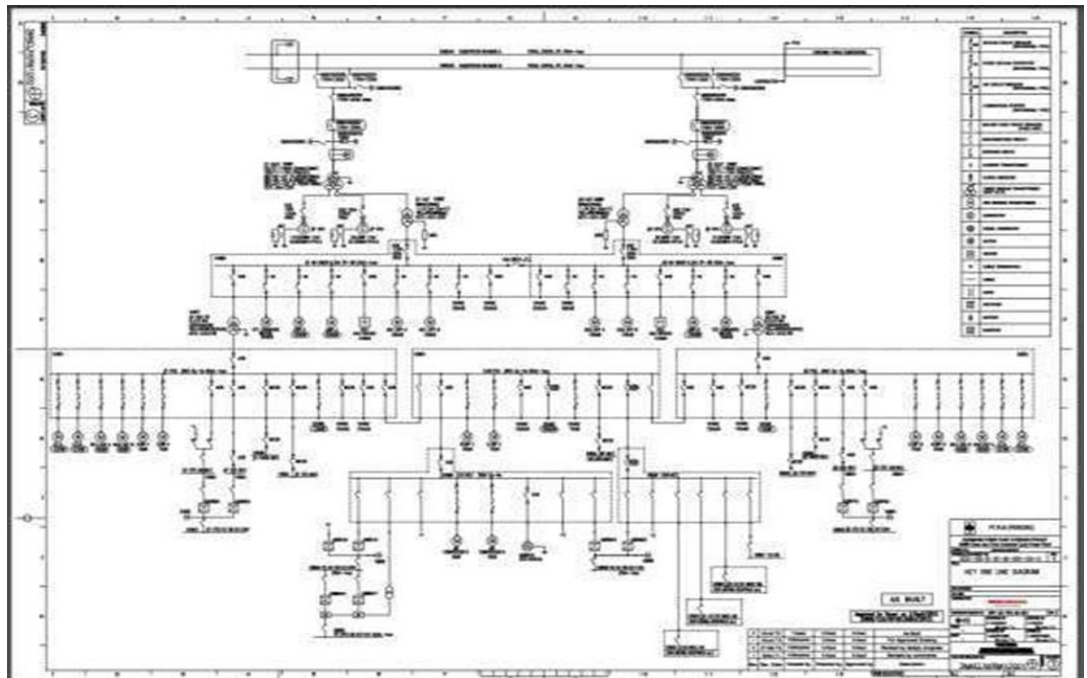




## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Pengertian Transformator**

Transformator adalah suatu alat listrik yang digunakan untuk mentransformasikan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh. Definisikan sebagai bagian statis aparatur dengan dua atau lebih gulungan dengan induksi elektromagnetik, mengubah sistem bolak-balik tegangan dan arus ke sistem lain yang tegangan dan arus biasanya memiliki nilai yang berbeda dan pada frekuensi yang sama untuk tujuan transmisi tenaga listrik. Berdasarkan IEV (International Electrotechnical Vocabulary) 441-14-20 disebutkan bahwa circuit breaker (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar / switching mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi short circuit / hubung singkat. Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan( hubung singkat ) pada jaringan atau peralatann lain.



**Gambar 2. 1** Single line Diagram Transformator di PLTGU Indralaya

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandingan impedansi (*input Impedance*) antara sumber dan beban, untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian. Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

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

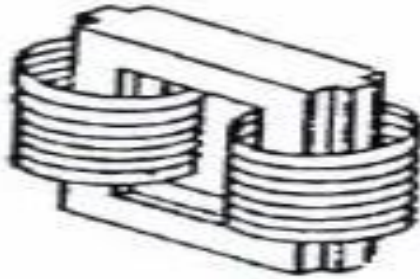
## 2.2 Bentuk dan Konstruksi Bagian – bagian Transformator Daya

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

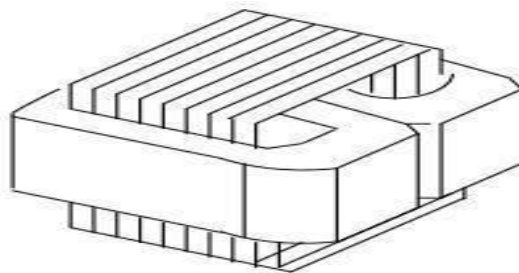
1. Konstruksi jenis inti (*core*), lilitan primer membelit salah satu kaki transformator dan lilitan sekunder membelit kaki transformator yanglain.

2. Konstruksi jenis cangkang (*shell*), lilitan primer dan lilitan sekunder membelit kaki yang sama (kaki tengah) pada transformator

Pada gambar 2.2 dan 2.3 diperlihatkan konstruksi dari kedua inti, dimana kedua kumparan dililitkan saling tergabung secara magnetis, namun kumparan tersebut tidak tergabung secara elektrik. Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandingan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandingan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Berdasarkan cara melilitnya kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.



**Gambar 2. 2** Konstruksi Transformator Tipe Inti



**Gambar 2. 3** Konstruksi Transformator Tipe Cangkang<sup>2</sup>

### 2.3 Prinsip Kerja Transformator<sup>3</sup>

Prinsip kerja dari trafo melibatkan bagian-bagian utama pada trafo, yaitu: kumparan primer, kumparan sekunder dan inti trafo. Kumparan tersebut mengelilingi inti besi dalam bentuk lilitan. Apabila kumparan pada sisi primer trafo

---



dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak-balik sinusoidal ( $V_p$ ), maka akan mengalir arus bolak-balik yang juga sinusoidal ( $I_p$ ) pada kumparan tersebut. Arus bolak-balik ini akan menimbulkan fluks magnetik ( $\Phi$ ) yang sefasa dan juga sinusoidal di sekeliling kumparan. Akibat adanya inti trafo yang menghubungkan kumparan pada sisi primer dan kumparan pada sisi sekunder, maka fluks magnetik akan mengalir bersama pada inti trafo dari kumparan primer menuju kumparan sekunder sehingga akan membangkitkan tegangan induksi pada sisi sekunder trafo.

$$V_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

$V_s$  = Tegangan induksi pada sisi sekunder

$N_s$  = Jumlah belitan pada sisi sekunder

$\frac{d\phi}{dt}$  = Perubahan fluks terhadap waktu

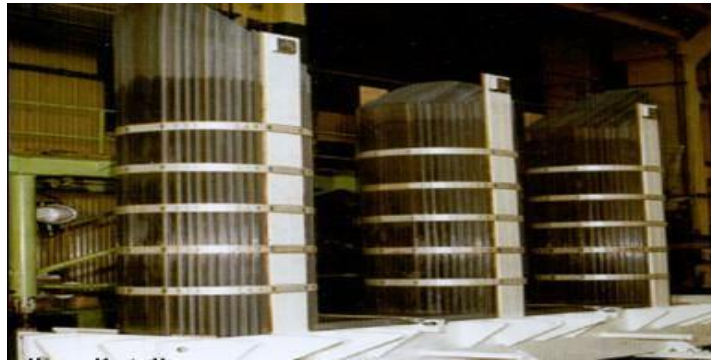
Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan trafo berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti trafo. Selain itu, tegangan induksi juga dapat terbangkitkan apabila ada perubahan fluks terhadap waktu, jika fluks yang mengalir adalah konstan maka tegangan induksi tidak dapat terbangkitkan.

## 2.4 Komponen Utama Transformator Daya

Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan, bushing, minyak transformator, tangki konservator, peralatan bantu pendinginan transformator, tap changer, dan Indikator

### 2.4.1. Inti besi

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya flux yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain..



*Gambar 2. 4* Inti Besi dan Laminasi yang diikat Fiber Glass

#### 2.4.2 Kumparan

Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan flux magnetik.



*Gambar 2. 5* Belitan Trafo<sup>4</sup>

#### 2.4.3. Bushing

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo. Pada bushing dilengkapi fasilitas untuk pengujian tentang kondisi bushing yang sering disebut center tap.

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



**Gambar 2. 6** Bushing

#### 2.4.4. Minyak Isolasi Transformator

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



**Gambar 2. 7** Minyak Isolasi Trafo Tenaga

#### 2.4.5. Tangki Konservator

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Gambar konservator 2.8 digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.



*Gambar 2. 8* Tangki Konservator

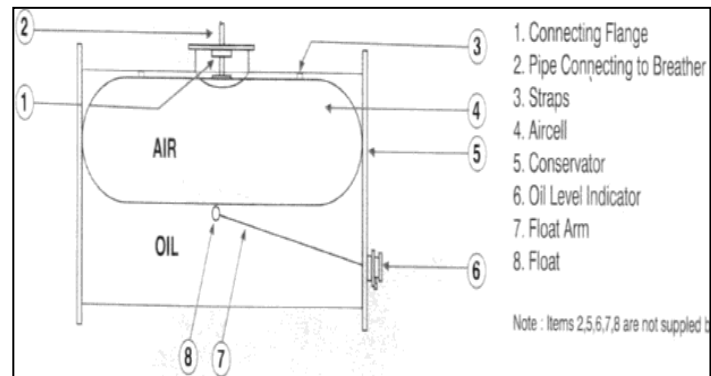


*Gambar 2. 9* Silicage1<sup>5</sup>

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara didalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara didalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel.



Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan *brether bag/rubber bag*, yaitu sejenis balon karet yang dipasang didalam tangki konservator.



**Gambar 2. 10** Konstruksi Konservator dengan Rubber Bag

### 2.5. 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>6</sup>



**Gambar 2. 11** Pendingin TransformatoTabel 2. 1 Klasifikasi Pendinginan Transformator<sup>7</sup>

No	Macam sistem pendingin	Media				Singkatan
		Didalam transformator		Diluar Transformator		
		Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	
1	<i>AN</i>	-	-	Udara	-	<i>Air Natural</i>
2	<i>AF</i>	-	-	-	Udara	<i>Air Forced</i>
3	<i>ONAN</i>	Minyak	-	Udara	-	<i>Oil Natural</i> <i>Air Natural</i>
4	<i>ONAF</i>	Minyak	-	-	Udara	<i>Oil Natural</i> <i>Air Forced</i>
5	<i>OFAN</i>	-	Minyak	Udara	-	<i>Oil Forced</i> <i>Air Forced</i>
6	<i>OFAF</i>	-	Minyak	-	Udara	<i>Oil Forced</i> <i>Air Forced</i>
7	<i>OFWF</i>	-	Minyak	-	Air	<i>Oil Forced</i> <i>Water Forced</i>
8	<i>ONAN/ONAF</i>	Kombinasi 3 dan 4				



9	<i>ONAN/OFAN</i>	Kombinasi 3 dan 5
10	<i>ONAN/OFAF</i>	Kombinasi 3 dan 6
11	<i>ONAN/OFWF</i>	Kombinasi 3 dan 7

### 2.5.1 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/lebih dan off-load yang dapat dipindah tap hanya jika trafo tidak berbeban/bertegangan.

### 2.5.2 Alat Pernapasan

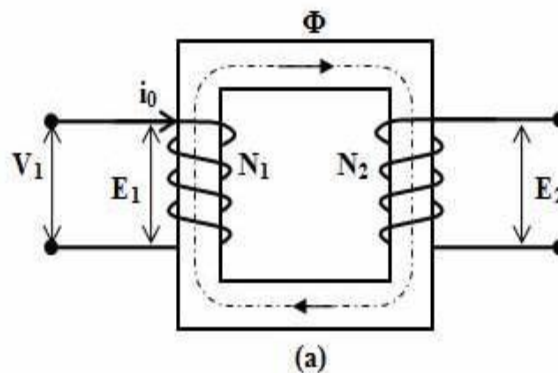
Alat pernapasan(DehydratingBreather).Sebagai itempat penampungan pemuaiian minyak isolasi akibat panas yang timbul, maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator. Pada konservator ini permukaan minyak diusahakantidak bolehbersinggungan dengan udara, karena kelembaban udara yang mengandung uap air akan mengkontaminasi minyak walaupun proses pengkontaminasinya berlangsung cukup lama.

Untuk mengatasi hal tersebut, udara yang masukkedalam tangki konservator pada saat minyak menjadi dingin memerlukan suatu media penghisap kelembaban, yang digunakan biasanya adalah silica gel. Kebalikan jika trafo panas maka pada saat menyusut maka

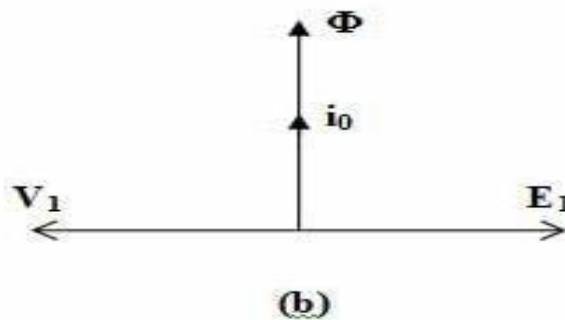


akan menghisap udara dari luar masuk kedalam tangki dan untuk menghindari terkontaminasi oleh kelembaban udara maka diperlukan suatu media penghisap kelembaban yang digunakan biasanya adalah silica gell, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas

## 2.6 Transformator Tanpa Beban



Gambar 2. 12 Trafo tanpa beban



Gambar 2. 13 Hubungan antara  $i_0$ ,  $\phi$ ,  $E_1$ , dan  $V_1$

Keterangan gambar 2.12 dan 2.13:

$E_1$  : Tegangan belitan primer  
sekunder

$E_2$  : Tegangan belitan

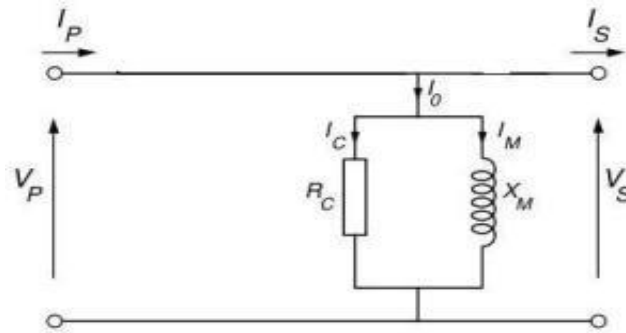
$N_1$  : Belitan primer

$N_2$  : Belitan sekunder

$i_0$  : Arus primer

$V_1$  : Tegangan primer

$\phi$ : fluks Magnet



Gambar 2. 14 Ragkaian Ekivalen Transformator Tanpa Beban

Keterangan gambar 2.14 :

- |    |                        |    |                     |
|----|------------------------|----|---------------------|
| Vp | : Tegangan Primer      | Vs | : Tegangan sekunder |
| Ip | : Arus Primer          | Is | : Arus sekunder     |
| IM | : Arus Pemagnetan      | Rc | : Hambatan inti     |
| XM | : Reaktansi pemagnitan |    |                     |

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_1$  yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer  $I_o$  yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan  $N_1$  reaktif murni,  $I_o$  akan tertinggal  $90^\circ$  dari  $V_1$  (gambar 2.13). Arus primer  $I_o$  menimbulkan *fluks* ( $\Phi$ ) yang sefasa juga berbentuk sinusoidal.

$$\Phi = \Phi_{maks} \sin \omega t \dots\dots\dots (2.3)$$

*Fluks* yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi  $e_1$  ( *Hukum Farada* )

$$e_1 = -N_1 \cdot \left( \frac{d\Phi}{dt} \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$e_1 = -N_1 \cdot \left( \frac{d(\Phi_{maks} \sin \omega t)}{dt} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$e_1 = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{maks} \cdot \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\text{harga efektifnya adalah } E_1 = \left( \frac{N_1 \cdot 2 \pi f \Phi_{maks}}{2} \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$E_1 = 4.44 n_1 \cdot f \Phi_{maks} \dots\dots\dots (2.8)$$

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



$$e_1 = - N_2. \left(\frac{d\Phi}{dt}\right) \dots\dots\dots(2.9)$$

$$e_1 = - N_2. \omega. \Phi_{maks}. \cos\omega t \dots\dots\dots (2.10)$$

$$E_2 = 4.44 N_2. f \Phi_{maks} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\text{sehingga } \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya *fluks* bocor,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots(2.13)$$

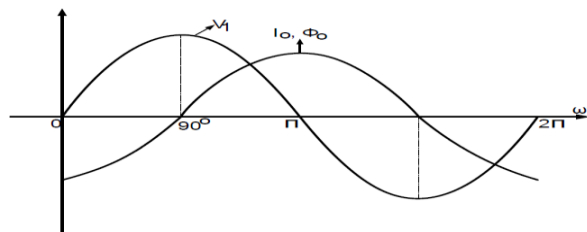
a = perbandingan transformasi

Dalam hal ini tegangan induksi  $E_1$  mempunyai kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber  $V_1$ .

Dimana :

e: gaya gerak listrik (Volt)                       $N_1$         : jumlah belitan di sisi primer (*turn*)

$\omega$  : kecepatan sudut putar (rad/sec)     $\Phi$         : *fluks* magnet (*weber*)



**Gambar 2. 15** Gelombang  $I_0$  Tertinggal  $90^0$  Dari V

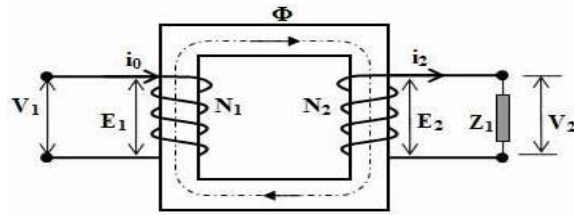
Keterangan gambar 2.15 :

$I_0$         : Arus Tembaga

$\omega t$         : Frekuensi sudut (rad/sec)

### 2.7 Transformator Keadaan Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z_L$ ,  $I_2$  mengalir pada kumparan sekunder dimana  $I_2 = V_2/Z_L$  dengan  $q_2 =$  faktor kerja beban.



Gambar 2. 16 Transformator dalam Keadaan Berbeban

Keterangan Gambar 2.16 :

Zl : Impedansi (ohm)

Arus beban I2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) N2I2 yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan IM. Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I'2, yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I2, hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi

$$I_1 = I_0 + I'_2 \dots\dots\dots (2.14)$$

Bila rugi besi diabaikan ( Ic diabaikan ) maka  $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots\dots\dots (2.15)$$

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

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.16)$$

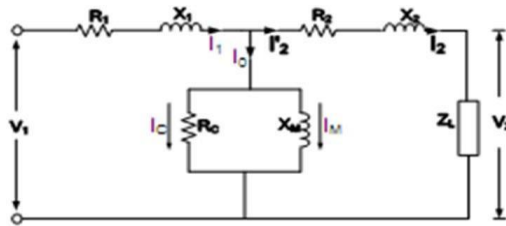
$$N_1 I_M = N_1 ( I_1 - I'_2 ) - N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.17)$$

$$\text{Hingga } N_1 I'_2 = N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Karena nilai IM dianggap kecil maka :

$$I_1 = I'_2 \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\text{Jadi } \rightarrow \frac{N_1}{I_1} \cdot \frac{N_2}{I_2} = \text{atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2.20)$$



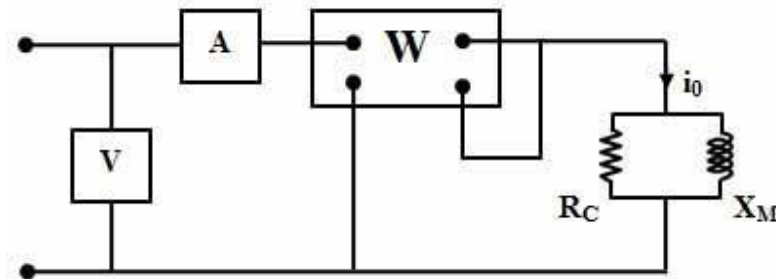
**Gambar 2. 17** Rangkaian Ekuivalen Transformator Berbeban

## 2.8 Menentukan Parameter Transformator

Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaian ekuivalen)  $R_c$ ,  $X_M$ ,  $R_{ek}$ , dan  $X_{ek}$ , dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran (test) yaitu pengukuran beban nol dan pengukuran hubungan singkat.

### 1. Pengukuran Beban Nol

Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_1$ , seperti telah diterangkan terdahulu maka hanya  $I_0$  yang mengalir.



**Gambar 2. 18** Parameter pengukuran beban nol

Dari pengukuran daya yang masuk ( $P_1$ ), arus  $I_0$  dan tegangan  $V_1$  akan diperoleh harga :

$$R_c = V_1^2 / P_1$$

$$Z_0 = V_1 / I_0 = (jX_M R_c) / (R_c + jX_M)$$

Dimana :

$$Z_0 = \text{impedansi inti}$$



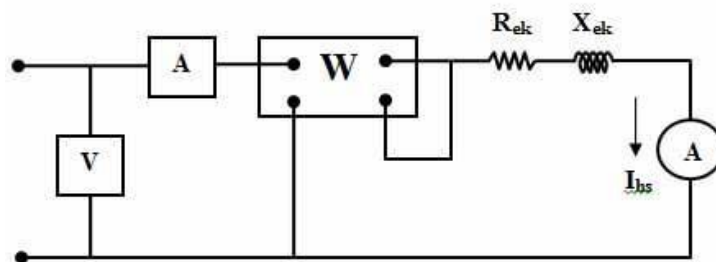
$X_M$  = reaktansi pemagnet

$I_0$  = Arus tanpa beban,

$R_c$  = hambatan inti

## 2. Pengukuran Hubungan Singkat

Hubungan singkat berarti impedansi beban  $Z_L$  diperkecil menjadi nol, sehingga hanya impedansi  $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$  yang membatasi arus. Karena harga  $R_{ek}$  dan  $X_{ek}$  ini relative kecil, harus dijaga agar tegangan yang masuk ( $V_{hs}$ ) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus nominal. Harga  $I_0$  akan relative kecil bila dibandingkan dengan arus nominal, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan.



**Gambar 2. 19** Pengukuran Trafo Hubung Singkat

Dengan mengukur tegangan  $V_{hs}$ , arus  $H_{hs}$ , dan daya  $P_{hs}$ , akan dapat dihitung parameter:

$$R_{ek} = P_{hs}/(H_{hs})^2$$

$$Z_{ek} = V_{hs}/H_{hs} = R_{ek} + jX_{ek}$$

$$X_{ek} = \sqrt{(Z_{ek}^2 - R_{ek}^2)}$$

Dimana :

$R_{ek}$  = hambatan ekivalen

$Z_{ek}$  = impedansi ekivalen

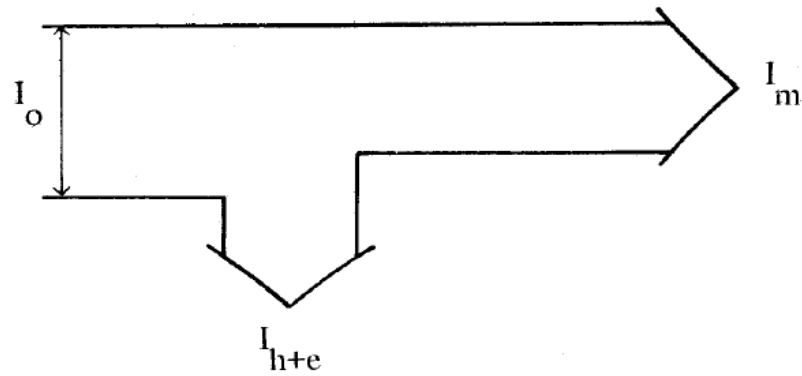
$X_{ek}$  = reaktansi ekivalen.





## 2.9 Rangkaian Pengganti Transformator

Pada tes hubungan terbuka, telah dijelaskan bahwa dengan adanya tegangan primer  $U_1$ , maka akan terjadi  $I_0$  yang dapat diuraikan menjadi  $I_m$  dan  $I_{h+e}$

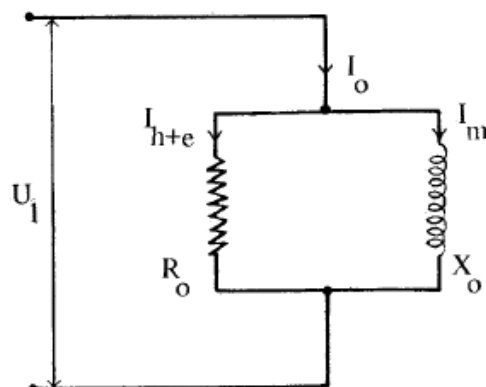


**Gambar 2. 20** Bagian  $I_m$  dan  $I_{h+e}$

$I_m$  : harga arus yang efektif dalam pembentukan magnet.

$I_{h+e}$  : harga arus yang membentuk rugi-rugi besi dalam pembentukan magnet.

Dari gambar 2.6 di atas,  $I_m$  dan  $I_{h+e}$  dapat digambarkan sebagai berikut :



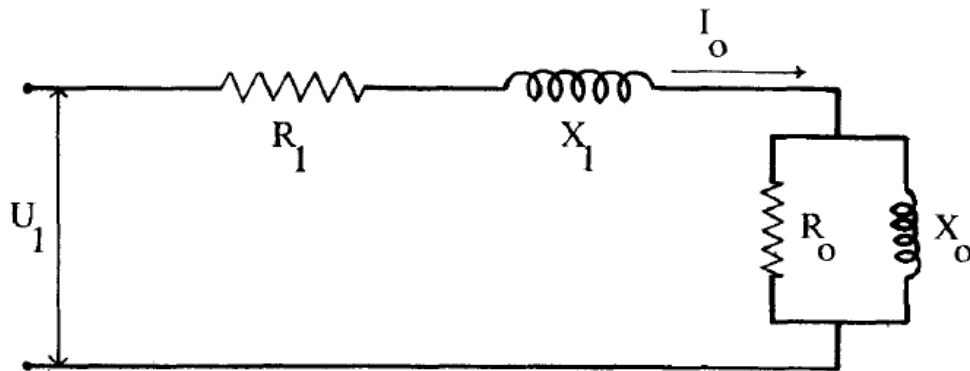
**Gambar 2. 21** Rangkaian  $R_0$  dan  $X_0$



Pada transformator tidak bebahan pada kumparan primer akan mengalir arus sebesar  $I_0$ .

$$U_1 = I_0 (R_0 + jX_0) + I_0 (R_1 + jX_1)$$

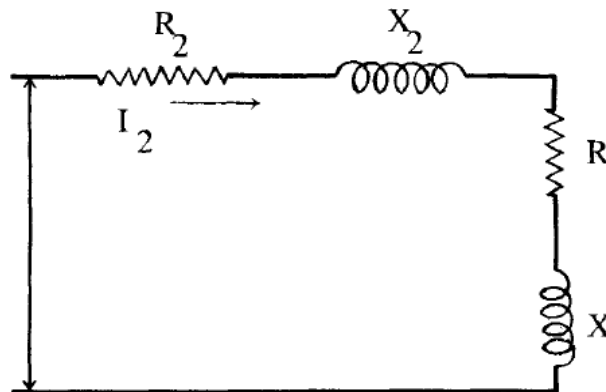
Rangkaian primer dapat digambarkan sebagai berikut :



**Gambar 2. 22** Rangkaian Pengganti Primer

Jika kumparan sekunder dihubungkan dengan beban  $Z$ , dengan  $Z = (R + jX)$ , maka pada kumparan sekunder mengalir arus  $I_2$  yang sumbernya adalah  $E_s$

$$E_s = I_2 [(R_2 + R) + j(X_2 + X)]$$



**Gambar 2. 23** Rangkaian Pengganti Sekunder

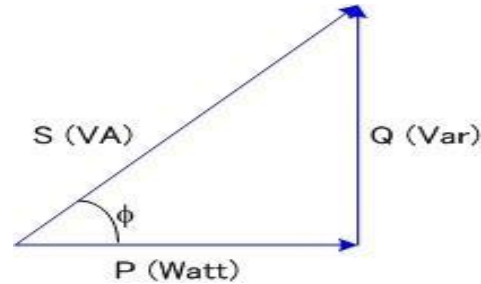
Rangkaian ekivalen sekunder di atas dapat disambungkan dengan rangkaian primer bila harga  $E_s = E_p$

Untuk menjadikan  $E_s = E_p$ , maka harga  $E_s$  dikalikan  $a$  atau  $E_p$  dibagi dengan  $a$  tergantung dari harga tersebut dibawa ke primer atau ke sekunder.



## 2.10 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah suatu hubungan antara daya nyata, daya semu, dan daya reaktif, yang dapat dilihat hubungannya pada gambar bentuk segitiga berikut ini :



**Gambar 2. 24** Segitiga Daya

Daya Listrik dibagi menjadi 3 bagian yaitu sebagai berikut :

### a) Daya Aktif<sup>8</sup>

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

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \dots\dots\dots (2.21)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots\dots\dots (2.22)$$

### b) 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,

$$S = \sqrt{3} \cdot VI \dots\dots\dots (2.23)$$



## c) 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,

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots \dots \dots (2.24)$$

## 2.11 Rugi-rugi Transformator

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

### 1 Rugi Variabel<sup>9</sup>

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.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots \dots \dots (2.25)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.26)$$

Dengan demikian rugi tembaga total :

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

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.27)$$

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

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

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

$$= I_1^2 Re_{k1} \text{ atau dapat ditulis}$$

$$P_{cu} = I_2^2 Re_{k2} \dots \dots \dots (2.28)$$

<sup>9</sup> Ibid., hlm 19



Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah :

$$\text{Prugi total} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots\dots\dots(2.29)$$

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots(2.30)$$

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 pengenalan

$$\eta_{listrik} = \frac{C}{B} \times 100\% \dots\dots\dots(2.31)$$

$$\eta_{mekanik} = \frac{B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots(2.32)$$

$$\eta_{Trafo} = \eta_{listrik} \times \eta_{mekanik} = \frac{C}{B} \times \frac{B}{A} = \frac{C}{A} = \frac{P_o}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.33)$$

## 2. Rugi-rugi Inti Besi (core losses)

Rugi inti pada transformator dibagi atas dua bagian, yaitu rugi hysteresis dan arus eddy yang dapat diukur melalui percobaan/test tanpa beban, dimana pada saat tanpa beban rugi hysteresis yaitu rugi yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi, sedangkan rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan oleh arus pusar pada inti besi. Jadi rugi inti dapat ditulis dalam persamaan:

$$P_{fe} = P_h + P_e$$

Dimana :

$P_{fe}$  = rugi inti (watt)



**$P_h$**  = rugi hysteresis (watt)

**$P_e$**  = rugi arus eddy (watt l)

### 3. Rugi Hysteresis

Rugi hysteresis adalah rugi yang diakibatkan oleh fluks ( $\Phi$ ) bolak-balik di inti besi. Pada besi yang mendapat fluks bolak-balik, Rugi hysteresis per cycle berbanding dengan luas lup (jerat) hysteresis. Rugi hysteresis dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$P_h = K_h f B^2 m$$

Dimana:

$K_h$  = konstanta Hysteresis

$f$  = frekuensi (Hz)

$B$  = kerapatan fluks maksimum (Tesla)

### 4. Rugi-rugi Arus Eddy

Rugi-rugi ini disebabkan pemanasan pada ketebalan inti besi oleh arus yang terinduksi pada inti dan perbedaan tegangan antara sisinya akan membangkitkan arus yang berputar – putar pada sisi yang luas/tebal. Adanya arus eddy berdasar pada fluks magnetik yang mana perbedaan tegangan antara sisinya yang memberikan perubahan fluks tersebut. Pada dasarnya induksi tegangan di besi ini sama seperti pada transformator (dapat dianggap bahwa tiap lempeng besi adalah sekunder yang terhubung singkat), maka emf induksi di inti akan berbanding dengan fluks ( $e = 4,44 f n \Phi$ ). Impedansi dari inti yang di aliri arus dapat dianggap konstan untuk laminasi yang tipis dan tidak tergantung pada frekuensi, untuk frekuensi rendah atau frekuensi daya listrik, sehingga dapat dituliskan persamaan:

$$P_e = K_e f^2 B^2 m$$



Dimana :

$Ke$  adalah konstanta arus eddy

## 2.12 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 :

$$\text{Daya keluaran} = \text{daya input} - \text{kerugian} \dots\dots\dots (2.34)$$

$$\eta = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.35)$$

Atau

$$\eta = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya keluaran} + \Sigma_{\text{rugi}}} \dots\dots\dots (2.36)$$

$$\eta = \frac{\Sigma_{\text{rugi}}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.37)$$

Dimana:

$\eta$  = Efisiensi Transformator

$P_{out}$  = Daya keluaran (kumparan sekunder)

$P_{in}$  = Daya masukan (kumparan primer)

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

## 2.13 Perubahan Efisiensi Terhadap Beban

$$\eta = \frac{V_2 \cos \varphi}{V_2 \cos \varphi + I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}} \dots\dots\dots (2.38)$$



Agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dI_2} \left( I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2} \right) = 0 \dots \dots \dots (2.39)$$

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

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

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

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

$$W_{ef \text{ maks}} = \sqrt{\frac{\text{Rugi-rugi besi}}{\text{Rugi-rugi tembaga beban penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots \dots \dots (2.40)$$