

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

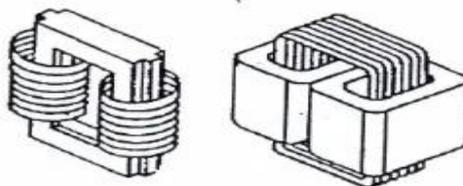
2.1 Pengertian Transformator⁶

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.

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

- a. Transformator daya
- b. Transformator distribusi⁸
- c. Transformator pengukuran (transformator arus dan transformator tegangan).¹⁰

Kerja transformator yang berdasarkan induksi electromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan 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 2.1 Tipe inti dan tipe cangkang

^[6] https://www.academia.edu/11535092/2_TEORI_TRANSFORMATOR Diakses pada tanggal 2 Juni 2020 pukul 15:55 WIB

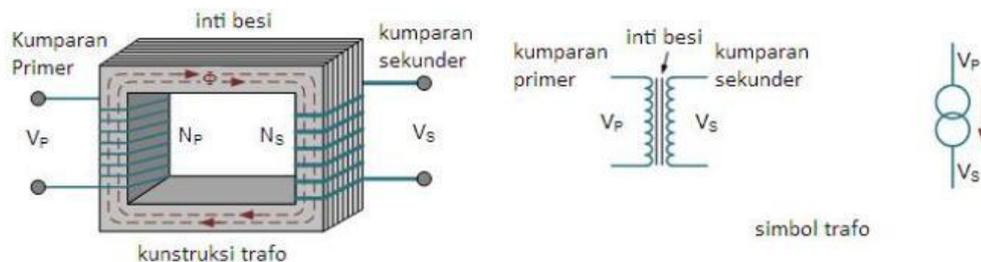
^[8] Rijono, Yon. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Penerbit ANDI, hlm. 3

^[10] Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik*, (Bandung: Penerbit ITB, 1991), hlm. 16



2.2 Konstruksi Transformator¹¹

Transformator sering juga disebut trafo memiliki konstruksi dan simbol seperti pada gambar berikut ini:



Gambar 2.2 Konstruksi dan simbol transformator

Dimana:

N_p = Jumlah lilitan primer

N_s = Jumlah lilitan sekunder

V_p = Tegangan primer

V_s = Tegangan sekunder

a. Inti besi

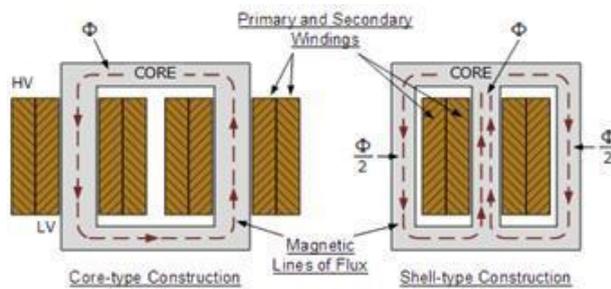
Sebuah trafo terdiri dari kumparan dan inti besi. Biasanya terdapat dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua kumparan ini tidak berhubungan secara fisik tetapi dihubungkan oleh medan magnet. Untuk meningkatkan induksi magnetik antara 2 kumparan maka ditambahkan inti besi seperti pada gambar 2.2. Inti besi pada trafo dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. Inti besi tipe *shell* (*Shell Core Transformer*)
2. Inti besi tipe tertutup (*Closed Core Transformer*)⁹

Kedua jenis inti besi dapat dilihat seperti pada gambar dibawah ini:

^[11] <https://djukarna.wordpress.com/2013/10/21/transformator/>. Diakses pada tanggal 2 Juni 2020 pukul 16:05 WIB

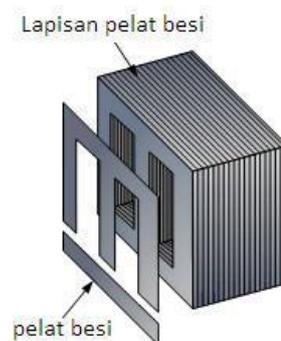
^[9] Sumanto. 1991. Teori Transformator. Yogyakarta: ANDI OFFSET, hlm. 21



Gambar 2.3 Inti trafo

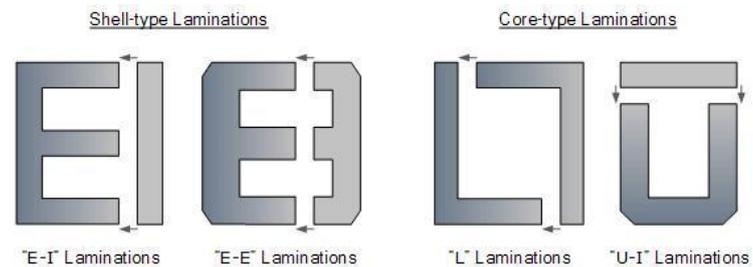
Pada trafo dengan inti besi berbentuk *shell*, kumparan dikelilingi oleh inti besi. Fluks magnetik pada inti besi tipe *shell* akan terbelah dua. Sementara kumparan primer dan kumparan sekunder digulung bersamaan. Untuk trafo yang memiliki inti besi tipe tertutup. Tidak ada pembagian fluks magnetik.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

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



Gambar 2.4 Inti besi berlapis pada trafo

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



Gambar 2.5 Cara menghubungkan lapisan inti besi pada trafo

b. *Winding*¹

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 2.6 Belitan trafo

c. **Bushing**

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan *body main tank* trafo.



Gambar 2.7 Bushing

^[1] Bambang Cahyono, dkk., Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2014), hlm. 2



Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu:

1. Isolasi

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

- Bushing kondenser, bushing kondenser umumnya dipakai pada tegangan rating bushing 72,5 kV keatas.
- Bushing non kondenser, bushing non kondenser umumnya digunakan pada tegangan rating 72,5 kV kebawah.

2. Konduktor

Terdapat jenis-jenis konduktor pada bushing yaitu *hollow conductor* dimana terdapat besi pengikat atau penegang di tengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan *flexible lead*.

3. Klem koneksi

Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar di luar bushing.

4. Asesori

Asesoris bushing terdiri dari indikasi minyak, seal atau gasket dan tap pengujian. Seal atau gasket pada bushing terletak dibagian bawah mounting flange.



Gambar 2.8 Indikator level minyak bushing

Gambar 2.9 Gasket/seal antara *flange bushing* dengan *body* trafo

Gambar 2.10 Tap pengujian

d. Pendingin

Suhu pada trafo yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada trafo. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan. Minyak isolasi trafo 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 radiator¹. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan. Transformator tipe kering menggunakan udara atau gas murni sebagai media pendingin.⁴

^[1] Bambang Cahyono, dkk., Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2014), hlm. 7

^[4] Lister, Eugene C. 1993. Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam (Terjemahan). Jakarta: Erlangga. Hlm. 177.



Tabel 2.1 Macam-macam pendingin pada trafo

No.	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Trafo		Diluar Trafo	
		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/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			



Gambar 2.11 Radiator

e. Konservator¹

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada trafo, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun.

^[1] Bambang Cahyono, dkk., Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2014), hlm. 8



Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat trafo mengalami kenaikan suhu.



Gambar 2.12 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 trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe konservator tanpa *rubber bag*), maka udara yang akan masuk ke dalam konservator akan di *filter* melalui *silica gel* sehingga kandungan uap air dapat diminimalkan.



Gambar 2.13 *Silica Gel*

Untuk menghindari agar minyak trafo 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.

f. Minyak Isolasi Trafo¹

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



Gambar 2.14 Minyak isolasi trafo

g. Tap Changer¹

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Trafo dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan sehingga dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/ sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/ primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut Tap changer.

^[1] Bambang Cahyono, dkk., Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2014), hlm. 10

^[1] *Ibid*, hlm. 11



2.3 Prinsip Kerja Transformator¹²

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 (Φ) 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.

Setiap trafo juga memiliki suatu besaran yang dinamakan perbandingan transformasi, untuk menunjukkan perbandingan lilitan atau perubahan level tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder yang ditransformasikan pada trafo tersebut.

^[12] <https://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-transformator/> Diakses pada tanggal 2 Juni 2020 pukul 16:23 WIB



Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , maka akan mengalir I_2 pada kumparan sekunder trafo, dimana besarnya I_2 dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_L} \dots \dots \dots (2.2)$$

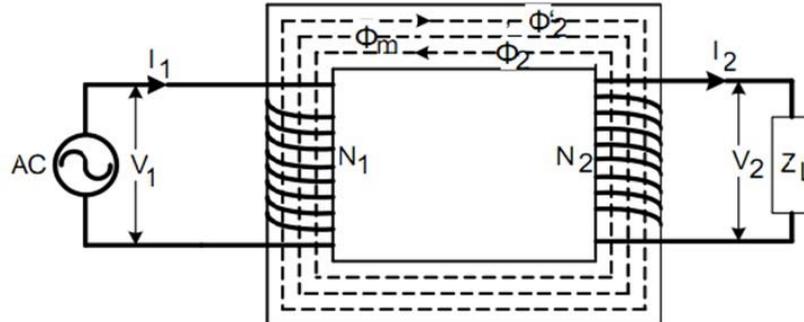
Dimana:

I_2 = Arus

V_2 = Tegangan

Z_L = Beban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) atau fluks yang cenderung berlawanan dengan fluks bersama (Φ) yang telah ada akibat arus pemagnetan pada sisi primer. Agar fluks bersama tersebut nilainya tidak berubah akibat pengaruh ggm yang berlawanan, maka pada kumparan primer harus mengalir arus I_2 dan menimbulkan fluks Φ_2' yang menentang fluks akibat arus beban I_2 .



Gambar 2.15 Trafo berbeban

2.4 Daya Listrik³

Karena beban (Z) membentuk pergeseran sudut terhadap tegangan maka arus beban (I_b) yang mengalir pun membentuk sudut yang sama searah dengan sudut dari Z sebesar ϕ . Hal ini berakibat timbulnya tiga macam daya, yaitu daya aktif (watt), daya reaktif (VAR) dan daya semu (VA).

^[3] Irene Kartika Febrianti, "Analisa Penurunan Faktor Kerja Transformator Daya 30 MVA", Jurnal Ampere. Vol.2 No.1, PGRI Palembang 2017, hal. 21



2.4.1 Daya Aktif

Daya aktif biasanya disebut juga daya nyata yaitu daya yang secara langsung digunakan oleh beban untuk diubah ke energi lain seperti energi panas, energi cahaya dan sebagainya. Daya ini dapat diserap oleh beban yang berupa tahanan murni atau beban yang mengandung komponen tahanan seperti lampu pijar, elemen pemanas, motor-motor listrik dan lainnya. Daya aktif diukur dalam satuan watt (W).

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \dots\dots\dots(2.3)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.4.2 Daya Reaktif

Daya reaktif disebut juga daya buta dimana daya ini tidak dapat dipakai secara langsung oleh beban untuk diubah menjadi energi lain, tetapi berupa daya magnetisasi yang dapat membangkitkan fluksi magnet pada peralatan listrik induksi seperti transformator, motor-motor listrik dan lainnya yang mengandung reaktansi. Daya ini menurut sifatnya terdiri dari dua bagian yaitu daya reaktif induktif dan daya reaktif kapasitif. Daya reaktif induktif berbentuk energi magnetis sebagai pembangkit fluksi. Tanpa adanya daya reaktif induktif daya tak dapat ditransfer ke sisi sekunder transformator atau melalui celah udara pada motor induksi. Daya reaktif kapasitif adalah daya reaktif yang dibutuhkan oleh kapasitor, saluran transmisi tegangan tinggi, condenser sinkron dan lain-lain. Satuan daya reaktif adalah Volt Ampere reaktif (VAR), kilo Volt Ampere reaktif (kVAR), Mega Volt Ampere reaktif (MVAR) dan seterusnya.

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots\dots\dots(2.5)$$



2.4.3 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,

$$S = \sqrt{3} \cdot VI \dots \dots \dots (2.6)$$

2.5 Rugi-Rugi Pada Transformator¹¹

2.5.1 Hysterisis Losses

Kerugian histerisis disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet di dalam inti besi. Gesekan molekul dalam inti besi ini menimbulkan panas. Panas yang timbul ini menunjukkan kerugian energi, karena sebagian kecil energi listrik tidak dipindahkan, tetapi diubah bentuk menjadi energi panas. Panas yang tinggi juga dapat merusak trafo, sehingga pada trafo-trafo transmisi daya listrik ukuran besar harus didinginkan dengan media pendingin. Umumnya digunakan minyak khusus untuk mendinginkan trafo ini.

Sebuah trafo didesain untuk bekerja pada rentang frekuensi tertentu. Menurunnya frekuensi arus listrik dapat menyebabkan meningkatnya rugi-rugi histerisis dan menurunkan kapasitas (VA) trafo.

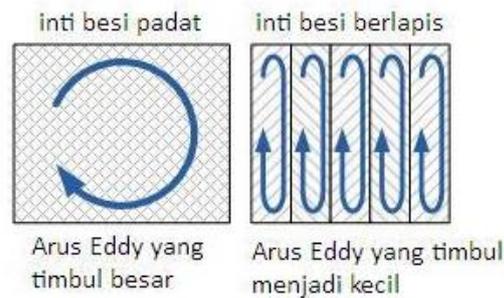
2.5.2 Eddy Current Losses

Kerugian karena *Eddy current* disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Ini disebabkan oleh aliran fluk magnetik disekitar inti besi. Karena inti besi trafo terbuat dari konduktor (umumnya besi lunak), maka arus Eddy yang menginduksi inti besi akan semakin besar. *Eddy current* dapat menyebabkan kerugian daya pada sebuah trafo karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti besi, maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi panas. Ini merupakan kerugian.

^[11] <https://djukarna.wordpress.com/2013/10/21/transformator/> Diakses pada tanggal 2 Juni 2020 Pukul 16.33 WIB



Untuk mengurangi arus Eddy, maka inti besi trafo dibuat berlapis-lapis, tujuannya untuk memecah induksi arus Eddy yang terbentuk di dalam inti besi. Perbedaan induksi arus Eddy di dalam inti besi tunggal dengan inti besi berlapis dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.16 Inti besi utuh dan inti besi berlapis

2.5.3 Copper Losses

Rugi-rugi tembaga (*copper losses*) terjadi di kedua kumparan. Kumparan primer atau sekunder dibuat dari gulungan kawat tembaga yang dilapisi oleh isolator tipis yang disebut enamel. Umumnya kumparan dibuat dari gulungan kawat yang cukup panjang. Gulungan kawat yang panjang ini akan meningkatkan hambatan dalam kumparan. Pada saat trafo dialiri arus listrik maka hambatan kumparan ini akan mengubah sejumlah kecil arus listrik menjadi panas yaitu sebesar (I^2R). Semakin besar harga R maka semakin besar pula energi panas yang timbul di dalam kumparan. Mutu kawat yang bagus dengan nilai hambatan jenis yang kecil dapat mengurangi rugi-rugi tembaga.

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.7)$$

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

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



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

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

$$P_{\text{rugi total}} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots \dots \dots (2.9)$$

Sebuah trafo yang ideal diasumsikan:

- a. Tidak terjadi rugi-rugi hysteresis
- b. Tidak terjadi induksi arus Eddy
- c. Hambatan dalam kumparan = 0, akibatnya tidak ada rugi-rugi tembaga.

2.6 Efisiensi Transformator¹¹

Sebuah trafo tidak membutuhkan bagian yang bergerak untuk memindahkan energi dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Ini berarti tidak ada kerugian karena gesekan atau hambatan udara seperti yang terdapat pada mesin – mesin listrik (contoh motor listrik dan generator). Namun di dalam trafo juga terdapat kerugian yang disebut rugi-rugi tembaga (*copper losses*) dan rugi-rugi besi (*iron losses*). Rugi-rugi tembaga terdapat pada kumparan primer dan kumparan sekunder, sedangkan rugi-rugi besi terdapat dalam inti besi. Rugi-rugi ini berupa panas yang dilepaskan akibat terjadinya *Eddy current*. Tetapi rugi-rugi ini sangat kecil. Efisiensi sebuah trafo dapat dihitung dengan membandingkan daya yang dikeluarkan di kumparan sekunder dengan daya yang diberikan pada kumparan primer. Efisiensi trafo dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.10)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - \text{Rugi total}}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.11)^8$$

^[10] <https://djukarna.wordpress.com/2013/10/21/transformator/#jp-carousel-1586> Diakses pada tanggal 3 Juni 2020 pukul 6.04 WIB

^[8] Wadhwa, C.L. 2007. *Basic Electrical Engineering Fourth Edition*. Delhi: New Age International Publishers. Hlm. 222



Dimana:

η = Efisiensi Transformator

P_{out} = Daya keluaran (kumparan sekunder)

P_{in} = Daya masukan (kumparan primer)

Dari persamaan tersebut, efisiensi transformator dapat ditentukan untuk setiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.

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

$$W_{ef maks} = \sqrt{\frac{\text{Rugi-rugi besi}}{\text{Rugi-rugi tembaga beban penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots \dots \dots (2.12)$$