

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

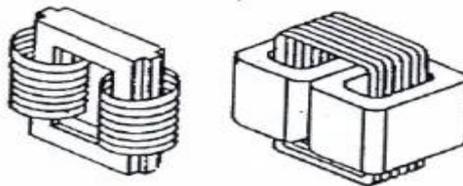
2.1 Pengertian Transformator⁶

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

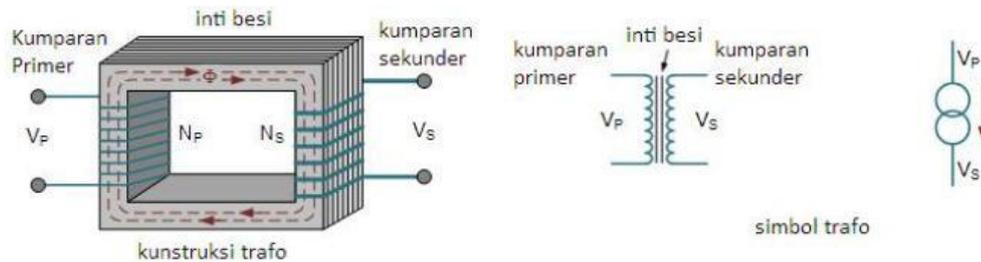
^[6][https://www.academia.edu/11535092/2 TEORI TRANSFORMATOR](https://www.academia.edu/11535092/2_TEORI_TRANSFORMATOR) Diakses pada tanggal 2 Juni 2020 pukul 15:55 WIB

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

^[10]Zuhal, *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

2.2.1. Inti besi

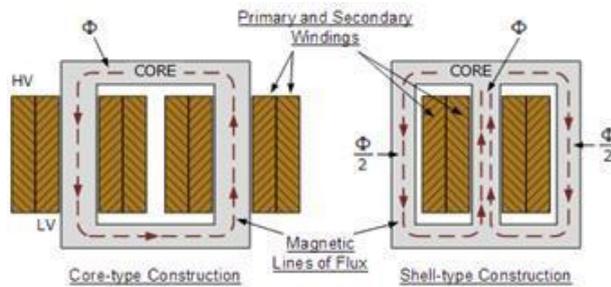
Sebuah trafo terdiri dari kumparan dan inti besi. Biasanya terdapat dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua kumparan ini tidak berhubungan secara fisik tetapi dihubungkan oleh medan magnet. Untuk meningkatkan induksi magnetik antara 2 kumparan maka ditambahkan inti besi seperti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

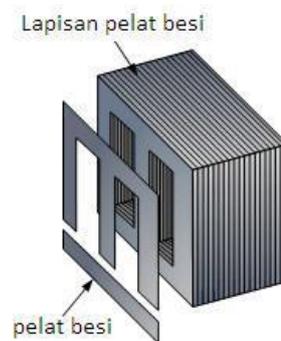
^[9]Sumanto. 1991. Teori Transformator. Yogyakarta: ANDI OFFSET, hlm. 21



Gambar 2.3 Inti trafo

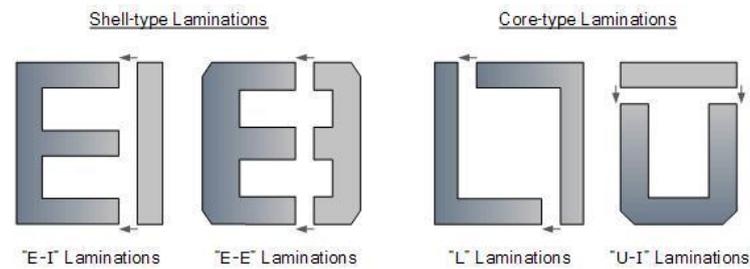
Pada trafo dengan inti besi berbentuk *shell*, kumparan dikelilingi oleh inti besi. Fluks magnetik pada inti besi tipe *shell*akan terbelah dua. Sementara kumparan primer dan kumparan sekunder digulung bersamaan. Untuk trafo yang memiliki inti besi tipe tertutup. Tidak ada pembagian fluks magnetik. Kumparan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

2.2.2 Winding¹

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

2.2.3 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* trafo.

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



Gambar 2.7 Bushing

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

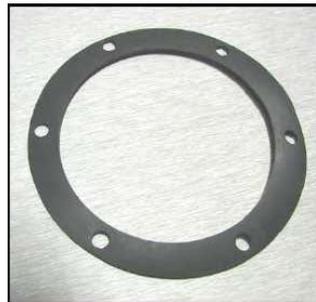
Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud bushing dengan konduktor penghantar di luar bushing.

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

2.2.4 Pendingin

Suhu pada trafo yang sedang beroperasi dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi 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

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			

^[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.



Gambar 2.11 Radiator

2.2.5 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. 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.

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



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.

2.2.6 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

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



2.2.7 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.

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

^[1] *Ibid*, hlm. 11

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



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.

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:

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

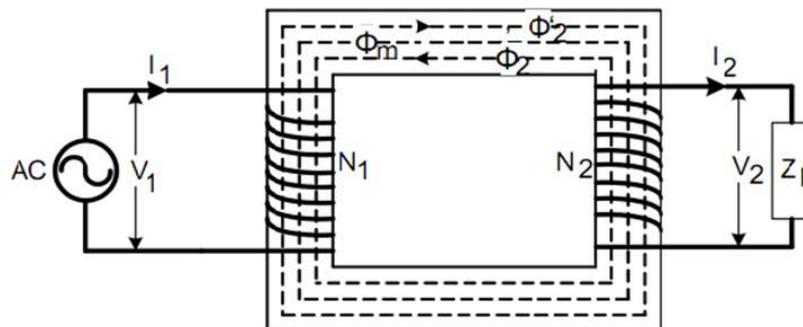
Dimana:

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



Zl : Impedansi (ohm)

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang *fluks* (Φ) 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 :

$$I_1 = I_o + I'_2 \dots\dots\dots(2.3)$$

Bila rugi besi diabaikan (I_c diabaikan) maka $I_o = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots\dots\dots(2.4)$$

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

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.5)$$

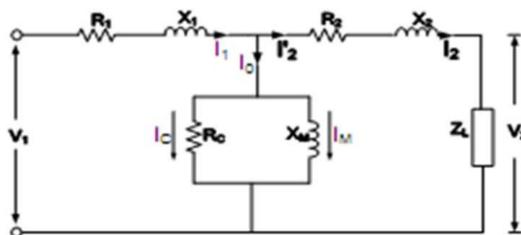
$$N_1 I_M = N_1 (I_1 - I'_2) - N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\text{Hingga } N_1 I'_2 = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.7)$$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka :

$$I_1 = I'_2 \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\text{Jadi } \rightarrow \frac{N_1}{I_1} \cdot \frac{N_2}{I_2} = \text{atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(2.9)$$



Gambar 2.16 Rangkaian Ekuivalen Transformator 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).

2.4.1 Daya Aktif⁵

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).

$$P = V \times I \cos \phi \text{ (1 fasa)(2.10)}$$

$$P = \sqrt{3}V \times I \cos \phi \text{ (3 fasa)(2.11)}$$

$$P_1 = P_2 = V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s \text{(2.12)}$$

2.4.2 Daya Semu (S)

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

$$S = \sqrt{3}V \times I \text{ (3 fasa) (VA).....(2.13)}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{(2.14)}$$

2.4.3 Daya Reaktif (Q)

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

^[5]M. Ade Kurniawan. 2016. Perhitungan Efisiensi Transformator 80 MVA Di PLTU Unit 1 PT. PLN (PERSERO) Pembangkitan Sumbagsel Sektor Pembangkitan Bukit Asam. Laporan Akhir. Politeknik Negeri Sriwijaya, Hlm. 22



Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas..

$$Q = V \times I \sin \phi \text{ (1 fasa)(2.15)}$$

$$Q = \sqrt{3}V \times I \cos \phi \text{ (3 fasa)(2.16)}$$

2.5 Rugi-Rugi Pada Transformator¹¹

2.5.1 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.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \text{(2.17)}$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \text{(2.18)}$$

Dengan demikian rugi tembaga total :

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

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \text{(2.19)}$$

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

$$\begin{aligned} P_{cu} &= I_1^2 R_1 + (a I_1)^2 R_2 \\ &= I_1^2 (R_1 + a^2 R_2) \\ &= I_1^2 R_{ek1} \text{ atau dapat ditulis} \\ P_{cu} &= I_2^2 R_{ek2} \text{(2.20)} \end{aligned}$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

$$P_{\text{rugi total}} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \text{(2.21)}$$

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

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



$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.22)$$

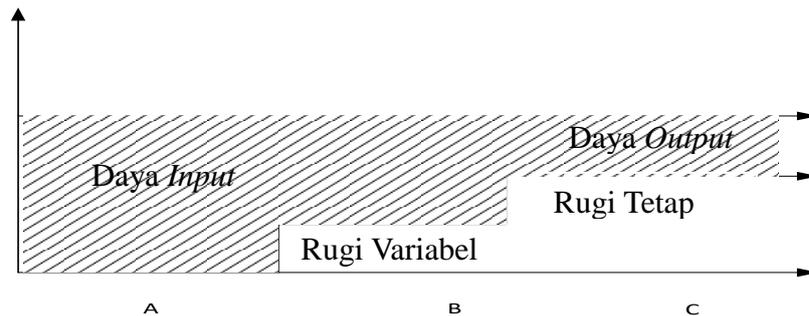
Keterangan:

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 2.17 Rugi-rugi Transformator

$$n_{listrik} = \frac{C}{B} \times 100\% \dots \dots \dots (2.23)$$

$$n_{mekanik} = \frac{B}{A} \times 100\% \dots \dots \dots (2.24)$$

$$n_{Trafo} = n_{listrik} \times n_{mekanik} = \frac{C}{B} \times \frac{B}{A} = \frac{C}{A} = \frac{P_o}{P_{in}} \dots \dots \dots (2.25)$$

2.5.2 Rugi Tetap

Rugi tetap terdiri atas :

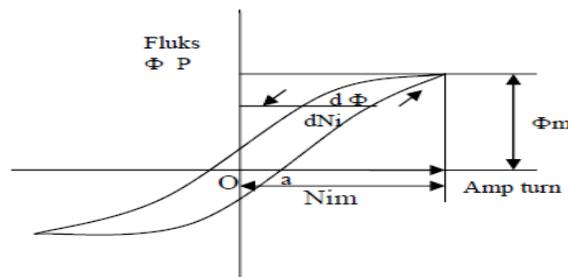
a. Rugi histerisis, yaitu rugi yang disebabkan *fluks* bolak-balik pada inti besi.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \text{ watt} \dots \dots \dots (2.26)$$

Dimana :

K_h = konstanta

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



Gambar 2.18 Lingkaran Histerisis



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

$$P_e = K_e^2 \cdot f^2 \cdot B_{\text{maks}} \dots \dots \dots (2.27)$$

$$\text{Jadi, rugi besi (rugi inti) } P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.28)$$

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:

$$\text{Daya keluaran} = \text{daya input} - \text{kerugian} \dots \dots \dots (2.29)$$

$$\eta =$$

$$\frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.30)$$

$$\text{Atau } \eta = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya keluaran} + \Sigma_{\text{rugi}}} \dots \dots \dots (2.31)$$

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma_{\text{rugi}}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.32)$$

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

^[11] <https://djukarna.wordpress.com/2013/10/21/transformator/#jp-carousel-1586> Diakses pada tanggal 3 Juni 2020 pukul 6.04 WIB