



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu alat magnetoelektrik yang sederhana, andal, dan efisien untuk mengubah tegangan arus bolak balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain pada umumnya transformator terdiri dari atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang di belit seputar “kaki” inti transformator. Penggunaan Transformator yang sangat sederhana dan andal itu merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Transformator yang di pakai pada jaringan tenaga listrik merupakan transformator tenaga. Di samping itu ada jenis-jenis transformator lain yang banyak di pergunakan dan yang pada umumnya merupakan transformator yang lebih kecil. Misalnya transformator yang di pakai di rumah tangga untuk menyesuaikan tegangan dari lemari es dengan yang jaringan listrik umum. Atau Transformator yang digunakan pada berbagai alat elektronik seperti pesawat penerima radio, Televisi dan, lain sebagainya.³

Tegangan bolak-balik yang diberikan pada gulungan primer menghasilkan arus bolak-balik, yang menimbulkan fluks magnet yang bolak-balik di sepanjang inti. Fluks Magnet ini menginduksi suatu g.g.l di gulungan sekunder, sebagaimana dijelaskan menurut hukum faraday, yang mengatakan bahwa ketika suatu konduktor dipoting dengan medan magnet, suatu g.g.l diinduksikan di dalam konduktor. Karena kedua gulungan terkait dengan fluks magnet yang sama, g.g.l induksi perputaran akan sama untuk kedua gulungan. Oleh karena itu, g.g.l pada kedua gulungan sebanding dengan jumlah putaran-nya. Secara Simbol,

² Kadir, Abdul., Transformator, Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press), 2010, Hal



$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \dots\dots\dots(2.1)$$

Kebanyakan Transformator daya, Praktis memiliki efisiensi yang sangat tinggi, dan untuk sebuah transformator ideal dengan efisiensi 100% pada daya primer sama dengan daya sekunder :

$$\text{Daya primer} = \text{Daya Sekunder}^4$$

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi 3 jenis yaitu sebagai berikut

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran

Transformator daya digunakan untuk menaikkan tegangan listrik, transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ketegangan rendah, dan transformator pengukuran, dalam hal ini ada 2 jenis transformator yaitu : Transformator arus dan transformator tegangan⁸

2.1.1 Auxiliary Transformator

Trafo yang dipakai pada distribusi LRT Sumatera Selatan adalah trafo tiga fasa dengan tipe kering yang dicasting dengan isolasi *epoxy* resin mengacu standar IEC60076-11, trafo didesain lebih kompak dan cocok untuk instalasi didalam ruangan.

Rating daya di dalam satuan kVA untuk setiap posisi step sadapan dan rasio tegangan nominal trafo tanpa beban adalah 20000/380Volt dengan sistem frekuensi 50Hz.

Pemilihan trafo kering mempunyai beberapa kehandalan sebagai berikut:

1. Tahan api. Kumbaran cor dengan *epoxy* resin dengan karakteristik tidak mudah terbakar

⁴ Linsley, Trevor.2004. *Instalasi listrik dasar*, Penerbit Erlangga , Jakarta : Indonesia Hal 151

⁸ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991 Hal 16

2. Kemampuan terhadap hubung singkat lebih tinggi. Kumparan cor dengan *epoxy* resin dengan kekuatan elektrik dan mekanik yang tinggi diproduksi dalam suatu struktur yang kuat terhadap kekuatan elektro-mekanik yang terjadi selama hubungan singkat, dampak eksternal, dan getaran yang abnormal.
3. *Moisture proof*. Kumparan cor dengan *epoxy* resin memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan tidak akan mengalami kerusakan properti dielektrik karena kelembaban dan efek penuaan bahan isolasi, bahkan setelah jangka panjang tanpa pemeliharaan.
4. *Maintenance* lebih mudah. Tidak ada pemeriksaan tegangan tembus minyak (purifikasi oil), hanya membersihkan debu di permukaan resin.

Berikut adalah foto *Auxiliary* Transformator yang digunakan di LRT Sumatera Selatan:



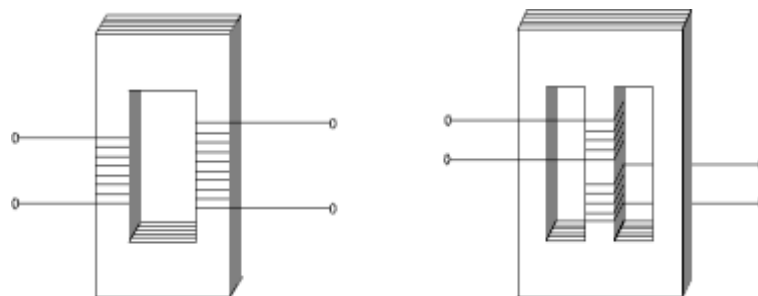
Gambar 2.1 *Auxiliary* Transformator

2.2 Bentuk 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 ⁷

Pada gambar 2.2 diperlihatkan konstruksi dari kedua inti, dimana kedua kumparan dililitkan saling tergabung secara magnetis, namun kumparan tersebut tidak tergabung secara elektrik.



Gambar 2.2 Konstruksi Tranformator

(a) Tipe Inti (*core type*)

(b) Tipe Cangkang (*shell type*)⁸

2.3 Komponen Utama Transformator Tenaga

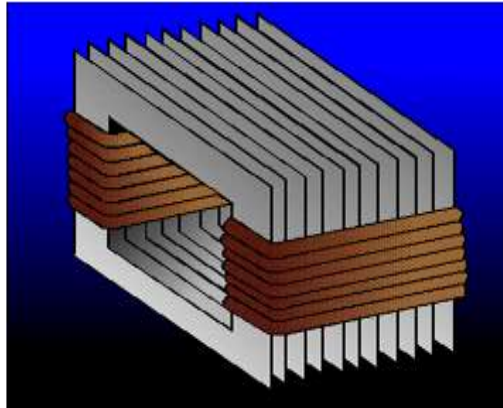
Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, peralatan Bantu pendinginan transformator, tap changer dan alat pernapasan (*dehydrating breather*).

⁷ Wijaya, mochtar S.T., 2001. Dasar-Dasar Mesin Listrik. Jakarta: Djambatan. Hal 61-61

⁸ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991 Hal 16

2.3.1 Inti besi

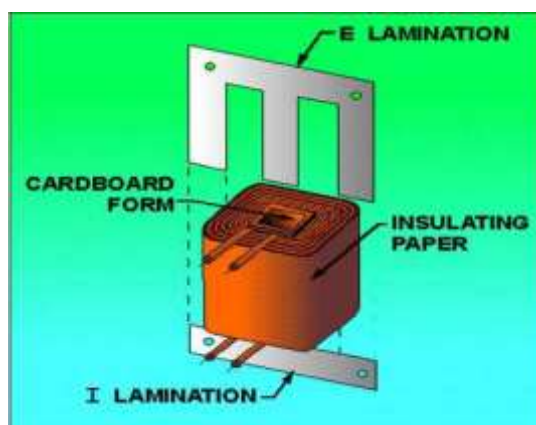
Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.



Gambar 2.3 Inti Besi

2.3.2 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 2.4 Konstruksi belitan transformator

2.3.3 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 2.5 Bushing

2.3.4 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.

2.3.5 Tangki Konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan 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 2.6 Tengki konservator

2.3.6 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.



Gambar 2.7 Peralatan Bantu Pendinginan Transformator

Berikut adalah Klasifikasi Pendinginan Transformator :

1. Pendinginan Alam :

- a) Air Natural Colling (AN) adalah Pendinginan dengan udara biasa)
- b) Oil-immersed Natural Colling (ON) adalah Pendinginan dengan direndam kedalam minyak
- c) Oil natural Air natural (ONAN) adalah pendinginan dengan udara dan minyak

2. Pendinginan Buatan (Udara)

- a) Oil-immersed Forced-Oil Corculation with Air- Blast Colling (OFB) adalah Pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dengan semburan udara
- b) Oil-immersed Air-blast Colling/Oil Naturan Air Force (OB/ONAF) adalah Pendinginan dengan direndam kedalam minyak dan dihembuskan udara

3. Pendinginan buatan (Air)

- a) Oil-immersed Water Colling (OFW)adalah Pendingin dengan direndam minyak dan juga dibantu dengan air) OFW
- b) Oil-immersed Forced-oil Circulation with Water Colling (OFW) adalah Pendingin dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dan juga dibantu dengan pendinginan air.

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



Gambar 2.8 Tap Charger

2.3.8 Alat pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Alat pernapasan (*Dehydrating Breather*). Sebagai tempat penampungan pemuaiian minyak isolasi akibat panas yang timbul, maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator. Pada konservator ini permukaan minyak diusahakan tidak boleh bersinggungan dengan udara, karena kelembaban udara yang mengandung uap air akan mengkontaminasi minyak walaupun proses pengkontaminasinya berlangsung cukup lama. Untuk mengatasi hal tersebut, udara yang masuk kedalam tangki konservator pada saat minyak menjadi dingin memerlukan.⁶

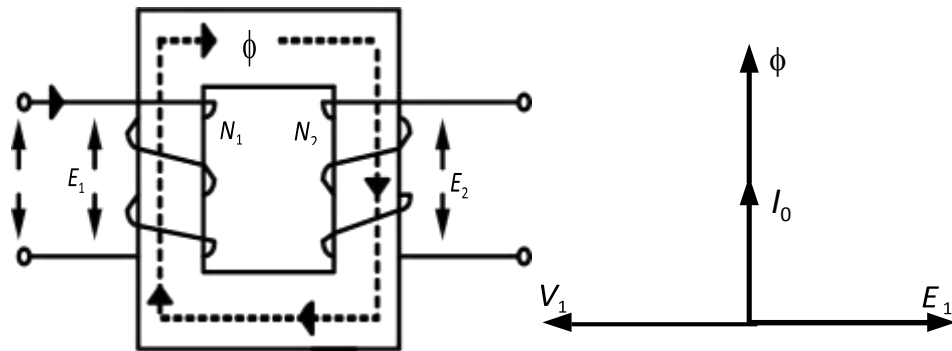
⁶M. Solikhudin. 2010. *STUDI GANGGUAN INTERBUS TRANSFORMER (IBT-1) 500/150 kV DI GITET 500 kV KEMBANGAN - JAKARTA BARAT*. Universitas Indonesia, Depok : Indonesia. Hal 4-6

2.4 Keadaan Transformator Tanpa Beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tinggal 90° dari V_1 (gambar 2.6b). Arus Primer I_0 menimbulkan fluks yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid :

$$\Phi = \Phi_{maks} \sin \omega t \quad (2.4)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (hukum Faraday)



Gambar 2.9 keadaan transformator tanpa beban

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

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{maks} \sin \omega t)}{dt}$$

$$= -N_1 \omega \phi_{maks} \cos \omega t$$

Harga Efektifnya :

$$E_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \phi_{maks}}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 \cdot f \cdot \phi_{maks} \dots\dots\dots (2.2)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) bersama tadi menimbulkan :

$$E_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$E_2 = -N_2 \omega \phi_{maks} \cos \omega t$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f \cdot \phi_{maks} \dots\dots\dots (2.3)$$

Sehingga $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ (2.4)

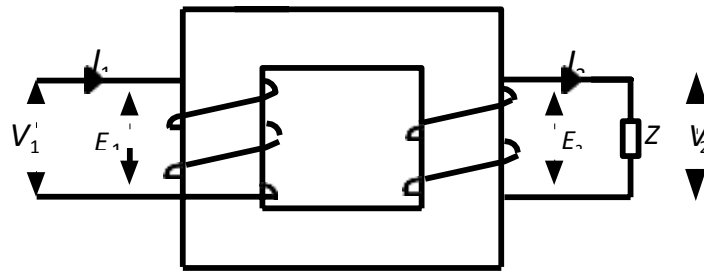
Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks Bocor,

$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = a$ (2.5)

a = perbandingan transformasi ⁸

2.5 Transformator berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_L mengalir pada kumparan sekunder. $I_2 = \frac{V_2}{Z_L}$ dengan $\phi_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar 2.10 Keadaan transformator berbeban

Arus beban I_2 ini 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 , sehingga

keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi:

$I_1 = I_0 + I_2'$ (2.6)

Bila rugi diabaikan (I_c diabaikan) maka $I_0 = I_M$

$I_1 = I_M + I_2'$ (2.7)

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

$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$ (2.8)⁸

⁸ Zuhal, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991 Hal 17 dan 21 s/d 22



2.6 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif

2.6.1 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata adalah merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik. Dirumuskan dengan $VI \cos \theta$ dengan simbol P dalam satuan watt (W), kilo watt (KW), mega watt (MW). Jadi,

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \dots \dots \dots (2.9)$$

2.6.2 Daya Semu

Daya semu adalah daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi dan distribusi. 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,

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots \dots \dots (2.10)$$

2.6.3 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,

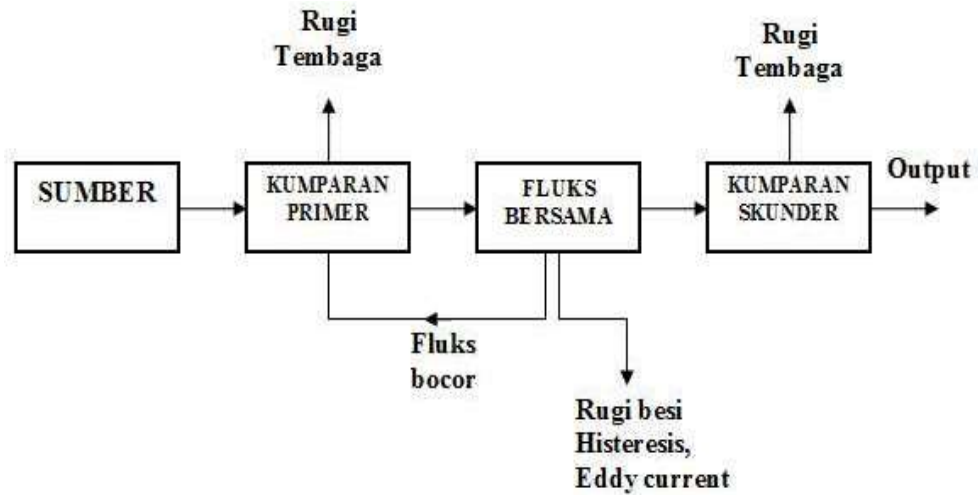
$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \sin \theta \dots \dots \dots (2.11)^1$$

2.7 Rugi-rugi Transformator

Rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun kumparan sekunder. Untuk mengurangi rugi-rugi besi aruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir didalamnya. Untuk memperkecil rugi-rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan.

¹ Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI YOGYAKARTA, 2013, Hal 7

Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang dapat menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan-perubahan fluks magnet.



Gambar 2.11 Diagram Blok Rugi-Rugi Pada Transformator

2.7.1 Rugi – Rugi Tanpa Beban

Rugi–Rugi tanpa beban menyangkut baik rugi-rugi histerisis dan rugi- rugi arus pusar. Karena fluks didalam inti praktis dan konstan untuk keadaan semua beban. Rugi– rugi ini dapat dikurangi dengan mempergunakan besi magnetic dengan kadar silicon yang tinggi dan memakai laminasi-laminasi yang tipis.

1. Rugi Histeris

Rugi histerisis terjadi apabila inti besi mendapat fluksi bolak- balik, Rugi histerisis persycle berbanding dengan luas histerisis loop. Rugi histerisis dinyatakan dalam

$$P_h = K_h \cdot f \cdot b_{maks} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

B_{maks} = rapat fluksi maksimum (tesla)



K_h = konstanta histerisis

2. Rugi arus pusar (eddy current)

Rugi arus pusar disebabkan adanya arus yang terinduksi di inti. Pada dasarnya induksi tegangan diinti besi ini sama seperti transformator (dapat dianggap bahwa setiap lempengan inti besi adalah sekunder yang terhubung singkat).

Impedansi yang dialiri arus listrik dapat dianggap konstan untuk laminasi yang tipis dan tak tergantung dari frekuensi, untuk frekuensi rendah atau power frekuensi, jadi rugi arus pusar dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_e = K^2 e \cdot f^2 \cdot B_{maks} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

K_e = konstanta *eddy current* ⁸

2.7.2 Rugi - Rugi dalam keadaan berbeban

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator berbeban dasarnya selalu berubah-ubah, hal ini tergantung pada arus beban yang mengalir pada tahanan transformator. Sehingga rugi transformator dalam keadaan berbeban yang dikenal sebagai rugi tembaga (P_{cu}) adalah :

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots(2.14)$$

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

⁸ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991 Hal 34



Untuk mencari rugi total saat pembebanan pada transformator dengan persamaan adalah :

$$\text{Prugi total} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots \dots \dots (2.15)^8$$

2.8 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 :

$$\begin{aligned} \text{Daya keluaran} &= \text{daya input} - \text{kerugian} \dots \dots \dots (2.16) \\ &= \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= \frac{\text{daya masukan} - \text{kerugian}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.17)$$

Dari persamaan di atas, jelaslah bahwa efisiensi transformator dapat ditentukan untuk setiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.⁵

⁸ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991, Hal 36

⁵ Lister, Eugene C. , Mesin dan Rangkaian Listrik, Penerbit Erlangga, 1993, Hal 176-177