

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gardu Traksi**

Gardu traksi adalah sebuah gardu listrik yang berfungsi mengubah tenaga listrik yang dipasok oleh industri tenaga listrik agar sesuai dengan tegangan, tipe arus, dan frekuensi yang digunakan di suatu jalur kereta api, trem, atau bus listrik. Gardu traksi dapat digunakan untuk mengubah arus bolak-balik tiga fasa dengan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz menjadi arus listrik satu fasa dengan frekuensi lebih rendah, sebagaimana digunakan oleh banyak jalur kereta api. Gardu traksi juga dapat digunakan untuk menyearahkan arus bolak-balik menjadi arus searah untuk digunakan oleh jalur kereta api yang menggunakan listrik arus searah sebagai sumber tenaganya.

Gardu traksi biasanya terdesentralisasi (beberapa gardu langsung memasok ke listrik aliran atas atau rel ketiga, sehingga tidak perlu menggunakan jaringan distribusi arus listrik traksi) atau tersentralisasi (satu gardu memasok ke jaringan tenaga traksi, dan biasanya juga memasok ke listrik aliran atas atau rel ketiga).

Untuk sistem DC, peralatan inti gardu traksi adalah transformator dan rectifier yang digunakan untuk mengubah pasokan utilitas menjadi DC. Penyearah (Rectifier) 6, 12 atau 24 pulsa. Di gardu traksi DC terdapat pemutus sirkuit untuk memastikan sistem terlindungi dengan memadai dan perangkat switching memungkinkan operasi dan pemeliharaan sistem.

Untuk sistem AC, peralatan inti gardu traksi adalah transformator yang terhubung ke catu daya tiga fasa untuk mengubahnya menjadi tegangan fasa tunggal yang cocok untuk sistem elektrifikasi rel yang digunakan. Terdapat pemutus sirkuit dan perangkat switching akan disediakan untuk memastikan perlindungan dan operasi sistem yang memadai dan memungkinkan pemeliharaan. Pasokan arus bolak-balik pada sisi traksi adalah fase tunggal dan

dapat menyebabkan ketidakseimbangan pada utilitas tiga fase di luar batas yang diizinkan. Perangkat *balancing* (*Scott transformer, static converter, dll.*) Sering digunakan untuk mencapai batas ini.

Umumnya gardu traksi akan dikendalikan oleh sistem SCADA dan kemungkinan akan memberikan daya untuk sistem tambahan seperti pensinyalan dan sisi lintasan lainnya. Gardu traksi memiliki kendala operasional dan stabilitas yang lebih keras daripada gardu distribusi daya normal. Ini termasuk sering terkena hubung singkat, lonjakan transien, depresi tegangan, dan kenaikan tegangan. Penggunaan drive traksi yang dikendalikan thyristor menghasilkan harmonisa yang signifikan, yang memengaruhi sistem pasokan.<sup>[12]</sup>

## 2.2 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 gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap – tiap keperluan; misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.<sup>[10]</sup>

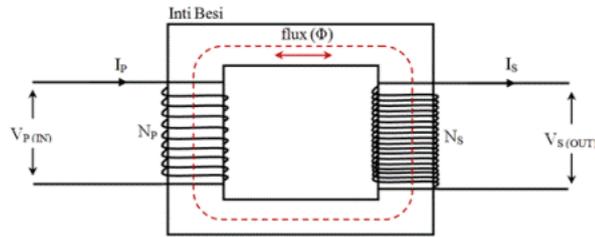
## 2.3 Prinsip Kerja Transformator

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

---

<sup>[12]</sup> Steven McFadeyen. 2012. Introduction to Traction Substation

<sup>[10]</sup> Zuhail. 1991. Dasar tenaga listrik. ITB, Bandung, Hal 15



Gambar 2.1 Prinsip kerja transformator

pada sisi primer transformator dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak-balik sinusoidal ( $V_1$ ), maka akan mengalir arus bolak-balik yang juga sinusoidal ( $I_1$ ) 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 :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

$e_1$  = GGL induksi pada kumparan primer (Volt)

$N_1$  = jumlah belitan pada sisi primer

$d\Phi/dt$  = perubahan fluks terhadap waktu (Wb/s)<sup>[10]</sup>

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan transformator berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti transformator. 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.

<sup>[10]</sup> Ibid, hal 17

Setiap trafo juga memiliki suatu besaran yang dinamakan perbandingan transformasi ( $a$ ), untuk menunjukkan perbandingan lilitan atau perubahan level tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder yang ditransformasikan pada trafo tersebut. Berikut perumusannya:

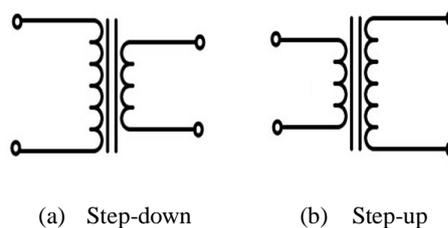
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} = a \dots\dots\dots (2.2)$$

## 2.4 Jenis – jenis Transformator

Berikut ini adalah beberapa jenis Trafo berdasarkan masing-masing pengklasifikasiannya.

### 2.4.1 Transformator berdasarkan level tegangan<sup>[11]</sup>

Pengklasifikasian ini pada dasarnya tergantung pada rasio jumlah gulungan di kumparan primer dengan jumlah kumparan sekundernya. Jenis Trafo berdasarkan level tegangan ini diantaranya adalah



Gambar 2.2 Jenis – jenis transformator berdasarkan level tegangan

#### 1. Transformator Step-up

Transformator step-up adalah jenis transformator yang memiliki fungsi untuk menaikkan suatu tegangan. Ciri-ciri transformator step-up :

- a. Jumlah lilitan pada kumparan primer selalu lebih kecil dibandingkan dengan jumlah lilitan pada kumparan sekunder ( $N_p < N_s$ ).

<sup>[11]</sup> Azzahra Rahmah. 2019. Transformator Adalah – Pengertian, Fungsi, Jenis, Gambar, Prinsip Kerja

- b. Tegangan primer juga selalu lebih kecil daripada tegangan sekunder ( $V_p < V_s$ ).
- c. Untuk kuat arus primer selalu lebih besar dibanding dengan kuat arus sekunder ( $I_p > I_s$ ).

Pada pembangkit listrik, transformator ini dimanfaatkan untuk menaikkan tegangan yang keluar dari generator. Hal ini bertujuan agar saat ditransmisikan ke jaringan listrik, listrik tidak akan kehilangan banyak daya. Tak hanya itu, transformator ini juga bisa digunakan pada perangkat inverter yang biasa digunakan untuk menaikkan tegangan menjadi lebih besar.

## 2. Transformator Step-down

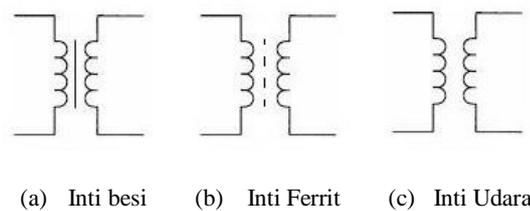
Transformator step-down jenis transformator yang memiliki fungsi untuk menurunkan tegangan. Ciri – ciri transformator step-down :

- a. Jumlah lilitan pada kumparan primer selalu lebih besar dibanding dengan jumlah lilitan pada kumparan sekunder ( $N_p > N_s$ ).
- b. Tegangan pada primer juga lebih besar dibanding dengan tegangan sekunder ( $V_p > V_s$ ).
- c. Untuk kuat arus primer selalu lebih kecil dari kuat arus sekunder ( $I_p < I_s$ )

Pada jaringan distribusi listrik, transformator ini berguna untuk mengubah tegangan grid yang tinggi menjadi tegangan rendah yang dapat dimanfaatkan pada peralatan rumah tangga. Misalnya pada adaptor AC–DC.

### 2.4.2 Transformator berdasarkan bahan inti yang digunakan

Berdasarkan media atau bahan inti yang digunakan untuk lilitan primer dan lilitan sekunder, dapat dibedakan sebagai berikut:



Gambar 2.3 Jenis – jenis transformator berdasarkan bahan inti yang digunakan

1. Transformator berinti udara (*Air Core Transformer*)

Pada transformator yang berinti udara, gulungan primer dan gulungan sekunder dililitkan pada inti berbahan non-magnetik yang biasanya berbentuk tabung yang berongga. Bahan non-magnetik yang dimaksud tersebut dapat berupa bahan kertas ataupun karton. Ini artinya, hubungan fluks antara gulungan primer dan gulungan sekunder adalah melalui udara. Tingkat kopling atau induktansi mutual diantara lilitan-lilitan tersebut lebih kecil dibandingkan dengan transformator yang berinti besi. Kerugian histerisis dan kerugian arus eddy yang biasanya terjadi pada trafo inti besi dapat dikurangi atau bahkan dapat dihilangkan pada transformator berinti udara ini. Transformator inti udara ini biasanya digunakan pada rangkaian frekuensi tinggi.

2. Transformator berinti besi (*Iron Core Transformer*)

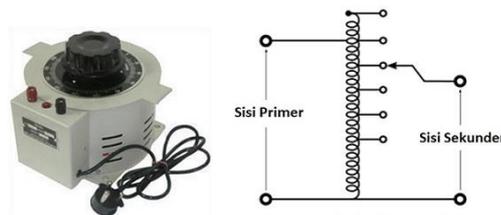
Pada transformator berinti besi, gulungan primer dan gulungan sekunder dililitkan pada inti lempengan - lempengan besi tipis yang dilaminasi. Plat - plat besi yang digunakan sebagai inti mempunyai bentuk serta ukuran yang bervariasi, diantaranya seperti E, I, U, L dan lain lain. Transformator inti besi memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan transformator yang berinti udara. Hal ini dikarenakan bahan besi mengandung sifat magnetik dan juga konduktif sehingga mempermudah jalannya fluks magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik kumparan serta untuk mengurangi suhu panas yang ditimbulkan.

Transformator yang berinti besi biasanya digunakan pada aplikasi frekuensi rendah.

### 3. Transformator inti ferrite

Transformator yang menggunakan bahan ferrite sebagai intinya memiliki daya tembus magnet yang terbilang tinggi. Transformator jenis ini lebih sering digunakan pada peralatan elektronik dibanding dengan elektrik. Transformator ferrite juga mempunyai bentuk dan ukuran yang bervariasi. Sementara untuk intinya secara umum berbentuk seperti huruf E. Untuk penggunaannya, lebih baik digunakan pada transformator yang menangani listrik berfrekuensi tinggi seperti pada *Switch Mode Power Supply* (SMPS), rectifier transformator dan sebagainya.

#### 2.4.3 Transformator berdasarkan pengaturan lilitannya



Gambar 2.4 Transformator otomatis (*Autotransformer*)

Transformator yang termasuk dalam jenis ini adalah transformator otomatis (*Autotransformer*). *Autotransformer* atau transformator otomatis adalah transformator yang lilitan primer dan sekundernya dihubungkan secara listrik dan juga secara magnetik. Secara umum transformator otomatis digunakan dalam penstart-an motor AC, yang mana tegangan yang dikenakan ke motor dikurangi selama periode penstart-an.<sup>[5]</sup>

<sup>[5]</sup> Lister, Eugene C.1993.Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam (terjemahan). Penerbit Erlangga, Jakarta, Hal 183

Pengaturan lilitan ini sangat berbeda dengan transformator standar pada umumnya yang terdiri dari dua kumparan yang ditempatkan pada dua sisi berbeda yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Transformator otomatis ini sering digunakan sebagai transformator step-up dan step-down yang berfungsi untuk menaikkan tegangan maupun menurun tegangan pada kisaran 100V-110V-120V dan kisaran 220V-230V-240V bahkan pada kisaran 110V hingga 220V.

#### 2.4.4 Transformator berdasarkan penggunaannya<sup>[7]</sup>

Transformator dapat digunakan untuk melakukan berbagai fungsi sesuai dengan kebutuhannya. Transformator jenis ini dapat diklasifikasikan menjadi:



Gambar 2.5 Jenis – jenis transformator berdasarkan penggunaannya

##### 1. Transformator Daya (*Power Transformer*)

Transformator daya adalah jenis transformator yang berukuran besar dan digunakan untuk aplikasi transfer daya. Transformator daya ini sering digunakan di stasiun pembangkit listrik dan gardu transmisi. Transformator daya biasanya memiliki tingkat insulasi yang tinggi.

<sup>[7]</sup> Rijono, Yon. 1997. Dasar Teknik Tenaga Listrik (Edisi Revisi). ANDI, Yogyakarta, Hal 3

## 2. Transformator Distribusi (*Distribution Transformer*)

Transformator distribusi digunakan untuk mendistribusikan energi listrik dari pembangkit listrik ke daerah perumahan ataupun lokasi industri. Pada dasarnya, transformator distribusi ini mendistribusikan energi listrik pada tegangan rendah untuk keperluan rumah tangga ataupun industri yang berada dalam kisaran tegangan 220V hingga 440V.

## 3. Transformator Pengukuran (*Measurement Transformer*)

Terdapat dua jenis transformator khusus yang dipergunakan pada sistem tenaga listrik untuk keperluan – keperluan pengukuran, yaitu transformator tegangan dan transformator arus.<sup>[3]</sup>

## 4. Transformator Pelindung (*Protector Transformer*)

Transformator pelindung ini digunakan untuk melindungi komponen listrik. Perbedaan utama antara transformator pelindung dan transformator pengukuran adalah pada akurasinya. Dimana transformator pelindung harus lebih akurat jika dibandingkan dengan transformator pengukuran.

### **2.4.5 Transformator berdasarkan tempat penggunaannya**

Penggolongan transformator berdasarkan tempat penggunaannya ini biasanya terdiri dari transformator *indoor* (dalam ruangan) dan transformator *outdoor* (luar ruangan). Kebanyakan transformator cocok untuk keperluan luar ruangan (*outdoor*) dan dirancang untuk menahan polutan atmosfer. Jarak rambat (*Creepage distance*) isolator bushing ditentukan sesuai dengan tingkat polusi.

---

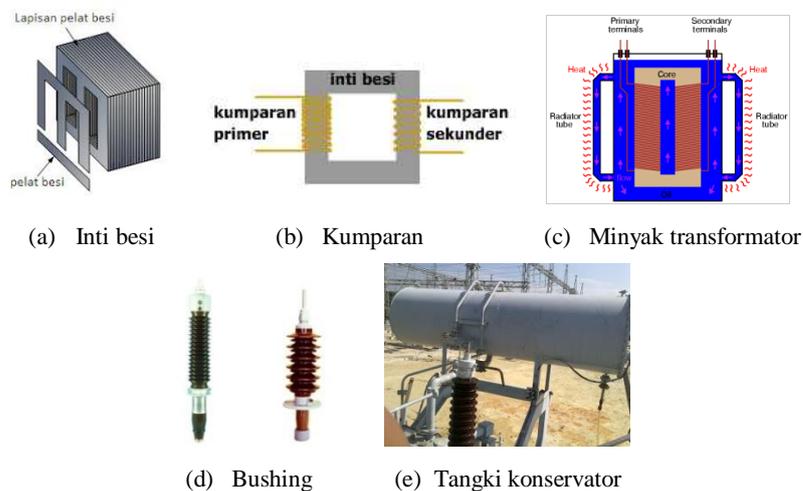
<sup>[3]</sup>Kadir, Abdul. 1993. Pengantar Teknik Tenaga Listrik. PT. Pustaka LP3ES, Jakarta, Hal 200

Semakin tinggi tingkat polusi, semakin besar jarak rambat yang dibutuhkan antara terminal langsung dan ground. Di sisi lain, transformator untuk aplikasi dalam ruangan (*indoor*) disimpan dalam ruangan yang tahan cuaca dan berventilasi baik.<sup>[4]</sup>

## 2.5 Komponen - komponen Transformator

Komponen transformator terdiri dari dua bagian, yaitu bagian utama dan bagian bantu.

### 2.5.1 Bagian Utama



Gambar 2.6 Bagian utama transformator

#### (a) 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*.<sup>[6]</sup>

<sup>[4]</sup> Kulkarni, S.V., & Khaparde, S.A. 2013. Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics Second Edition. Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, Hal 10

<sup>[6]</sup> Mukti K., Harrij. 2013. Analisis Kinerja Transformator Tiga Belitan sebagai Generator Step-Up Transformer, Politeknik Negeri Malang

(b) 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.

(c) Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator.

- 1) Sebagai bagian dari bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus.
- 2) Sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan.

Sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

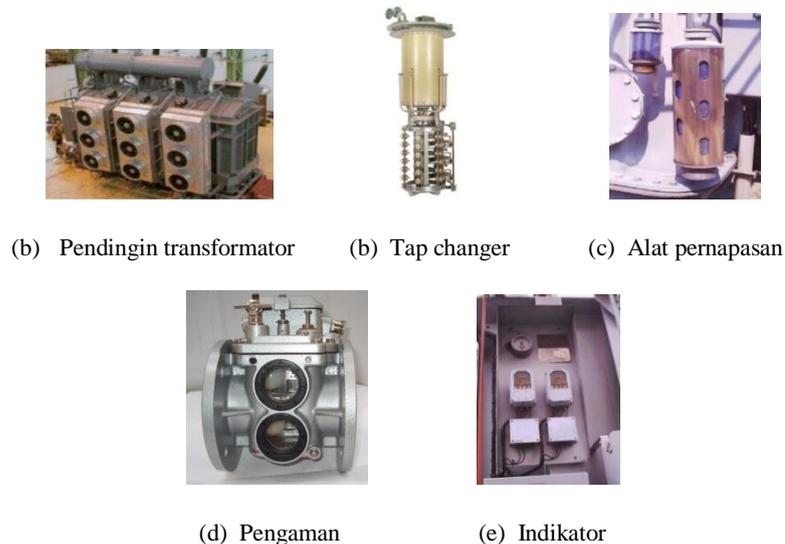
(d) Bushing

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

(e) Tangki Konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan transformator karena arus beban. Diantara tangki dan transformator dipasangkan relay bucholz yang akan menyerap gas produksi akibat kerusakan minyak .

## 2.5.2 Bagian Bantu



Gambar 2.7 Bagian bantu transformator

### (a) Pendingin Transformator

Pada saat transformator dibebani, dihasilkan panas baik dalam lilitan maupun inti karena adanya kerugian pada transformator. Untuk mengurangi dan mengeluarkan panas ini, transformator dikelompokkan ke dalam dua klasifikasi yaitu transformator tipe celup-cairan (*liquid-immersed type*) dan tipe kering (*dry type*). Cairan yang biasa digunakan dalam transformator celup-cairan adalah minyak (tipe yang tidak dapat terbakar). Transformator tipe kering menggunakan udara atau gas murni sebagai media pendingin.<sup>[5]</sup>

Pendinginan transformator dapat secara alamiah dan paksa. Pada cara alamiah, pengaliran media sebagai akibat adanya perbedaan suhu media dan untuk mempercepat pendinginan dari minyak dan udara dengan cara melengkapi transformator dengan sirip – sirip (radiator). Bila diinginkan penyaluran panas yang lebih cepat lagi, cara alamiah dapat dilengkapi dengan peralatan untuk mempercepat sirkulasi media pendingin dengan pompa – pompa sirkulasi minyak dan udara, cara ini disebut cara paksa (*forced*).

<sup>[5]</sup> Lister, Eugene C.1993.Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam (terjemahan). Erlangga, Jakarta, Hal 177

(b) Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah rasio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan sekunder pun disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan primernya. Penyesuaian rasio belitan ini disebut *Tap Changer*. Proses perubahan rasio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat trafo tidak berbeban (*Off load tap changer*). *Tap changer* terdiri dari:

- 1) *Selector switch*, merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal untuk menentukan posisi tap atau rasio belitan primer.
- 2) *Diverter switch*, merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.
- 3) Tahanan transisi, merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.

Dikarenakan aktifitas *tap changer* lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan *tap changer* dipisah.

(c) 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 suatu media penghisap kelembaban, yang

digunakan biasanya adalah *silica gel*. Kebalikan jika transformator 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 gel*, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas.

(d) Pengaman

- 1) Peralatan proteksi internal, berupa relay Bucholz (deteksi gas), Jansen membrane (pengaman tekanan lebih), relay tekanan lebih, relay pengaman tangki, dan *Neutral Grounding Resistance/ NGR* atau resistance pentanahan transformator.
- 2) Peralatan tambahan untuk pengaman transformator, meliputi pemadam kebakaran, thermometer pengukur langsung, thermometer pengukur tidak langsung.
- 3) Relay proteksi transformator, meliputi relay arus lebih, relay diferensial (mengamankan dari hubung singkat yang terjadi di daerah pengaman), relay gangguan tanah terbatas, relay arus lebih berarah, relay connections, relay gangguan tanah, dan relay tangki tanah.

(e) Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator pada transformator, yaitu indikator suhu minyak, indikator permukaan minyak, indikator sistem pendingin, indikator kedudukan tap dan sebagainya.

## 2.6 Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa banyak digunakan pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik karena pertimbangan ekonomis. Transformator tiga fasa banyak sekali mengurangi berat dan lebar kerangka, sehingga harganya dapat dikurangi bila dibandingkan dengan penggabungan tiga buah transformator satu fasa dengan “rating” daya yang sama. Sebuah transformator tiga fasa secara

prinsip sama dengan sebuah transformator satu fasa, perbedaan yang paling mendasar adalah pada sistem kelistrikkannya yaitu sistem satu fasa dan tiga fasa. Transformator tiga fasa ada yang memiliki dua belitan dan belitan ganda. Masing – masing belitan tersebut dapat terhubung secara bintang, segitiga atau zig-zag.

Transformator tiga fasa belitan ganda memiliki lebih dari dua belitan yang digabungkan dengan inti yang sama. Prinsip operasi dari transformator belitan ganda tidak berbeda dengan transformator biasa. Tegangan primer dan sekunder, rasio arus dan putaran semuanya dihitung sama, perbedaannya adalah bahwa perlunya perhatian khusus pada polaritas tegangan dari setiap belitan coil, konvensi titik menandai polaritas positif (atau negatif) dari belitan, ketika menghubungkannya bersama. Karena transformator beroperasi berdasarkan prinsip induktansi timbal-balik, setiap belitan individu dari transformator belitan ganda mendukung jumlah volt yang sama untuk setiap putaran, oleh karena itu hasil volt-ampere di setiap belitan adalah sama, yaitu  $N_P/N_S = V_P/V_S$  dengan rasio belitan antara belitan individu menjadi relatif terhadap suplai primer.

Transformator belitan ganda juga dapat digunakan untuk menghasilkan transformator *step-up*, transformator *step-down*, atau kombinasi keduanya. Bahkan beberapa transformator belitan ganda dapat memiliki beberapa gulungan sekunder pada inti yang sama dengan masing-masing memberikan tegangan atau arus yang berbeda level output. Penerapan transformator tiga fasa belitan ganda memungkinkan hal berikut:

- a. Interkoneksi beberapa sistem tenaga yang beroperasi pada tegangan berbeda.
- b. Penggunaan belitan stabilisasi terhubung delta, yang juga dapat digunakan untuk memasok beban ekernal.
- c. Kontrol regulasi tegangan dan daya reaktif.
- d. Isolasi listrik dari sirkuit sekunder.
- e. Duplikasi suplai ke beban kritis.

- f. Koneksi untuk peralatan *harmonic-filtering*.
- g. Sumber daya tambahan di gardu induk.<sup>[2]</sup>

## 2.7 Rugi – rugi pada Transformator

Rugi – rugi pada transformator dapat dibedakan menjadi:

### 2.7.1 Rugi Tanpa Beban (*No load loss*)

Rugi tanpa beban disebabkan oleh arus magnetisasi yang diperlukan untuk memberi energi pada inti transformator, dan tidak bervariasi sesuai dengan beban pada transformator. Rugi tanpa beban dapat dikategorikan ke dalam lima komponen: kerugian histeresis pada laminasi inti, kerugian arus eddy pada laminasi inti, kerugian  $I^2R$  karena arus tanpa beban, kerugian arus eddy yang menyimpang pada klem inti, baut dan komponen inti lainnya, dan kerugian dielektrik. Kerugian histeresis dan kerugian *eddy current* berkontribusi lebih dari 99% dari rugi tanpa beban, sedangkan arus eddy tersesat (*stray eddy current*), kerugian dielektrik, dan kerugian  $I^2R$  karena arus tanpa-beban adalah kecil dan akibatnya sering diabaikan.

### 2.7.2 Rugi Beban (*load loss*)

Rugi beban ada karena digunakannya daya selama arus mengalir melalui tahanan. Arus beban yang mengalir melalui lilitan transformator menghasilkan kerugian daya atau  $I^2R$  yang besarnya bergantung pada beban yang sedang dicatu oleh transformator.<sup>[5]</sup>

---

<sup>[2]</sup> Harlow, James H. 2012. *Electric Power Transformer Engineering Third Edition*. Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, Hal 16-9

<sup>[5]</sup> Lister, Eugene C. 1993. *Mesin dan Rangkaian Listrik Edisi Keenam (terjemahan)*. Erlangga, Jakarta, Hal 177

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

$P_{t2}$  = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu (watt)

$P_{t1}$  = Rugi-rugi tembaga beban penuh (watt)

$S_2$  = Beban yang dioperasikan (VA)

$S_1$  = Nilai pengenal (VA)

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah :

$$\text{Prugi total} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots\dots\dots (2.4)^{[10]}$$

## 2.8 Jenis Daya<sup>[1]</sup>

### 2.8.1 Daya Semu

Daya semu adalah perkalian tegangan dengan arus dengan simbol S dalam satuan volt ampere (VA).

$$S = VI, \text{ untuk 1 fasa} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot VI, \text{ untuk 3 fasa} \dots\dots\dots (2.6)$$

### 2.8.2 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan  $VI \cos \theta$  dengan simbol P dalam satuan watt (W).

<sup>[10]</sup>Zuhal. 1991. Dasar tenaga listrik. ITB, Bandung, Hal 35

<sup>[1]</sup> Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian. 2013. Rangkaian Listrik. ANDI, Yogyakarta, Hal 74

$$P = VI \cos \theta, \text{ untuk 1 fasa} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta, \text{ untuk 3 fasa} \dots\dots\dots (2.8)$$

### 2.8.3 Daya Reaktif

Daya reaktif dirumuskan dengan  $S \sin \theta$  atau  $VI \sin \theta$  dengan simbol  $Q$ , dalam satuan volt ampere reaktif (VAR).

$$Q = VI \sin \theta, \text{ untuk 1 fasa} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta, \text{ untuk 3 fasa} \dots\dots\dots (2.10)$$

## 2.9 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya keluaran (sekunder) dengan daya masukan (primer) atau hasil bagi antara energi sekunder dengan energi primer. Efisiensi trafo dinyatakan dengan  $\eta$ . Sebuah transformator yang ideal akan memiliki efisiensi sebesar 100%. Ini berarti bahwa semua daya yang diberikan pada kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder tanpa adanya kerugian. Sebuah transformator yang *real* memiliki efisiensi di bawah 100%. Untuk transformator yang bekerja pada tegangan dan frekuensi yang konstan, efisiensinya dapat mencapai 98%. Besar efisiensi trafo dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran}}{\text{Daya masukan}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\eta = \frac{\text{Daya masukan} - \text{rugi total}}{\text{Daya masukan}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran}}{\text{Daya keluaran} + \text{rugi total}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\eta = \frac{N_S \times I_S}{N_P \times I_P} \times 100\% \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

$N_P$  = lilitan primer

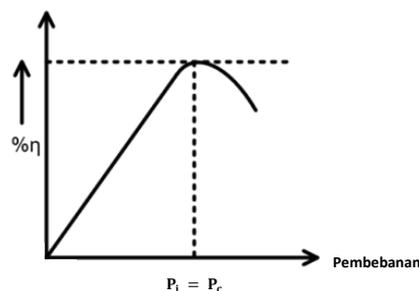
$N_S$  = lilitan sekunder

$I_P$  = arus primer (Ampere)

$I_S$  = arus sekunder (Ampere)

Rugi – rugi total terdiri dari rugi inti (*no load loss*) yang konstan dan rugi tembaga (*load loss*) yang bervariasi. Rugi inti konstan karena tegangan suplai adalah tegangan rating konstan dan rugi tembaga bervariasi bergantung pada kondisi pembebanan. Jika beban nol, rugi tembaga nol namun rugi besi terjadi dan konstan dalam kondisi tanpa beban, keluarannya nol dan masukan sesuai dengan rugi besi dan karenanya efisiensi transformator adalah nol.

Dengan asumsi tegangan sekunder ( $V_S$ ) tetap konstan selama kondisi pembebanan tertentu, dengan peningkatan beban, arus sekunder ( $I_S$ ) meningkat dan karenanya untuk faktor daya beban, keluaran (*output*) meningkat dan rugi tembaga juga meningkat, kehilangan besi tetap konstan sesuai dengan kondisi tanpa beban, efisiensi meningkat. Ketika pembebanan sedemikian rupa sehingga rugi inti sama dengan rugi tembaga maka efisiensinya maksimal. Jika adanya penambahan beban lebih lanjut sehingga rugi tembaga lebih besar dari rugi inti dan kenaikan *output* tidak sebesar kenaikan rugi tembaga, akibatnya efisiensi menurun.



Gambar 2.8 Variasi dari efisiensi<sup>[9]</sup>

<sup>[9]</sup> Wadhwa, C.L. 2004. Basic Electrical Engineering Forth Edition. New Age International (P) Ltd., New Delhi, Hal 223

Efisiensi maksimum transformator untuk beban tertentu terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti. Untuk menentukan besarnya beban yang dioperasikan pada saat efisiensi maksimum, berlaku :

$$\text{Daya saat } \eta \text{ maks} = \sqrt{\frac{\text{Rugi-rugi besi}}{\text{Rugi-rugi tembaga beban penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots\dots (2.15)^{[8]}$$

---

<sup>[8]</sup> Theraja, B.L. 1985. Worked Examples in Electrical Technology. S. Chand & Company Ltd., New Delhi, Hal 339