



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

##### 2.1.1 Penjelasan Umum Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga merupakan satu kesatuan yang terinterkoneksi. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi.<sup>1</sup>

##### 2.1.2 Bagian-Bagian Sistem Tenaga Listrik

###### 1) Pembangkitan Tenaga Listrik: PLTGU

Pembangkitan tenaga listrik yang banyak dilakukan dengan cara memutar generator sinkron sehingga didapatkan tenaga listrik arus bolak-balik tiga fasa. Tenaga mekanik yang dipakai memutar generator listrik didapat dari mesin penggerak generator listrik atau biasa disebut penggerak mula (*primover*). Mesin penggerak generator listrik yang banyak digunakan adalah mesin diesel, turbin uap, turbin air, dan turbin gas.

Mesin penggerak generator melakukan konversi tenaga primer menjadi tenaga mekanik penggerak generator. Proses konversi tenaga primer menjadi tenaga mekanik menimbulkan produk sampingan berupa limbah dan kebisingan yang perlu dikendalikan agar tidak menimbulkan masalah lingkungan.<sup>2</sup>

###### Pusat Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU):

Pusat listrik tenaga gas dan uap merupakan kombinasi PLTG dengan PLTU. Gas buang dari PLTG dimanfaatkan untuk menghasilkan uap oleh ketel

---

<sup>1</sup> Tim Penulis, Transmisi Tenaga Listrik. (Jakarta: PPPPTK BMTI bekerja sama dengan Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Departemen Pendidikan Nasional, 2013), 3.

<sup>2</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 1.



uap dan menghasilkan uap sebagai penggerak turbin uap. Turbin uap selanjutnya memutar generator listrik.<sup>3</sup>

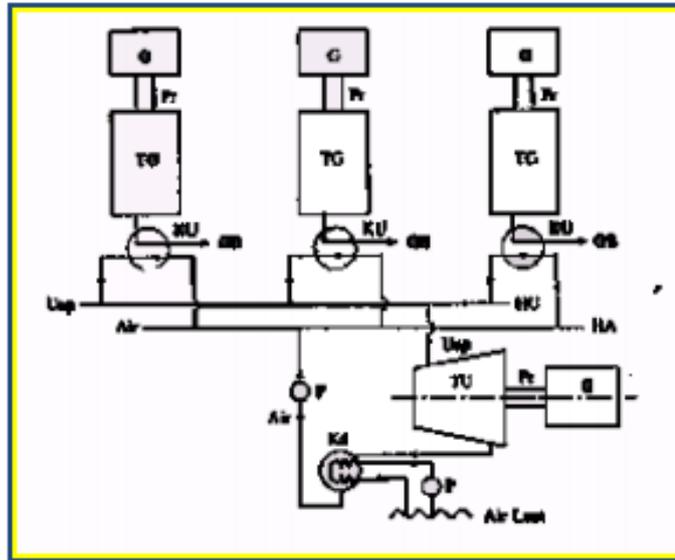
<sup>4</sup>Gas buang dari PLTG yang umumnya mempunyai suhu di atas 400°C, dimanfaatkan (dialirkan) ke dalam ketel uap PLTU untuk menghasilkan uap penggerak turbin uap. Dengan cara ini, umumnya didapat PLTU dengan daya sebesar 50% daya PLTG. Ketel uap yang digunakan untuk memanfaatkan gas buang PLTG mempunyai desain khusus untuk memanfaatkan gas buang di mana dalam bahasa Inggris disebut *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*. Gambar 2.1 menunjukkan bagan dari 3 buah unit PLTG dengan sebuah unit PLTU yang memanfaatkan gas buang dari 3 unit PLTG tersebut. 3 unit PLTG beserta 1 unit PLTU ini disebut sebagai 1 blok PLTGU. Setiap unit PLTG mempunyai sebuah ketel uap penampung gas buang yang keluar dari unit PLTG. Uap dari tiga ketel uap unit PLTG kemudian ditampung dalam sebuah pipa pengumpul uap bersama yang dalam bahasa Inggris disebut *common steam header*. Dari pipa pengumpul uap bersama, uap dialirkan ke turbin uap PLTU yang terdiri dari turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah. Keluar dari turbin tekanan rendah, uap dialirkan ke kondensor untuk diembunkan. Dari kondensor, air dipompa untuk dialirkan ke ketel uap.

HRSG dalam perkembangannya dapat terdiri dari 3 drum uap dengan tekanan uap yang berbeda: Tekanan Tinggi (HP), Tekanan Menengah (IP), dan Tekanan Rendah (LP). Hal ini didasarkan perhitungan Termodinamika Drum HP, IP, dan LP yang berhubungan dengan suhu gas buang yang tinggi, sedang, dan rendah (lihat Gambar 2.2).

---

<sup>3</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 21.

<sup>4</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 184-188.



Gambar 2.1 Skema Blok PLTGU (3 Unit PLTG dan 1 Unit PLTU)

Keterangan: Header Uap; Pr: Poros; TG: Turbin Gas; KU: Ketel Uap; GB: Gas Buang; Kd: Kondensor; HA: Header Air; TU: Turbin Uap; Generator; P: Pompa

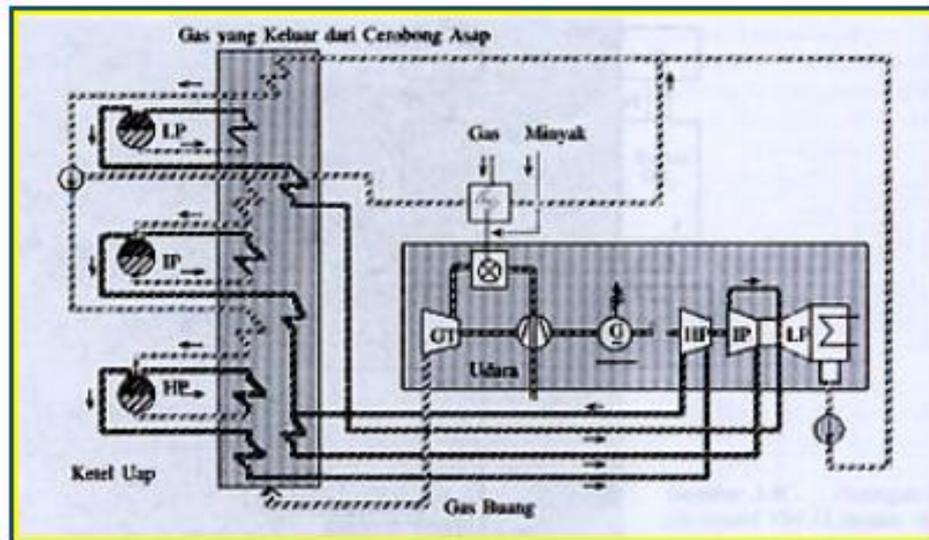
Dalam operasinya, unit turbin gas dapat dioperasikan terlebih dahulu untuk menghasilkan daya listrik sementara gas buangnya berproses untuk menghasilkan uap dalam ketel pemanfaat gas buang. Kira-kira 6 (enam) jam kemudian, setelah uap dalam ketel uap cukup banyak, uap dialirkan ke turbin uap untuk menghasilkan daya listrik. Karena daya yang dihasilkan turbin uap tergantung kepada banyaknya gas buang yang dihasilkan unit yaitu kira-kira menghasilkan 50% daya unit PLTG, maka dalam mengoperasikan PLTGU ini, pengaturan daya PLTGU dilakukan dengan mengatur daya unit PLTG, sedangkan unit PLTU mengikuti saja, menyesuaikan gan gas buang yang diterima dari unit PLTG-nya.

Perlu diingat bahwa selang waktu untuk pemeliharaan unit PLTG lebih pendek daripada unit PLTU sehingga koordinasi pemeliharaan yang baik dalam suatu blok PLTGU agar daya keluar dari blok tidak terlalu banyak berubah sepanjang waktu.

Ditinjau dari segi efisiensi pemakaian bahan bakar, PLTGU tergolong sebagai unit yang paling efisien dari unit-unit thermal (bisa mencapai angka di

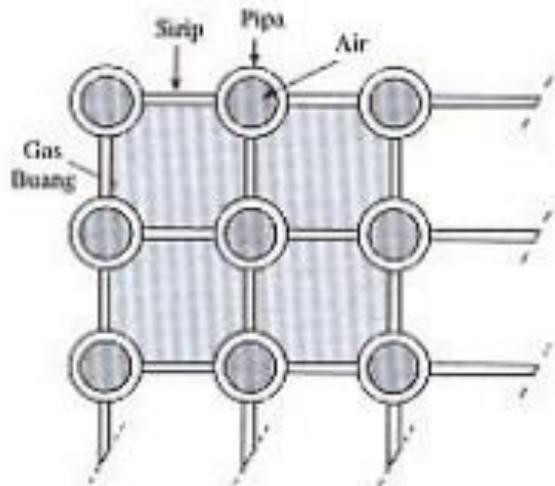
atas 45%). PLTGU termasuk produk teknologi mutakhir dalam perkembangan pusat listrik. PLTGU PLN yang pertama beroperasi di sekitar tahun 1995. Daya terpasangnya per blok dibatasi oleh besarnya daya terpasang unit PLTG-nya. Sampai saat ini, unit PLTG yang terbesar baru mencapai daya terpasang sekitar 120 MW.

Proses perpindahan panas pada HRSG praktis hanya melalui proses konveksi dan konduksi saja, tidak ada proses radiasi, karena HRSG tidak berhadapan dengan lidah api. Oleh karenanya maka desain HRSG adalah dengan desain ketel. PLTU yang mengambil energi kalori langsung dari ruang bakar. Gambar 2.3, menggambarkan prinsip perpindahan panas yang terjadi melalui proses konveksi sentuhan HRSG. Seperti terlihat pada Gambar 2.2, uap yang keluar dari drum tekanan menengah IP bertemu uap yang keluar dari turbin tekanan tinggi HP untuk selanjutnya dialirkan ke turbin tekanan menengah titik pertemuan ini perlu ada pengatur tekanan uap yang berfungsi menyamakan tekanan. Hal serupa berlaku antara uap dari drum LP yang bertemu dengan uap yang keluar dari turbin IP untuk selanjutnya menuju ke turbin LP.



Gambar 2.2 Diagram Aliran Uap pada sebuah PLTGU yang Menggunakan 3 Macam Tekanan Uap

HP (High Pressure); IP (Intermediate Pressure); dan LP (Low Pressure) Buatan Siemens



Gambar 2.3 Bagian dari HRSG yang Bersentuhan dengan Gas Buang

## 2) Turbin Gas dan Uap

Di dalam PLTGU terdapat dua jenis turbin yaitu turbin gas dan turbin uap. Turbin mengubah energi kinetik dari gas buang bertekanan dan uap air bertekanan menjadi energi mekanik melalui bilah-bilah turbin. <sup>5</sup>



Gambar 2.4 Turbin di PLTGU

(Sumber: PT PLN (Persero) UPDK Keramasan, 2021)

<sup>5</sup> Nurhening Yuniarti dan Ilham Wisnu Aji, Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik. (Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2009), 113.



Turbin uap merupakan komponen di dalam sistem PLTU yang mengubah energi panas menjadi energi gerak. Uap air yang sebelumnya telah dipanaskan oleh *boiler* menjadi bertekanan, tekanan itulah yang dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Turbin memiliki baling-baling yang di desain untuk dapat menerima tekanan uap air kemudian menghasilkan energi mekanik. <sup>6</sup>

Turbin gas adalah komponen yang mengubah energi kinetik yang dihasilkan oleh gas buang dari ruang bakar menjadi energi mekanik. Pada turbin terdapat bilah-bilah besi yang dapat menerima gas buang sehingga turbin dapat berputar.<sup>7</sup>

### 3) Generator

Generator merupakan komponen yang berfungsi untuk mengubah energi gerak atau energi mekanik menjadi energi listrik. Energi yang menggerakkan generator dapat bermacam-macam misalnya air ataupun angin. Generator bekerja berdasarkan hukum faraday yang berbunyi “apabila suatu penghantar diputar di dalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan muncul garis gaya listrik” yang memiliki satuan volt. <sup>8</sup>

---

<sup>6</sup> Nurhening Yuniarti dan Ilham Wisnu Aji, Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik. (Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2009), 45.

<sup>7</sup> Nurhening Yuniarti dan Ilham Wisnu Aji, Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik. (Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2009), 104.

<sup>8</sup> Nurhening Yuniarti dan Ilham Wisnu Aji, Modul Pembelajaran Pembangkit Tenaga Listrik. (Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2009), 21.



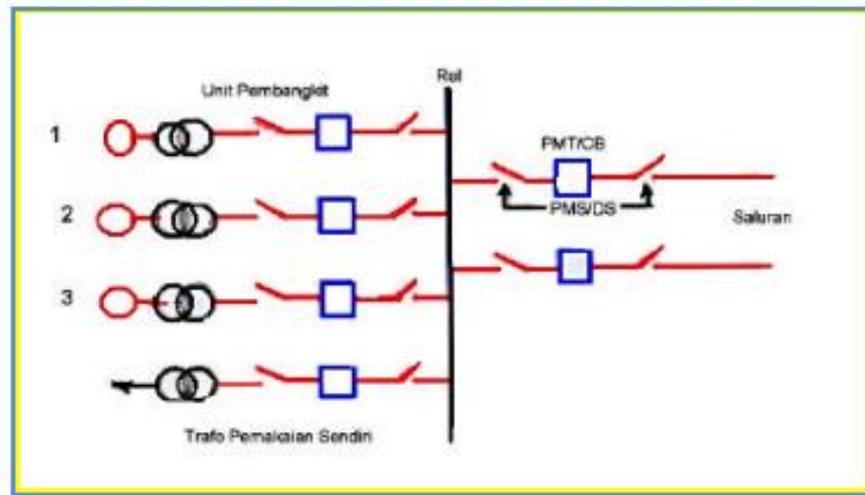
Gambar 2.5 Generator di PLTGU

(Sumber: PT PLN (Persero) UPRK Keramasan, 2021)

Secara umum, pusat pembangkit listrik membangkitkan tenaga listrik arus bolak-balik tiga fasa yang dihasilkan oleh generator sinkron. Tegangan generator paling tinggi yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit listrik adalah 23 kV. Pada saat ini, dalam tingkat riset sedang dikembangkan generator yang dapat membangkitkan tegangan listrik sampai 150 kV. Diagram satu garis instalasi tenaga listrik pada pusat pembangkit listrik sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.6.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 14-15.



Gambar 2.6 Diagram Satu Garis Instalasi Tenaga Listrik pada Pusat Pembangkit Listrik Sederhana

Keterangan:

PMT/CB : Pemutus Tenaga (Circuit Breaker)

PMS/DS : Sakelar Pemisah (Disconnecting Switch)

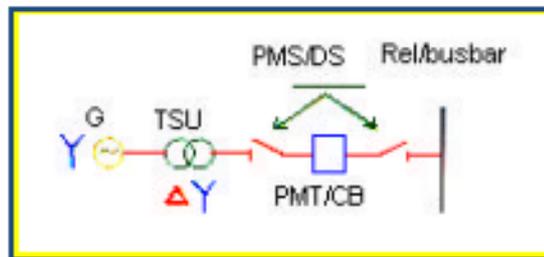
Pusat pembangkit listrik yang sudah beroperasi secara komersial secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.6. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sinkron dinaikkan dengan menggunakan transformator listrik sebelum dihubungkan pada rel (*busbar*) melalui pemutus tenaga (PMT). Semua generator listrik yang menghasilkan energi listrik dihubungkan pada rel (*busbar*). Begitu pula semua saluran keluar dari pusat listrik dihubungkan dengan rel pusat listrik.

Penyaluran daya dari generator sinkron 3 fasa sampai ke transformator penaik tegangan menggunakan kabel yang diletakkan pada saluran tanah dan saluran di atas tanah (*cable duct*). Setelah keluar dari sisi tegangan tinggi transformator sebagai penaik tegangan, tenaga disalurkan melalui konduktor tanpa isolasi ke PMT dan dari PMT ke rel menggunakan konduktor tanpa isolasi juga. Pada rel (*busbar*) umumnya berupa konduktor tanpa isolasi.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 27-28.

Saluran tenaga listrik dari generator sampai dengan rel harus rapi dan bersih agar tidak menimbulkan gangguan, karena gangguan pada bagian ini akan menimbulkan arus hubung singkat yang relatif besar dan mempunyai resiko terganggunya pasokan tenaga listrik dari pusat listrik ke sistem, bahkan apabila generator yang digunakan pada sistem berkapasitas besar kemungkinan seluruh sistem menjadi terganggu.

Secara diagram hubungan generator sinkron dan transformator 3 fase ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram hubungan generator dan transformator 3 fase

Keterangan:

G : Generator

TSU : Transformator untuk penaik tegangan

PMS : Transformator pemisah (*disconnecting switch/DS*)

PMT : Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker/CB*)

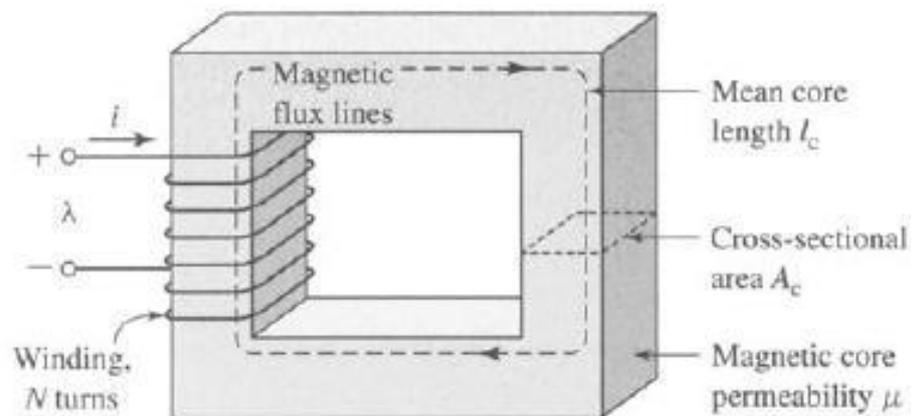
#### 4) Transformator

Transformator adalah suatu alat untuk memindahkan daya listrik arus bolak-balik dari suatu rangkaian ke rangkaian lainnya secara induksi elektromagnetik. <sup>11</sup>

Suatu rangkaian magnetik terdiri dari kerangka yang sebagian besar tersusun dari bahan magnetik berpermeabilitas tinggi. Adanya bahan permeabilitas tinggi ini menyebabkan fluks magnetik terkurung pada jalan yang dibatasi oleh kerangka tersebut, sebagaimana dengan terkurungnya arus listrik dalam konduktor pada rangkaian listrik. Sebagai contoh yang sederhana adalah

<sup>11</sup> Ujang Wiharja, Transformator. (Jakarta: Universitas Krisnadwipayana, 2009), 9.

sebuah transformator, pada kumparan ini menimbulkan medan magnetik dalam inti. Medan magnetik dapat divisualisasikan dengan garis-garis fluks yang membentuk lingkaran tertutup yang terangkum oleh kumparan. Hubungan dasar antara arus ( $i$ ) dan intensitas medan magnet ( $H$ ) menyatakan bahwa, integral garis  $H$  mengelilingi jalan yang tertutup sama dengan arus total yang terkurung oleh jalan tersebut. Dalam penerapannya sumber medan magnetik dalam inti adalah hasil kali amper lilitan ( $NI$ ) atau sering dikenal arus gerak magnet ( $agm$ ).<sup>12</sup>



Gambar 2.8 Pengantar Medan Magnet

Besar fluks magnetik dalam inti  $\Phi = B.A$

Dimana  $A$  = Luas penampang inti

Adapun besarnya induktansi ( $L$ ).

Pemilihan bahan magnetik (ferromagnetik) menjadi penting, hal ini untuk:

- Untuk memperoleh rapat fluks yang besar dan gaya magnetisasi yang relatif rendah.
- Mengurung dan mengarahkan medan magnetik dalam jalur yang telah ditentukan.
- Untuk menurunkan arus eksitasi (rugi-rugi inti).

<sup>12</sup> Ujang Wiharja, Transformator. (Jakarta: Universitas Krisnadwipayana, 2009), 2-3.

Hampir semua transformator dan bagian tertentu mesin listrik menggunakan bahan berbentuk lempeng baja yang mempunyai arah magnetisasi yang sangat baik sepanjang mana kerugian dalam inti rendah dan permeabilitasnya tinggi. Bahan tersebut disebut grainorientied steel. Alasan mengenai sifat ini terletak pada struktur atomic kristal sederhana dari senyawa silikon-besi yang berupa kubus berpusat badan (body center-cube).

<sup>13</sup>Prinsip kerja transformator terdapat dua macam keadaan, yaitu:

1) Keadaan Transformator Tanpa Beban

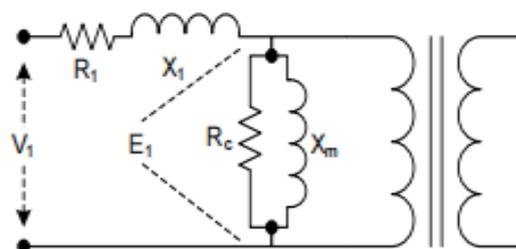
Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan sumber (yang sinusoid) maka akan mengalir arus bolak-balik ( $I_o$ ) pada kumparan tersebut. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan akan timbul gaya gerak listrik (ggl) induksi.

Tegangan maksimum pada kumparan primer adalah

$$e_{maks} = N_1 \omega \Phi_m \text{ dan tegangan efektifnya adalah}$$

$$E_{1rms} = \frac{e_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \Phi_m \dots\dots\dots 2.1$$

Fluks tersebut juga menginduksikan ggl induksi  $e_2$  pada kumparan sekunder.



Gambar 2.9 Rangkaian Transformator Tanpa Beban

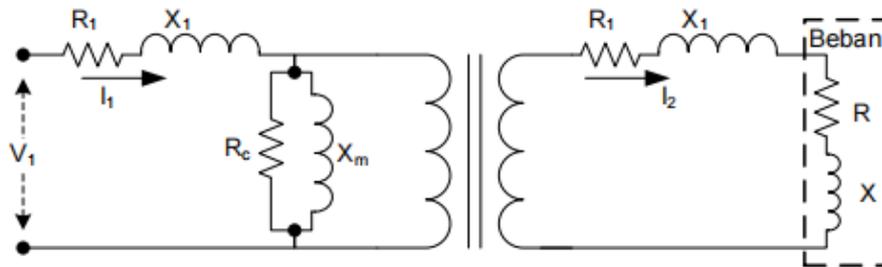
<sup>13</sup> Ujang Wiharja, Transformator. (Jakarta: Universitas Krisnadwipayana, 2009), 9-13.

## 2) Keadaan Transformator Berbeban

Bila sisi sekunder dihubungkan dengan suatu beban dengan impedansi  $Z = R + jX$ , maka pada kumparan sekunder akan mengalir arus sebesar  $I_2$ .

Rumus:

$$I_2 = \frac{E_2}{(R_2 + R) + j(X_2 + X)} \dots\dots\dots 2.2$$



Gambar 2.10 Rangkaian Transformator Berbeban

<sup>14</sup>Konstruksi transformator secara umum terdiri atas:

- a) Inti yang terbuat dari lembaran plat besi lunak atau baja silikon yang diklem menjadi satu.
- b) Belitan dibuat dari tembaga yang membelitkan pada inti dapat konsentris maupun spiral.
- c) Sistem pendinginan transformator yang berkapasitas kecil dan sistem satu fasa menggunakan udara terbuka, untuk transformator yang berkapasitas besar system pendinginan dengan menggunakan minyak trafo.

<sup>14</sup> Ujang Wiharja, Transformator. (Jakarta: Universitas Krisnadwipayana, 2009), 7-8.

Konstruksi berdasarkan letak kumparan terhadap inti:

a) *Core type* (jenis inti) yakni kumparan mengelilingi inti

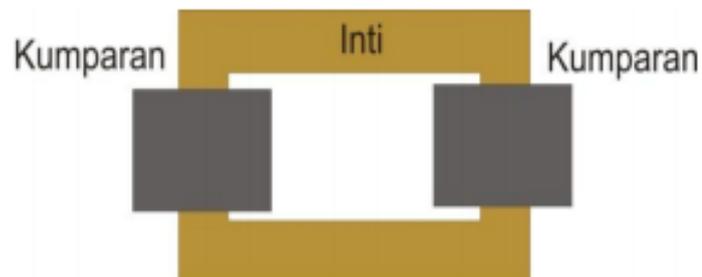
*Core Type* (lilitan melingkari inti), digunakan pada daya dan tegangan tinggi.



Gambar 2.11 Kontruksi *Core Type* (Jenis Inti)

b) *Shell type* (jenis cangkang), yaitu inti mengelilingi belitan

*Shell Type* (inti melingkari belitan), digunakan pada daya dan tegangan rendah (0-240 V)



Gambar 2.12 Konstruksi *Shell Type* (Jenis Cangkang)



<sup>15</sup>Dalam pusat pembangkit listrik yang besar (di atas 100 MW) terdapat beberapa transformator.

Macam-macam transformator yang ada di pembangkit tenaga listrik adalah:

1. Transformator Penaik Tegangan Generator (Step-Up)

Jika rel dalam pusat listrik menggunakan tegangan di atas tegangan generator sinkron 3 fasa, maka tegangan dari generator dinaikkan terlebih dahulu melalui transformator penaik tegangan sebelum dihubungkan ke rel. Transformator penaik tegangan generator merupakan satu kesatuan dengan generator terutama dari segi proteksi.

2. Transformator Unit Pembangkit

Setiap Unit Pembangkit yang besar (di atas 10 MW) umumnya mempunyai transformator unit pembangkit, yaitu transformator yang mengambil daya langsung dari generator untuk memasok alat-alat bantu unit pembangkit yang bersangkutan, seperti: motor pompa pendingin, motor pompa minyak pelumas, dan lain-lain.

3. Transformator Pemakaian Sendiri

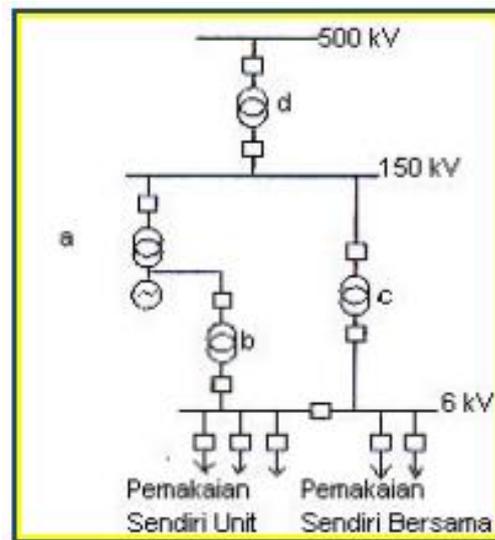
Transformator pemakaian sendiri mendapat pasokan daya dari rel pusat listrik kemudian memasok daya ke rel pemakaian sendiri. Rel pemakaian sendiri digunakan untuk memasok instalasi penerangan, baterai aki, mesin-mesin bengkel, mesin pengangkat, dan alat-alat bantu unit pembangkit pada periode start.

4. Transformator Antar Rel

Jika di dalam pusat listrik ada beberapa rel dengan tegangan operasi yang berbeda-beda, maka ada transformator antar rel.

---

<sup>15</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 81-82.



Gambar 2.13 Macam-Macam Transformator pada Unit Pembangkit Listrik

Adanya rel-rel dengan tegangan yang berbeda dapat disebabkan karena perkembangan sistem tenaga listrik dan juga dapat terjadi karena diperlukan rel tegangan menengah (antara 6 kV sampai 40 kV) untuk keperluan distribusi di daerah sekitar pusat listrik selain rel tegangan tinggi (di atas 60 kV) untuk saluran transmisi jarak jauh.

Transformator dengan tegangan di atas 60 kV, titik netralnya umumnya ditanahkan secara langsung dengan maksud untuk menghemat biaya isolasi. Untuk transformator dengan tegangan di bawah 60 kV, titik netralnya kebanyakan ditanahkan melalui impedansi berupa tahanan atau kumparan dengan tujuan menghasilkan sedikit gangguan hubung tanah yang cukup besar agar relai hubung tanah bekerja.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 84.



## 5) Gardu Induk dan Gardu Distribusi

### Gardu Induk:

<sup>17</sup>Gardu induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik yang berfungsi untuk :

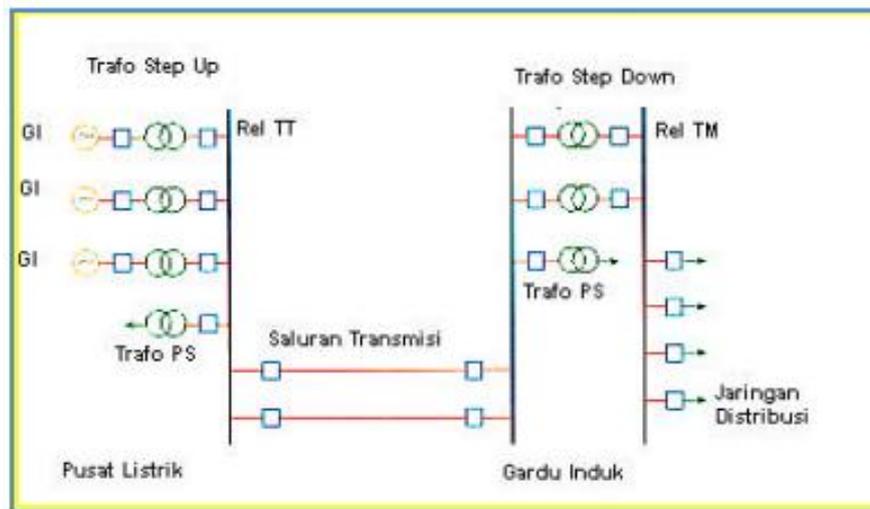
- a. Mengubah tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ke tegangan tinggi yang lainnya atau tegangan menengah.
- b. Pengukuran, pengawasan, operasi serta pengaturan pengamanan sistem tenaga listrik.
- c. Pengaturan daya ke Gardu-Gardu Induk lain melalui tegangan tinggi dan Gardu-Gardu Distribusi melalui gawai tegangan menengah.

<sup>18</sup>Di gardu induk (GI), tegangan diturunkan menjadi tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang digunakan PLN adalah 20 kV. Proses penyaluran tenaga listrik bagi konsumen ditunjukkan pada Gambar 2.13 dan Gambar 2.14. Dari Gardu Induk (GI), tenaga listrik didistribusikan melalui penyulang-penyulang distribusi yang berupa saluran udara atau melalui saluran kabel tanah. Pada penyulang-penyulang distribusi terdapat gardu-gardu distribusi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan distribusi primer menjadi tegangan rendah 380/220 Volt yang didistribusikan melalui jaringan tegangan rendah (JTR). Konsumen tenaga listrik mendapat tenaga listrik dari JTR dengan menggunakan sambungan rumah (SR). Dari sambungan, tenaga listrik masuk ke alat pembatas dan pencatat tenaga listrik berupa KWH meter sebelum memasuki instalasi rumah milik konsumen. KWH meter berfungsi membatasi daya dan mencatat besarnya pemakaian energi listrik oleh konsumen.

---

<sup>17</sup> Tim Penulis, Gardu Induk, Semester 3. (Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2013), 4.

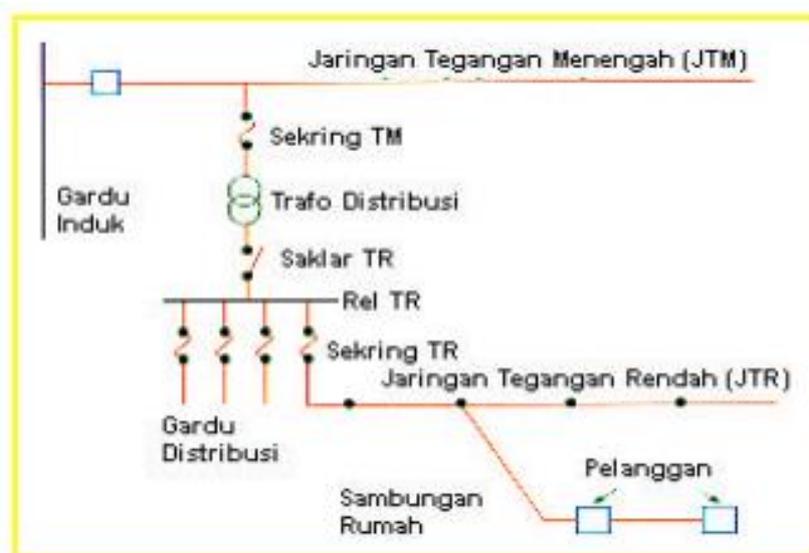
<sup>18</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 1. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 22-23.



Gambar 2.14 Proses Penyediaan Tenaga Listrik (Pembangkitan dan Penyaluran)

Keterangan:

- Trafo *Step Up* : Transformator untuk menaikkan tegangan listrik
- Trafo *Step Down* : Transformator untuk menurunkan tegangan listrik
- Trafo PS : Transformator untuk pemakaian sistem (sendiri)
- Rel TT : Rel tegangan tinggi
- Rel TM : Rel tegangan menengah



Gambar 2.15 Proses Penyediaan Tenaga Listrik bagi Konsumen



### Gardu Distribusi:

<sup>19</sup>Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V).

Konstruksi gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemda setempat.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1) Jenis pemasangannya :

- a. Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantola
- b. Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios

2) Jenis Konstruksinya :

- a. Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)
- b. Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
- c. Gardu Kios

3) Jenis Penggunaannya :

- a. Gardu Pelanggan Umum
- b. Gardu Pelanggan Khusus

Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan mengalihkan pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (*Remote Terminal Unit*). Untuk fasilitas ini lazimnya dilengkapi fasilitas *DC Supply* dari Trafo Distribusi pemakaian sendiri atau trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesatuan.

---

<sup>19</sup> Tim Penulis, Gardu Induk, Semester 3. (Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, 2013), 42-43.



## 2.2 Transformator Daya

### 2.2.1 Pengertian Transformator Daya

<sup>20</sup>Transformator daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya (mentransformasikan tegangan) dengan frekuensi sama).

Dalam operasi umumnya, transformator-transformator daya ditanahkan pada titik netralnya sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan atau proteksi. Sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV, dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan di sisi netral 20 kV nya. Transformator yang telah diproduksi terlebih dahulu melalui pengujian sesuai standar yang telah ditetapkan.

### 2.2.2 Klasifikasi dari Transformator Daya

<sup>21</sup>Transformator daya dapat di klasifikasikan menurut sistem pemasangan dan cara pendinginannya.

- 1) Pemasangan
  - Pemasangan dalam
  - Pemasangan luar
- 2) Pendinginan

Menurut cara pendinginannya dapat dibedakan sebagai berikut:

1. Fungsi dan pemakaian
  - Transformator mesin (untuk mesin-mesin listrik)
  - Transformator Gardu Induk
  - Transformator Distribusi

---

<sup>20</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 3. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 451.

<sup>21</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 3. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 451-452.



## 2. Kapasitas dan tegangan

Dalam usaha mempermudah pengawasan dalam operasi, transformator dapat dibagi menjadi: transformator besar, transformator sedang, dan transformator kecil.

### 2.2.3 Bagian-Bagian dari Transformator Daya

<sup>22</sup>Suatu transformator terdiri atas beberapa bagian yang mempunyai fungsi masing-masing

#### a. Bagian utama

##### 1) Inti besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, 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 arus pusar atau *eddy current*.

##### 2) Kumparan transformator

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan, dan kumparan tersebut diisolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan menggunakan isolasi padat seperti karton, *pertinax*, dan lain-lain.

Pada transformator terdapat kumparan primer dan kumparan sekunder. Jika kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi yang menimbulkan induksi tegangan, bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaiannya beban) maka mengalir arus pada kumparan tersebut, sehingga kumparan ini berfungsi sebagai alat transformasi tegangan dan arus.

##### 3) Kumparan Tertier

Fungsi kumparan *tertier* diperlukan adalah untuk memperoleh tegangan tertier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan

---

<sup>22</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 3. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 452-457.



tersebut, kumparan tertier selalu dihubungkan delta atau segitiga. Kumparan *tertier* sering digunakan juga untuk penyambungan peralatan bantu seperti kondensator sinkron, kapasitor *shunt* dan reaktor *shunt*, namun demikian tidak semua transformator daya mempunyai kumparan *tertier*.

#### 4) Minyak transformator

Sebagian besar dari transformator tenaga memiliki kumparan-kumparan yang intinya direndam dalam minyak transformator, terutama pada transformator-transformator tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak transformator mempunyai sifat sebagai media pemindah panas (disirkulasi) dan juga berfungsi pula sebagai isolasi (memiliki daya tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi dan minyak transformator harus memenuhi persyaratan, yaitu:

- Kekuatan isolasi tinggi
- Penyalur panas yang baik, berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
- Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendinginan menjadi lebih baik
- Titik nyala yang tinggi dan tidak mudah menguap yang dapat menimbulkan baha
- Tidak merusak bahan isolasi padat
- Sifat kimia yang stabil

#### 5) Bushing

Hubungan antara kumparan transformator ke jaringan luar melalui sebuah *bushing*, yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.

#### 6) Tangki dan konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari transformator yang terendam minyak transformator berada atau (ditempatkan) di dalam tangki. Untuk



menampung pemuaian pada minyak transformator, pada tangki dilengkapi dengan sebuah konservator.

Terdapat beberapa jenis tangki, diantaranya adalah:

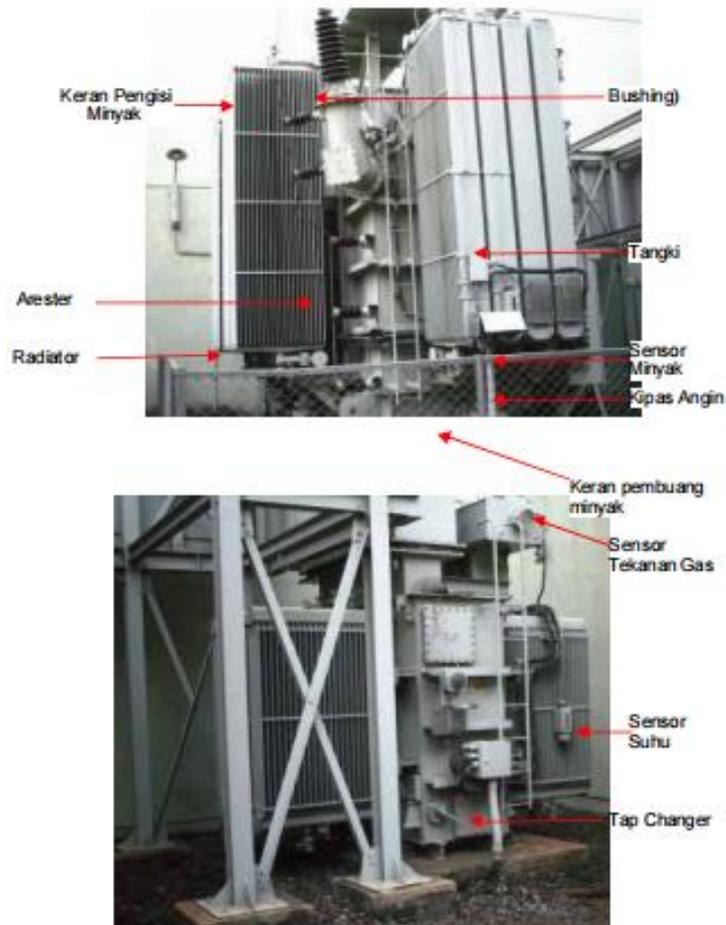
a) Jenis sirip (tank corrugated)

Badan tangki terbuat dari pelat baja bercanai dingin yang menjalani penekukan, pemotongan dan proses pengelasan otomatis, untuk membentuk badan tangki bersirip dengan siripnya berfungsi sebagai radiator pendingin dan alat bernapas pada saat yang sama.

Tutup dan dasar tangki terbuat dari plat baja bercanai panas yang kemudian dilas sambung kepada badan tangki bersirip membentuk tangki *corrugated* ini. Umumnya transformator di bawah 4000 kVA dibuat dengan bentuk tangki *corrugated*.

b) Jenis tangki Conventional Beradiator

Jenis tangki terdiri dari badan tangki dan tutup yang terbuat dari *mild steel plate* (plat baja bercanai panas) ditekuk dan dilas untuk dibangun sesuai dimensi yang diinginkan, sedang radiator jenis panel terbuat dari pelat baja bercanai dingin (*cold rolled steel sheets*). Transformator ini umumnya dilengkapi dengan konservator dan digunakan untuk 25.000,00 kVA, yang ditunjukkan pada Gambar



Gambar 2.16 Transformator Tipe Conventional Beradiator

(Sumber: Trafindo 2005)

c) Hermatically Sealed Tank With N2 Cushined

Tipe tangki ini sama dengan jenis conventional tetapi di atas permukaan minyak terdapat gas nitrogen untuk mencegah kontak antara minyak dengan udara luar



b. Peralatan Bantu

a) Pendingin

<sup>23</sup>Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi transformator, maka untuk mengurangi adanya kenaikan suhu yang berlebihan tersebut pada transformator perlu juga dilengkapi dengan sistem pendingin yang bergungsi untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa udara, gas, minyak dan air. Sistem pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara:

- Alamiah (*natural*)
- Tekanan/paksaan (*forced*).

b) Tap Changer (perubah tap)

*Tap Changer* adalah perubah perbandingan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder sesuai yang diinginkan dari tegangan jaringan/primer yang berubah-ubah. *Tap changer* dapat dilakukan baik dalam keadaan berbeban (*on-load*) atau dalam keadaan tak berbeban (*off load*), dan tergantung jenisnya.

c) Alat pernapasan

Karena adanya pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyak akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki, sebaliknya bila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Kedua proses di atas disebut pernapasan transformator.

Permukaan minyak transformator akan selalu bersinggungan dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus pada minyak

---

<sup>23</sup> Supari Muslim, Joko, Puput Wanarti R., Teknik Pembangkit Tenaga Listrik, Jilid 3. (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), 458-460.



transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat *hygroscopis*.

d) Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator yang dipasang pada transformator. Indikator tersebut adalah sebagai berikut:

- Indikator suhu minyak
- Indikator permukaan minyak
- Indikator sistem pendingin
- Indikator kedudukan tap, dan sebagainya.

c. Peralatan Proteksi

a) Rele Bucholz

Rele *Bucholz* adalah rele alat atau relai yang berfungsi mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan transformator yang menimbulkan gas.

Timbulnya gas dapat diakibatkan oleh beberapa hal, diantaranya adalah:

- Hubung singkat antar lilitan pada atau dalam fasa
- Hubung singkat antar fasa
- Hubung singkat antar fasa ke tanah
- Busur api listrik antar laminasi
- Busur api listrik karena kontak yang kurang baik.

Pengaman tekanan lebih, alat ini berupa membran yang terbuat dari kaca, plastik, tembaga atau katup berpegas, sebagai pengaman tangki transformator terhadap kenaikan tekan gas yang timbul di dalam tangki yang akan pecah pada tekanan tertentu dan kekuatannya lebih rendah dari kekuatan tangki transformator.

b) Rele tekanan lebih



Rele ini berfungsi hampir sama seperti Rele *Bucholz*. Fungsinya adalah mengamankan terhadap gangguan di dalam transformator. Bedanya rele ini hanya bekerja oleh kenaikan tekanan gas yang tiba-tiba dan langsung mentriapkan pemutus tenaga (PMT).

c) Rele Diferensial

Berfungsi mengamankan transformator terhadap gangguan di dalam transformator, antara lain adalah kejadian *flash over* antara kumparan dengan kumparan atau kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun beda kumparan.

d) Rele arus lebih

Berfungsi mengamankan transformator arus yang melebihi dari arus yang diperkenankan lewat dari transformator tersebut dan arus lebih ini dapat terjadi oleh karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.

e) Rele tangki tanah

Alat ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila ada hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.

f) Rele hubung tanah

Fungsi alat ini adalah untuk mengamankan transformator jika terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.

g) Rele Thermis

Alat ini berfungsi untuk mencegah/mengamankan transformator dari kerusakan isolasi pada kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam rele ini adalah kenaikan temperatur.



## 2.3 Daya Listrik Arus Bolak-Balik

### 2.3.1 Pengertian Daya Listrik

Daya merupakan perkalian antara tegangan yang diberikan dengan hasil arus yang mengalir.<sup>24</sup>

### 2.3.2 Jenis-Jenis Daya Listrik

<sup>25</sup> Dalam listrik AC ada tiga jenis daya, khususnya untuk beban yang memiliki impedansi (Z). Tiga jenis daya tersebut adalah:

#### 1. Daya aktif

Untuk rangkaian listrik AC, bentuk gelombang tegangan dan arus sinusoida, besarnya daya setiap saat tidak sama. Maka daya merupakan daya rata-rata diukur dengan satuan Watt dan diukur dengan alat ukur Wattmeter.

Pada beban resistif, di mana tidak mengandung induktor grafik gelombang tegangan V dan arus sefasa, sehingga besarnya daya sebagai perkalian tegangan dan arus menghasilkan dua gelombang yang keduanya bernilai positif. Besarnya daya aktif adalah P.

Persamaan daya aktif (P) beban resistif :

$$P = \frac{1}{2} P_{\text{eff}} = \frac{1}{2} V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \sqrt{2} V \sqrt{2} I = VI \dots\dots\dots 2.3$$

Dengan keterangan :

P = Daya (watt)

$P_{\text{eff}}, I_{\text{eff}}, V_{\text{eff}}$  = Harga maksimum daya, arus dan tegangan

V, I = Harga efektif tegangan dan arus

Pada beban impedansi, dimana disamping mengandung resistor juga terdapat komponen induktor. Perkalian gelombang tegangan dan gelombang arus

<sup>24</sup> Mohamad Ramdhani, Rangkaian Listrik (Revisi). (Bandung: Sekolah Tinggi Teknologi Telkom, 2005), 180.

<sup>25</sup> Siswoyo, Teknik Listrik Industri, Jilid 1, (Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), (3-27) - (3-31).



menghasilkan dua puncak positif yang besar dan dua puncak negatif yang kecil. Pergeseran sudut fasa tergantung seberapa besar komponen induktornya.

Persamaan daya aktif pada beban induktif :

$$P = V I \cos \varphi \dots\dots\dots 2.4$$

Dengan keterangan:

P = Daya aktif

V = Tegangan efektif

I = Arus efektif

$\cos \varphi$  = Faktor Kerja

Pada beban dimana pergeseran fasa tegangan dan arus sebesar  $90^\circ$ , maka daya aktif akan menjadi nol.

## 2. Daya semu

Mengukur daya aktif beban impedansi (Resistor R seri dan induktor XL) dilakukan dengan Wattmeter. Daya semu merupakan perkalian tegangan dengan arus, satuan VA (Volt-Amper). Tegangan di ukur dengan Voltmeter, arus diukur dengan Ampermeter.

$$S = V I \dots\dots\dots 2.5$$

Dengan keterangan:

S = Daya semu (VA, volt-amper)

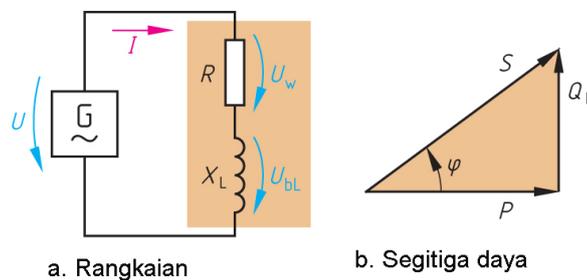
V = Tegangan efektif (V)

I = Arus efektif (A)

### 3. Daya reaktif

Beban induktif dapat digambarkan dengan dua kondisi, yaitu Resistor R seri dengan induktor  $X_L$  dan Resistor R paralel dengan induktor  $X_L$ . Sumber tegangan AC dengan beban Resistor seri induktor mengalir arus I.

Pada Resistor terjadi drop tegangan  $V_w$  dan drop tegangan induktor  $V_{BL}$ . Daya yang terjadi pada rangkaian pada gambar 2.11, yaitu daya semu, daya aktif dan daya reaktif.



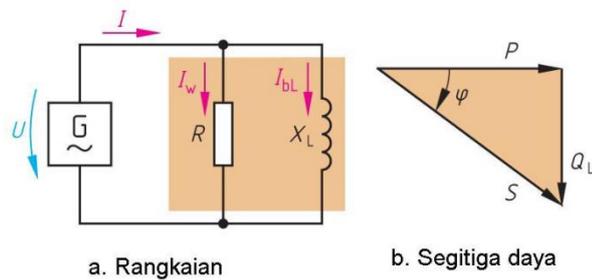
Gambar 2.17 Rangkaian R Seri dan Segitiga Daya

$$S = V I \text{ (VA, volt-amper)}$$

$$P = V_w \text{ (W, watt)}$$

$$Q = V_w I_{BL} \text{ (VAR, volt-amper-reaktif)}$$

Beban induktif bisa juga terjadi dimana Resistor R terhubung secara paralel dengan induktor  $X_L$ . Arus yang mengalir melewati Resistor sebesar  $I_w$  dan arus cabang melewati induktor  $I_{BL}$ . Daya yang terjadi pada rangkaian pada gambar 2.17 tersebut mencakup kita sebut segitiga daya mencakup daya semu, daya aktif dan daya reaktif.



Gambar 2.18 Rangkaian R Paralel dan Segitiga Daya

Daya aktif P dengan garis horizontal, daya reaktif Q berbeda sudut 90°, daya semu penjumlahan aljabar P dan Q. Sudut  $\alpha$  antara P dan S merupakan faktor kerja.

$$S^2 = P^2 + Q_L^2$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$$

$$S = V I \text{ (VA)}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$P = S \cos \varphi$$

$$P = V I \cos \varphi \text{ (W)}$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_L}{S}$$

$$Q_L = V I \sin \varphi = V I \sin \varphi \text{ (VAR)}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q_L}{P}$$

$$Q_L = P \tan \varphi \dots\dots\dots 2.6$$

Dengan keterangan:

- S = Daya Semu
- P = Daya Aktif
- QL = Daya Reaktif
- $\varphi$  = Faktor kerja



### 2.3.3 Rumus Daya Listrik 3 Fasa

<sup>26</sup>Berikut ini adalah rumus daya listrik 3 fasa, kita bisa menggunakan rumus ini untuk menghitung nilai dari suatu besaran listrik sistem 3 fasa baik pada jaringan instalasi maupun pada beban.

Berikut rumusnya:

a. Daya Semu (S)

$$S = \sqrt{3} V I \dots\dots\dots 2.7$$

Keterangan:

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\sqrt{3}$  = 1,73

b. Daya Aktif (P)

$$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi \dots\dots\dots 2.8$$

Keterangan:

P = Daya aktif (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\sqrt{3}$  = 1,73

$\cos \varphi$  = 0,8

---

<sup>26</sup> Abu Akhdan, "Rumus Daya Listrik Arus Bolak Balik (AC)", Akhdanazizan'Blog, 12 Februari 2015, <https://akhdanazizan.com/rumus-daya-listrik/>.



c. Daya Reaktif (Q)

$$Q_L = \sqrt{3} V I \sin \varphi \dots\dots\dots 2.9$$

Keterangan:

$Q_L$  = Daya reaktif (VAR)

$V$  = Tegangan (V)

$I$  = Arus (A)

$\sqrt{3}$  = 1,73

$\cos \varphi$  = 0,8