

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik¹

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke konsumen.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikan tegangannya oleh Gardu Induk (GI) dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.

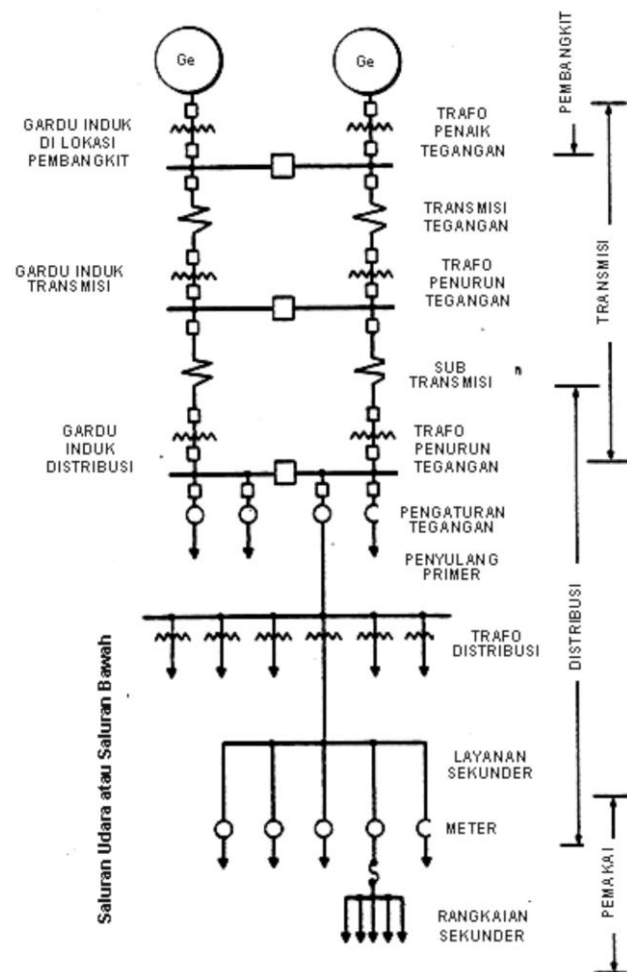
Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula.

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt.

Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke pelanggan konsumen. Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan *transformator step-up*. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahal harganya perlengkapan-perlengkapannya, selain itu juga tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka,

¹ Suhadi dkk, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*, Jakarta, Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008, Hal 11

pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan *transformator step-down*. Dalam hal ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.



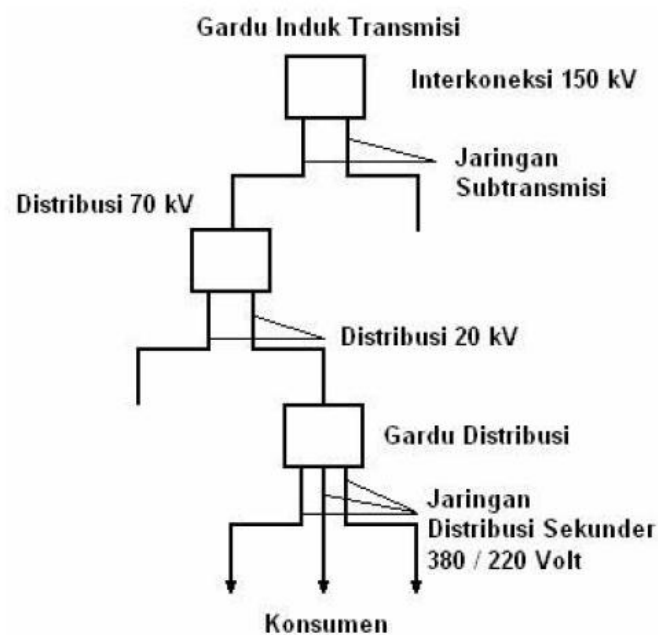
Gambar 2.1 Pengelompokan Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.2 Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi terdiri atas dua bagian, yang pertama adalah jaringan tegangan menengah/primer (JTM), yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk subtransmisi ke gardu distribusi, jaringan distribusi primer menggunakan tiga kawat atau empat kawat untuk tiga fasa. Jaringan yang kedua adalah jaringan tegangan rendah (JTR), yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen, dimana sebelumnya tegangan tersebut ditransformasikan oleh

transformator distribusi dari 20 kV menjadi 380/220 Volt, jaringan ini dikenal pula dengan jaringan distribusi sekunder.

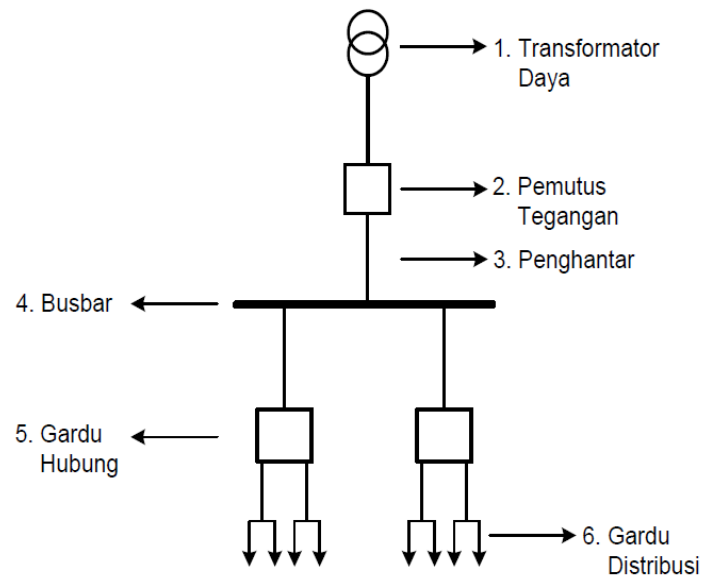
Jaringan distribusi sekunder terletak antara transformator distribusi dan sambungan pelayanan (beban) menggunakan penghantar udara terbuka atau kabel dengan sistem tiga fasa empat kawat (tiga kawat fasa dan satu kawat netral). Dapat kita lihat gambar dibawah proses penyediaan tenaga listrik bagi para konsumen.



Gambar 2.2 Diagram Sistem Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.2.1 Jaringan sistem distribusi primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplay tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer. Berikut adalah gambar bagian-bagian distribusi primer secara umum.



Gambar 2.3 Bagian-bagian Sistem Distribusi Primer

Bagian-bagian sistem distribusi primer terdiri dari :

1. Transformator daya, berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya.
2. Pemutus tegangan, berfungsi sebagai pengaman yaitu pemutus daya
3. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya
4. Busbar, berfungsi sebagai titik pertemuan / hubungan antara trafo daya dengan peralatan lainnya
5. Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa mengubah tegangan.
6. Gardu distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

2.2.2 Jaringan distribusi primer menurut susunan rangkaiannya²

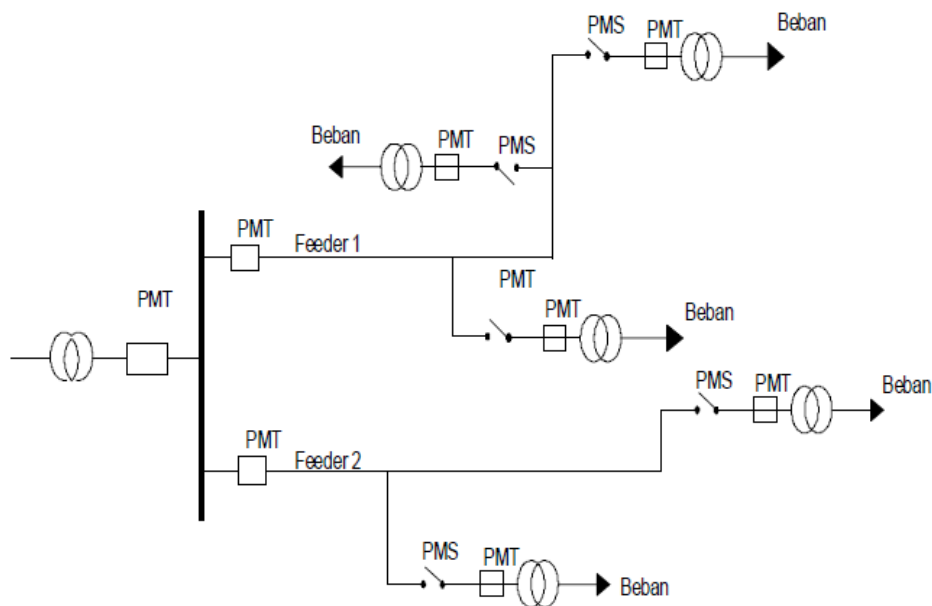
Jaringan Pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer 20kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan hantaran

² Ahmad Ardiansyah, *Analisis Keandalan Sistem Jaringan Distribusi Udara 20 kV*, 2010, Hal 7.

penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (Loop), Jaringan Spindel dan Sistem Gugus atau Kluster.

a. Jaringan Radial

Merupakan jaringan sistem distribusi primer yang sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial.

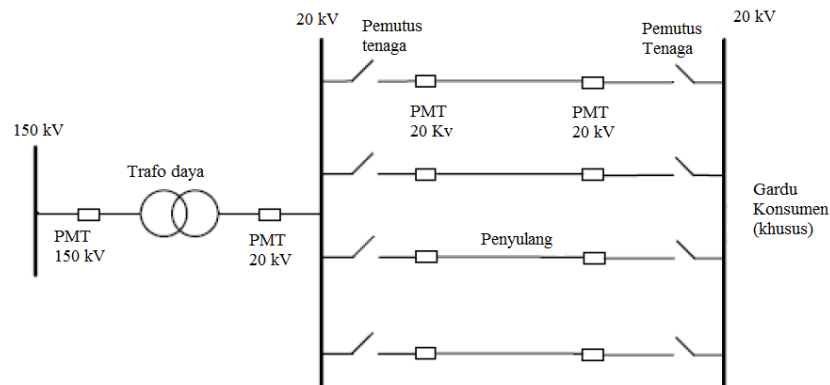


Gambar 2.4 Skema Saluran Sistem Radial

Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibanding sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada di ujung saluran.

b. Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

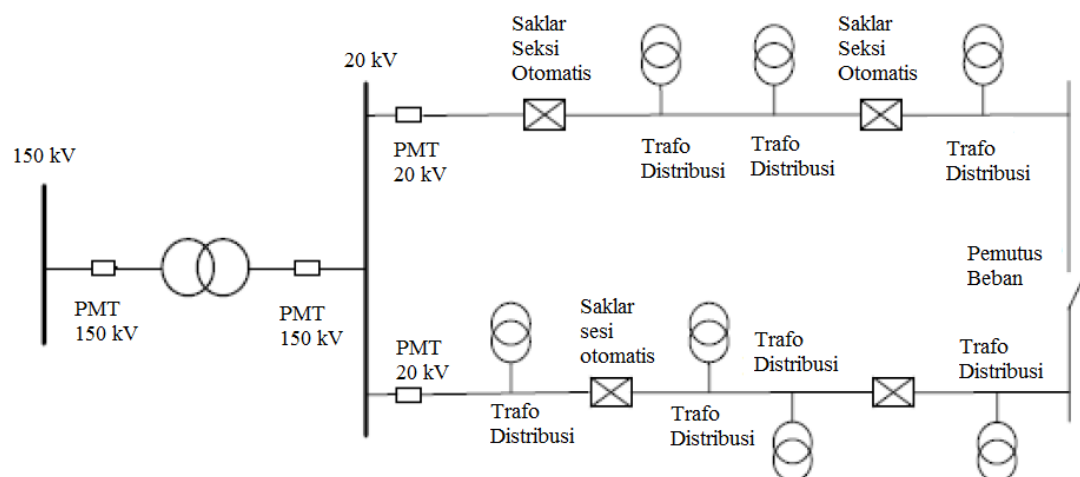
Sistem distribusi Tie Line seperti Gambar 2.3 digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam (Bandar Udara, Rumah Sakit, dan lain-lain.)



Gambar 2.5 Skema Saluran Tie Line

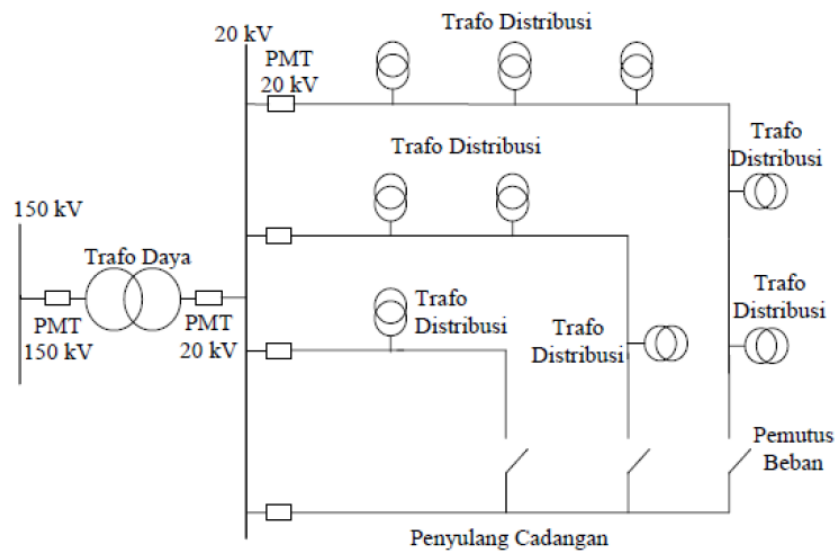
c. Jaringan Loop

Tipe ini merupakan jaringan distribusi primer, gabungan dari dua tipe jaringan radial dimana ujung kedua jaringan dipasang PMT. Pada keadaan normal tipe ini bekerja secara radial dan pada saat terjadi gangguan PMT dapat dioperasikan sehingga gangguan dapat terlokalisir. Tipe ini lebih handal dalam penyaluran tenaga listrik dibandingkan tipe radial namun biaya investasi lebih mahal.



Gambar 2.6 Skema Saluran Sistem Loop

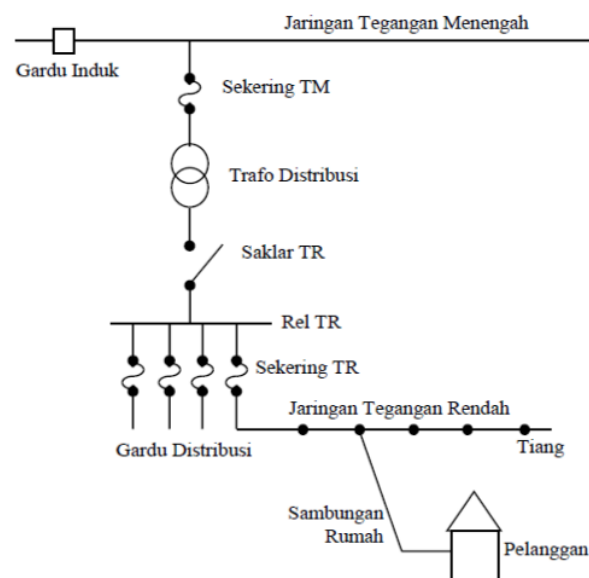
Sistem ini mirip dengan sistem spindle. bedanya pada sistem cluster tidak digunakan gardu hubung atau gardu switching, sehingga express feeder dari gardu hubung ke tiap jaringan. Express feeder ini dapat berguna sebagai titik manufer ketika terjadi gangguan pada salah satu bagian jaringan.



Gambar 2.8 Skema Saluran Sistem Cluster

2.2.3 Jaringan sistem distribusi sekunder

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.2 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.



Gambar 2.9 Hubungan tegangan menengah ke tegangan rendah dan konsumen

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi.

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini berfungsi menerima daya listrik dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan.

Sistem penyaluran daya listrik pada Jaringan Tegangan Rendah dapat dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut :

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR.
2. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*). ukuran kabel LVTC adalah : $2 \times 10 \text{ mm}^2$, $2 \times 16 \text{ mm}^2$, $4 \times 25 \text{ mm}^2$, $3 \times 35 \text{ mm}^2$, $3 \times 50 \text{ mm}^2$, $3 \times 70 \text{ mm}^2$.

Menurut SPLN No.3 Tahun 1987, jaringan tegangan rendah adalah jaringan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan beserta perlengkapannya, dari sumber penyaluran tegangan rendah sampai dengan alat pembatas/pengukur. Sedangkan STR (Saluran Tegangan Rendah) ialah bagian JTR tidak termasuk sambungan pelayanan (bagian yang menghubungkan STR dengan alat pembatas/pengukur).

2.3 Gardu Distribusi³

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

³ PT.PLN (Persero), *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*, Jakarta, 2010. Hal.1

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 Pemerintah daerah (Pemda) setempat.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

a. Jenis pemasangannya :

Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol

Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios

b. Jenis Konstruksinya :

a) Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)

b) Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol

c) Gardu Kios

c. Jenis Penggunaannya :

a) Gardu Pelanggan Umum

b) Gardu Pelanggan Khusus

Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver 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.

2.4 Transformator⁴

Transformator merupakan suatu alat listrik suatu alat listrik yang termasuk ke dalam klasifikasi mesin listrik statis yang berfungsi menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah dan sebaliknya atau dapat juga diartikan mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi elektromagnet.

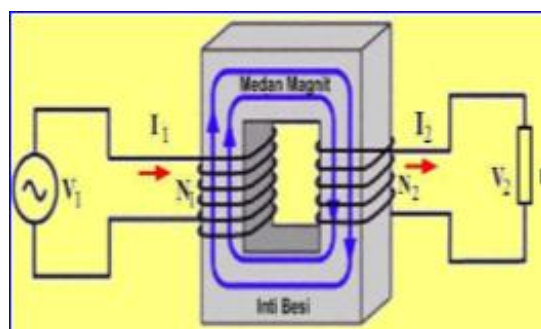
⁴ Prih Sumardjati, dkk, Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3, 2008

Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan, misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

Dalam bidang teknik listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

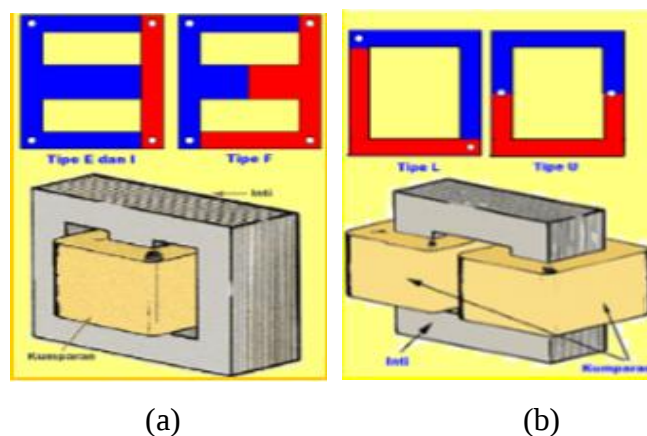
1. Transformator daya, yaitu transformator yang biasa digunakan untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi
2. Transformator distribusi, yaitu transformator yang biasa digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi
3. Transformator pengukuran, yaitu transformator yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

Secara konstruksinya transformator terdiri atas dua kumparan yaitu primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka fluks bolak-balik akan terjadi pada kumparan sisi primer, kemudian fluks tersebut akan mengalir pada inti transformator, dan selanjutnya fluks ini akan mengimbas pada kumparan yang ada pada sisi sekunder yang mengakibatkan timbulnya fluks magnet di sisi sekunder, sehingga pada sisi sekunder akan timbul tegangan.



Gambar 2.10 Gambar fluks magnet transformator

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua jenis transformator, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). Pada transformator tipe inti Gambar 2.11(a), kumparan mengelilingi inti, dan pada umumnya inti transformator L atau U. Peletakkan kumparan pada inti diatur secara berhimpitan antara kumparan primer dengan sekunder. Dengan pertimbangan kompleksitas cara isolasi tegangan pada kumparan, biasanya sisi kumparan tinggi diletakkan di sebelah luar sedangkan pada transformator tipe cangkang Gambar 2.11b kumparan dikelilingi oleh inti, dan pada umumnya intinya berbentuk huruf E dan huruf I, atau huruf F. Untuk membentuk sebuah transformator tipe Inti maupun Cangkang, inti dari transformator yang berbentuk huruf tersebut disusun secara berlapis-lapis (laminasi), jadi bukan berupa besi pejal.



Gambar 2.11 (a) Transformator tipe inti dan (b) Tipe cangkang

Tujuan utama penyusunan inti secara berlapis ini adalah untuk mengurangi kerugian energi akibat “*Eddy Current*” (arus pusar), dengan cara laminasi seperti ini maka ukuran jerat induksi yang berakibat terjadinya rugi energi di dalam inti bisa dikurangi. Proses penyusunan inti transformator biasanya dilakukan setelah proses pembuatan lilitan kumparan transformator pada rangka (koker) selesai dilakukan.

2.4.1 Transformator sisipan⁵

Transformator Sisipan adalah transformator distribusi yang dipasang oleh PT PLN (Persero) guna membantu transformator distribusi yang sudah ada, yang mengalami pembebanan berlebih atau untuk memperbaiki keadaan dimana jaringan mengalami *drop* tegangan yang tinggi. Hal ini dengan cara memindahkan beban dari satu saluran kepada satu saluran yang berbeda dari transformator yang sudah ada ke transformator sisipan.

Beberapa faktor yang dipertimbangkan oleh PT.PLN untuk menambah tranformator atau gardu sisipan adalah :

1. Trafo sebelumnya sudah overload⁶

Over load terjadi karena beban yang terpasang pada trafo melebihi kapasitas maksimum yang dapat dipikul trafo dimana arus beban melebihi arus beban penuh (*full load*) dari trafo. *Over load* akan menyebabkan trafo menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan besarnya drop tegangan pada JTR

2. Besarnya *drop* tegangan pada JTR

Menurut SPLN No. 72 tahun 1987 pasal 4 ayat 19 tentang Pengaturan tegangan dan turun tegangan, bahwa jatuh tegangan yang diperbolehkan pada transformator distribusi dibolehkan 3% dari tegangan kerja. Turun tegangan pada STR dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja.

2.4.2 Pembebanan transformator

Untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{F-N}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana: I_{FL} = arus beban penuh (A)
 S = daya transformator (kVA)
 V_{F-N} = tegangan sisi sekunder transformator (V)

⁵ <http://www.purwanata.com/2014/04/laporan-ts-ojt-pemasangan-trafo-sisipan.html>

⁶ Fanoel Thamrin, *Studi Inferensi Fuzzy Tsukamoto untuk Penentuan Faktor Pembebanan Trafo PLN*, Hal.41

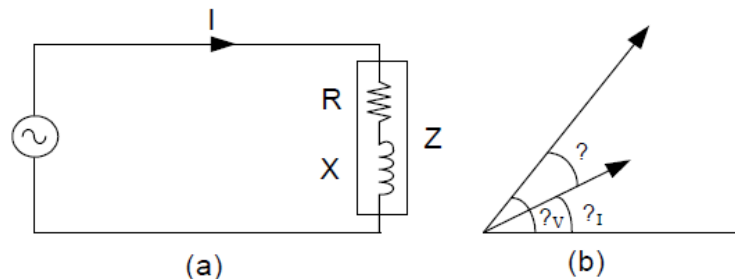
Menurut PT.PLN (Persero), transformator distribusi diusahakan agar tidak dibebani lebih dari 80 % atau dibawah 40 %. Jika melebihi atau kurang dari nilai tersebut transformator bisa dikatakan *overload* atau *underload*. Diusahakan agar trafo tidak dibebani keluar dari range tersebut. Bila beban trafo terlalu besar maka dilakukan penggantian trafo atau penyisipan trafo atau mutasi trafo. Rumus berikut dapat digunakan untuk melihat besar kapasitas trafo yang ada.

$$kVA \text{ beban terukur} = \frac{(I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{T-N})}{1000} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Persentase beban Transformator (\%)} = \frac{kVA \text{ beban terukur}}{kVA \text{ Trafo}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.3)$$

2.5 Daya Listrik

Apabila suatu sumber listrik arus bolak-balik (AC) diterapkan pada komponen impedansi kompleks $Z = R + jX$ dimana $X = 2\pi \cdot fL$ seperti ditampilkan pada gambar 2.12 (a), menghasilkan fasor tegangan $V = |V| \angle \theta$ dan fasor arus $I = |I| \angle \theta$, dalam nilai efektif (rms) seperti digambarkan pada gambar 2.12 (b).



Gambar 2.12 Tegangan AC yang diterapkan pada beban dan diagram fasor.

(a) Rangkaian R dan X, (b) Diagram Vektor I dan V

Ungkapan daya pada rangkaian diatas adalah perkalian tegangan dan arus VI^* yang menghasilkan,

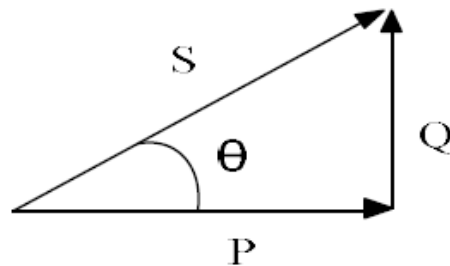
$$VI^* = |V||I| \angle \theta_V - \theta_I$$

$$VI^* = |V||I| \angle \theta$$

$$VI^* = |V||I| \cos \theta + j|V||I| \sin \theta \dots\dots\dots (2.4)$$

Persamaan diatas menentukan kuantitas daya kompleks dimana bagian realnya merupakan daya nyata P dan bagian imajinernya merupakan daya rekatif Q sedangkan θ merupakan sudut daya.

Menurut Smith (1992) konsep daya kompleks memberikan pendekatan lain untuk pemecahan persoalan rangkaian arus AC. Perhitungan yang mengikuti kaidah aljabar kompleks, teknik vektor dan metode grafik dapat diterapkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Segitiga daya kompleks

Selanjutnya daya kompleks ditandai dengan S dan diberikan melalui,

$$S = VI^* \dots\dots\dots(2.5)$$

$$S = P + jQ \dots\dots\dots(2.6)$$

Magnitude dari S ,

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

Persamaan diatas merupakan daya terlihat (*apperent power*), satuannya dalam Volt-Ampere dan satuan besarnya dalam kVA atau MVA. Daya terlihat memberikan indikasi langsung dari energi listrik dan digunakan sebagai suatu rating satuan perangkat daya. Dari uraian diatas maka daya listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga macam, yakni daya semu, daya aktif (nyata) dan daya reaktif.

2.5.1 Daya semu

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

$$\text{Untuk 1 fasa : } S = V \times I \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Ampere)

2.5.2 Daya aktif

Daya aktif (daya nyata) merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya. Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

$$\text{Untuk 1 fasa : } P = V \times I \times \cos \emptyset \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \emptyset \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Amper)

$\cos \emptyset$ = Faktor Daya (standar PLN 0,85)

2.5.3 Daya reaktif

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.

$$\text{Untuk 1 fasa : } Q = V \times I \times \sin \emptyset \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \emptyset \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Amper)

$\sin \emptyset$ = Faktor Daya (tergantung nilai $\emptyset$)

2.5.4 Faktor daya

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu.

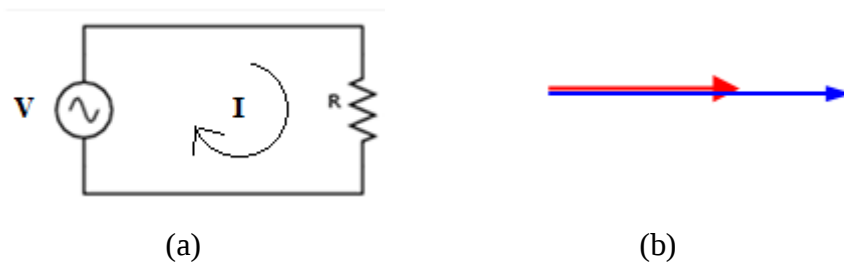
Secara teoritis, jika seluruh beban daya yang dipasok oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya satu, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistim pendistribusian. Sehingga, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,5, maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA).

Faktor Daya / Faktor kerja menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi. Perbaikan faktor daya ini menggunakan kapasitor.

Dalam sistem tenaga listrik dikenal 3 jenis faktor daya yaitu faktor daya unity, faktor daya terbelakang (*lagging*) dan faktor daya terdahulu (*leading*) yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem.

1. Faktor Daya *Unity*

Faktor daya unity adalah keadaan saat nilai $\cos \phi$ adalah satu dan tegangan sephasa dengan arus. Faktor daya *Unity* akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni.



Gambar 2.14 Arus Sefasa dengan Tegangan

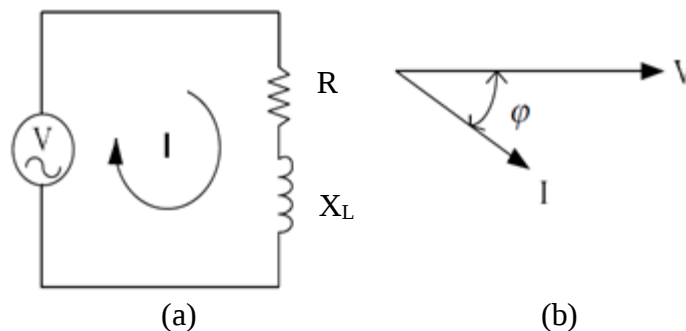
(a) Rangkaian beban R (b) Diagram vektor I dan V sefasa

Pada Gambar terlihat nilai $\cos \phi$ sama dengan 1, yang menyebabkan jumlah daya nyata yang dikonsumsi beban sama dengan daya semu.

2. Faktor Daya Terbelakang (*Lagging*)

Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi sebagai berikut :

1. Beban/ peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif.
2. Arus (I) terbelakang dari tegangan (V), V mendahului I dengan sudut ϕ



Gambar 2.15 Arus tertinggal dari tegangan sebesar sudut ϕ

- a. Rangkaian R dan L
- b. Diagram vektor I lagging terhadap V

Dari Gambar terlihat bahwa arus tertinggal dari tegangan maka daya reaktif mendahului daya semu, berarti beban membutuhkan atau menerima daya reaktif dari sistem.

Rumus faktor daya tertinggal :

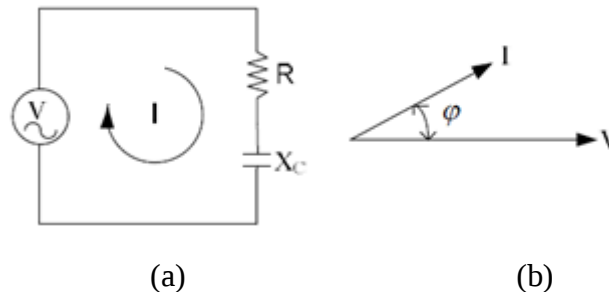
$$\text{Faktor daya (power factor)} = \frac{P}{S} = \frac{V.I.\sin \theta}{V.I} = \sin \theta \dots\dots\dots (2.15)$$

3. Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi sebagai berikut :

1. Beban/ peralatan listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif.

2. Arus mendahului tegangan, V terbelakang dari I dengan sudut ϕ



Gambar 2.16 Arus mendahului dari tegangan sebesar sudut ϕ

- Rangkaian R dan C
- Diagram vektor I leading terhadap V

Dari Gambar terlihat bahwa arus mendahului tegangan maka daya reaktif tertinggal dari daya semu, berarti beban memberikan daya reaktif kepada sistem.

Rumus faktor daya tertinggal :

$$\text{Faktor daya (power factor)} = \frac{P}{S} = \frac{V.I.\cos\theta}{V.I} = \cos\theta \dots\dots\dots (2.16)$$

2.6 Resistansi Penghantar

Resistansi adalah tahanan suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang menyebabkan kerugian daya. Maka besarnya resistansi pada jaringan listrik dapat dicari dengan rumus persamaan berikut:

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana :

- R : Resistansi (Ω),
 l : Panjang kawat penghantar (m),
 A : Luas penampang kawat (m^2),
 ρ : Tahanan jenis (Ωm).

Tahanan penghantar mempunyai suhu maksimum yang telah distandarkan oleh pabrik pembuatnya (maksimum 30°C untuk Indonesia), perubahan suhu sebesar 1°C dapat menaikkan tahanan penghantar. Perubahan tahanan nilai tahanan ini disebut koefisien temperatur dari tahanan yang diberi simbol α , nilai α dapat

dilihat pada tabel di bawah ini. Perubahan nilai tahanan terhadap suhu, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$R_{t2} = R_{t1}[1 + \alpha_{t1}(t_2 - t_1)] \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana T_0 = Temperatur pada penghantar aluminium ($^{\circ}\text{C}$)

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \dots\dots\dots (2.19)^7$$

Dimana:

R_{t2} = resistan pada suhu t_2 (Ω / km)

R_{t1} = resistan pada suhu t_1 (Ω / km)

α_{t1} = koefisien temperature dari tahanan pada suhu

0,03931 untuk Cu pada suhu 12345°C

0,03931 untuk Al pada suhu 12345°C

t_1 = suhu normal penghantar ($^{\circ}\text{C}$)

t_2 = suhu yang ditentukan ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = konstanta untuk penghantar tertentu :

- a. 234,5 untuk tembaga 100% Cu
- b. 241,0 untuk tembaga 97% Cu
- c. 228 untuk aluminium 61 % Al

2.7 Jatuh Tegangan (*Drop Tegangan*)

Jatuh tegangan (*drop voltage*) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar.

Adapun penyebab jatuh tegangan (drop tegangan) adalah :

1. Panjang jaringan, jauhnya jaringan dari trafo
2. Rendahnya tegangan yang diberikan dari trafo distribusi
3. Jenis penghantar yang digunakan
4. Sambungan penghantar atau konektor yang tidak baik
5. Arus yang dihasilkan terlalu besar

⁷ T.S. Hutahuruk, *Transmisi Daya Listrik*, 1996, Hal 7

Keterangan :

ΔV = drop tegangan (V)

V_s = Tegangan awal (V)

V_r = Tegangan akhir (V)

R = Resistansi saluran (Ω)

X = Reaktansi saluran (Ω)

I = Arus saluran (A)

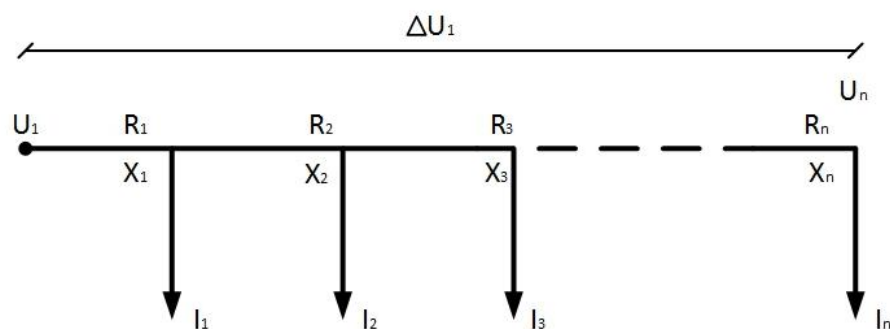
I_R = Komponen arus aktif

I_X = Komponen arus reaktif

pf = power factor

qf = power factor reaktif

Adapun perhitungan untuk jatuh tegangan menurut Kadir, yakni dapat dilihat pada Gambar 2.18 Terlihat sebuah jala terbuka, dengan tegangan awal U_1 , beban $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, tegangan akhir U_n kerugian tegangan atas jala sebesar ΔU_j dan masing-masing bagian jala dengan resistansi dan reaktansi, sebesar R_1 dan X_1, R_2 dan X_2 , hinggakan R_n dan X_n .



Gambar 2.18 Jala Terbuka dengan Beban Terbagi Rata

Besarnya kerugian tegangan ΔU_j adalah:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{U}_j &= \bar{U}_1 - \bar{U}_a \\ &= (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \dots + \bar{I}_n) R_1 + (\bar{I}_2 + \bar{I}_3 + \dots + \bar{I}_n) R_2 + \dots + \bar{I}_n R_n + j[\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \dots + \bar{I}_n) X_1 + (\bar{I}_2 + \bar{I}_3 + \dots + \bar{I}_n) X_2 + \dots + \bar{I}_n X_n \dots \dots \dots (2.28) \end{aligned}$$

Dengan mempergunakan pendekatan yang telah lebih dahulu dipakai, diperoleh:

$$\begin{aligned} \Delta U &\approx U_1 - U_2 \\ &\approx I_1 R_1 \cos \phi_1 + I_1 X_1 \sin \phi_1 + I_2 R_2 \cos \phi_2 + I_2 X_2 \sin \phi_2 + \dots + I_n R_n \cos \phi_n + I_n X_n \sin \phi_n \end{aligned}$$

$$\Delta U \approx \sum_{p=1}^n [I_p R_p \cos \phi_p + I_p X_p \sin \phi_p] \dots \dots \dots (2.29)$$

2.8 Rugi daya (*Power Losses*)

Dalam menentukan distribusi beban secara ekonomis diantara stasiun-stasiun dijumpai keperluan untuk mempertimbangkan kehilangan daya dalam saluran-saluran distribusi. Hilang daya (rugi daya) utama pada saluran adalah besarnya daya yang hilang pada saluran, yang besarnya sama dengan daya yang disalurkan dari sumber daya yang dikurangi besarnya daya yang diterima pada perlengkapan hubungan bagi utama. Rugi daya dipengaruhi oleh tahanan dan besarnya arus yang mengalir pada saluran, hingga timbul rugi energi berupa panas yang hilang pada saluran.

Besar rugi daya satu fasa dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta P = I^2 \times R \text{ (Watt) } \dots \dots \dots (2.30)^8$$

Keterangan:

ΔP = Rugi daya pada saluran (Watt)

I = Arus beban pada saluran (Ampere)

R = Tahanan Murni (Ohm)

Untuk rugi-rugi daya pada saluran tiga fasa dinyatakan oleh persamaan:

$$\Delta P = 3 \times I^2 \times R \dots \dots \dots (2.31)^9$$

⁸ Ibid, Hal 67

⁹ PT.PLN Pusat Pendidikan dan Pelatihan. *Teknik Listrik Terapan*. Hlm 13