



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

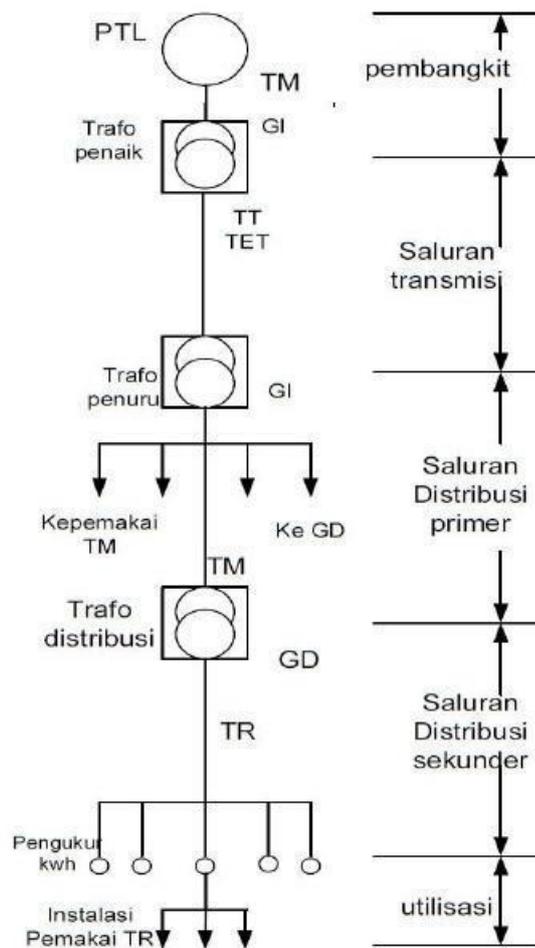
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik¹

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. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk 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 ($I^2 \cdot R$). 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 konsumen-konsumen.

¹Suhadi dkk. (2008). *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.

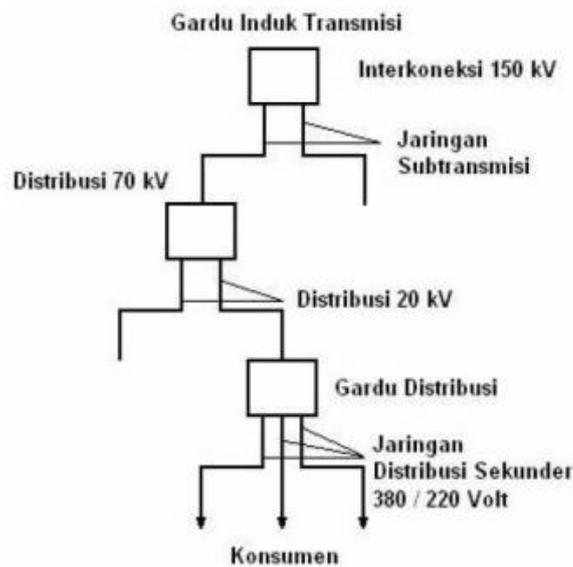
Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo-trafo *step-up*. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (HV,UHV,EHV) menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapan perlengkapannya, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo-trafo *step-down*. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.2 Jaringan Distribusi

Distribusi tenaga listrik adalah tahap akhir dalam pengiriman tenaga listrik; ini merupakan proses membawa listrik dari sistem transmisi listrik menuju ke konsumen listrik. Gardu distribusi terhubung ke sistem transmisi dan menurunkan tegangan transmisinya dengan menggunakan trafo. Jaringan Distribusi Tenaga Listrik dibagi menjadi dua bagian yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder.

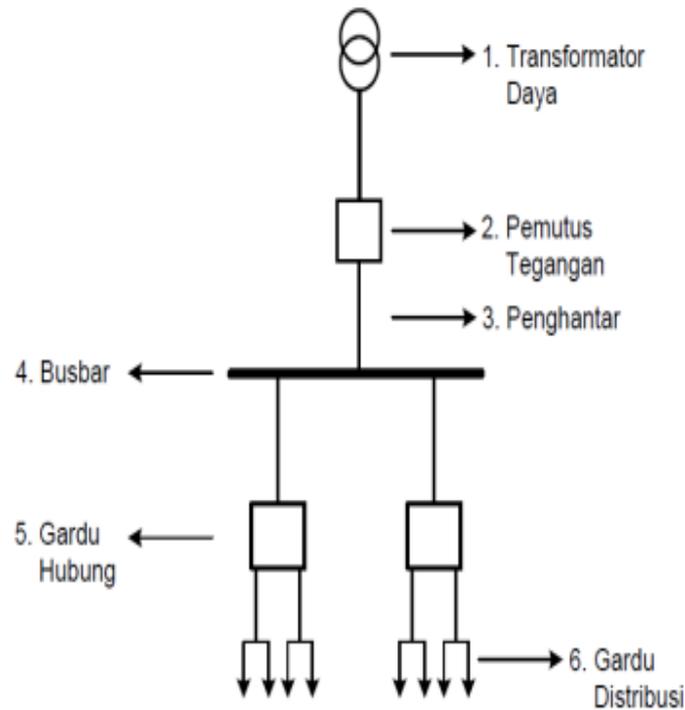


Gambar 2.2 Diagram Sistem Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.2.1 Distribusi Primer²

Yaitu jaringan distribusi yang berasal dari jaringan transmisi yang diturunkan tegangannya di Gardu Induk (GI) menjadi Tegangan Menengah (TM) dengan nominal tegangan 20 kV yang biasa disebut JTM (Jaringan Tegangan Menengah) lalu disalurkan ke lokasi-lokasi pelanggan listrik kemudian di turunkan tegangannya di trafo pada gardu distribusi untuk disalurkan ke pelanggan.

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

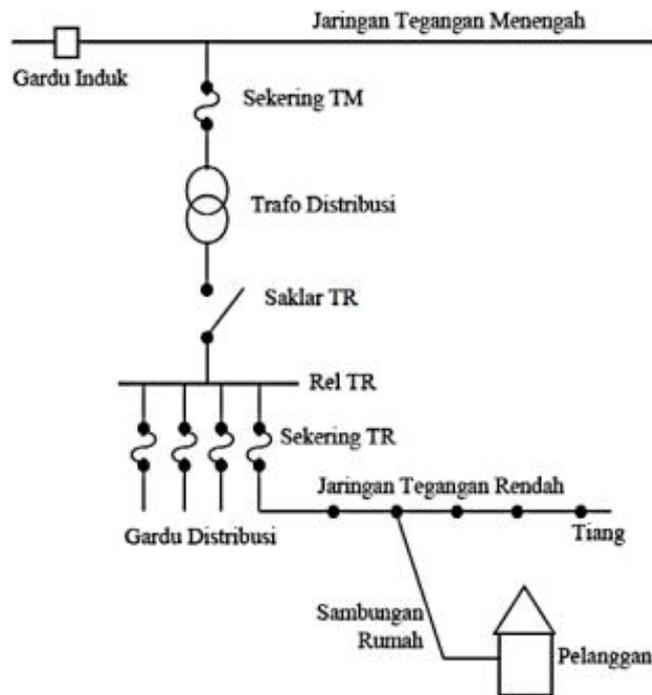


Gambar 2.3 Sistem Distribusi Primer

2.2.2 Distribusi Sekunder

Yaitu jaringan distribusi dari gardu distribusi untuk di salurkan ke pelanggan dengan klasifikasi tegangan rendah yaitu 220 V atau 380 V (antar fasa). Pelanggan yang memakai tegangan rendah ini adalah pelanggan paling banyak karena daya yang dipakai tidak terlalu banyak. Jaringan dari gardu distribusi dikenal dengan JTR (Jaringan Tegangan Rendah), lalu dari JTR dibagi-bagi untuk ke rumah pelanggan, saluran yang masuk dari JTR ke rumah pelanggan disebut Sambungan Rumah (SR). Pelanggan tegangan ini banyaknya menggunakan listrik satu fasa, walau ada beberapa memakai listrik tiga fasa.

Konsumen rumah tangga maupun komersial biasanya terhubung dengan jaringan distribusi sekunder melalui sambungan rumah listrik. Konsumen yang membutuhkan tegangan yang lebih tinggi dapat mengajukan permohonan untuk langsung terhubung dengan jaringan distribusi primer, atau ke level subtransmisi.



Gambar 2.4 Sistem Distribusi Sekunder

Jaringan Tegangan Rendah (JTR) berfungsi untuk menyalurkan sisi tegangan rendah transformator distribusi ke konsumen menggunakan jaringan hantaran udara 3 fasa 4 kawat dengan tegangan distribusi sekunder 220 volt (tegangan fasa-netral) atau 380 volt tegangan fasa-fasa).

Jaringan Tegangan Rendah ialah jaringan tenaga listrik dengan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan tersebut beserta perlengkapannya. dari sumber penyaluran tegangan rendah tidak termasuk SLTR. Sedangkan Sambungan tenaga listrik tegangan rendah (SLTR) ialah penghantar di bawah atau di atas tanah termasuk peralatannya mulai dari titik penyambungan pada JTR sampai dengan alat pembatas dan pengukur (App).(SPLN No.56 tahun 1984).

Sistem penyaluran daya listrik pada JTR 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 x 10mm², 2 x 16mm², 4 x 25mm², 3 x 35mm², 3 x 50mm², 3 x 70mm².

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 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.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1. Jenis pemasangannya :

- Gardu pemasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
- Gardu pemasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios

2. Jenis Konstruksinya :

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

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

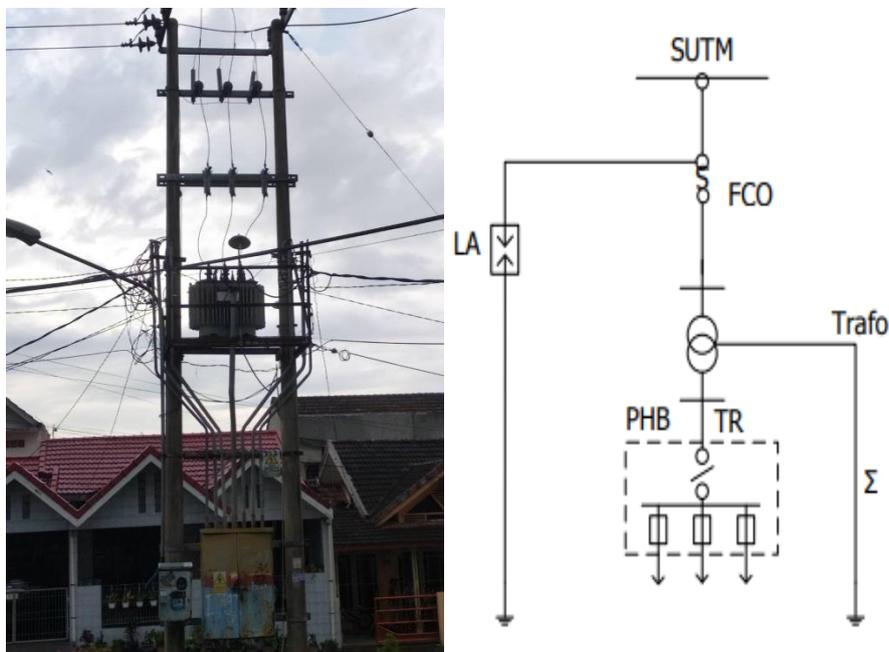
3. Jenis Penggunaannya :

- Gardu Pelanggan Umum
- 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.

2.3.1 Gardu Portal

Umumnya konfigurasi Gardu Tiang yang dicatu dari SUTM adalah *T section* dengan peralatan pengaman Pengaman Lebur *Cut-Out* (FCO) sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur (*pengaman lebur link type expulsion*) dan *Lightning Arrester* (LA) sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada transformator akibat surja petir.



Gambar 2.5 Gardu Portal dan Diagram satu garis Gardu Distribusi Portal



Untuk Gardu Tiang pada sistem jaringan lingkaran terbuka (*open-loop*), seperti pada sistem distribusi dengan saluran kabel bawah tanah, konfigurasi peralatan adalah π section dimana transformator distribusi dapat di catu dari arah berbeda yaitu posisi *Incoming – Outgoing* atau dapat sebaliknya.

Guna mengatasi faktor keterbatasan ruang pada Gardu Portal, maka digunakan konfigurasi *switching/proteksi* yang sudah terakit ringkas sebagai RMU (*Ring Main Unit*). Peralatan *switching incoming-outgoing* berupa Pemutus Beban atau LBS (*Load Break Switch*) atau Pemutus Beban Otomatis (PBO) atau CB (*Circuit Breaker*) yang bekerja secara manual (atau digerakkan dengan *remote control*).

Fault Indicator (dalam hal ini PMFD : *Pole Mounted Fault Detector*) perlu dipasang pada section jaringan dan percabangan untuk memudahkan pencarian titik gangguan, sehingga jaringan yang tidak mengalami gangguan dapat dipulihkan lebih cepat.

2.3.2 Gardu Cantol

Pada Gardu Distribusi tipe cantol, transformator yang terpasang adalah transformator dengan daya ≤ 100 kVA Fase 3 atau Fase 1. Transformator terpasang adalah jenis CSP (*Completely Self Protected Transformer*) yaitu peralatan *switching* dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator.

Perlengkapan perlindungan transformator tambahan adalah lightning arrester. Pada transformator tipe CSP fasa 1, penghantar pembumian arrester dihubung langsung dengan badan transformator. Konstruksi pembumian sama dengan gardu portal. Perlengkapan hubung bagi Tegangan Rendah maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH, NT) sebagai pengaman jurusan. Semua bagian konduktif terbuka dihubungkan dengan pembumian sisi Tegangan Rendah. Nilai pengenalan LA 5 kA untuk posisi di tangan jaringan dan 10 kA untuk posisi pada akhir jaringan. Nilai tahanan pembumian tidak melebihi 1 Ohm.



Gambar 2.6 Gardu Cantol

2.3.3 Gardu Beton

Seluruh komponen utama instalasi yaitu transformator dan peralatan switching/proteksi, terangkai didalam bangunan sipil yang dirancang, dibangun dan difungsikan dengan konstruksi pasangan batu dan beton (*masonry wall building*). Konstruksi ini dimaksudkan untuk pemenuhan persyaratan terbaik bagi keselamatan ketenagalistrikan.



Gambar 2.7 Gardu Beton

2.3.4 Gardu Kios

Gardu tipe ini adalah bangunan *prefabricated* terbuat dari konstruksi baja, fiberglass atau kombinasinya, yang dapat dirangkai di lokasi rencana pembangunan gardu distribusi. Terdapat beberapa jenis konstruksi, yaitu Kios Kompak, Kios Modular dan Kios Bertingkat.

Gardu ini dibangun pada tempat-tempat yang tidak diperbolehkan membangun Gardu Beton. Karena sifat mobilitasnya, maka kapasitas transformator distribusi yang terpasang terbatas. Kapasitas maksimum adalah 400 kVA, dengan 4 jurusan tegangan rendah. Khusus untuk kios kompak, seluruh instalasi komponen utama gardu sudah dirangkai selengkapnyanya di pabrik, sehingga dapat langsung di angkut kelokasi dan disambungkan pada sistem distribusi yang sudah ada untuk difungsikan sesuai tujuannya.



Gambar 2.8 Gardu Kios

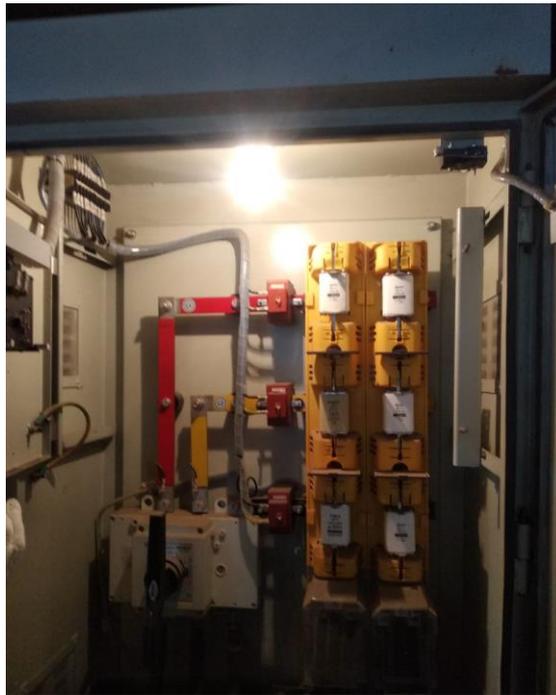
2.4 PHB sisi Tegangan Rendah (PHB-TR)⁴

PHB sisi Tegangan Rendah (PHB-TR) adalah suatu kombinasi dari satu atau lebih Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah dengan peralatan kontrol, peralatan ukur, pengaman dan kendali yang saling berhubungan.

⁴ Pramono, Tri Joko, dkk. (2017). *Studi Analisis Gangguan Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah dan Upaya Mengatasinya di PLN Area Tanjung Priok*.

Keseluruhannya dirakit lengkap dengan sistem pengawatan dan mekanis pada bagian-bagian penyangganya.

Secara umum PHB TR sesuai SPLN 118-3-1-1996, untuk pasangan dalam adalah jenis terbuka. Rak TR pasangan dalam untuk gardu distribusi beton. PHB jenis terbuka adalah suatu rakitan PHB yang terdiri dari susunan penyangga peralatan proteksi dan peralatan Hubung Bagi dengan seluruh bagian-bagian yang bertegangan, terpasang tanpa isolasi. Jumlah jurusan per transformator atau gardu distribusi sebanyak-banyaknya 8 jurusan, disesuaikan dengan besar daya transformator dan Kemampuan Hantar Arus (KHA) Penghantar JTR yang digunakan. Pada PHB-TR harus dicantumkan diagram satu garis, arus pengenal gawai proteksi dan kendali serta nama jurusan JTR.

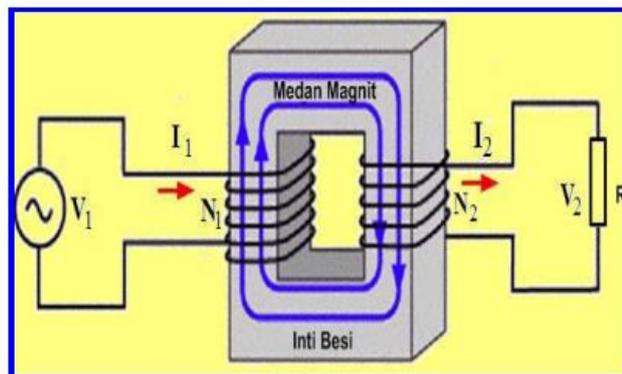


Gambar 2.9 PHB –TR

2.5 Transformator⁵

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.

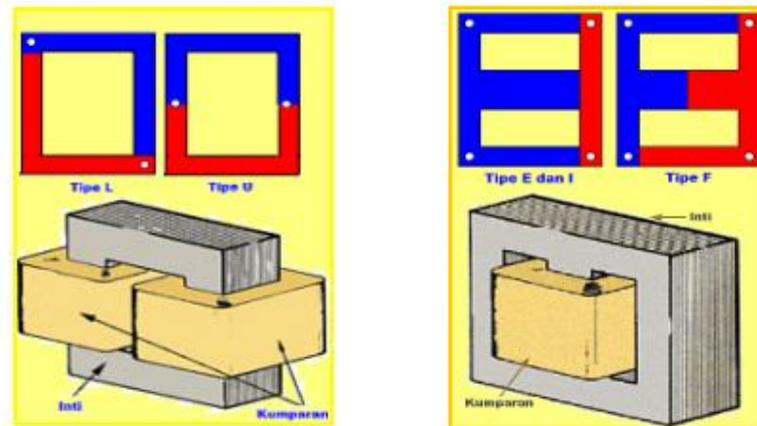
Secara konstruksinya transformator terdiri atas dua kumparan yaitu primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka fluks bolak-balik akan terjadi pada kumparan sisi primer, kemudian fluks tersebut akan mengalir pada inti transformator, dan selanjutnya fluks 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 Fluks Magnet Transformator

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua jenis transformator, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*).

⁵ Prih Sumardjati dkk. (2008). *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.



Gambar 2.11 (a) Transformator tipe Inti (b) Tipe Cangkang

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 2.11(b) 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. 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.

2.6 Konstruksi Transformator

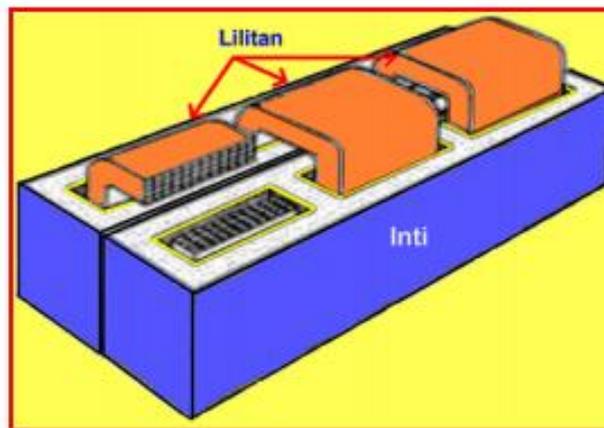
Secara umum sebuah transformator tiga fasa mempunyai konstruksi hampir sama, yang membedakannya adalah alat bantu dan sistem pengamannya, tergantung pada letak pemasangan, sistem pendinginan, pengoperasian, fungsi dan pemakaiannya.

2.6.1 Inti Besi Transformator

Inti besi berfungsi sebagai tempat mengalirnya fluks dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Sama seperti transformator satu fasa, berdasarkan cara melilit kumparanya ada dua jenis, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

2.6.2 Kumbaran Transformator

Kumbaran transformator terdiri dari lilitan kawat berisolasi dan membentuk kumbaran. Kawat yang dipakai adalah kawat tembaga berisolasi yang berbentuk bulat atau plat. Kumbaran-kumbaran transformator diberi isolasi baik terhadap kumbaran lain maupun inti besinya. Bahan isolasi berbentuk padat seperti kertas prespan, pertinak, dan lain-nya.



Gambar 2.12 Inti dan Kumbaran pada Transformator tipe cangkang

2.6.3 Minyak Transformator

Untuk mendinginkan transformator saat beroperasi maka kumbaran dan inti transformator direndam di dalam minyak transformator, minyak juga berfungsi sebagai isolasi.

Oleh karena itu minyak transformator harus memenuhi persyaratan, sebagai berikut :

- Mempunyai kekuatan isolasi (*Dielectric Strength*).



- Penyalur panas yang baik dengan berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel kecil dapat mengendap dengan cepat.
- Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- Tidak nyala yang tinggi, tidak mudah menguap.
- Sifat kimia yang stabil.

2.6.4 Tangki Transformator

Tangki transformator berfungsi untuk menyimpan minyak transformator dan sebagai pelindung bagian-bagian transformator yang direndam dalam minyak. Ukuran tangki disesuaikan dengan ukuran inti dan kumparan.

2.6.5 Konservator Transformator

Konservator Transformator Konservator merupakan tabung berisi minyak transformator yang diletakan pada bagian atas tangki.

Fungsinya adalah :

- Untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan.
- Sebagai saluran pengisian minyak.

2.6.6 Sistem Pendinginan Transformator

Sistem pendinginan pada transformator dibutuhkan supaya panas yang timbul pada inti besi dan kumparan dapat disalurkan keluar sehingga tidak merusak isolasi didalam transformator. Media yang digunakan pada sistem pendinginan dapat berupa : udara / gas, minyak dan air. Sirkulasinya dilakukan secara : alamiah (natural) dan atau paksaan (*forced*).

2.6.7 Bushing Transformator

Bushing transformator adalah sebuah konduktor yang berfungsi untuk menghubungkan kumparan transformator dengan rangkaian luar yang diberi selubung isolator. Isolator juga berfungsi sebagai penyekat antara konduktor



dengan tangki transformator. Bahan bushing adalah terbuat dari porselin yang tengahnya berlubang.

2.6.8 Alat Pernafasan

Naik turunnya beban transformator dan suhu udara sekeliling transformator, mengakibatkan suhu minyak berubah-ubah mengikuti perubahan tersebut. Bila suhu minyak naik, minyak memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki dan bila suhu turun sebaliknya udara akan masuk. Keadaan ini merupakan proses pernapasan transformator. Tetapi udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak. Untuk mencegah hal itu transformator dilengkapi dengan alat pernafasan yang berupa tabung berisi zat hygroskopis, seperti kristal silikagel.

2.6.9 Tap Changer

Tap changer adalah alat yang berfungsi untuk mengubah perbandingan lilitan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi pada sisi sekunder sesuai yang dibutuhkan oleh tegangan jaringan (beban) atau karena tegangan sisi primer yang berubah-ubah. *Tap changer* (perubahan tap) dapat dilakukan dalam keadaan berbeban (*on load*) atau keadaan tidak ber-beban (*off load*). Untuk tranformator distribusi perubahan tap changer dilakukan dalam keadaan tanpa beban.

2.6.10 Plat Nama

Plat nama yang terdapat pada bagian luar transformator sebagai pedoman saat pemasangan maupun perbaikan. Data-data yang dicantumkan seperti: Fasa dan frekuensi, daya nominal, tegangan primer/ sekunder, kelompok hubungan, arus nominal, persentase arus hubung singkat, sistem pendinginan, volume minyak, dan lain-lain.

2.7 Pembebanan transformator⁶

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*. Pembebanan trafo tertinggi yaitu waktu beban puncak pukul 18.00 - 22.00. Pada waktu beban puncak inilah puncak pemakaian listrik tertinggi oleh konsumen. *Overload* 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. Beban *overload* akan menyebabkan trafo menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan trafo.

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.

- $kVA \text{ beban terukur} = \frac{(I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{T-N})}{1000} \dots\dots\dots(2.1)$

- $\text{Persentase beban Transformator (\%)} = \frac{kVA \text{ beban terukur}}{kVA \text{ Trafo}} \times 100 \% \dots\dots(2.2)$

2.8 Ketidakseimbangan beban⁷

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana :

1. Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° antara satu vektor dengan vektor lainnya.

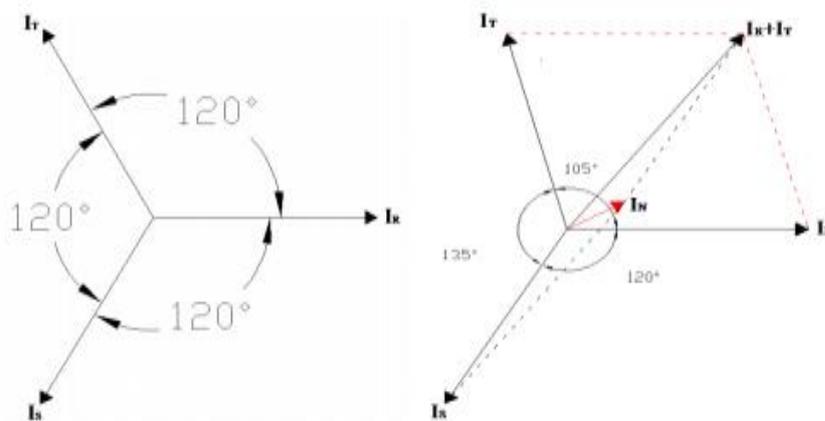
⁶ Gassing, & Jaya, I. (2013). *Optimalisasi Pembebanan Transformator Distribusi dengan Penyeimbangan Beban*. Makassar.

⁷ Syahputra, Siregar Rizky. (2017) *Perhitungan Arus Netral Rugi-rugi Efisiensi Transformator Distribusi 3 Fasa 20 kV/400 V Di PT PLN (Persero) Rayon Medan Timur Akibat Ketidakseimbangan Beban*. Medan: Universitas Sumatera Utara.

Sedangkan ketidakseimbangan beban adalah suatu keadaan dimana satu atau dua syarat dari beban seimbang tidak terpenuhi. Ada tiga kemungkinan keadaan beban tidak seimbang, yaitu:

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Adapun gambar diagram vektor arus dalam keadaan seimbang dan tidak seimbang dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.13 (a) Diagram vektor arus dalam keadaan seimbang
(b) Diagram vektor arus dalam keadaan tidak seimbang

2.9 Penyaluran Dan Susut Daya

Misalnya daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = 3 \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana :

P : daya pada ujung kirim

V : tegangan pada ujung kirim

$\cos \varphi$: faktor daya (0,85)

Daya yang sampai ujung terima akan lebih kecil dari P karena terjadi penyusutan dalam saluran. Jika $[I]$ adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama

tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b dan c sebagai berikut :

$$I_R = a \cdot I \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_S = b \cdot I \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_T = c \cdot I \dots\dots\dots (2.6)$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana apabila beban antara fasa R, S dan T seimbang maka besaran arus fasa akan sama dengan rata-rata beban ketiga fasa. Maka, koefisien a, b dan c bisa didapatkan melalui persamaan berikut :

$$a = \frac{I_R}{I_{\text{Rata-rata}}} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{\text{Rata-rata}}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{\text{Rata-rata}}} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan I_R , I_S , dan I_T berturut-turut adalah arus di fasa. Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai:

$$P = (a + b + c) V \cdot I \cdot \cos \theta \dots\dots\dots (2.11)$$

Apabila persamaan (2.3) dan persamaan (2.11) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu:

$$a + b + c = 3 \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana pada keadaan seimbang, nilai $a = b = c = 1$. Dengan demikian, rata-rata ketidakseimbangan beban dalam (%), yaitu:

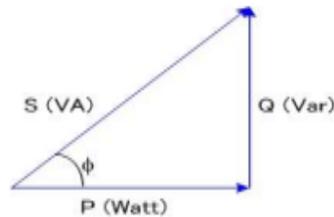
- %Ketidakseimbangan = $\frac{(|a-1|+|b-1|+|c-1|)}{3} \times 100\% \dots\dots\dots (2.13)$

2.10 Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \varphi$) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam listrik arus bolak-balik (AC) atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \varphi$. Berdasarkan pengertian tersebut, faktor daya ($\cos \varphi$) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots (2.14)$$

Untuk penjelasan tentang daya-daya dapat dilihat pada segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.14 Segitiga daya

Daya aktif (Active Power) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah Watt. Adapun persamaan untuk mencari daya aktif sebagai berikut :

$$P = V.I.\cos \varphi \dots\dots\dots (2.15)$$

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, dan lain – lain. Satuan daya reaktif adalah Var.

$$Q = V.I.\sin \varphi \dots\dots\dots (2.16)$$

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar. Adapun persamaan untuk mencari daya semu sebagai berikut:

$$S = V.I \dots\dots\dots (2.17)$$



2.11 Resistansi Penghantar⁸

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 menggunakan rumus persamaan berikut:

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana :

R = Resistansi (Ω)

l = Panjang kawat penghantar (m)

A = Luas penampang kawat (m^2)

ρ = Tahanan jenis (Ωm)

2.12 Rugi-Rugi Pada Transformator⁹

2.12.1 Hysteresis Losses

Kerugian histerisis disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet di dalam inti besi. Gesekan molekul dalam inti besi ini menimbulkan panas. Panas yang timbul ini menunjukkan kerugian energi, karena sebagian kecil energi listrik tidak dipindahkan, tetapi diubah bentuk menjadi energi panas. Panas yang tinggi juga dapat merusak trafo, sehingga pada trafo-trafo transmisi daya listrik ukuran besar harus didinginkan dengan media pendingin. Umumnya digunakan minyak khusus untuk mendinginkan trafo ini. Sebuah trafo didesain untuk bekerja pada rentang frekuensi tertentu. Menurunnya frekuensi arus listrik dapat menyebabkan meningkatnya rugi-rugi histerisis dan menurunkan kapasitas (VA) trafo.

2.12.2 Eddy Current Losses

Kerugian karena *Eddy current* disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Ini disebabkan oleh aliran fluk magnetik disekitar inti besi.

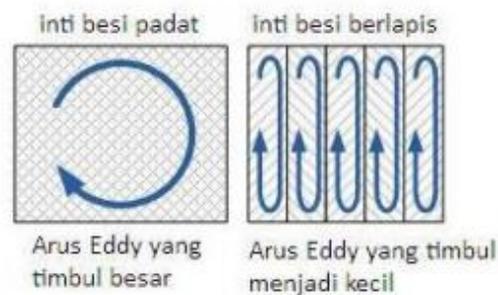
⁸ Hutaaruk, T. S. (1996). *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga.

⁹ Djukarna. 2013. Transformator.

<https://djukarna.wordpress.com/2013/10/21/transformator/>. (Diakses pada tanggal 25 April 2021)

Karena inti besi trafo terbuat dari konduktor (umumnya besi lunak), maka arus Eddy yang menginduksi inti besi akan semakin besar. Eddy current dapat menyebabkan kerugian daya pada sebuah trafo karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti besi, maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi panas. Ini merupakan kerugian.

Untuk mengurangi arus Eddy, maka inti besi trafo dibuat berlapis-lapis, tujuannya untuk memecah induksi arus Eddy yang terbentuk di dalam inti besi. Perbedaan induksi arus Eddy di dalam inti besi tunggal dengan inti besi berlapis dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.15 Inti besi utuh dan inti besi berlapis

2.12.3 Rugi Tembaga (*Copper Losses*)

Rugi-rugi tembaga (*copper losses*) terjadi di kedua kumparan. Kumparan primer atau sekunder dibuat dari gulungan kawat tembaga yang dilapisi oleh isolator tipis yang disebut enamel. Umumnya kumparan dibuat dari gulungan kawat yang cukup panjang. Gulungan kawat yang panjang ini akan meningkatkan hambatan dalam kumparan. Pada saat trafo dialiri arus listrik maka hambatan kumparan ini akan mengubah sejumlah kecil arus listrik menjadi panas yaitu sebesar (I^2R) . Semakin besar harga R maka semakin besar pula energi panas yang timbul di dalam kumparan. Mutu kawat yang bagus dengan nilai hambatan jenis yang kecil dapat mengurangi rugi-rugi tembaga.

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots \dots \dots (2.19)$$

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

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana:

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 = Daya Trafo (VA)

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah:

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

Sebuah trafo yang ideal diasumsikan:

- a. Tidak terjadi rugi-rugi hysteresis
- b. Tidak terjadi induksi arus Eddy
- c. Hambatan dalam kumparan = 0, akibatnya tidak ada rugi-rugi tembaga.

2.13 Efisiensi Transformator

Sebuah trafo tidak membutuhkan bagian yang bergerak untuk memindahkan energi dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Ini berarti tidak ada kerugian karena gesekan atau hambatan udara seperti yang terdapat pada mesin-mesin listrik (contoh motor listrik dan generator). Namun di dalam trafo juga terdapat kerugian yang disebut rugi-rugi tembaga (copper losses) dan rugi-rugi besi (iron losses). Rugi-rugi tembaga terdapat pada kumparan primer dan kumparan sekunder, sedangkan rugi-rugi besi terdapat dalam inti besi. Rugi-rugi ini berupa panas yang dilepaskan akibat terjadinya Eddy current. Tetapi rugi-rugi ini sangat kecil. Efisiensi sebuah transformator dapat dihitung dengan membandingkan daya yang dikeluarkan di kumparan sekunder dengan daya yang diberikan pada kumparan primer. Efisiensi maksimum akan terjadi saat rugi tetap sama dengan rugi tembaga yaitu sebesar 210 watt. Besarnya beban saat efisiensi maksimum dapat dicari dengan persamaan:

$$S = \text{Prating trafo} \times \sqrt{\frac{\text{Pinti}}{\text{Pcu full load}}} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana:

- S = Beban Terukur (VA)
- Prating trafo = Daya Trafo (VA)
- Pinti = Rugi Inti Trafo (Watt)
- Pcu full load = Rugi Tembaga Beban Penuh (Watt)

Efisiensi transformator dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.23)$$

$$P_{out} = V \times I \times \text{Cos } \phi \dots\dots\dots (2.24)$$

$$n = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{rugi-rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana:

- η = Efisiensi Transformator
- P_{out} = Daya keluaran (kumparan sekunder)
- P_{in} = Daya masukan (kumparan primer)