

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik<sup>9</sup>**

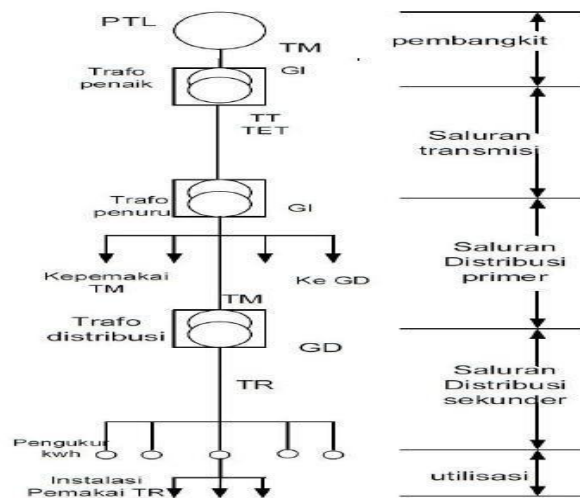
Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen-komponen listrik seperti generator, transformator, jaringan tenaga listrik dan beban listrik.

Peranan utama dari sistem tenaga listrik adalah menyalurkan energy listrik yang dibangkitkan oleh generator ke konsumen yang membutuhkan energy listrik tersebut. Secara garis besar suatu sistem tenaga listrik dapat di kelompokkan ke bagian subsistan :

1. Bagian Pembangkit
  - a. Generator
  - b. Gardu induk sebagian
2. Bagian penyaluran/transmisi daya
  - a. Gardu induk distribusi
  - b. Saluran distribusi primer (20kV)
  - c. Gardu distribusi
  - d. Saluran distribusi sekunder (220/380)
  - e. Beban listrik/konsumen

---

<sup>9</sup>Said Muhammad Irfan. 2019. *Analisa Pemertataan Beban Pada Gardu Distribusi PH 0034 PT PLN (Persero) Rayon Mariana Palembang* : Politeknik Negeri Sriwijaya



**Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

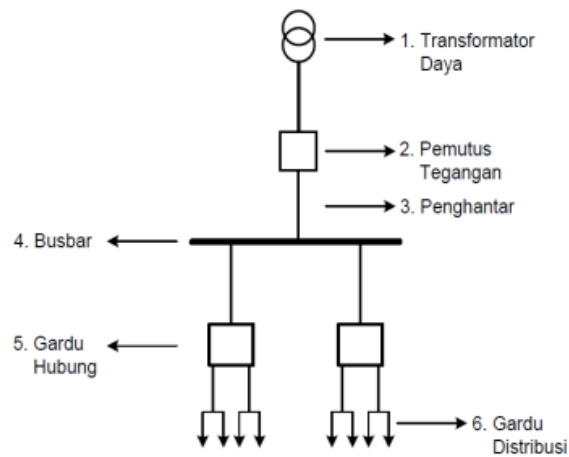
## 2.2 Jaringan Distribusi<sup>1</sup>

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.

### 2.2.1 Jaringan Sistem Distribusi Primer

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 diturunkan tegangannya di trafo pada gardu distribusi untuk disalurkan ke pelanggan.

<sup>1</sup>Ahmad Ardiansyah, 2010, *Analisis Keandalan Sistem Jaringan Distribusi Udara 20 kV*, Medan, Hal 7

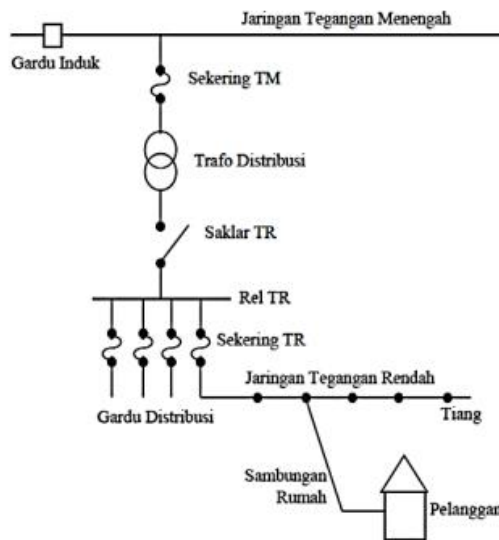


**Gambar 2.2 Diagram Sistem Distribusi Primer**

### 2.2.2 Jaringan Sistem 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 2.3 Diagram 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)

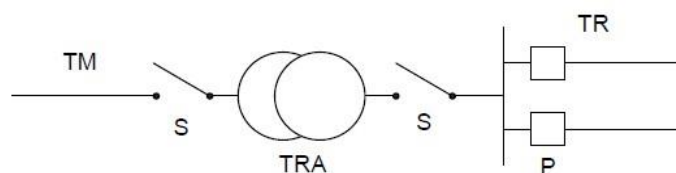
Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (Low Voltage Twisted Cable), ukuran kabel LVTC adalah : 2 x 10mm<sup>2</sup> , 2 x 16mm<sup>2</sup> , 4 x 25mm<sup>2</sup> , 3 x 35mm<sup>2</sup> , 3 x 50mm<sup>2</sup> , 3 x 70mm<sup>2</sup> .

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 Distribusi<sup>7</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).



*Gambar 2.4. Skema Gardu Distribusi*

**Gambar 2.4 Single line diagram Gardu Distribusi**

Keterangan:

TRA = Transformator Distribusi

P = Proteksi

S = Saklar atau Pemisah

TM = Tegangan Menengah

TR = Tegangan Rendah

---

<sup>7</sup>PT. PLN (Persero). (2010). *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta

Kabel tegangan menengah memasuki gardu dan melalui sebuah saklar atau pemisah dihubungkan pada transformator. Saklar atau pemisah pada sisi tegangan rendah sering tidak terpasang dan langsung disambungkan pada proteksi yang berupa sekring.

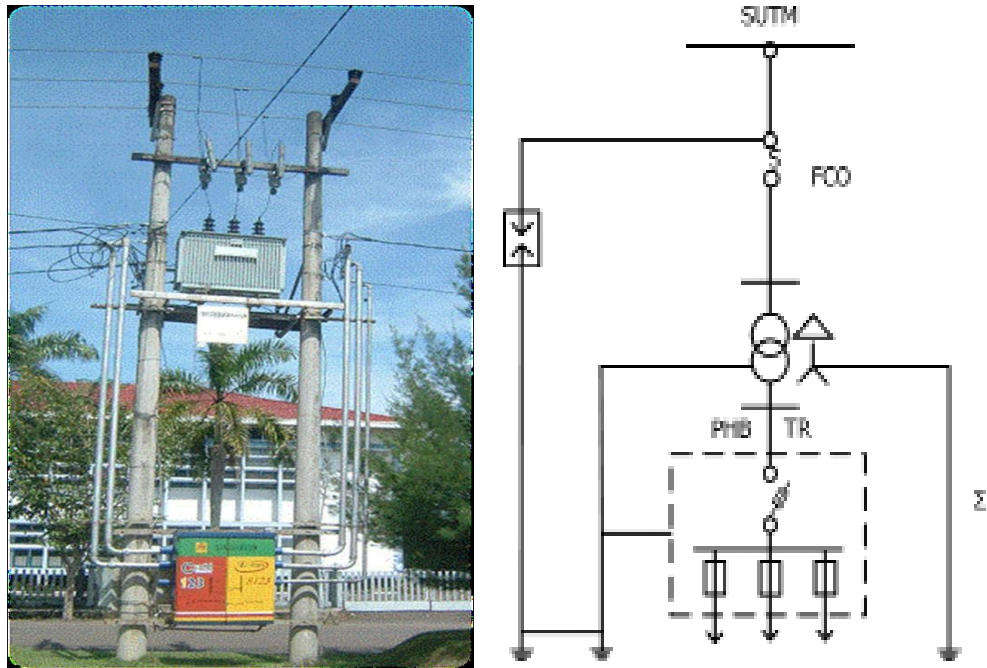
Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya. Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1. Jenis pemasangannya :
  - Gardu pemasangan luar : Gardu portal, Gardu Cantol
  - Gardu pemasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios
2. Jenis Konstruksinya
  - Gardu Beton (bangunan sipil : beton, batu)
  - Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
  - Gardu Kios
3. Jenis Penggunaannya
  - Gardu Pelanggan Umum
  - Gardu Pelanggan Khusus

Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk mempermudah 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.



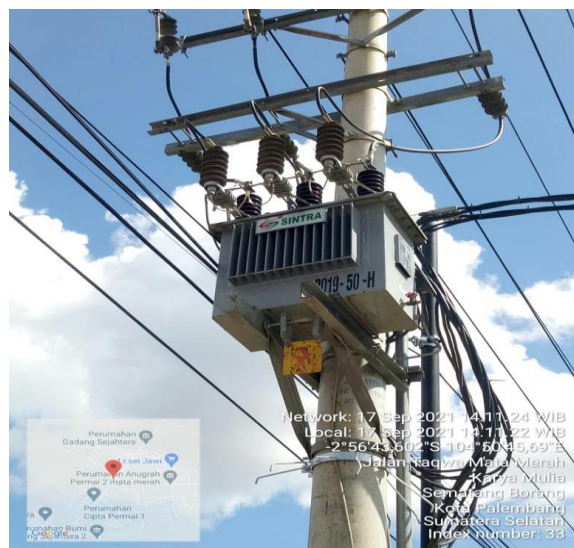
**Gambar 2.5 Gardu Portal dan Diagram satu garis Gardu Distribusi Portal**

Untuk Gardu Tiang pada sistem jaringan lingkaran terbuka (*open-loop*), seperti pada sistem distribusi dengan saluran kabel bawah tanah, konfigurasi peralatan adalah  $\pi$  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  $\leq 100$  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 pengenal LA 5 kA untuk posisi di tengah 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 selengkapnya di pabrik, sehingga dapat langsung di angkut kelokasi dan disambungkan pada sistem distribusi yang sudah ada untuk difungsikan sesuai tujuannya.

#### **2.4 PHB sisi Tegangan Rendah (PHB-TR)<sup>5</sup>**

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

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

Secara umum PHB TR sesuai SPLN 118-3-1-1996, untuk pemasangan dalam adalah jenis terbuka. Rak TR pemasangan 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 pengenalan gawai proteksi dan kendali serta nama jurusan JTR.



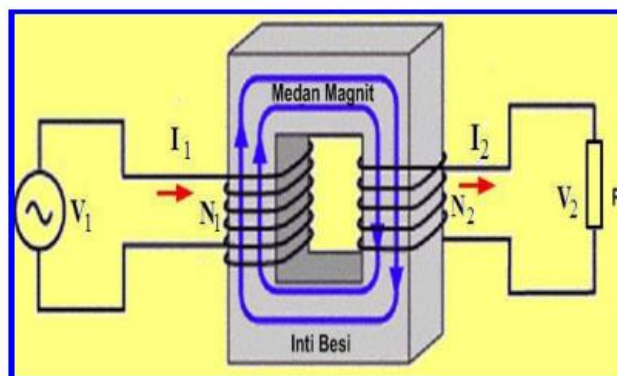
**Gambar 2.8 PHB-TR**

<sup>5</sup>Pramono, Tri Joko, dkk. (2017). *Studi Analisis Gangguan Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah dan Upaya Mengatasinya di PLN Area Tanjung Priok*.

## 2.5 Transformator<sup>6</sup>

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.

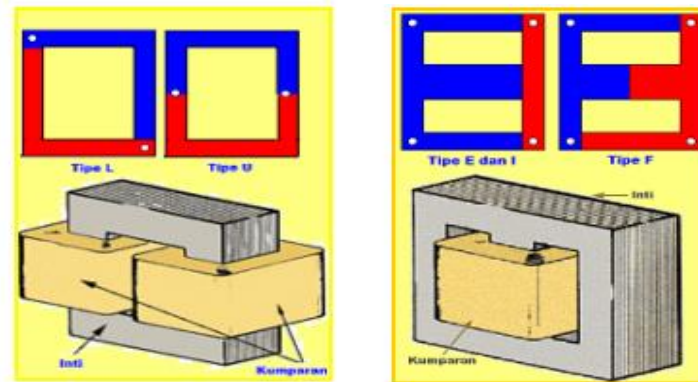
Secara konstruksinya transformator terdiri atas dua kumparan yaitu primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka fluks bolak-balik akan terjadi pada kumparan sisi primer, kemudian fluks tersebut akan mengalir pada inti transformator, dan selanjutnya fluks 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 2.9 Fluks Magnet Transformator**

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

<sup>6</sup>Prih Sumardjati, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*, Jakarta, Direktorat Sekolah Menengah Kejuruan



**Gambar 2.10 (a) Transformator tipe Inti (b) Tipe Cangkang**

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

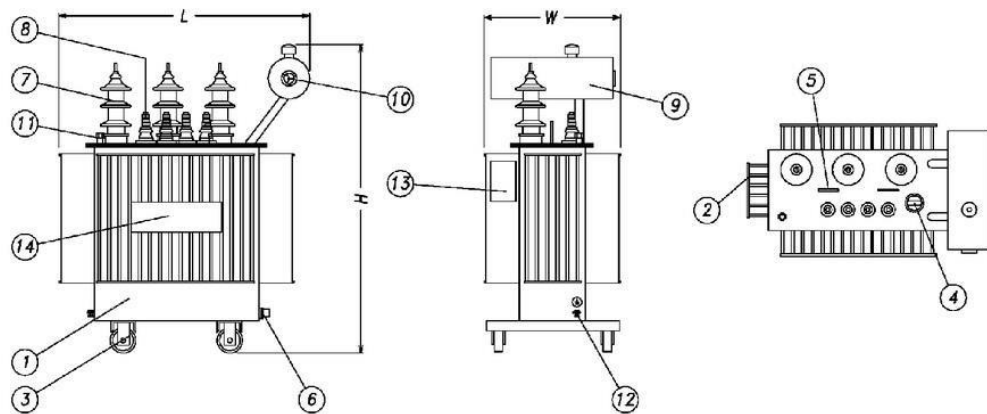
### 2.5.1. Transformator Daya 3 fasa

Ditinjau dari jumlah fasanya trafo distribusi ada dua macam, yaitu trafo satu fasa dan trafo tiga fasa. Trafo tiga fasa mempunyai dua tipe yaitu tipe tegangan sekunder ganda dan tipe tegangan sekunder tunggal.

Sebuah transformator tiga fasa secara prinsip sama dengan sebuah transformator satu fasa, perbedaan yang paling mendasar adalah pada sistem kelistrikannya yaitu sistem satu fasa dan tiga fasa. Sehingga sebuah transformator tiga fasa bias dihubung bintang, segitiga, atau zig – zag.

Transformator tiga fasa banyak digunakan pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik karena pertimbangan ekonomis. Transformator tiga fasa banyak sekali mengurangi beraat dan lebar kerangka, sehingga harganya dapat dikurangi bila dibandingkan dengan penggabungan tiga buah transformator satu fasa dengan “rating” daya yang sama. Tetapi, transformator tiga fasa juga mempunyai kekurangan, diantaranya bila salah satu fasa mengalami kerusakan, maka seluruh transformator harus dipindahkan (diganti), tetapi bila transformator

terdiri dari tiga buah transformator satu fasa, bila salah satu fasa transformator mengalami kerusakan, sistem masih bias dioperasikan dengan sistem “ open delta”.



(a) Tampak Depan      (b) Tampak samping      (c) Tampak Atas

**Gambar 2.11. Trafo Distribusi 3 fasa kelas 20 kV**

Keterangan gambar diatas adalah :

1. Tanki minyak
2. Radiator
3. Roda
4. Tap changer
5. Lubang untuk tarikan
6. Penyumbat keluaran minyak
7. Bushing tegangan tinggi
8. Bushing tegangan rendah
9. Konservator

10. Indikator minyak
11. Katup pengaman
12. Terminal pembumian
13. Name plate
14. Merek trafo

### 2.5.2. Transformator Distribusi

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator step- down 20KV/400V. Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380 V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada rak tegangan rendah dibuat di atas 380 V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380 V. Pada kumparan primer akan mengalir arus jika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, sehingga pada inti transformator yang terbuat dari bahan ferromagnet akan terbentuk sejumlah garis-garis gaya magnet (fluks =  $\phi$ ).

Karena arus yang mengalir merupakan arus bolak-balik, maka fluks yang terbentuk pada inti akan mempunyai arah dan jumlah yang berubah- ubah. Jika arus yang mengalir berbentuk sinusoidal, maka fluks yang terjadi akan berbentuk sinusoidal pula. Karena fluks tersebut mengalir melalui inti yang mana pada inti tersebut terdapat belitan primer dan sekunder, maka pada belitan primer dan sekunder tersebut akan timbul ggl (gaya gerak listrik) induksi, tetapi arah ggl induksi primer berlawanan dengan arah ggl induksi sekunder. Sedangkan frekuensi masing-masing tegangan sama dengan frekuensi sumbernya. Hubungan transformasi tegangan adalah sebagai berikut:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana,

- E1 = ggl induksi di sisi primer (volt)
- E2 = ggl induksi di sisi sekunder (volt)
- N1 = jumlah belitan sisi primer (turn)
- N2 = jumlah belitan sisi sekunder (turn)

$a$  = perbandingan transformasi

## 2.6 Konstruksi Transformator

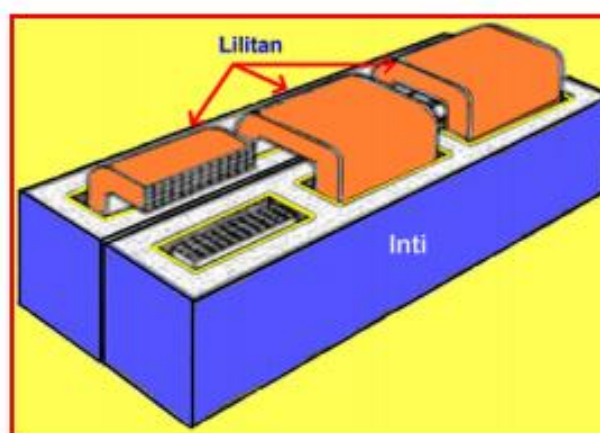
Secara umum sebuah transformator tiga fasa mempunyai konstruksi hampir sama, yang membedakannya adalah alat bantu dan sistem pengamannya, tergantung pada letak pemasangan, sistem pendinginan, pengoperasian, fungsi dan pemakaiannya.

### 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 Kumparan Transformator

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



**Gambar 2.12 Inti dan Kumparan pada Transformator tipe cangkang**

### 2.6.3 Minyak Transformator

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

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

- a) Mempunyai kekuatan isolasi (*Dielectric Strength*).
- b) Penyalur panas yang baik dengan berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel kecil dapat mengendap dengan cepat.
- c) Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- d) Tidak nyala yang tinggi, tidak mudah menguap.
- e) 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:

- a) Untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan.
- b) 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 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Untuk dapat menghitung pembebanan transformator dapat menggunakan rumus dibawah ini :

$$\text{KVA Beban} = (I_R \cdot V_{R-N}) + (I_S \cdot V_{S-N}) + (I_T \cdot V_{T-N}) \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

$I_R$  = Arus fasa R

$V_{r-n}$  = Tegangan fasa R terhadap Netral

$I_S$  = Arus fasa S

$V_{s-n}$  = Tegangan fasa S terhadap Netral

$I_T$  = Arus fasa T

$V_{t-n}$  = Tegangan fasa T terhadap Netral

$$\% \text{Beban Trafo} = \frac{\text{KVA Beban}}{\text{KVA Trafo}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

### 2.8 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Transformator<sup>4</sup>

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata – rata, maka koefisien a, b, dan c diperoleh dengan:

$$a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}}$$

$$b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}}$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}}$$

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \frac{(|a-1|+|b-1|+|c-1|)}{3} \times 100\% \dots \dots \dots (2.5)$$

## 2.9 Pengukuran Arus dan Tegangan pada Gardu Distribusi<sup>3</sup>

Pengukuran adalah suatu perbandingan antara suatu besaran dengan besaran lain yang sejenis secara eksperimen dan salah satu besaran dianggap sebagai standar. Dalam pengukuran listrik terjadi juga perbandingan, dalam perbandingan ini digunakan suatu alat bantu (alat ukur). Alat ukur ini sudah dikalibrasi, sehingga dalam pengukuran listrikpun telah terjadi perbandingan. Sebagai contoh pengukuran tegangan pada jaringan tenaga listrik dalam hal ini tegangan yang akan diukur diperbandingkan dengan penunjukkan dari Voltmeter.

Pada pengukuran listrik dapat dibedakan dua hal, yaitu Pengukuran besaran listrik, seperti arus (*Ampere*), tegangan (*Volt*), daya listrik (*Watt*), dan pengukuran besaran nonlistrik, seperti suhu, kuat cahaya, tekanan, dll.

---

<sup>4</sup>Dahlan. Moh, Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi, Kudus, Hal 4.

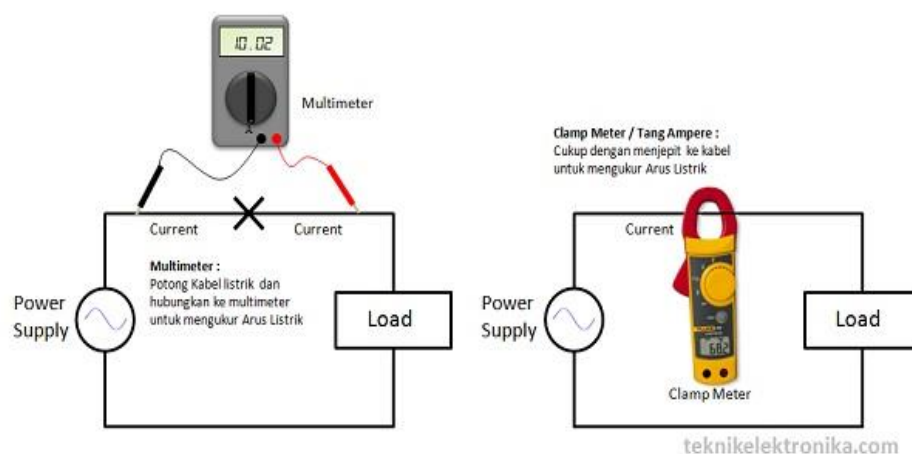
<sup>3</sup>Arsul Sani Manda. 2021. *Analisa Pemerataan Beban Pada Gardu distribusi LC 0066 Penyulang Matahari PT. PLN (Persero) ULP Pagar Alam*: Politeknik Negeri Sriwijaya

Dalam melakukan pengukuran, pertama harus ditentukan cara pengukurannya. Cara dan pelaksanaan pengukuran itu dipilih sedemikian rupa sehingga alat ukur yang ada dapat digunakan dan diperoleh hasil dengan ketelitian seperti yang dikehendaki. Juga cara itu harus semudah mungkin, sehingga diperoleh efisiensi setinggi-tingginya. Jika cara pengukuran dan alatnya sudah ditentukan, penggunaannya harus dengan baik pula. Setiap alat harus diketahui dan diyakini cara kerjanya. Dan harus diketahui pula apakah alat-alat yang akan digunakan dalam keadaan baik dan mempunyai kelas ketelitian sesuai dengan keperluannya. Jadi jelas pada pengukuran listrik ada tiga unsur penting yang perlu diperhatikan yaitu cara pengukuran, orang yang melakukan pengukuran, alat yang digunakan.

Lalu, pada pengukuran arus dan tegangan di sebuah transformator, pengukuran dapat terlaksana dengan menggunakan langkah kerja yang tepat dan alat yang digunakan adalah alat yang sesuai kebutuhan.

### 2.9.1 Alat Ukur yang Digunakan

Alat ukur tang ampere atau dikenal juga dengan sebutan Ampere meter jepit bekerja dengan prinsip, yang sama dengan inti primer sebuah transformator arus. Dengan alat ukur tang ampere ini, pengukuran arus dapat dilakukan tanpa memutuskan suplai listrik terlebih dahulu. Konstruksi dari alat ukur ampere meter ini diperlihatkan pada gambar 2.4 sebagai berikut:



**Gambar 2.13. Penggunaan Ampere Meter**

### 2.9.2. Langkah-langkah *Meeting* Gardu Distribusi

Pengukuran arus dan tegangan atau disebut *meting* merupakan suatu kegiatan yang dilakukan untuk mengetahui besar arus dan tegangan pada setiap jurusan di gardu distribusi, serta pada rel busbar utamanya.

Untuk mengukur besarnya arus listrik ada berbagai macam Alat yang digunakan, tetapi alat yang paling mudah untuk digunakan yaitu memakai tang ampere karena kita tidak perlu melakukan pengkabelan dan fleksibel bisa dipakai dimana saja.

Adapun langkah-langkah penggunaan tang ampere, yaitu sebagai berikut:

1. Posisikan *switch* pada posisi Amperemeter (A), karena selain untuk mengukur arus, tang ampere juga bias dipakai untuk mengukur tahanan dan tegangan
2. *Adjust* tang ampere sehingga menunjukkan Angka nol
3. Pilih skala yang paling besar dulu, bila hasil pengukuran lebih kecil maka pindahkan ke skala yang lebih kecil untuk hasil pengukuran yang lebih akurat
4. Pilihlah jenis pengukuran yang kita lakukan, AC atau DC. Tapi, ada juga tang ampere yang hanya untuk mengukur AC saja, biasanya tang ampere jenis analog
5. Kalungkan tang ampere ke salah satu kabel. Hasil pengukuran akan terlihat
6. Tekan hold untuk menahan hasil pengukuran ini
7. Matikan posisi menahan, untuk melakukan pengukuran kembali

### 2.10 Penghantar

Penghantar dalam teknik elektro adalah zat yang dapat menghantarkan arus listrik, baik berupa zat padat, cair atau gas. Karena sifatnya yang konduktif maka disebut konduktor. Konduktor yang baik adalah yang memiliki tahanan jenis yang kecil. Pada umumnya logam bersifat konduktif. Emas, perak, tembaga, aluminium, zink, besi berturut-turut memiliki tahanan jenis semakin besar. Jadi

sebagai penghantar emas adalah sangat baik, tetapi karena sangat mahal harganya, maka secara ekonomis tembaga dan aluminium paling banyak digunakan.

Jenis konduktor untuk SUTM yang dipakai adalah AAAC (all aluminium alloy conductor), suatu campuran aluminium dengan silicium (0,4% - 0,7%), magnesium (0,3% - 0,35%) dan ferum (0,2% - 0,3%), mempunyai kekuatan yang lebih besar daripada aluminium murni, tetapi kapasitas arusnya lebih rendah.

Untuk SUTR dipakai kabel pilin udara (twisted cable) suatu kabel dengan inti AAAC berisolasi XLPE (*cross linked polyethylene*), dilengkapi kawat netral AAAC sebagai penggantung, dan dipilin.

### **2.11 Pengertian Beban<sup>2</sup>**

Beban adalah suatu sirkuit akhir pemanfaatan dari suatu jaringan tenaga listrik, yang berarti tempat terjadinya suatu perubahan energi dari energi listrik menjadi energi lainnya, seperti cahaya, panas, gerakan, magnet, dan sebagainya tetapi beban dapat pula berupa suatu sirkuit yang bukan pemanfaatan akhir dari suatu jaringan tenaga listrik, tetapi berupa jaringan listrik yang lebih kecil dan sederhana, seperti beban dari jaringan tegangan tinggi adalah suatu gardu induk, dimana gardu induk belum berupa sirkuit akhir dari pemanfaatan energi listrik. Untuk jaringan distribusi primer, bebannya adalah setiap transformator distribusi tetapi untuk pembahasan laporan ini bebannya adalah sirkuit akhir dari pemanfaatan, karena pembahasan dititik beratkan pada transformator distribusi jenis tiang portal. Beban dari transformator distribusi ini berupa feeder – feeder satu fasa tegangan rendah yang secara langsung dapat dihubungkan dengan sirkuit akhir pemanfaatan seperti rumah tinggal, pertokoan, dan industri kecil.

---

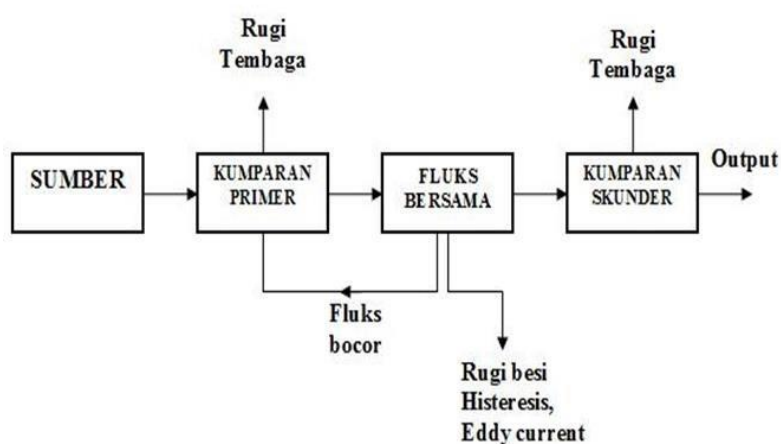
<sup>2</sup>Arizqi, Muhammad Ikhwan. 2021. *Analisis Pemerataan Beban Pada Gardu Distribusi PA0282 Penyulang Surabaya Terhadap Losses Trafo Di Wilayah Kerja PT. PLN (Persero) ULP Rivai Palembang* : Politeknik Negeri Sriwijaya

Beban merupakan sirkit akhir pemanfaatan dari jaringan tenaga listrik yang harus dilayani oleh sumber tenaga listrik tersebut untuk diubah menjadi bentuk energi lain. Oleh karena itu, pelayanan terhadap beban haruslah terjamin kontinuitasnya untuk menjaga kehandalan dari sistem tenaga listrik. Untuk mencapai keadaan yang handal tersebut, suatu sistem tenaga listrik haruslah dapat mengatasi semua gangguan yang terjadi tanpa melakukan pemadaman terhadap bebannya.

## 2.12 Rugi – rugi Transformator

Rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun sekunder. Untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan- perubahan fluks magnet. Rugi histerisis merupakan rugi tenaga yang disebabkan oleh fluks magnet bolak-balik pada inti.

Gambar di bawah ini adalah diagram rugi-rugi pada transformator:



*Gambar 2.14. Blok Diagram Rugi – rugi Transformator*

### 2.12.1 Rugi Tembaga (PCu)<sup>11</sup>

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga dapat sebagai:

$$P_{cu} = I^2R \dots \dots \dots (2.6)$$

Karena arus beban berubah – ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

**Tabel 2.1 Nilai Rugi – rugi Transformator Distribusi<sup>8</sup>**

KVA Rating	Rugi Besi (Watt)	Rugi Tembaga (Watt)
25	115	700
50	190	1100
100	320	1750
160	400	2000
200	550	2850
315	770	3900
400	930	4600
680	1300	6500
800	1950	10200
1000	2300	12100
1250	2700	15000
1600	3300	18100

<sup>11</sup>Zuhal. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung : Penerbit ITB

<sup>8</sup>PT. PLN (Persero). 1997. *Standar Perusahaan Listrik Negara 50*. Jakarta : PT. PLN (Persero)



### 2.13 Rugi Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator

Sebagai akibat dari beban yang tidak seimbang tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator (fasa R, S, dan T) mengalirlah arus di penghantar netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral transformator ini menyebabkan rugi-rugi. Untuk menghitung rugi-rugi pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 + R_N \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana

$P_N$  = rugi rugi pada penghantar netral transformator (watt)

$I_N$  = arus pada penghantar netral (A)

$R_N$  = tahanan penghantar netral

### 2.14 Ketidakseimbangan Beban<sup>10</sup>

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

1. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan tidak seimbang tidak terpenuhi.

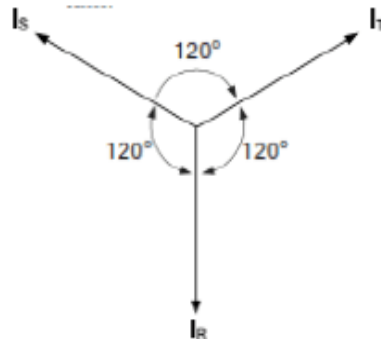
Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3, yaitu:

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

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar vektor diagram arus berikut ini.

---

<sup>10</sup>Saputra Erfin. 2015. *Analisa Pemerataan Beban Gardu Distribusi U 046 PT. PLN (Persero) Rayon Ampera Palembang*: Politeknik Negeri Sriwijaya



**Gambar 2.15. Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang**

Gambar 2.15 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Masing-masing nilai pada ketiga vektor arus diatas apabila dijumlahkan akan bernilai nol. Keadaan ini tidak akan memunculkan arus netral (\$I\_N\$).

Dimana arus yang berlaku pada hubungan Y adalah

$$I_A = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -\theta$$

$$I_B = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta$$

$$I_C = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -240^\circ - \theta$$

Disubstitusikan ke persamaan :

$$I_N = I_A + I_B + I_C \dots\dots\dots(2.8)$$

$$= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta$$

$$= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ)$$

$$= I [\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta -$$

$$240^\circ) + jI [\sin(-\theta) + (-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)]$$

Dengan menggunakan persamaan identitas trigonometri :

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$$

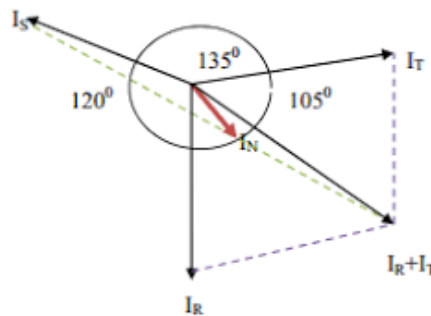
$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$$

Masukkan identitas trigonometri ke persamaan :

$$I_N = I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta)\cos 120^\circ + \sin(-\theta)\sin 120^\circ + \cos(-\theta)\cos 240^\circ + \sin(-\theta)\sin 240^\circ] + jI[\sin(-\theta) + \sin(-\theta)\cos 120^\circ - \cos(-\theta)\sin 120^\circ + \sin(-\theta)\cos 240^\circ - \cos(-\theta)\sin 240^\circ]$$

$$I_N = I\left[\cos(-\theta) - \frac{1}{2}\cos(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(-\theta) - \frac{1}{2}\cos(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(-\theta)\right] + jI\left[\sin(-\theta) - \frac{1}{2}\sin(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(-\theta) - \frac{1}{2}\sin(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(-\theta)\right]$$

$$I_N = 0 \text{ A (pada saat keadaan beban seimbang)}$$



**Gambar 2.16. Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang**

Sedangkan pada gambar 2.16 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Terdapat perbedaan nilai pada masing-masing fasa, dan apabila dijumlahkan tidak bernilai nol. Selain itu, sudut antar fasanya juga tidak membentuk  $120^\circ$ . Keadaan ini akan memunculkan arus netral ( $I_N$ ) dan besar dari arus netral ini berpengaruh pada besar dari faktor ketidakseimbangannya. Dalam sistem tenaga tiga fasa ideal, arus netral adalah jumlah vektor dari arus tiga fasa, harus sama dengan nol. Di bawah kondisi operasi normal, beberapa ketidakseimbangan fasa terjadi mengakibatkan arus netral kecil.