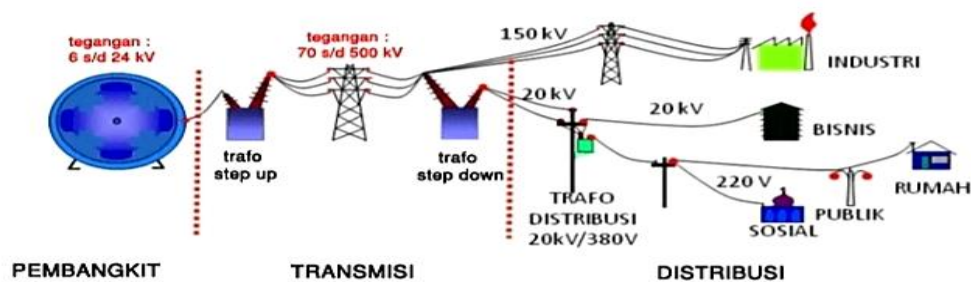


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Distribusi Listrik<sup>4</sup>

Sistem Distribusi adalah semua bagian yang termasuk dalam peralatan sistem tenaga listrik yang mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk hingga ke APP pada konsumen melalui sistem jaringan tegangan menengah dan sistem jaringan tegangan rendah. Sistem tenaga listrik dikatakan sebagai kumpulan atau gabungan yang terdiri dari komponen – komponen listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban yang berhubungan dan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu sistem. Dalam kelistrikan, seringkali timbul persoalan – persoalan teknis, dimana tenaga listrik pada umumnya dibangkitkan pada tempat – tempat tertentu yang jauh dari kumpulan pelanggan, sedangkan pemakai tenaga listrik atau pelanggan tenaga listrik tersebar di segala penjuru tempat. Dengan demikian maka penyaluran tenaga listrik dari pusat tenaga listrik sampai ketempat pelanggan memerlukan berbagai penanganan teknis. Pada jaringan distribusi biasanya menggunakan tegangan yang lebih rendah dari tegangan saluran transmisi.



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Listrik

<sup>4</sup> Suhadi, dkk, 2008, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1 dan 3*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan



Hal ini karena daya yang didistribusikan oleh masing – masing jaringan distribusi biasanya relatif kecil dibanding dengan daya yang disalurkan saluran transmisi, dan juga menyesuaikan dengan tegangan pelanggan atau pengguna energi listrik. Level tegangan jaringan distribusi yang digunakan ada dua macam, yaitu 20kV untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan 230 V untuk jaringan tegangan rendah (JTR). Dengan demikian diperlukan gardu induk yang berisi trafo penurun tegangan untuk menurunkan tegangan dari saluran transmisi ke tegangan distribusi 20kV. Diperlukan juga trafo distribusi untuk menurunkan tegangan dari 20kV ke 230 V sesuai tegangan pelanggan.

Pada jaringan distribusi terdapat beberapa struktur jaringan yaitu Jaringan Distribusi Radial, Jaringan Distribusi Lingkaran (*loop*), Jaringan Distribusi Spindle, Jaringan Distribusi Kluster. Sistem distribusi tenaga listrik dapat diartikan sebagai sistem sarana penyampaian tenaga listrik dari sumber ke pusat beban. Sementara untuk sistem instalasi listrik adalah cara pemasangan atau penyaluran tenaga listrik atau peralatan listrik untuk semua barang yang memerlukan tenaga listrik, dimana pemasangannya harus sesuai dengan peraturan yang telah ditetapkan didalam Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL). Secara umum, baik buruknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik terutama adalah ditinjau dari hal – hal berikut ini:

1. Kontinuitas pelayanan yang baik, tidak sering terjadi pemutusan, baik karena gangguan maupun hal – hal yang direncanakan.
2. Kualitas daya yang baik, antara lain meliputi Kapasitas daya yang memenuhi, tegangan yang selalu konstan dan nominal, frekuensi yang selalu konstan (untuk sistem AC).
3. Perluasan dan penyebaran daerah beban yang dilayani seimbang.
4. Fleksibel dalam pengembangan dan perluasan daerah beban.
5. Kondisi dan situasi Lingkungan
6. Pertimbangan Ekonomis

### 2.1.1.1. Pembagian Jaringan Distribusi Tenaga Listrik<sup>3</sup>

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, lalu diadakan pembagian serta pembatasan-pembatasan seperti :

- Daerah I :Bagian pembangkitan (*Generation*)
- Daerah II :Bagian penyaluran (*Transmission*), bertegangan tinggi (*HV, UHV, EHV*)
- Daerah III :Bagian distribusi primer, bertegangan menengah (6 atau 20kV).
- Daerah IV :(Di dalam bangunan pada beban / konsumen), Instalasi bertegangan rendah.

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahuibahwa porsi materi Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat.

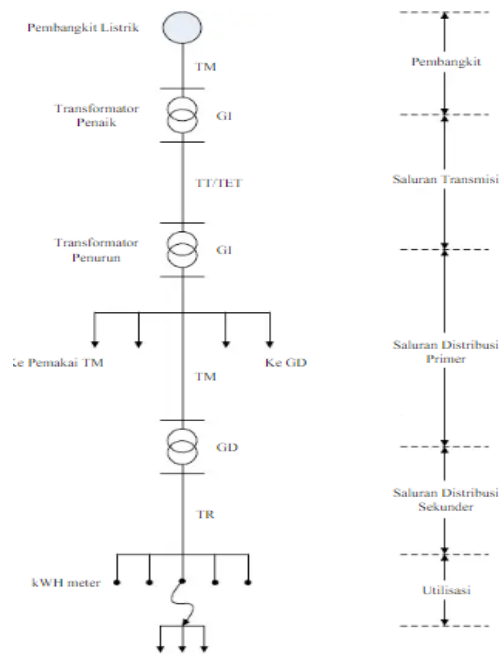
Dengan demikian ruang lingkup Jaringan Distribusi adalah:

- a. SUTM, terdiri dari : Tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan perlengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.
- b. SKTM, terdiri dari : Kabel tanah, indoor dan outdoor termination, batu bata, pasir dan lain-lain.
- c. Gardu trafo, terdiri dari : Transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat trafo, *LV panel*, pipa-pipa pelindung, *Arrester*, kabel-kabel, *transformer band*, peralatan *grounding*, dan lain-lain.
- d. SUTR dan SKTR terdiri dari : sama dengan perlengkapan/ material pada SUTM dan SKTM. Yang membedakan hanya dimensinya.

Adapun dibawah ini gambar *single line diagram* sederhana dari sistem tenaga listrik beserta gambar dan penjelasannya :

---

<sup>3</sup> PT. PLN PERSERO. 2010. *Buku 1 : Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta.



Gambar 2.2 *Single line diagram* sistem distribusi tenaga listrik

Pada gambar 2.2 terlihat bahwa sistem distribusi tenaga listrik itu dimulai dari pembangkit 150 kV dan terakhir pada instalasi pelanggan TR 230 /400 kV. Dalam pendistribusian listrik tegangan dari pembangkit mengalami penurunan dari 150 kV – 230 V, hal ini dilakukan untuk menghindari kehilangan daya terlalu banyak ketika proses transmisi sebab jarak antara pembangkit dengan pelanggan TR itu sangatlah jauh,serta adanya material kabel atau kawat yang dikhawatirkan menyerap daya terlalu banyak. Tegangan juga perlu diturunkan terlebih dahulu sebelum disalurkan ke pelanggan TR ini dilakukan demi keamanan agar peralatan elektronik tidak rusak karena tegangan yang sangat tinggi.

### 2.1.2 Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik<sup>1</sup>

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

#### 1. Menurut Nilai Tegangannya

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi terbagi menjadi dua, yaitu :

<sup>1</sup> PT. PLN PERSERO. 2010. *Buku 5 : Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik*. Jakarta.



a. Jaringan Distribusi Primer

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) ini terletak antara gardu induk dengan gardu pembagi, yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan yang terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 6 kV, 10 kV, dan 20 kV (sesuai standar PLN).

b. Jaringan Distribusi Sekunder

Sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR), merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu pembagi (gardu distribusi) ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 127/220 V untuk sistem lama, dan 220/380 V untuk sistem baru, serta 440/550 V untuk keperluan industri.

2. Menurut bentuk tegangannya:

- a. Saluran Distribusi DC (Direct Current) menggunakan sistem tegangan searah.
- b. Saluran Distribusi AC (Alternating Current) menggunakan sistem tegangan bolak – balik.

3. Menurut jenis/tipe konduktornya:

- a. Saluran udara, dipasang pada udara terbuka dengan bantuan tiang dan perlengkapannya, dibedakan atas:
  - Saluran kawat udara, bila konduktornya terbungkus isolasi pembungkus.
  - Saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.
- b. Saluran bawah tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (*ground cable*).
- c. Saluran bawah laut, dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (*Submarine cable*).

4. Menurut susunan (konfigurasi) salurannya:

- a. Saluran konfigurasi Horizontal : Bila saluran fasa terhadap fasa yang lain / terhadap netral, atau saluran positif terhadap negatif (pada sistem DC) membentuk garis horizontal.



- b. Saluran konfigurasi Vertikal : Bila saluran – saluran tersebut membentuk garis vertikal.
- c. Saluran konfigurasi Delta : Bila kedudukan saluran satu sama lain membentuk suatu segitiga (delta).

#### 5. Menurut susunan rangkaiannya

Dari uraian diatas telah disinggung bahwa sistem distribusi dibedakan menjadi dua yaitu Primer dan Sekunder.

##### a. Jaringan sistem distribusi primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk (GI) distribusi ke pusat – 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 direntangkan sepanjang daerah yang akan disuplai tenaga listrik sampai pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian distribusi primer.

- a. Jaringan distribusi radial
- b. Jaringan distribusi ring (*Loop*)
- c. Jaringan distribusi jaring-jaring (*NET*)
- d. Jaringan distribusi *spindle*
- e. Saluran radial interkoneksi

#### 6. Menurut ukuran tegangannya

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi terbagi menjadi dua, yaitu :

##### a. Jaringan Distribusi Primer

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) ini terletak antara gardu induk dengan gardu pembagi, yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan yang terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah 6 kV, 10 kV, dan 20 kV (sesuai standar PLN).

##### b. Jaringan Distribusi Sekunder

Sistem jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi



tegangan rendah (JDTR), merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu-gardu pembagi (gardu distribusi) ke pusat-pusat beban (konsumen tenaga listrik). Besarnya standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini adalah 127/220 V untuk sistem lama, dan 220/380 V untuk sistem baru, serta 440/550 V untuk keperluan industri.

### 2.1.3. Macam-Macam Saluran Jaringan Distribusi

Sesuai dengan fungsinya, maka suatu sistem jaringan distribusi dengan bagian-bagiannya dapat merupakan bentuk, susunan dan macam yang berbeda-beda disesuaikan dengan tujuan tertentu. Pelaksanaan pemasangan jaringan distribusi dibagi menjadi dua macam yaitu hantaran udara dan hantaran bawah tanah.

#### a. Jaringan hantaran udara (*Over Head Line*)

Hantaran udara sering juga disebut saluran udara merupakan penghantar energi listrik, tegangan menengah ataupun tegangan rendah, yang dipasang di atas tiang listrik di luar bangunan. Tiang-tiang jaringan distribusi primer atau sekunder biasanya dapat berupa tiang kayu, besi ataupun beton tetapi biasanya untuk jaringan distribusi yang paling banyak digunakan adalah tiang dari jenis besi karena memberikan keuntungan antara lain :

1. Tiang tidak mudah terpengaruh oleh keadaan alam sehingga usia pemakaian lebih panjang bila dibandingkan dengan tiang kayu.
2. Tiang besi juga dapat langsung sebagai elektroda pentanahan. Dalam pengaturan rugi tegangan dalam hantaran udara terdapat suatu Standar yang menentukan rugi tegangan yaitu SPLN No 72 tahun 1987 (rugi tegangan pada JTM yang diperbolehkan) antara lain :
  - 2 % dari tegangan kerja sistem yang menggunakan sistem spindel dan gugus
  - 5 % dari tegangan kerja bagi sistem yang menggunakan sistem radial diatas tanah dan sistem simpul
  - Rugi tegangan pada transformator distribusi diperbolehkan 3 % dari tegangan kerja.

Bahan yang banyak dipakai untuk kawat penghantar terdiri atas 7 jenis :

- AAAC (*All Alloy Aluminium Conductor*) yaitu penghantar yang terbuat



dari campuran aluminium, tidak berisolasi dan tidak berinti. Kabel jenis ini mempunyai ukuran diameter antara 1,50 – 4,50 mm dengan bentuk fisiknya berurat banyak.

- AAC (*All Aluminium Conductor*) yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium
- ACSR (*aluminium conductor, steel-reinforced*) yaitu kawat penghantar aluminium berinti baja
- ACAR (*aluminium conductor alloy reinforced*) yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

b. Jaringan hantaran bawah tanah (Under Ground Line)

Untuk daerah kerapatan beban tinggi, seperti pusat kota ataupun pusat industri pemasangan jaringan hantaran udara akan mengganggu baik dari segi keamanan maupun dari segi keindahan. Bahan untuk inti kabel dan kabel tanah pada umumnya terdiri atas tembaga dan aluminium. Sebagai isolasi dipergunakan bahan-bahan berupa kertas serta perlindungan mekanikal berupa tinta hitam. Untuk tegangan menengah sering juga dipakai minyak sebagai isolasi. Jenis hantaran bawah tanah ini biasanya menggunakan jenis :

- NYFGbY : Kabel ini berisolasi dan berselubung PVC berperisai kawat baja atau aluminium untuk tegangan kerja sampai dengan 0,6/1 kV.

Dengan adanya pelindung kawat pita baja, kabel ini memungkinkan ditanam langsung ke dalam tanah tanpa pelindung tambahan.

## 2.2 Gardu Distribusi<sup>2</sup>

Gardu distribusi merupakan suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Tegangan Menengah (PHB-TM) dan Perlengkapan Hubung bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik Tegangan Menengah (TM 20kV) maupun Tegangan Rendah (TR 230/400 V). Jenis perlengkapan hubung bagi

<sup>2</sup> PT. PLN PERSERO. 2010. *Buku 4 : Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Jakarta.





tegangan menengah pada gardu distribusi berbeda sesuai dengan jenis konstruksi gardunya. Secara garis besar gardu distribusi dibedakan menjadi tiga jenis yaitu (1) Jenis pemasangannya, (2) Jenis konstruksinya dan (3) Jenis penggunaannya.

Menurut jenis Pemasangannya ialah gardu pasang luar dan gardu pasang dalam. Menurut jenis konstruksinya ialah gardu beton, gardu tiang dan gardu kios. Dan menurut jenis penggunaannya ialah gardu pelanggan umum dan gardu pelanggan khusus. Terdapat juga jenis gardu distribusi yang memiliki fungsi berbeda dengan gardu distribusi pada umumnya yaitu gardu hubung.

Konstruksi gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan pemda setempat. Kontruksi yang digunakan difungsikan untuk menunjang dan mencapai kontinuitas pendistribusian pelayanan yang terjamin, mutu yang tinggi dan menjalin keselamatan bagi manusia.

#### 2.2.1. Macam-macam Gardu Distribusi

##### 1. Gardu Beton

Yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya terbuat dari beton (campuran pasir, batu dan semen). Gardu beton termasuk `gardu jenis pemasangan dalam, karena pada umumnya semua peralatan peng-hubung/pemutus, pemisah dan trafo distribusi terletak di dalam bangunan beton. Dalam pembangunannya semua peralatan tersebut di disain dan diinstalasi di lokasi sesuai dengan ukuran bangunan gardu.



Gambar 2.3 Gardu Beton

##### 2. Gardu Hubung

Gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (Remote Terminal Unit). Gardu Hubung juga dapat dilengkapi sarana pemutus tenaga pembatas beban pelanggan khusus Tegangan Menengah.



Konstruksi Gardu Hubung sama dengan Gardu Distribusi tipe beton. Pada ruang dalam Gardu Hubung dapat dilengkapi dengan ruang untuk Gardu Distribusi yang terpisah dan ruang untuk sarana pelayanan kontrol jarak jauh. Ruang untuk sarana pelayanan kontrol jarak jauh dapat berada pada ruang yang sama dengan ruang Gardu Hubung, namun terpisah dengan ruang Gardu Distribusinya.



Gambar 2.4 Gardu Hubung

### 3. Gardu Portal

Gardu listrik tipe pasang luar dengan memakai konstruksi dua tiang atau lebih. Tempat kedudukan transformator sekurang - kurangnya 3 meter di atas tanah dan ditambahkan platform sebagai fasilitas kemudahan kerja teknisi operasi dan pemeliharaan. Umumnya konfigurasi Gardu portal 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



### a. Komponen Komponen Pada Gardu Portal

#### - Komponen Utama Bagian Atas Gardu



Gambar 2.6 Komponen Atas Gardu Portal

#### 1. *Lightning Arrester (LA)*

Berfungsi sebagai alat proteksi atau pengamanan trafo distribusi dari tegangan lebih akibat petir, khususnya gardu pasang luar.

#### 2. Fused Cut Out (FCO)

Berfungsi sebagai proteksi atau pengamanan lebur. FCO ini berfungsi sebagai alat pelindung transformator dari arus hubung singkat dan sebagai alat untuk membebaskan sumber tegangan jika dilakukan pemeliharaan. Proteksi pada FCO ini dipasang dalam bentuk Fuse Link yang dapat disesuaikan dengan nominal daya trafo yang terpasang.

#### 3. *Wiring* Gardu

Berupa pengawatan atau kawat penghubung untuk menghubungkan tegangan dari jaringan SUTM, *Lightning Arrester (LA)*, dan Fused Cut Out (FCO) ke Transformator Distribusi.

#### 4. Tiang

Tiang yang dipergunakan untuk gardu distribusi ini bisa berupa tiang beton maupun tiang besi, Biasanya menggunakan jenis tiang TM KOOL.

#### 5. Transformator Distribusi

Komponen utama dari gardu distribusi untuk menurunkan tegangan dari sisi TM (Tegangan Menengah) 20 kV menjadi tegangan TR 230/400 V. Trafo yang digunakan berkapasitas 50 kVA - 400 kVA sesuai dengan kebutuhan.



## 6. Rangka Gardu

Pada dasarnya berfungsi untuk menempatkan Trafo distribusi dan komponen lainnya pada Tiang. Rangka Gardu ini biasanya sudah berupa satu Set lengkap.

## 7. Pipa Jurusan

Berfungsi untuk menempatkan kabel naik atau kabel jurusan dari PHB-TR ke jaringan SUTR di bagian atas.

- Komponen Utama Bagian Bawah Gardu.



Gambar 2.7 Komponen PHB TR

1. Saklar utama

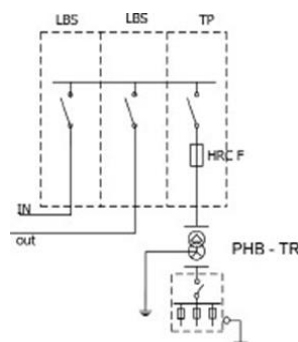
2. Rel Tembaga atau Rel Jurusan

3. *NH Fuse*

4. Kabel naik ( kabel penghubung dari PHB TR menuju JTR)

5. Kabel turun ( kabel penghubung dari Trafo ke PHB TR ).

- Konstruksi Gardu Portal



Gambar 2.8 Diagram satu garis gardu portal



Gardu Portal adalah gardu listrik tipe terbuka (*out-door*) dengan memakai konstruksi dua tiang atau lebih. Tempat kedudukan transformator sekurang – kurangnya 3 meter di atas tanah dan ditambahkan platform sebagai fasilitas kemudahan kerja teknisi operasi dan pemeliharaan. Transformator dipasang pada bagian atas dan lemari panel / PHB-TR pada bagian bawah.

1. Gardu Portal 50 kVA – 100 kVA, 2 jurusan TR

PHB-TR gardu ini dirancang untuk 2 Jurusan Jaringan Tegangan Rendah.

2. Gardu Portal 160 kVA – 400 kVA, 4 jurusan TR

PHB-TR gardu ini dirancang untuk 4 Jurusan Jaringan Tegangan Rendah.

3. Gardu Portal Pelanggan Khusus

Gardu Portal untuk pelanggan khusus Tegangan Rendah dan Tegangan Menengah.

4. Gardu Cantol

Gardu Cantol adalah tipe gardu distribusi jenis pasangan luar (*outdoor*) yang terpasang dengan konstruksi 1 tiang dan memiliki transformator yang terpasang jenis 3 fasa atau 1 fasa dengan tipe CSP (*Completely Self Protected Transformer*) yaitu peralatan switching dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator. Perlengkapan perlindungan tambahan LA (*Lightning Arrester*) dipasang terpisah dengan penghantar hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (tipe NH,NT) sebagai pengaman jurusan.



Gambar 2.9 Gardu Cantol



### 5. Gardu Kios/ Gardu *Metal Clad* ( MC )

Yaitu Gardu Distribusi Tenaga Listrik yang konstruksinya terbuat dari bahan konstruksi baja, fiberglass atau kombinasinya. Gardu ini dibangun di lokasi yang tidak memungkinkan didirikan Gardu Beton atau Gardu tembok. Karena sifatnya Mobilitas, maka kapasitas Transformator yang terpasang terbatas yakni maksimum 400 kVA



Gambar 2.10 Gardu Metal Clad (MC)

## 2.3. Transformator

### 2.3.1. Pengertian Transformator

Transformator atau trafo adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan terpilihnya tenaga yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pendistribusian listrik jarak jauh.

### 2.3.2. Jenis - jenis Transformator

Jenis – jenis transformator terdiri dari, yaitu :

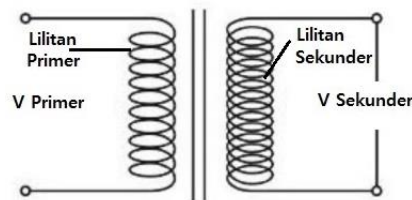
#### 1. Transformator *Step Up*

Transformator step up adalah alat yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik bolak – balik (AC) sehingga tegangan yang dihasilkan lebih besar dari



tegangan sumber. Tegangan sumber disebut dengan tegangan primer ( $V_P$ ), sedangkan tegangan yang dihasilkan disebut dengan tegangan sekunder ( $V_S$ ). Jadi, transformator step up akan menghasilkan tegangan sekunder yang lebih besar daripada tegangan primer.

Kemampuan transformator step up untuk menaikkan tegangan didapat dari perbandingan antara jumlah lilitan primer dan lilitan sekundernya. Lilitan primer adalah lilitan yang terhubung dengan arus dan tegangan sumber (tegangan primer), sedangkan lilitan sekunder adalah lilitan tempat keluarnya arus dengan tegangan sekunder. Pada transformator step up, jumlah lilitan sekundernya lebih banyak daripada jumlah lilitan primernya.



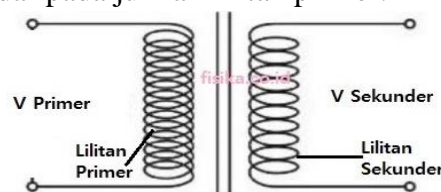
Gambar 2.11 Transformator *step up*

Transformator step up dapat dijumpai penggunaannya pada jaringan – jaringan pembangkit listrik untuk menaikkan tegangan pada jalur transmisi. Cara kerja transformator step up mengikuti cara kerja transformator pada umumnya, yaitu berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dalam hukum Faraday. Induksi elektromagnetik menghasilkan tegangan atau beda potensial yang disebut gaya gerak listrik induksi. Jadi, ketika lilitan primer dihubungkan dengan tegangan input berupa arus bolak – balik (AC), arus yang mengalir pada lilitan primer akan menginduksi inti besi transformator. Selanjutnya, di dalam inti besi akan mengalir flux magnet dan akan menginduksi lilitan sekunder sehingga pada ujung lilitan sekunder akan terdapat tegangan (GGL induksi) sesuai dengan hukum Faraday. Oleh karena GGL induksi berbanding lurus dengan jumlah lilitan, maka GGL induksi pada bagian sekunder lebih besar daripada GGL induksi bagian primer. Itulah sebabnya mengapa sehingga transformator step up bisa menghasilkan tegangan sekunder yang lebih besar daripada tegangan primer.



## 2. Transformator *Step Down*

Transformator step down adalah komponen yang digunakan untuk menurunkan tegangan listrik bolak-balik (AC) sehingga menghasilkan tegangan yang lebih kecil daripada tegangan sumber. Tegangan sumber disebut dengan tegangan primer (VP), sedangkan tegangan yang dihasilkan disebut dengan tegangan sekunder (VS). Dengan kata lain, transformator step down adalah trafo yang menghasilkan tegangan sekunder lebih kecil daripada tegangan primer. Kemampuan transformator step down untuk menurunkan tegangan didapat dari perbandingan antara jumlah lilitan primer dan lilitan sekundernya. Lilitan primer adalah lilitan yang terhubung dengan arus dan tegangan sumber (tegangan primer), sedangkan lilitan sekunder adalah lilitan tempat keluarnya arus dan tegangan sekunder. Transformator step down memiliki jumlah lilitan sekunder lebih sedikit daripada jumlah lilitan primer.



Gambar 2.11 Transformator *step down*

Perbandingan jumlah lilitan inilah yang menjadi pembeda dengan transformator step up, di mana lilitan sekundernya lebih banyak daripada lilitan primernya. Transformator step down banyak dijumpai penggunaannya dalam kehidupan sehari-hari, contoh yang paling dekat adalah charger handphone atau laptop dan pada gardu distribusi.

Cara kerja transformator step down mengikuti cara kerja transformator pada umumnya, yaitu berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dalam hukum Faraday. Induksi elektromagnetik menghasilkan tegangan atau beda potensial yang disebut gaya gerak listrik induksi. Jadi, ketika lilitan primer dihubungkan dengan tegangan input berupa arus bolak-balik, arus yang mengalir pada lilitan primer akan menginduksi inti besi transformator. Selanjutnya, di dalam inti besi akan mengalir flux magnet dan flux magnet ini akan menginduksi lilitan sekunder sehingga pada ujung lilitan sekunder akan terdapat tegangan (GGL induksi) sesuai dengan hukum Faraday. Oleh karena





GGL induksi berbanding lurus dengan jumlah lilitan, maka GGL induksi pada bagian sekunder lebih kecil daripada GGL induksi pada bagian primer. Itulah sebabnya mengapa sehingga transformator step down bisa menghasilkan tegangan sekunder yang lebih kecil daripada tegangan primer.

### 2.3.3. Bagian-Bagian Transformator

Bagian-bagian pada transformator terdiri dari :

#### 1. Inti Besi

Inti besi tersebut berfungsi untuk membangkitkan fluks yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo, sedang bahan ini terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis, hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy (eddy current).

#### 2. Kumparan dan Inti Besi

Sebuah trafo terdiri dari kumparan dan inti besi. Biasanya terdapat 2 buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kedua kumparan ini tidak berhubungan secara fisik tetapi dihubungkan oleh medan magnet.

#### 3. Pendingin trafo

Perubahan temperatur akibat perubahan beban maka seluruh komponen trafo akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada trafo dilakukan pendingin pada trafo. Sedangkan cara pendinginan trafo terdapat dua macam yaitu : alamiah/natural (Onan) dan paksa/tekanan (Onaf). Pada pendinginan alamiah (natural) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk trafo yang besar minyak pada trafo disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip trafo terdapat fan/kipas yang bekerjanya sesuai setting temperaturnya

#### 4. Tap changer trafo

Tap changer adalah suatu alat perubah pembanding transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. Tap changer hanya dapat dioperasikan pada keadaan trafo tidak bertegangan atau



disebut dengan “*Off Load Tap Changer*” serta dilakukan secara manual.

#### 2.3.4. Prinsip Kerja Transformator

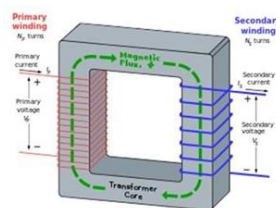
Transformator terdiri atas dua kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka *fluks* bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibatnya adanya *fluks* di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya *fluks* magnet di kumparan *sekunder*, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian *sekunder* dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

$$e = \frac{N d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan : e = gaya gerak listrik

N = jumlah lilitan

$d\Phi / dt$  = perubahan flux magnet (weber/sec)



Gambar 2.13 Prinsip kerja transformator

Dari persamaan tersebut diketahui bahwa tegangan induksi yang terbangkitkan pada kumparan trafo berbanding lurus dengan jumlah lilitan kumparan pada inti trafo. Selain itu, tegangan induksi juga dapat terbangkitkan apabila ada perubahan fluks terhadap waktu, jika fluks yang mengalir adalah konstan maka tegangan induksi tidak dapat terbangkitkan. Setiap trafo juga memiliki suatu besaran yang dinamakan perbandingan transformasi (a), untuk menunjukkan perbandingan



lilitan atau perubahan level tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder yang ditransformasikan pada trafo tersebut. Berikut perumusannya: Daya Transformator bila ditinjau dari sisi tegangan primer dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :      S       : daya transformator (kVA)  
                   V       : tegangan primer transformator (kV)  
                   I       : Arus (A)

### 2.3.5. Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator<sup>6</sup>

Daya Transformator bila ditinjau dari sisi tegangan primer dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \frac{\sqrt{3}}{V \times I} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :      S       : daya transformator (kVA)  
                   V       : tegangan primer transformator (kV)  
                   I       : Arus (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (full load) dapat menggunakan rumus :

$$I_{fl} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :      I<sub>fl</sub> : arus beban penuh (A)  
                   S : daya transformator (kVA)  
                   V : tegangan sisi sekunder trafo (V)

### 2.3.6. Pembebanan Transformator

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. Beban merupakan sirkuit akhir pemanfaatan dari jaringan tenaga listrik yang harus dilayani oleh sumber tenaga listrik tersebut untuk diubah menjadi bentuk energi

<sup>6</sup> Esmaul, Didik Eksan. 2020. Analisa Pembebanan Transformator Di PT. Indoprima Gemilang Surabaya. Jurnal Teknik Elektro



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. Menurut PT. PLN (Persero), transformator distribusi diusahakan agar tidak dibebani lebih dari 80% untuk keadaan overload dan dibawah 40 % untuk keadaan underload. Untuk menghitung besar persentase pembebanan transformator dapat menggunakan rumus berikut :

$$\% \text{ pembebanan trafo} : = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{fl}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :           Persentase pembebanan trafo : persen (%)

$I_{\text{rata-rata}}$  : arus rata-rata fasa R,S,T (A)

$I_{fl}$  : beban penuh (A)

Untuk mendapatkan nilai arus rata-rata, dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana           :            $I_{\text{rata-rata}}$  = beban rata – rata (A)

$I_R$  = beban fasa R (A)

$I_S$  = beban fasa S (A)

$I_T$  = beban fasa T (A).

## 2.4 Ketidakseimbangan Beban<sup>8</sup>

### 2.4.1. Pengertian Ketidakseimbangan Beban

Masalah yang sering timbul pada sistem tiga fasa yaitu beban tidak seimbang, biasanya terjadi karena beban pada salah satu fasa lebih mendominasi dari ketiga fasa tersebut. Jika terjadi ketidakseimbangan beban pada tiga fasa, maka akan mengakibatkan mengalirnya arus pada kawat netral dan perbedaan sudut beban per fasa nya tidak sama dengan 120°. Yang dimaksud dengan keadaan

<sup>8</sup> Purwati, Novia (2016). *Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Di sisi Sekunder Transformator Distribusi 20kV Di PT PLN (Persero) UP3 Serpong*. FAKULTAS KETENAGALISTRIKAN DAN ENERGI TERBARUKAN INSTITUT TEKNOLOGI – PLN.

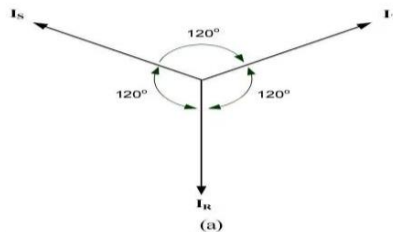


beban seimbang adalah suatu keadaan dimana :

- Ketiga vektor arus/tegangan sama besar.
- Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.

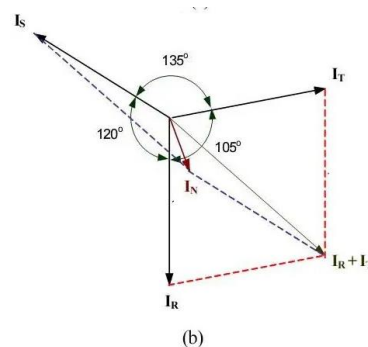
Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga, yaitu:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.



Gambar 2.14 Vektor Arus Seimbang

Gambar (2.11) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R, I_S, I_T$ ) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ). Sedangkan pada gambar.



Gambar 2.12 Vektor Arus Tidak Seimbang

Gambar (2.12) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R, I_S, I_T$ ) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.



Menurut standard IEC ketidakseimbangan beban yang diijinkan adalah 5% dengan tingginya ketidakseimbangan beban berpengaruh terhadap besarnya arus netral, dimana arus netral yang besar mengakibatkan losses bertambah dan kualitas tenaga yang rendah sehingga berpengaruh terhadap kualitas sistem tenaga listrik .

#### 2.4.2 Penyebab terjadinya ketidaksimetrisan sistem 3 fasa

1. Tidak simetris tegangan sejak pada sumbernya: Tegangan tak simetris pada output generator 3 fasa bisa saja terjadi (walaupun jarang) karena kesalahan teknis pada ketiga berkas kumparan dayanya (jumlah lilitan atau resistansi).
2. Tidak simetris tegangan pada salurannya: disebabkan oleh beberapa faktor :
  - a. Konfigurasi ketiga saluran secara total total tidak simetris, sehingga total kapasitansinya tidak simetris. Keadaan demikian dapat terjadi pada penyaluran jarak jauh dan bertegangan tinggi, dimana jarak rata-rata masing-masing saluran fasa terhadap tanah tidak sama.
  - b. Resistansi saluran tidak sama karena jenis bahan konduktor yang berbeda
  - c. Resistansi saluran tidak sama karena ukuran konduktor tidak sama
  - d. Resistansi saluran tidak sama karena jarak antara masing-masing saluran fasa dengan beban tidak sama

3. Tidak simetris pada resistansi bebannya:

Kondisi tak simetris pada tegangan sisi terima akibat tidak simetrisnya beban ini adalah suatu hal yang paling sering terjadi dalam praktek, antara lain oleh adanya sambungan-sambungan di luar perhitungan dan perencanaan. Upaya teknis memang perlu dilakukan, agar diperoleh keadaan pembebanan yang simetris. Pada sistem 3 fasa yang menggunakan saluran netral (baca saluran nol), dalam keadaan beban simetris maka arus yang lewat saluran nol adalah benar-benar nol (netral), tetapi bila terjadi keadaan tak simetris, maka sebagian arus (berupa arus resultan) akan lewat saluran netral ini, sehingga saluran tersebut menjadi tidak netral lagi.

4. Tidak sama besar faktor daya dari bebannya:



Keadaan demikian bisa terjadi, misalnya bila sistem 3 fasa dibebani seperti berikut:

- Fasa R dibebani (1 fasa) beban resistif murni
- Fasa S dibebani motor 1 fasa dengan p.f. = 0,8 mengikut.
- Fasa T dibebani motor 1 fasa dengan p.f. = 0,6 mengikut.
- Fasa RST dibebani motor 3 fasa dengan p.f. = 0,8 mengikut.

Dengan pembebanan tersebut berarti arus beban akan tidak simetris.

#### 2.4.3 Akibat dari Ketidaseimbangan Beban<sup>7</sup>

Sebagai akibat dari pembebanan yang tidak seimbang pada trafo maka akan menimbulkan rugi-rugi (losses) energi diantaranya

##### 1. Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral

Arus Netral pada sistem distribusi merupakan arus yang mengalir pada penghantar netral pada sistem tiga fasa empat kawat. Munculnya arus netral dapat disebabkan karena ketidakseimbangan beban dan juga karena adanya arus harmonisa sebagai akibat banyaknya penggunaan beban nonlinier. Rugi ini terjadi karena ada arus yang lumayan cukup besar mengalir penghantar netral sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T). Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan losses (rugi-rugi). Jadi untuk beban seimbang arus netral sama dengan nol. Sistem 3 fasa 4 kawat yang terhubung bintang, karena adanya ketidakseimbangan beban maka, akan ada arus yang mengalir pada penghantar netralnya. Pada keadaan tak seimbang terdapat komponen urutan nol pada penghantar netralnya. Arus netral yang tinggi dapat mempengaruhi sistem, contohnya akan menyebabkan panas yang berlebih pada transformator maupun pada komponen – komponen gardu distribusi, serta menurunnya kualitas daya yang akan diterima oleh pelanggan.

<sup>7</sup> Fikri, Ahmat (2019). *Analisa Pengaruh Ketidakeimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Penghantar Pada Trafo Distribusi 1.427 PT. PLN (PERSERO) WS2JB Cabang Palembang. Rayon Demang. Universitas Sriwijaya.*



## 2. Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Grounding

Ketidakseimbangan beban juga mengakibatkan adanya arus yang mengalir pada penghantar grounding (pentanahan).

### 2.4.4. Menentukan Besaran Ketidakseimbangan Beban<sup>5</sup>

Dengan menggunakan koefisien ketidakseimbangan beban yaitu  $a=b=c=1$ , maka beban rata – rata adalah arus fasa dalam keadaan seimbang. Jadi untuk mengetahui berapa besar ketidakseimbangan beban digunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}} \text{ maka : } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$I_S = b \times I_{\text{rata-rata}} \text{ maka : } b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$I_T = c \times I_{\text{rata-rata}} \text{ maka : } c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} \dots\dots\dots (2.12)$$

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

Dimana :  $I_{\text{rata-rata}}$  = Beban rata – rata

$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}}$  = Koefisien a

$I_S = b \times I_{\text{rata-rata}}$  = Koefisien b

$I_T = c \times I_{\text{rata-rata}}$  = Koefisien c

$I_{\text{ketidakseimbangan}}$  = Beban tidak seimbang

Setelah mendapatkan nilai koefisien a, b dan c maka selanjutnya adalah dengan menghitung persentase ketidakseimbangan dengan menggunakan persamaan (2.13). Setelah itu akan didapatkan berapa persentase ketidakseimbangan beban.

<sup>5</sup> Arash, Muhammad (2021). *Perhitungan Ketidakseimbangan Beban dan Penyeimbangan Beban Transformator Distribusi*. Politeknik Negeri Bengkalis – Riau.