



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik<sup>1</sup>

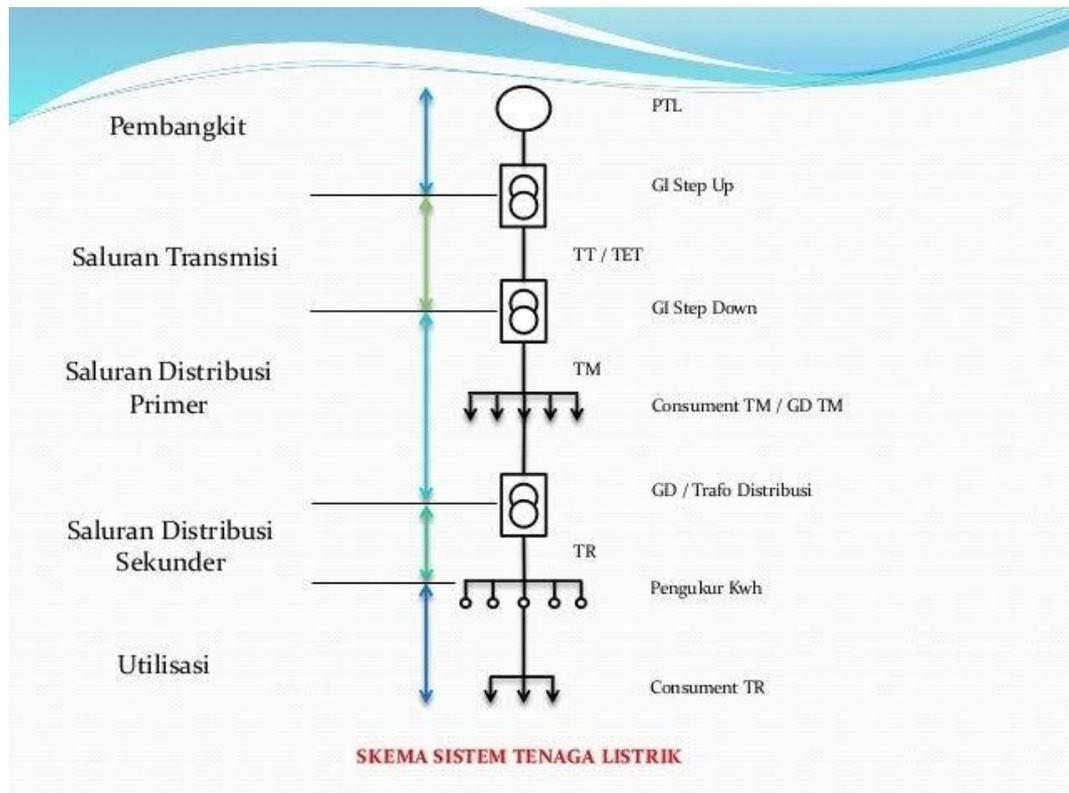
Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk menggunakan transformator *step-up* menjadi 70 kV, 154 kV, 220kV 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 ( $I^2R$ ). 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, yang kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi menurunkan tegangannya menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo *step-up*. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini 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. Oleh karena itu, pada daerah-daerah pusat beban, tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo *step-down*. Dalam hal ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan

---

<sup>1</sup> Suhadi dik. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1. Hal. 11



**Gambar 2.1** Gambar Skema Sistem Tenaga Listrik<sup>2</sup>

Keterangan:

PTL	= Pembangkit Tenaga Listrik	GI	= Gardu Induk
TT	= Tegangan Tinggi	GD	= Gardu Distribusi
TET	= Tegangan Ekstra Tinggi	PP	= <i>Power Plan</i>
TM	= Tegangan Menengah	GID	= Gardu Induk Distribusi
TR	= Tegangan Rendah		

Baik atau tidaknya sesuatu sistem distribusi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah regulasi tegangan, kontinuitas penyaluran, efisiensi, dan harga sistem. Oleh karena itu, suatu sistem distribusi harus memiliki regulasi tegangan yang tidak terlalu besar, gangguan pada pelayanan yang tidak terlalu lama, serta biaya sistem yang tidak terlalu mahal.

<sup>2</sup> Abdul Kadir. 2000. Distribusi dan Utilitasi Tenaga Listrik. Hal 5



### 1.1.1 Sistem jaringan distribusi primer

Sistem jaringan distribusi primer atau sering disebut jaringan distribusi tegangan menengah ini terletak antara gardu induk dengan gardu distribusi (gardu pembagi), yang memiliki tegangan sistem lebih tinggi dari tegangan terpakai untuk konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini adalah tegangan sistem diatas 1000V sampai 35000V

### 2.1.2 Sistem 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 industry. Besarnya tegangan maksimum yang diizinkan adalah 3 sampai 4 % lebih besar dari tegangan nominalnya. Penetapan ini sebanding dengan besarnya nilai tegangan jatuh (*drop voltage*) yang telah ditetapkan berdasarkan PUIL 661 F.1, bahwa rugi-rugi daya pada suatu jaringan adalah 15 %. Dengan adanya pembatasan tersebut stabilitas penyaluran daya ke pusat-pusat beban tidak terganggu.

## 1.2 Konfigurasi Sistem Distribusi <sup>3</sup>

Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai konsep

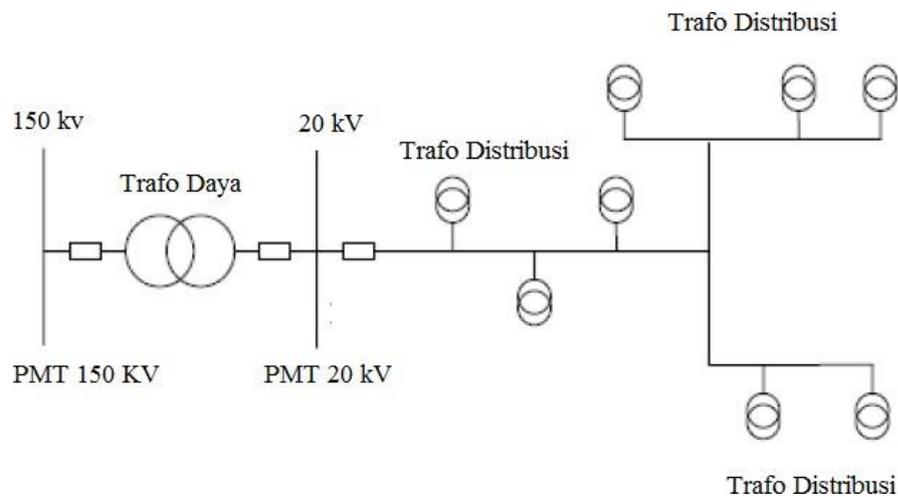
### 2.2.1 Jaringan radial

Yaitu jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga listrik, jika terjadi gangguan akan terjadi "*black-out*" atau padam pada bagian yang tidak dapat di pasok

---

<sup>3</sup> PT. PLN (PERSERO). 2010. Buku 1 Kriteria Desain Engineering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Bab 4 hal 3-7.

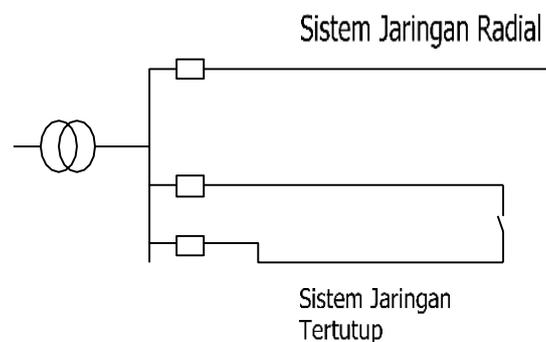
<sup>3</sup> Abdul Kadir. 2000. Distribusi dan Utilitasi Tenaga Listrik. Hal 5



**Gambar 2.2** Skema Saluran Sistem Radial

### 2.2.2 Jaringan bentuk tertutup

Yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari



**Gambar 2.3** Pola Jaringan Distribusi Dasar.

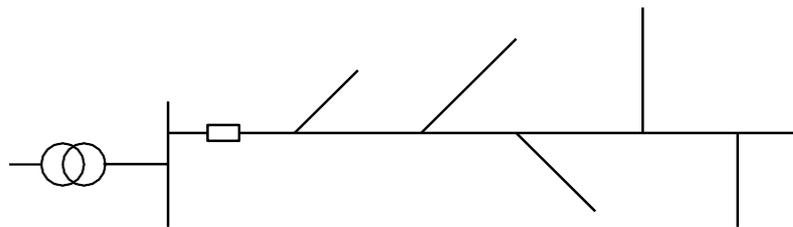
Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaanya sebagai berikut:

#### a. Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish Bone*)

Konfigurasi fishbone ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah



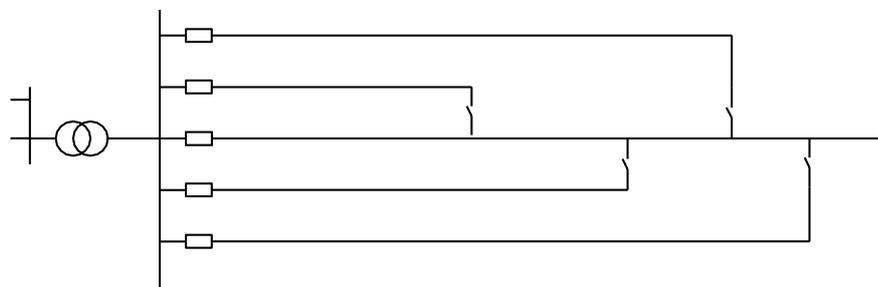
[*Pole Top Switch (PTS)*, *Air Break Switch (ABSW)*] dengan koordinasi relai atau dengan system SCADA. Pemutus balik otomatis PBO (*Automatic Recloser*) dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (*Automatic Sectionalizer*) pada pencabangan.



**Gambar 2.4** Konfigurasi Tulang Ikan (*Fishbone*).

**b. Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)**

Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem tertutup, namun beroperasi radial (*Radial Open Loop*). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.



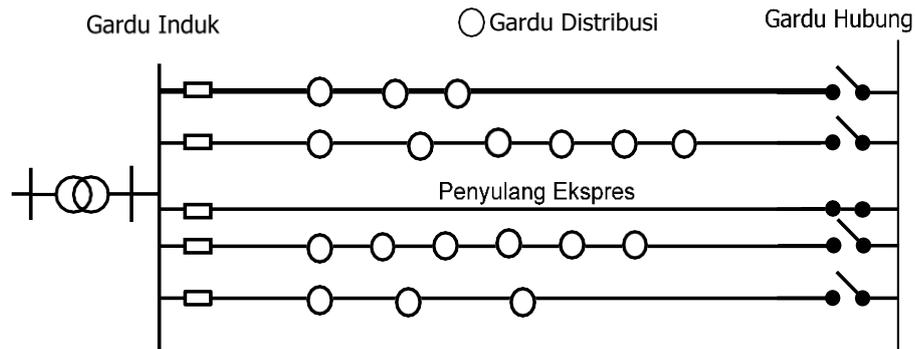
**Gambar 2.5** Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*).

**c. Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)**

Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu penyulang cadangan (*standby* atau *express feeder*) dan penyulang operasi (*working feeder*). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai back-up supply jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep *Spindel* jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan



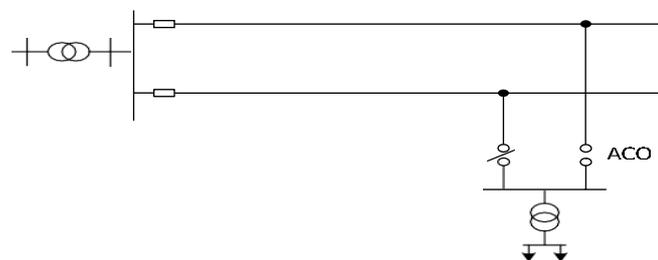
konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).



**Gambar 2.6** Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*).

#### d. Konfigurasi Fork

Konfigurasi ini memungkinkan 1(satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (*Short Break Time*). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu sangat singkat dengan menggunakan fasilitas *Automatic Change Over Switch (ACOS)*. Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan *Tee- Off (TO)* dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi.



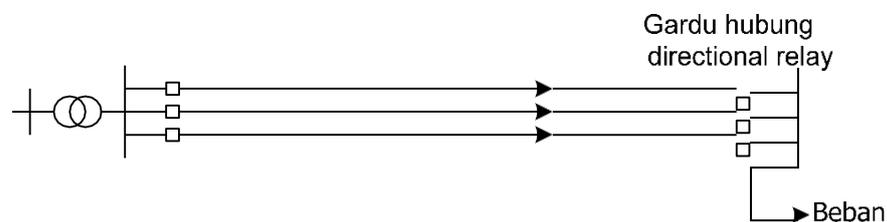
**Gambar 2.7** Konfigurasi Fork.



### e. Konfigurasi Spot load (Parallel Spot Configuration)

Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi.

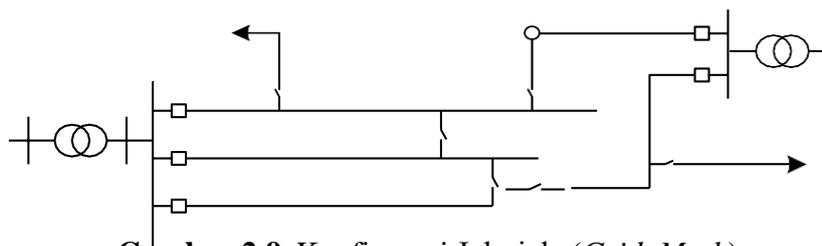
Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (*Directional Relay*) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).



Gambar 2.8 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*).

### f. Konfigurasi Jala-Jala (Grid, Mesh)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus.



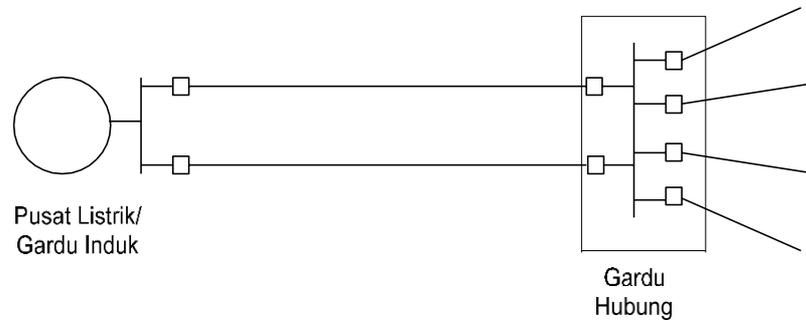
Gambar 2.9 Konfigurasi Jala-jala (*Grid, Mesh*).

### g. Konfigurasi lain-lain

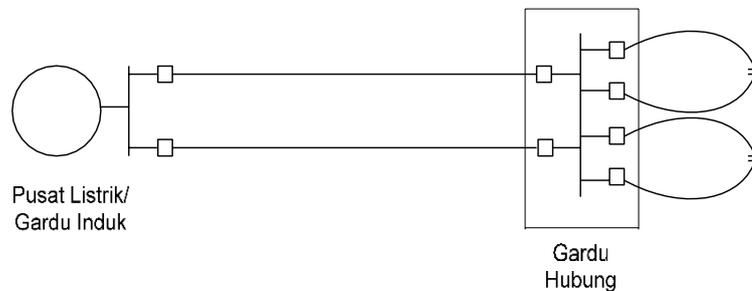
Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana diatas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif model model struktur jaringan. Struktur Garpu dan Bunga dipakai jika pusat beban berada jauh dari pusat listrik/Gardu Induk. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) berfungsi sebagai pemasok, Gardu Hubung sebagai



Gardu Pembagi, Pemutus Tenaga sebagai pengaman dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah pada JTM yang berawal dari Gardu Hubung.

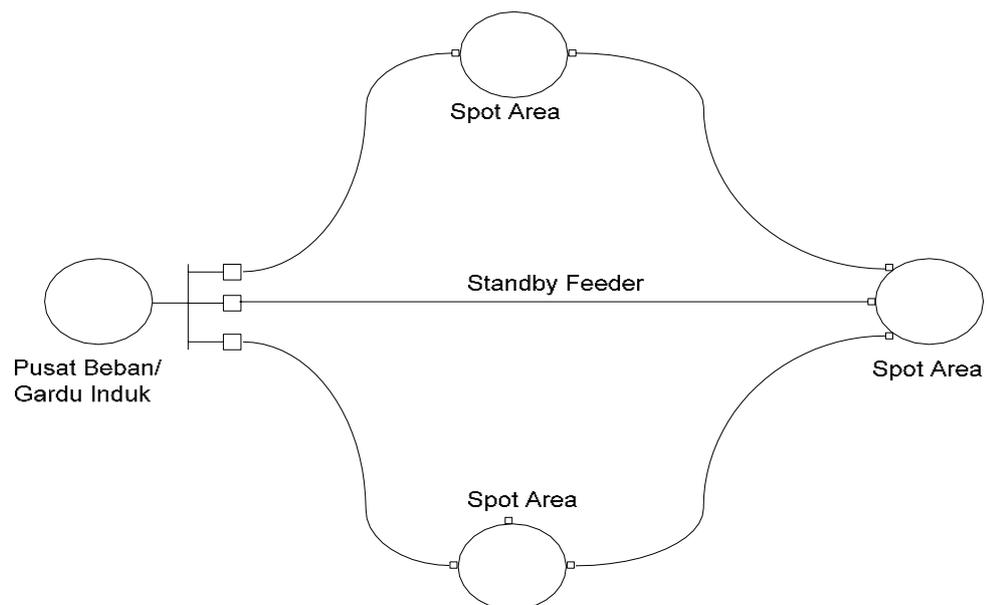


**Gambar 2.10** Konfigurasi Struktur Garpu.



**Gambar 2.11** Konfigurasi Struktur Bunga.

Struktur rantai pada gambar 2.12 dipakai pada suatu Kawasan yang luas dengan pusat-pusat beban yang berjauhan satu sama lain



**Gambar 2.12** Konfigurasi Struktur Rantai.



### 2.3 Pengertian Gardu Distribusi<sup>4</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 220/400V). Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemda setempat.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas:

- a. **Jenis Pemasangannya:**
  1. Gardu pasangan luar: Gardu Portal, Gardu Cantol
  2. Gardu pasangan dalam: Gardu Beton, Gardu Kios
- b. **Jenis Konstruksinya:**
  1. Gardu Beton (bangunan sipil: batu, beton)
  2. Gardu Tiang: Gardu Portal dan Gardu Cantol
  3. Gardu Kios
- c. **Jenis Penggunaannya:**
  1. Gardu Pelanggan Umum
  2. 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.

---

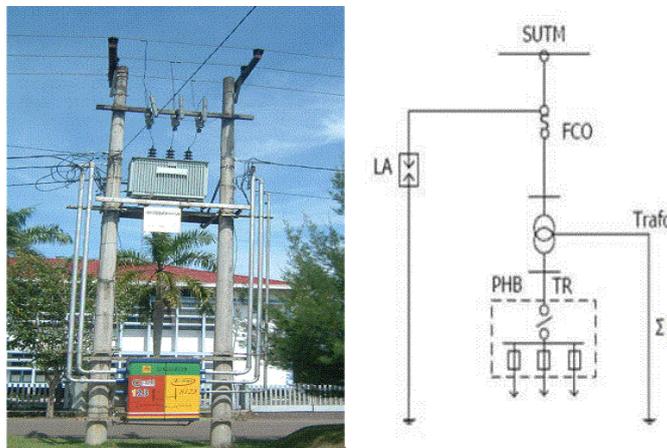
<sup>4</sup> PLN (Persero), 2010, Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik, Edisi ke-1, Jakarta Selatan.



## 2.4 Macam – macam Gardu Distribusi

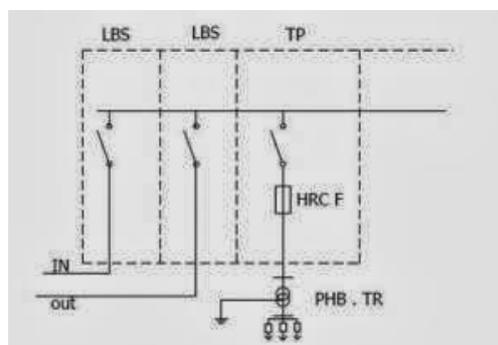
### 2.4.1 Gardu Portal

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 2.13** (a) Gardu Portal (b) Single Line Gardu 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.



**Gambar 2.14** Single Line Konfigurasi  $\pi$  Section Gardu Portal



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.

#### 2.4.2 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 LA (*Lightning Arrester*) dipasang terpisah dengan Penghantar pembumiannya yang dihubung langsung dengan badan transformator. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH, NT) sebagai pengaman jurusan. Semua Bagian Konduktif Terbuka (BKT) dan Bagian Konduktif Ekstra (BKE) dihubungkan dengan pembumian sisi Tegangan Rendah.



**Gambar 2.15** Gardu Tipe Cantol



### 2.4.3 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 (*masonrywall building*). Konstruksi ini dimaksudkan untuk pemenuhan persyaratan terbaik bagi keselamatan ketenagalistrikan.



**Gambar 2.16** Gardu Beton

### 2.4.4 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.

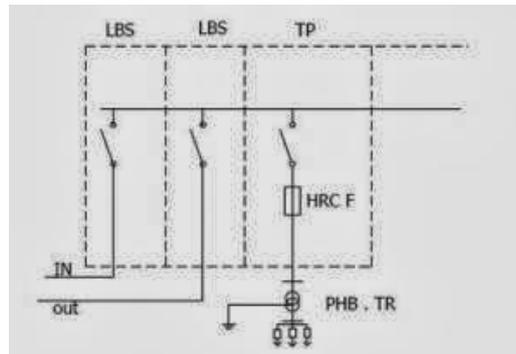


**Gambar 2.17** Gardu Kios



### 2.4.5 Gardu Pelanggan Umum

Umumnya konfigurasi peralatan Gardu Pelanggan Umum adalah  $\pi$  section, sama halnya seperti dengan Gardu Tiang yang dicatu dari SKTM.



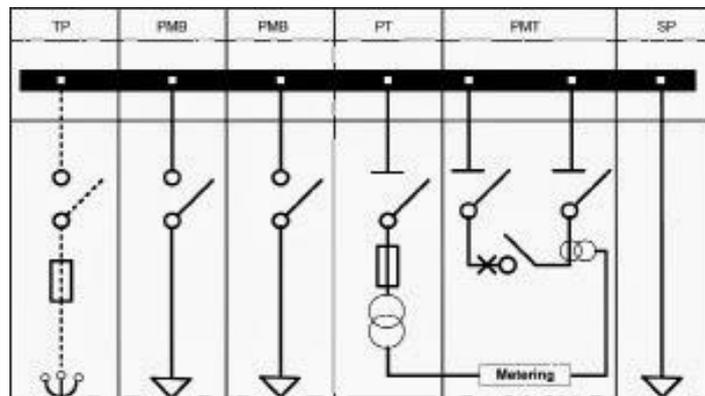
**Gambar 2.18** Single Line konfigurasi  $\pi$  section Gardu Pelanggan Umum

Karena keterbatasan lokasi dan pertimbangan keandalan yang dibutuhkan, dapat saja konfigurasi gardu berupa T section dengan catu daya disuplai PHB-TM gardu terdekat yang sering disebut dengan Gardu Antena. Untuk tingkat keandalan yang dituntut lebih dari Gardu Pelanggan Umum biasa, maka gardu dipasok oleh SKTM lebih dari satu penyulang sehingga jumlah saklar hubung lebih dari satu dan dapat digerakan secara Otomatis (ACOS: *Automatic Change Over Switch*) atau secara *remote control*.

### 2.4.6 Gardu Pelanggan Khusus

Gardu ini dirancang dan dibangun untuk sambungan tenaga listrik bagi pelanggan berdaya besar. Selain komponen utama peralatan hubung dan proteksi, gardu ini di lengkapi dengan alat-alat ukur yang dipersyaratkan.

Untuk pelanggan dengan daya lebih dari 197 kVA, komponen utama gardu distribusi adalah peralatan PHB-TM, proteksi dan pengukuran Tegangan Menengah. Transformator penurun tegangan berada di sisi pelanggan atau diluar area kepemilikan dan tanggung jawab PT PLN (Persero). Pada umumnya, Gardu Pelanggan Khusus ini dapat juga dilengkapi dengan transformator untuk melayani pelanggan umum.



**Gambar 2.19** Single Line Gardu Pelanggan Khusus

## 2.5 Jenis – Jenis Penghantar Pada Sistem Jaringan Distribusi primer<sup>5</sup>

Jaringan distribusi SUTM 20 KV pada umumnya menggunakan jenis kawat yaitu saluran yang konduktornya tidak dilapisi isolasi sebagai pelindung luar (telanjang). Tipe demikian dipergunakan pada pemasangan luar yang diharapkan terbebas dari sentuhan misalnya untuk jenis kabel yaitu saluran yang konduktornya dilindungi (dibungkus) lapisan isolasi.

Bahan konduktornya yang paling populer digunakan adalah tembaga (*copper*) dan aluminium. Tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga. Untuk mempebesar kuat Tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*). Berbagai macam jenis penghantar aluminium yang ada yaitu sebagai berikut:

1. AAAC “*all-aluminium-alloy conductors*”, seluruhnya terbuat dari campuran aluminium
2. ACSR “*Aluminium conductors, steel-reinforced*”. Penghantar aluminium yang di perkuat baja

<sup>5</sup> Wiliam D. Stevenson, Jr. 1994. Analisa Sistem Tenaga Listrik. Hal. 37.



3. XLPE “*Cross-Linked Polyethylene*”. Penghantar isolasi menggunakan bahan-bahan sintesis seperti EPR (*Ethylene Propylene Rubbe*)

## 2.6 Daya Listrik<sup>6</sup>

Pengertian daya listrik adalah perkalian antara tegangan yang diberikan dengan hasil arus yang mengalir. Daya dikatakan positif, Ketika arus yang mengalir bernilai positif artinya arus mengalir dari sumber tegangan menuju rangkaian (transfer energi dari sumber ke rangkaian). Sedangkan, daya dikatakan negatif, Ketika arus yang mengalir bernilai negatif artinya arus mengalir dari rangkaian menuju sumber tegangan (transfer energi dari rangkaian ke sumber).

### 2.6.1 Daya Semu

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

Untuk 1 phasa yaitu:

$$S = V.I \dots\dots\dots (2.1)^7$$

Untuk 3 phasa yaitu:

$$|SI| = P2 + Q2 = 3VLIL \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana

S = Daya semu (V A)

P = Daya aktif (Watt)

Q = Daya reaktif (V ar)

V = Tegangan Fasa-Netral (Volt)

VL = Tegangan *Line-Line* (Volt)

I/IL = Arus Yang Mengalir Pada Penghantarn (Ampere)

<sup>6</sup> Ramadhani, Mohamad. 2008. Rangkaian Listrik, Hal. 269.

<sup>7</sup> Ir. Wahyudi Sarimun N.,MT. 2011. BUKU SAKU PELAYANAN TEKNIK. Hal. 25



### 2.6.2 Daya aktif

Daya aktif atau sering disebut juga dengan daya nyata adalah daya yang dipakai untuk menggerakkan berbagai macam peralatan mekanik. Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

Untuk 1 phasa:

$$P = V.I.\cos\theta \dots\dots\dots (2.3)$$

Untuk 3 phasa:

$$P = \sqrt{3} VLIL \cos\theta_p \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan Fasa-Netral (Volt)

VL = Tegangan Line-Line (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Ampere)

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

### 2.6.3 Daya reaktif

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini adalah hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya.

Untuk 1 phasa

$$Q = V.I.\sin\theta \dots\dots\dots (2.5)$$

Untuk 3 phasa

$$Q = 3VILI.\sin\theta_p \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

Q = Daya Reaktif (Var)



$V$  = Tegangan Fasa-Netral (Volt)

$V_L$  = Tegangan *Line-Line* (Volt)

$I$  = Arus (Amper)

$\sin \theta_p$  = Faktor Daya (tergantung nilai 0)

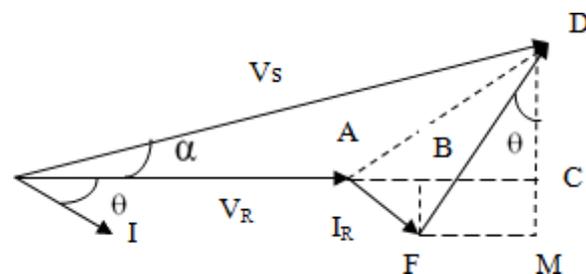
#### 2.6.4 Faktor Daya

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan semu/daya total (VA). Dengan kata lain dapat dikatakan merupakan cosinus sudut antar daya aktif dan daya/ daya total. Daya reaktif (Var) yang tinggi akan meningkatkan sudut dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Adapun rumus untuk menghitung faktor daya adalah:

$$Pf = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff} I_{eff} \cos \theta}{V_{eff} I_{eff}} = \cos \theta \dots \dots \dots (2.7)$$

#### 2.7 Jatuh Tegangan

Jatuh Tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik umumnya berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban, serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besar jatuh tegangan dapat dinyatakan dalam persen maupun dalam satuan volt. Berdasarkan SPLN No.72:1987, drop tegangan atau jatuh tegangan yang diperbolehkan untuk sistem distribusi tegangan menengah adalah sebesar 5%. Dalam suatu sistem distribusi, *drop* tegangan yang terjadi harus diupayakan sekecil-kecilnya agar tidak merugikan konsumen.



**Gambar 2.20** Diagram fasor saluran distribusi



Besarnya drop tegangan yang terjadi pada saluran tersebut dapat dirumuskan:

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \dots \dots \dots (2.8)$$

Berdasarkan penjelasan, maka besar persentase susut tegangan pada saluran tiga fasa dapat ditentukan dengan rumus:

$$\% V \text{ rugi} = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100\% \dots \dots \dots (2.9)$$

Sedangkan untuk besarnya susut tegangan untuk jaringan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta V(1\Phi) = (I \cdot R \cos \phi + I \cdot X \sin \phi) \dots \dots \dots (2.10)$$

$$\Delta V(3\Phi) = \sqrt{3} (I \cdot R \cos \phi + I \cdot X \sin \phi) \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan:

$\Delta V$ = Drop tegangan (V)	$I$ = Arus Saluran (A)
$V_s$ = Tegangan awal (V)	$\cos \phi$ = power factor
$V_r$ = Tegangan akhir (V)	$\sin \phi$ = sudut reaktif
$R$ = Resistansi saluran ( $\Omega$ )	
$X$ = Reaktansi saluran ( $\Omega$ )	

## 2.8 Rugi-Rugi Daya Dalam Jaringan

Dalam suatu sistem distribusi tenaga listrik, selalu diusahakan agar rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi sekecil-kecilnya. Hal ini dimaksudkan agar daya yang disalurkan ke konsumen tidak terlampau berkurang. Besar rugi daya pada saluran tiga fasa dapat dicari dengan persamaan:

$$P_Z = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \cdot LLF \cdot LD \dots \dots \dots (2.12)^8$$

Jika besar rugi daya diperoleh, maka besar daya yang diterima:

$$P_R = P - P_H \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana:

$P_Z$  = Rugi Daya pada saluran ( MW )

<sup>8</sup> Hadiyanto, Ahmad Rifqi. 2006. *Monitoring Susut Per Penyulang*. PT. PLN (Persero).



- PR = Besar daya yang diterima ( MW )  
 P = Besar daya yang disalurkan ( MW )  
 R = Tahanan Jaringan ( $\Omega$  / KM)  
 L = Panjang jaringan (KM)  
 I = Besar kuat arus pada beban (A)  
 LDF = Load Density Factor (0,333)  
 LLF = Loss Load Factor

LLF merupakan koefisien yang diperhitungkan dalam menghitung susut sebagai perbandingan antara rugi daya rata-rata terhadap rugi daya beban puncak. Nilai LLF dapat dicari dengan persamaan:

$$LLF = 0,3 LF + 0,7 LF^2 \dots\dots\dots(2.14)^9$$

Dimana:

LF = Load Factor sistem region

Maka besar nilai persentase (%) rugi daya adalah:

$$\Delta P = \frac{P_{total\ rugi}}{P} \times 100 \dots\dots\dots(2.15)$$

## 2.9 Parameter Saluran

Seluruh saluran yang menggunakan penghantar dari suatu sistem tenaga listrik memiliki sifat – sifat listrik sebagai parameter saluran, seperti resistansi, induktansi, kapasitansi, dan konduktansi. Oleh karena saluran distribusi memiliki saluran yang tidak begitu panjang (kurang dari 80 km) dan menggunakan tegangan tidak lebih besar dari 69 kV, maka kapasitansi dan konduktansi sangat kecil dan dapat diabaikan. Resistansi yang timbul pada saluran dihasilkan dari jenis penghantar yang memiliki tahanan jenis dan besar resistansi pada penghantar tergantung dari jenis material, luas penampang dan panjang saluran. Induktansi timbul dari efek medan magnet di sekitar penghantar jika pada penghantar terdapat arus yang mengalir. Parameter ini penting untuk pengembangan model saluran distribusi yang digunakan dalam analisa sistem tenaga.

<sup>9</sup> Ray, Subir. 2007. Electrical Power Systems. New Delhi: Prentice Hall Of India Private Limited.



### 2.9.1 Resistansi saluran

Resistansi adalah tahanan pada suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang dapat menyebabkan kerugian daya. Nilai tahanan suatu penghantar dapat ditentukan dari persamaan:

$$R = \rho l/A \dots\dots\dots (2.16)^{10}$$

Dimana:

$\rho$  = Tahanan jenis penghantar (  $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m)

$l$  = Panjang saluran (m)

$A$  = Luas penampang penghantar (mm<sup>2</sup>)

Kenaikan resistansi karena pembentukan lilitan diperkirakan mencapai 1% untuk penghantar dengan tiga serat dan 2% untuk penghantar dengan lilitan konsentris. Jika suhu dilukiskan pada sumbu tegak dan resistansi pada sumbu mendatar maka titik pertemuan perpanjangan garis dengan sumbu suhu dimana resistansinya sama dengan nol adalah suatu konstanta untuk bahan logam bersangkutan, maka tahanan searahnya dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\frac{Rt_2}{rt_1} = \frac{T_0+t_2}{T_0+t_1} \dots\dots\dots (2.17)^{11}$$

Dimana:

$Rt_2$  = Resistansi penghantar pada suhu  $t_1$  (temperatur sebelum operasi konduktor)

$Rt_1$  = Resistansi penghantar pada suhu  $t_2$  (temperatur operasi konduktor)

$t_1$  = Temperatur awal (°C)

$t_2$  = Temperatur akhir (°C)

$T_0$  = Konstanta yang ditentukan oleh grafik.

Nilai-nilai konstanta  $T_0$  adalah sebagai berikut:

$T_0$  = 234,5 untuk tembaga dengan konduktivitas 100%

$T_0$  = 241 untuk tembaga dengan konduktivitas 97,3%

$T_0$  = 228 untuk tembaga dengan konduktivitas 61%

### 2.9.2 Reaktansi saluran

<sup>10</sup> Hutaaruk, T.S. 1996, Transmisi Daya Listrik. Hal. 5.

<sup>11</sup> Hutaaruk, T.S 1996, Transmisi Daya Listrik. Hal. 6.



Untuk menentukan besarnya induktansi saluran pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$L = (0,5 + 4,6 \log \frac{D-r}{r}) \times 10^{-7} \text{ H/M} \dots\dots\dots (2.18)^{12}$$

Dimana D adalah jarak antara konduktor dan r adalah radius masing-masing konduktor tersebut. Bila letak konduktor tidak simetris, maka D pada persamaan diatas perlu diganti dengan:

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \dots\dots\dots (2.19)$$

Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan:

$$A = \pi r^2 \dots\dots\dots (2.20)$$

$$R = \frac{\bar{A}}{\pi} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dari persamaan 2.14 maka dapat dicari nilai reaktansi induktif saluran dengan menggunakan persamaan 2.17 dibawah ini:

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L \dots\dots\dots (2.22)^{13}$$

Dimana:

$X_L$  = Reaktansi induktif saluran ( $\Omega/\text{km}$ )

$2\pi$  = Sudut arus bolak balik

$F$  = Frekuensi sistem (50 Hz)

$L$  = Induktansi dari konduktor (H/km)

<sup>12</sup> Zuhail. 1995. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Gramedia. 1995. Hal.152

<sup>13</sup> B.I. Theraja. 1983. *Worked Examples in Electrical Technology*. Techouse. Hal. 236.