



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

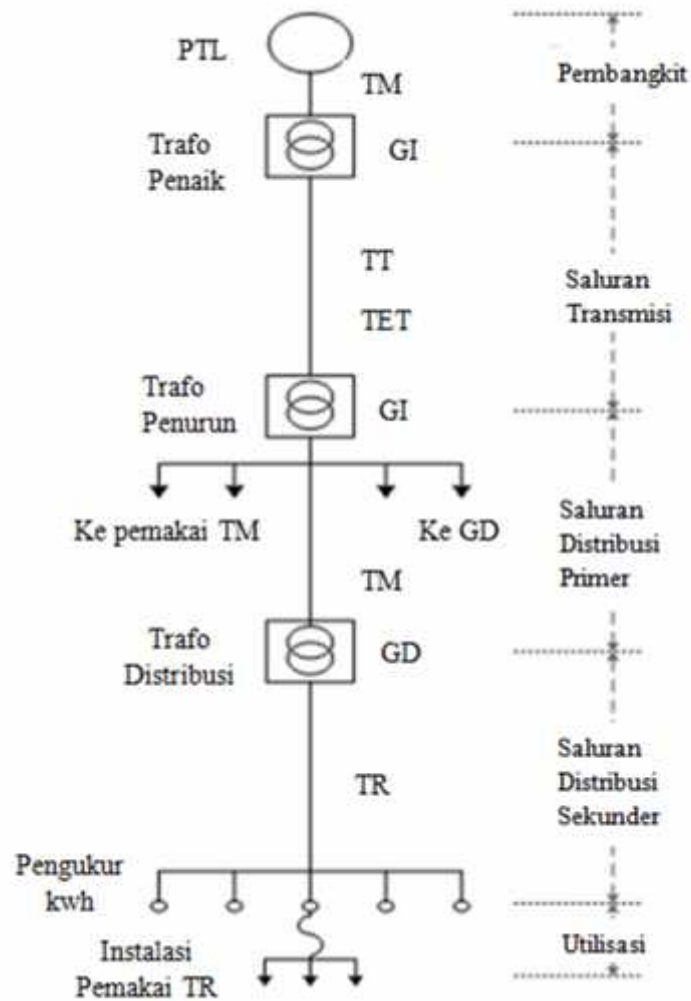
2.1 Sistem Tenaga Listrik¹

Sistem Tenaga Listrik dikatakan sebagai kumpulan/gabungan yang terdiri dari komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban yang saling berhubungan dan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu sistem.² Sekalipun tidak terdapat suatu sistem tenaga listrik yang “tipikal”, namun pada umumnya dapat dikembalikan batasan pada suatu sistem yang lengkap mengandung empat unsur.

Pertama, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya merupakan tegangan menengah (TM). Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT), atau tegangan ekstra tinggi (TET). Ketiga, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). Keempat, adanya unsur pemakaian atau utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi. Gambar 2.1. memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang bisa disebut sebagai sistem interkoneksi. Kiranya jelas bahwa arah mengalirnya energi listrik berawal dari Pusat Tenaga Listrik melalui saluran-saluran transmisi dan distribusi dan sampai pada instalasi pemakai yang merupakan unsur utilisasi.

¹ Kadir, Abdul, *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, (Jakarta : UI Press, 2000), hlm. 3.

² PT. PLN(Persero) Jasdik, *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, hlm. 2.

Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik¹

Keterangan:

PTL : Pembangkit Tenaga Listrik

GI : Gardu Induk

TT : Tegangan Tinggi

TET : Tegangan Ekstra Tinggi

TM : Tegangan Menengah

GD : Gardu Distribusi

TR : Tegangan Rendah



2.2 Distribusi Tenaga Listrik³

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.

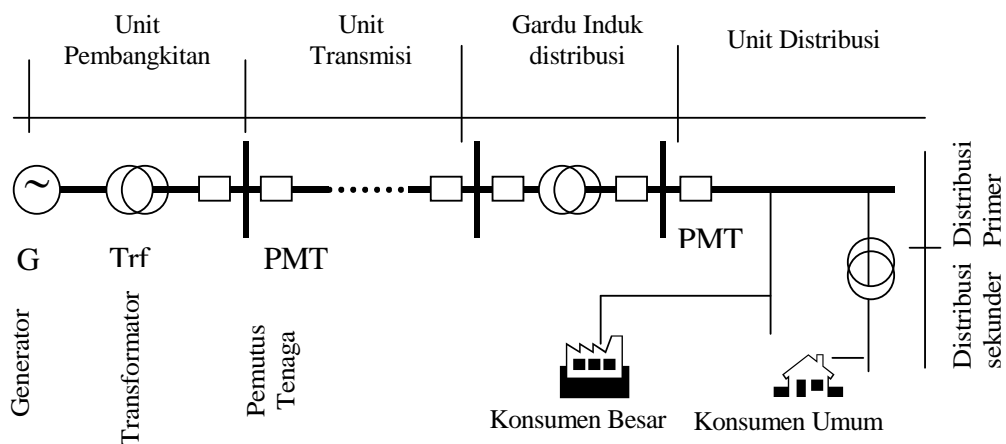
Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo-trafo step-up. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (HV,UHV,EHV) menimbulkan beberapa konsekuensi

³ Suhadi, dkk, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*, (Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008), hlm. 11.



antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahal nya harga perlengkapan-perengkapannya, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo-trafo step-down. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.



Gambar 2.2 Sistem penyaluran tenaga listrik⁴

2.2.1 Pengelompokan jaringan distribusi

Dari uraian sistem distribusi diatas, dapat dilakukan pembagian serta pembatasan-pembatasan dalam sistem distribusi tenaga listrik, yakni :

- Daerah I : Bagian pembangkitan (Generation).
- Daerah II : Bagian penyaluran (Transmission), bertegangan tinggi.
- Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah.
- Daerah IV : Instalasi, bertegangan rendah.

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi sistem distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu

⁴ PT. PLN(Persero) Jasdik, *op. cit.*, hlm. 3.



dibuat. Dengan demikian ruang lingkup Jaringan Distribusi adalah :

- a. SUTM

Terdiri dari : Tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan per-lengkapannya, 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.

2.2.2 Klasifikasi saluran distribusi

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

1. Menurut nilai tegangannya:
 - a. Saluran distribusi primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder trafo substation dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20 kV. Jaringan listrik 70 kV atau 150 kV, jika langsung melayani pelanggan, bisa disebut jaringan distribusi.
 - b. Saluran distribusi sekunder

Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban.
2. Menurut bentuk tegangannya:
 - a. Saluran distribusi dc (direct current)

Saluran distribusi yang menggunakan sistem tegangan searah.



b. Saluran distribusi ac (alternating current)

Saluran distribusi yang menggunakan sistem tegangan bolak-balik.

3. Menurut jenis/tipe konduktornya:

a. Saluran udara

Dipasang pada udara terbuka dengan bantuan support (tiang) dan perlengkapannya, dibedakan atas saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus dan saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.

b. Saluran bawah tanah

Dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (ground cable).

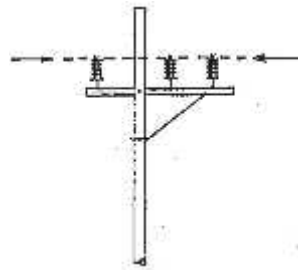
c. Saluran bawah laut

Dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (submarine cable).

4. Menurut susunan (konfigurasi) salurannya:

a. Saluran konfigurasi horizontal

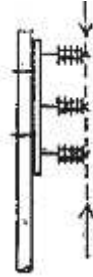
Bila saluran fasa terhadap fasa yang lain/terhadap netral, atau saluran positif terhadap negatif (pada sistem dc) membentuk garis horisontal. Berikut merupakan gambar dari saluran konfigurasi horizontal.



Gambar 2.3 Konfigurasi Horizontal

b. Saluran konfigurasi vertical

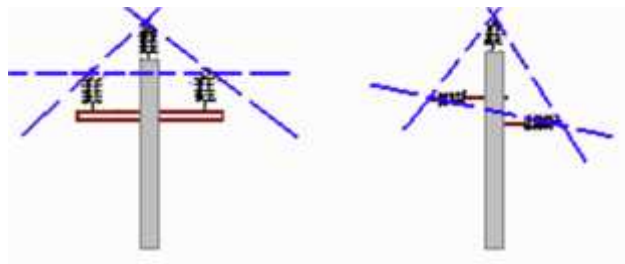
Bila saluran tersebut membentuk garis vertikal. Untuk lebih memahami pengertian dari saluran konfigurasi vertical, berikut merupakan gambar dari saluran konfigurasi vertical.



Gambar 2.4 Konfigurasi Vertical

c. Saluran konfigurasi delta

Bila kedudukan saluran satu sama lain membentuk suatu segitiga (delta). Untuk lebih memahami pengertian dari saluran konfigurasi delta, berikut merupakan gambar dari saluran konfigurasi vertical.



Gambar 2.5 Konfigurasi Delta

2.3 Sistem Distribusi Primer⁵

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

⁵ Suhadi, dkk, *op. cit.*, hlm. 17.



2.3.1 Jaringan distribusi radial

Bila antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (line), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk Jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Oleh karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama. Maksudnya, saluran utama (dekat sumber) yang menanggung arus beban besar, ukuran penampangnya relatif besar, dan saluran cabang-cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil, ukurannya lebih kecil pula. Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah:

- Bentuknya sederhana.
- Biaya investasinya relatif murah.
- Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
- Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternative saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami “*black out*” secara total.

Untuk melokalisir gangguan, pada bentuk radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman berupa fuse, *sectionalizer*, *recloser*, atau alat pemutus beban lainnya, tetapi fungsinya hanya membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah/dibelakang titik gangguan, selama gangguan belum teratasi.

2.3.2 Jaringan distribusi ring (loop)

Bila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu



sumber. Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan "loop". Susunan rangkaian penyulang membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil. Bentuk loop ini ada 2 macam, yaitu:

a. Bentuk open loop:

Dikatakan bentuk open loop bila diperlengkapi dengan normally-open switch, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

b. Bentuk close loop

Dikatakan bentuk close loop bila diperlengkapi dengan normally-close switch, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

Pada tipe ini, kualitas dan kontinuitas pelayanan daya memang lebih baik, tetapi biaya investasinya lebih mahal, karena memerlukan pemutus beban yang lebih banyak. Bila digunakan dengan pemutus beban yang otomatis (dilengkapi dengan recloser atau AVS), maka pengamanan dapat berlangsung cepat dan praktis, dengan cepat pula daerah gangguan segera beroperasi kembali bila gangguan telah teratasi. Dengan cara ini berarti dapat mengurangi tenaga operator. Bentuk ini cocok untuk digunakan pada daerah beban yang padat dan memerlukan keandalan tinggi.

2.3.3 Jaringan distribusi jaring – jaring (NET)

Merupakan gabungan dari beberapa saluran mesh, dimana terdapat lebih satu sumber sehingga berbentuk saluran interkoneksi. Jaringan ini berbentuk jaring-jaring, kombinasi antara radial dan loop. Titik beban memiliki lebih banyak alternatif saluran/penyulang, sehingga bila salah satu penyulang terganggu, dengan segera dapat digantikan oleh penyulang yang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin. Spesifikasi Jaringan NET ini adalah:

- Kontinuitas penyaluran daya paling terjamin.
- Kualitas tegangannya baik, rugi daya pada saluran amat kecil.



- Dibanding dengan bentuk lain, paling flexible (luwes) dalam mengikuti pertumbuhan dan perkembangan beban.
- Sebelum pelaksanaannya, memerlukan koordinasi perencanaan yang teliti dan rumit.
- Memerlukan biaya investasi yang besar (mahal).
- Memerlukan tenaga-tenaga terampil dalam pengoperasiannya.

Dengan spesifikasi tersebut, bentuk ini hanya layak (feasible) untuk melayani daerah beban yang benar-benar memerlukan tingkat keandalan dan kontinuitas yang tinggi, antara lain: instalasi militer, pusat sarana komunikasi dan perhubungan, rumah sakit, dan sebagainya. Karena bentuk ini merupakan jaringan yang menghubungkan beberapa sumber, maka bentuk jaringan NET atau jaring-jaring disebut juga jaringan "interkoneksi".

2.3.4 Jaringan distribusi spindle

Selain bentuk-bentuk dasar dari jaringan distribusi yang telah ada, maka dikembangkan pula bentuk-bentuk modifikasi, yang bertujuan meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Salah satu bentuk modifikasi yang populer adalah bentuk spindle, yang biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Saluran 6 penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan "working feeder" atau saluran kerja, dan satu saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan "express feeder". Fungsi "express feeder" dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu "working feeder", juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal. Dalam keadaan normal memang "express feeder" ini sengaja dioperasikan tanpa beban. Perlu diingat di sini, bahwa bentuk-bentuk jaringan beserta modifikasinya seperti yang telah diuraikan di muka, terutama dikembangkan pada sistem jaringan arus bolak-balik (AC).



2.3.5 Jaringan distribusi radial interkoneksi

Saluran Radial Interkoneksi yaitu terdiri lebih dari satu saluran radial tunggal yang dilengkapi dengan LBS/AVS sebagai saklar inerkoneksi. Masing-masing tipe saluran tersebut memiliki spesifikasi sendiri, dan agar lebih jelas akan dibicarakan lebih lanjut pada bagian lain. Pada dasarnya semua beban yang memerlukan tenaga listrik, menuntut kondisi pelayanan yang terbaik, misalnya dalam hal stabilitas tegangannya, sebab seperti telah dijelaskan, bila tegangan tidak nominal dan tidak stabil, maka alat listrik yang digunakan tidak dapat beroperasi secara normal, bahkan akan mengalami kerusakan. Tetapi dalam prakteknya, seberapa besar tingkat pelayanan terbaik dapat dipenuhi, masih memerlukan beberapa pertimbangan, mengingat beberapa alasan digunakan untuk daerah dengan :

- Kepadatan beban yang tinggi.
- Tidak menuntut keandalan yang terlalu tinggi.

Contoh: Daerah pinggiran kota, kampung, perumahan sedang.

2.4 Sistem Distribusi Sekunder⁶

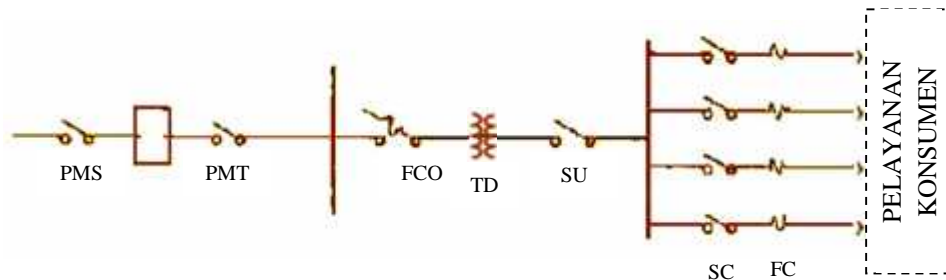
Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sbb:

- Papan pembagi pada trafo distribusi,
- Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
- Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai)
- Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

⁶ *Ibid.*, hlm. 27.



Komponen saluran distribusi sekunder seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut ini.



Gambar 2.6 Komponen Sistem Distribusi

Keterangan :

PMS = Pemisah	TD = Trafo Distribusi	FC = Fuse Cabang
PMT = Pemutus	SU = Saklar Utama	
FCO = Fuse Cut Out	SC = Saklar Cabang	

Ada bermacam-macam sistem tegangan distribusi sekunder menurut standar; (1) EEI : Edison Electric Institut, (2) NEMA (National Electrical Manufactures Association). Pada dasarnya tidak berbeda dengan sistem distribusi DC, faktor utama yang perlu diperhatikan adalah besar tegangan yang diterima pada titik beban mendekati nilai nominal, sehingga peralatan/beban dapat dioperasikan secara optimal. Ditinjau dari cara pengawatannya, saluran distribusi AC dibedakan atas beberapa macam tipe, dan cara pengawatan ini bergantung pula pada jumlah fasanya, yaitu:

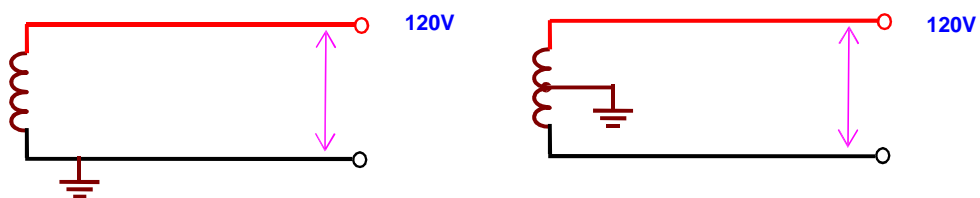
1. Sistem satu fasa dua kawat 120 Volt
2. Sistem satu fasa tiga kawat 120/240 Volt
3. Sistem tiga fasa empat kawat 120/208 Volt
4. Sistem tiga fasa empat kawat 120/240 Volt
5. Sistem tiga fasa tiga kawat 240 Volt
6. Sistem tiga fasa tiga kawat 480 Volt
7. Sistem tiga fasa empat kawat 240/416 Volt
8. Sistem tiga fasa empat kawat 265/460 Volt



9. Sistem tiga fasa empat kawat 220/380 Volt

Di Indonesia dalam hal ini PT. PLN menggunakan sistem tegangan 220/380 Volt. Sedang pemakai listrik yang tidak menggunakan tenaga listrik dari PT. PLN, menggunakan salah satu sistem diatas sesuai dengan standar yang ada. Pemakai listrik yang dimaksud umumnya mereka bergantung kepada negara pemberi pinjaman atau dalam rangka kerja sama, dimana semua peralatan listrik mulai dari pembangkit (generator set) hingga peralatan kerja (motor-motor listrik) di suplai dari negara pemberi pinjaman/kerja sama tersebut. Sebagai anggota, IEC (International Electrotechnical Commission), Indonesia telah mulai menyesuaikan sistem tegangan menjadi 220/380 Volt saja, karena IEC sejak tahun 1967 sudah tidak mencantumkan lagi tegangan 127 Volt. Diagram rangkaian sisi sekunder trafo distribusi untuk masing- masing sistem tegangan tersebut ditunjukkan pada gambar berikut ini:

2.4.1 Sistem distribusi satu fasa dengan dua kawat



Gambar 2.7 Sistem Satu Fasa Dua Kawat Tegangan 120V

Tipe ini merupakan bentuk dasar yang paling sederhana, biasanya digunakan untuk melayani penyalur daya berkapasitas kecil dengan jarak pendek, yaitu daerah perumahan dan pedesaan. Ditinjau dari sisi sekunder trafo distribusinya, tipe ini ada 2(dua) macam, seperti ditunjukkan apada gambar 2.6.

2.4.2 Sistem distribusi satu fasa dengan tiga kawat

Pada tipe ini, prinsipnya sama dengan sistem distribusi DC dengan tiga kawat, yang dalam hal ini terdapat dua alternatif besar tegangan. Sebagai saluran



“netral” disini dihubungkan pada tengah belitan (center-tap) sisi sekunder trafo, dan diketanahkan, untuk tujuan pengamanan personil. Tipe ini untuk melayani penyalur daya berkapasitas kecil dengan jarak pendek, yaitu daerah perumahan dan pedesaan.

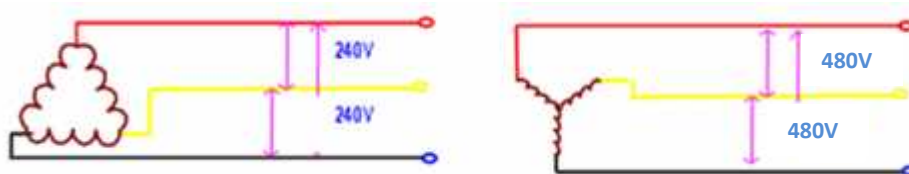


Gambar 2.8 Sistem Satu Fasa Tiga Kawat Tegangan 120/240V

2.4.3 Sistem distribusi tiga fasa dengan tiga kawat

Tipe ini banyak dikembangkan secara ekstensif. Dalam hal ini rangkaian tiga fasa sisi sekunder trafo dapat diperoleh dalam bentuk rangkaian delta (segitiga) ataupun rangkaian wye (star/bintang).

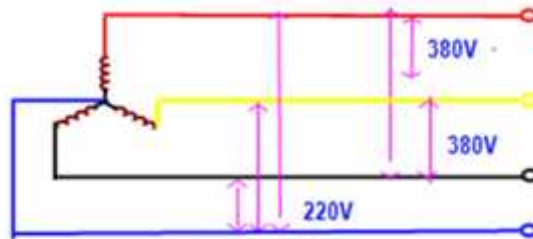
Diperoleh dua alternatif besar tegangan, yang dalam pelaksanaannya perlu diperhatikan adanya pembagian seimbang antara ketiga fasanya. Untuk rangkaian delta tegangannya bervariasi yaitu 240 Volt, dan 480 Volt. Tipe ini dipakai untuk melayani beban-beban industri atau perdagangan.



Gambar 2.9 Sistem Tiga Fasa Tiga Kawat Tegangan 240/480V

2.4.4 Sistem distribusi tiga fasa empat kawat

Pada tipe ini, sisi sekunder (output) trafo distribusi terhubung star, dimana saluran netral diambil dari titik bintangnya. Seperti halnya pada sistem tiga fasa yang lain, di sini perlu diperhatikan keseimbangan beban antara ketiga fasanya, dan disini terdapat dua alternatif besar tegangan.



Gambar 2.10 Sistem Tiga Fasa Empat Kawat Tegangan 220/380V

2.5 Jaringan Distribusi Tegangan Rendah⁷

Jaringan distribusi tegangan rendah adalah bagian hilir dari suatu sistem tenaga listrik. Melalui jaringan distribusi ini disalurkan tenaga listrik kepada para pemanfaat / pelanggan listrik. Mengingat ruang lingkup konstruksi jaring distribusi ini langsung berhubungan dan berada pada lingkungan daerah penghuni, maka selain harus memenuhi persyaratan kualitas teknis pelayanan juga harus memenuhi persyaratan aman terhadap pengguna dan akrab terhadap lingkungan. Konfigurasi Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) pada umumnya berbentuk radial. Jenis konstruksi Jaringan Tegangan Rendah terdiri dari :

- Saluran Udara Tegangan Rendah Kabel Pilin
- Saluran Udara Tegangan Rendah Bare Conductor
- Saluran Kabel Tanah Tegangan Rendah

Saluran Udara Tegangan Rendah dengan kabel pilin (*twisted cable*) ini dapat dikonstruksikan pada :

1. Tiang yang berdiri sendiri dengan panjang 9 meter dan ditanam 1/6 kali panjang tiang.
2. Di bawah jaringan saluran udara tegangan menengah.
3. Pada dinding bangunan.

⁷ Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia, *Buku 3 Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Rendah Tenaga Listrik*, (Jakarta Selatan : PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 1.



2.5.1 Saluran udara tegangan menengah

Untuk konstruksi jaringan SUTR yang berdiri sendiri dipakai tiang beton atau tiang besi dengan panjang 9 meter. Tiang beton yang dipakai dari berbagai jenis yang memiliki kekuatan beban kerja (*working load*) 200 daN, 350 daN dan 500 daN. Pada titik yang memerlukan pembumian dipakai tiang beton yang dilengkapi dengan terminal pembumian. Jenis penghantar yang digunakan adalah kabel pilin udara (NFA2Y) *aluminium twisted cable* dengan inti aluminium sebagai inti penghantar fasa dan almelec/aluminium alloy sebagai netral. Penghantar netral dengan ukuran 3x35+N, 3x50+N, 3x70+N berfungsi sebagai pemikul beban mekanis kabel atau *messenger*. Untuk kepentingan jaminan pelaksanaan handling transportasi, panjang penghantar haspel kurang dari 1000 m.

2.5.2 Saluran kabel tanah tegangan rendah

Tabel 2.1 Jenis dan KHA Kabel Tanah SKTR

Jenis Kabel	Ukuran Penampang	KHA
NYFGbY	4 x 95 mm ²	275 A
	4 x 70 mm ²	228 A
	4 x 50 mm ²	185 A
	4 x 25 mm ²	128 A

Jenis kabel yang dipakai adalah jenis kabel bawah tanah berpelindung mekanis NYFGbY dengan ukuran penampang dan KHA pada $t = 30^{\circ}\text{C}$ dan kedalaman penggalaran bawah tanah 70cm seperti tabel diatas.

Kemampuan hantar kabel tersebut akan berkurang apabila digelar lebih dari satu kabel pada satu jalur / parit berdasarkan faktor koreksi pada tabel 2.2. Semua terminasi kabel pada rel PHB harus memakai sepatu kabel sesuai dengan ukuran kabelnya. Jika memakai kabel dengan inti aluminium harus memakai sepatu kabel bimetal Al-Cu. Sebelum diikatkan pada terminasi sepatu kabel harus dilapisi timah solder guna menghindari oksidasi. Ikatan sepatu kabel pada inti kabel harus dipress hidrolik. Bagian dalam sepatu kabel dicor timah panas. Selanjutnya



ditutup dengan bahan *heatshrink-sleeve* sesuai dengan warna urutan fasanya. Terminal kabel yang digunakan untuk instalasi SKTR pasangan luar yang terbuat dari *heat-shrink* atau *cold-shrink* untuk mencegah masuknya air dalam inti penghantar.

Tabel 2.2 Faktor Koreksi KHA Kabel Tanah Untuk Berbagai Jumlah Gelaran.

Jarak Antar Kabel	Jumlah Kabel						
	2	3	4	5	6	7	8
	Faktor Koreksi						
a. Bersentuhan	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,50
b. 70 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,56
c. 25 cm	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,66

2.6 Gardu Distribusi⁸

Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V).

Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemda setempat.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1. Jenis pemasangannya :
 - a) Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
 - b) Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios
2. Jenis Konstruksinya :

⁸ Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia, *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*, (Jakarta Selatan : PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 1.



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

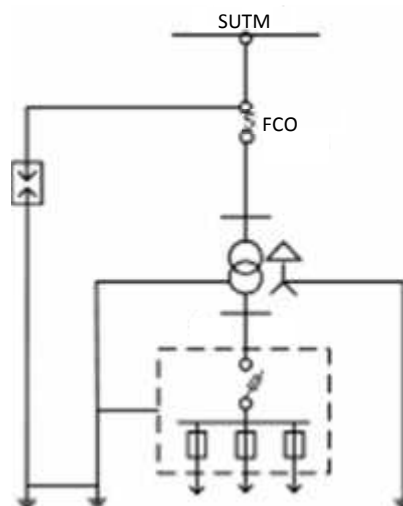
3. Jenis Penggunaannya :

- a) Gardu Pelanggan Umum
- b) Gardu Pelanggan Khusus

Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (*Remote Terminal Unit*). Untuk fasilitas ini lazimnya dilengkapi fasilitas DC Supply dari Trafo Distribusi pemakaian sendiri atau Trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesatuan.

2.6.1 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 2.11 *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 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.

2.6.2 Gardu cantol

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

Perlengkapan perlindungan transformator tambahan 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 pengamanan lebur (type NH, NT) sebagai pengamanan jurusan. Semua Bagian Konduktif Terbuka (BKT) dan Bagian Konduktif Ekstra (BKE) dihubungkan dengan pembumian sisi Tegangan Rendah.

2.6.3 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.

2.6.4 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.

2.6.5 Gardu pelanggan umum

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

2.6.6 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.

2.6.7 Gardu hubung

Gardu Hubung disingkat GH atau Switching Substation adalah gardu yang berfungsi sebagai sarana manuver pengendali beban listrik jika terjadi gangguan aliran listrik, program pelaksanaan pemeliharaan atau untuk maksud mempertahankan kountinuitas pelayanan.

Isi dari instalasi Gardu Hubung adalah rangkaian saklar beban (Load Break switch – LBS), dan atau pemutus tenaga yang terhubung paralel. 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. Berdasarkan kebutuhannya Gardu Hubung dibagi menjadi:

- Gardu Hubung untuk 7 buah sel kubikel.
- Gardu Hubung untuk (7 + 7) buah sel kubikel.
- Gardu Hubung untuk (7 + 7 +7 + 7) buah sel kubikel.

Pengunaan kelompok – kelompok sel tersebut bergantung atas sistem yang digunakan pada suatu daerah operasional, misalnya Spindel, Spotload, Fork, Bunga, dan lain – lain. Spesifikasi teknis sel – sel kubikel Gardu Hubung sama dengan spesifikasi teknis Gardu Distribusi, kecuali kemungkinan kemampuan arus nominalnya yang besar.



2.7 Parameter Saluran Distribusi

Energi listrik yang disalurkan ke pelanggan menggunakan saluran listrik yang berupa suatu penghantar konduktor. Penghantar memiliki sifat – sifat yang dapat kita jadikan sebagai parameter saluran tersebut. Dalam analisa sistem tenaga listrik, impedansi suatu saluran merupakan hal harus diketahui. Impedansi saluran penghantar berkaitan erat dengan resistansi dan reaktansi saluran tersebut.

2.7.1 Resistansi saluran

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

$$R = \frac{l}{A} \cdot \rho \quad (2.1)$$

Dimana :

R = Resistansi (Ω)

l = Panjang kawat penghantar (m)

A = Luas penampang kawat (m^2)

ρ = Tahanan jenis ($\Omega \cdot m$)

Tahanan penghantar mempunyai suhu maksimum yang telah distandarkan oleh pabrik pembuatnya (maksimum $30^\circ C$ untuk Indonesia), perubahan suhu sebesar $1^\circ C$ dapat menaikkan tahanan penghantar.

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \quad (2.2)$$

Dimana:

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

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

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

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

T_0 = konstanta untuk penghantar tertentu :

a. 234,5 untuk tembaga 100% Cu



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

2.7.2 Reaktansi saluran

Reaktansi penghantar pada saluran distribusi dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut :

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (2.3)$$

Dimana :

- X_L = Reaktansi Induktif ()
f = Frekuensi (Hz)
L = Induktansi (Henry)

2.7.3 Impedansi saluran

Impedansi penghantar pada saluran distribusi dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut :

$$Z = R + jX \quad (2.4)$$

Dimana :

- Z = Impedansi penghantar ()
R = Resistansi penghantar ()
X = Reaktansi penghantar ()

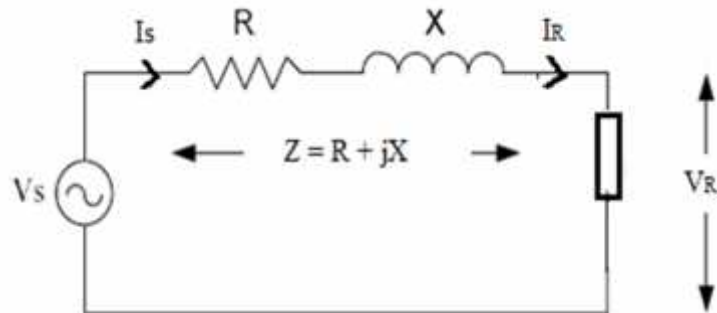
2.8 Model Saluran Distribusi

Saluran distribusi digambarkan melalui suatu model ekuivalen dengan mengambil parameter rangkaian pada suatu basis per fasa. Tegangan terminal digambarkan dari saluran ke netral, arus dari satu fasa saluran sehingga sistem distribusi tiga fasa berkurang menjadi ekuivalen sistem distribusi fasa tunggal.

Menurut Stevenson (1995) model saluran distribusi digunakan untuk menghitung tegangan, arus dan aliran daya yang dipengaruhi oleh panjang saluran. Model saluran distribusi diperoleh dengan mengalikan impedansi saluran persatuan panjang dengan panjang saluran. $Z = (r + j L)$ atau $Z = R + jX$ dimana



R dan X merupakan resistansi dan induktansi perfasa per satuan panjang, dan l merupakan panjang saluran. Model saluran distribusi pada suatu basis per fasa ditunjukkan pada gambar (2.10).



Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Saluran Distribusi⁹

Oleh karena arus rangkaian saluran distribusi merupakan hubungan seri maka arus ujung pengirim dan ujung penerima adalah sama ($I_S = I_R$).

2.9 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Dalam sistem listrik AC/Arus Bolak-Balik ada tiga jenis daya yang dikenal, yaitu :

2.9.1 Daya semu

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

$$\text{Untuk 1 fasa : } S = V \times I \quad (2.5)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } S = 3 \times V \times I \quad (2.6)$$

Dimana :

$$S = \text{Daya semu (VA)}$$

⁹ Theraja, B.L., *Worked examples in Electrical Technology*, (New Delhi : S. Chand & Company Ltd., 1983), hlm. 394.



V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

2.9.2 Daya Aktif

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

$$\text{Untuk 1 fasa : } P = V \times I \times \cos \emptyset \quad (2.7)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } P = 3 \times V \times I \times \cos \emptyset \quad (2.8)$$

Dimana :

P = Daya nyata (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Ampere)

$\cos \emptyset$ = Faktor Daya

2.9.3 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.

$$\text{Untuk 1 fasa : } Q = V \times I \times \sin \emptyset \quad (2.9)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } Q = 3 \times V \times I \times \sin \emptyset \quad (2.10)$$

Dimana :

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

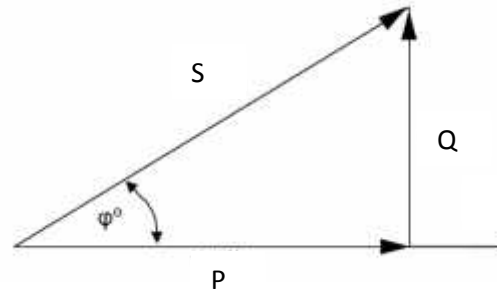
I = Arus (Amper)

$\sin \emptyset$ = Faktor Daya



2.9.4 Segitiga daya

Dari bermacam daya diatas maka daya listrik digambarkan sebagai segitiga siku, yang secara vektoris adalah penjumlahan daya aktif dan reaktif dan sebagai resultannya adalah daya semu.



Gambar 2.13 Segitiga Daya

2.10 Rugi – Rugi Daya

Berdasarkan gambar 2.12 rugi daya saluran timbul karena adanya komponen resistansi dan reaktansi saluran dalam bentuk rugi daya aktif dan reaktif. Rugi daya aktif yang timbul pada komponen resistansi saluran distribusi akan terdisipasi dalam bentuk energi. Sedangkan rugi daya reaktif akan dikembalikan ke sistem dalam bentuk medan magnet atau medan listrik.

Rugi daya yang dapat dicari menggunakan rumus :

$$P = I^2 \times R \quad (2.11)$$

Dimana :

P = Rugi daya (kw)

I = Arus yang mengalir (Ampere)

R = Resistansi penghantar (ohm)

2.11 Tegangan Jatuh

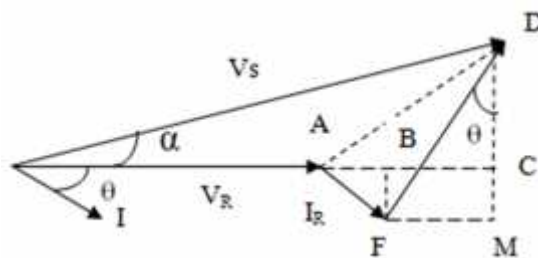
Tegangan jatuh (*drop voltage*) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi dan arus pada penghantar. Drop tegangan di trafo distribusi di sisi sekunder pada saat beban maksimum dibolehkan sebesar 4% dari tegangan kerja (sesuai SPLN 72 : 1987).



Adapun penyebab jatuh tegangan (drop tegangan) adalah :

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

Berdasarkan rangkaian ekivalen saluran pada gambar (2.12) dapat digambarkan diagram fasor arus dan tegangan seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.14 Diagram Fasor Saluran Distribusi

Besarnya drop tegangan yang terjadi pada saluran tersebut dapat dirumuskan :

$$V = |V_s| - |V_r| \quad (2.12)$$

Untuk mendapatkan susut tegangan seperti diagram fasor diatas dengan mengasumsikan bahwa V_s dan V_r berhimpitan.

Pada gambar 2.12 dapat diperhatikan bahwa persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah :

$$V_s = V_r + I (R \cos \phi + X \sin \phi) \quad (2.13)$$

Karena faktor $I (R \cos \phi + X \sin \phi)$ sama dengan IZ , maka persamaan menjadi :

$$V_s = V_r + IZ \text{ atau } V_s - V_r = IZ \quad (2.14)$$

Sehingga :

$$V = I \times Z \quad (2.15)$$

$$V = I (R \cos \phi + X \sin \phi) \quad (2.16)$$

Maka untuk saluran distribusi pada saluran distribusi 3 fasa adalah :

$$V = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \phi + X \sin \phi) \quad (2.17)$$



Tegangan pada sisi penerima :

$$V_r = V_s - V \quad (2.18)$$

Drop tegangan dalam persentase :

$$\% V \text{ rugi} = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100 \% \quad (2.19)$$

Keterangan :

V = drop tegangan (V)

V_s = Tegangan awal (V)

V_r = Tegangan akhir (V)

R = Resistansi penghantar ()

X = Reaktansi penghantar ()

I = Arus saluran (A)

Z = Impedansi penghantar ()