

BAB II

LANDASAN TEORI

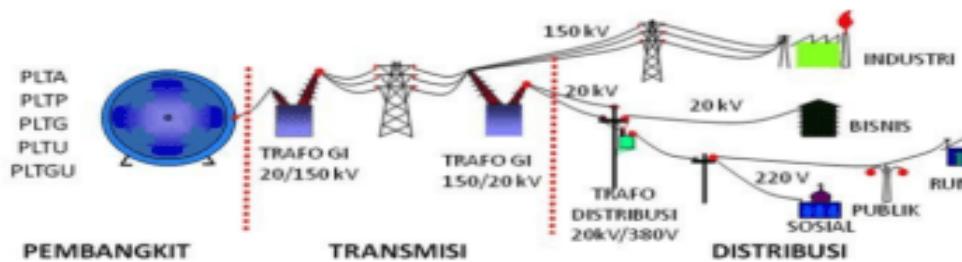
2.1 Tinjauan Pustaka

Sistem distribusi merupakan sistem penyaluran berfungsi untuk menyalurakan tenaga listrik dari rel tenaga menengah pada GI sampai dengan titik pelayanan pelanggan tegangan rendah pada GD. Dari uraian diatas dapat diketahui bahwa saluran distribusi dibagi menjadi 2 bagian, yaitu saluran yang beroperasi pada tegangan menengah dan sistem distribusi pada tegangan rendah. Ditinjau dari konfigurasi maka sistem tegangan menengah bisa dibedakan atas konfigurasi radial, loop, spindle. Jaringan tegangan menengah yang pemasangan diudara bisa disebut SUTM dan biasanya penghantar menggunakan jenis penghantar tak berisntalasi seperti AAAC, AAC yang terbuat dari alumunium.

Agar penyaluran distribusi dapat dilakukan dengan angka padam yang minimal maka pada sistem distribusi butuh ditambah dengan sistem proteksi untuk distirbusi tegangan menengah dengan konfigurasi spindle penghantar yang digunakan kabel tanah yang harganya cukup mahal dibandingankan dengan saluran penghantar udara. Spindle biasanya dipakai dikota, dimana SUTM tidak sulit digunakan. Saluran distribusi terbagi menjadi 2 saluran yaitu: saluran udara dan saluran bawah tanah. Pemilihan penggunaan saluran disesuaikan dengan kebijakan manajemen, masalah kontinuitas pelayanan, jenis pelanggan, pada beban atas permintaan khusus dan masalah biaya investasi.

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari subsistem pembangkit, subsistem penyaluran dan subsistem instalasi pengguna tenaga listrik yang di interkoneksi satu dengan lainnya, melalui transmisi atau distribusi. Di dalam dunia kelistrikan sering 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 pada gambar 2.1 ialah penyampaian tenaga listrik dari tempat dibangkitkannya yang disebut pusat tenaga listrik sampai ke tempat pelanggan dengan memerlukan berbagai penanganan teknis.

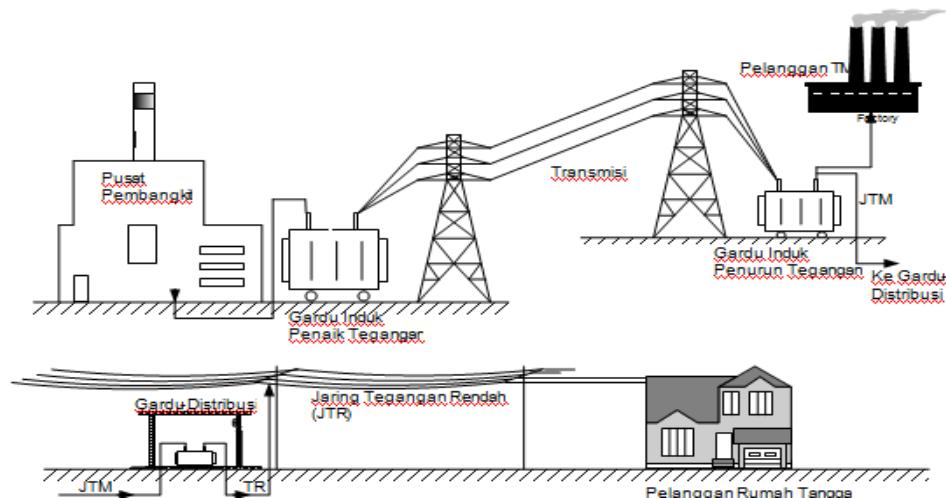


Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

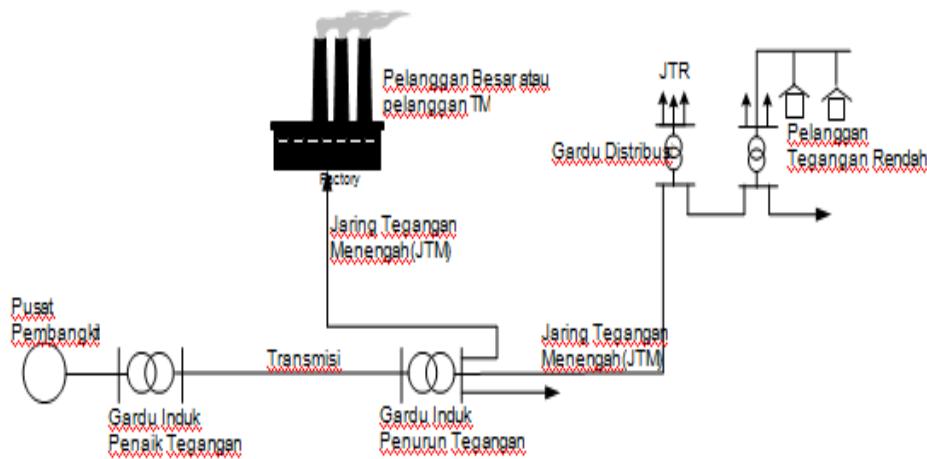
2.1.2 Sistem Penyaluran Tenaga Listrik

Energi listrik umumnya dibangkitkan oleh pusat pembangkit tenaga listrik yang jauh dari perkotaan dimana pada pelanggan umumnya berada. Permasalahan yang dihadapi sekarang ialah bagaimana menyalurkan tenaga listrik tersebut secara ekonomis pada jarak yang cukup jauh. Secara umum suplai tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi 3 unsur, yaitu :

1. Pusat Pembangkit
2. Transmisi
3. Distribusi



Gambar 2.2 Skema Penyaluran Energi Listrik Dimulai dari Pusat Pembangkit sampai dengan Pelanggan



Gambar 2.3 Diagram Satu Garis Penyaluran Energi Listrik Dimulai dari Pusat Pembangkit sampai dengan Pelanggan¹

¹ Hasan Basri, *Sistem Distribusi Daya Listrik* (Jakarta: ISTN, 1997), hlm. 1

2.1.2.1 Saluran Transmisi Tenaga Listrik

Saluran transmisi adalah sistem penyaluran tenaga listrik yang beroperasi pada TT (Tegangan Tinggi) dan TET (Tegangan Ekstra Tinggi). Transmisi dapat menyalurkan tenaga listrik dari GI Pembangkitan ke GI Tegangan Tinggi dan dari GI Tegangan Tinggi ke GI Distribusi.

Saluran transmisi berfungsi sebagai penyalur daya listrik secara besar-besaran dari pembangkit listrik ke bagian sistem distribusi dan konsumen. Saluran transmisi tegangan tinggi di PLN kebanyakan mempunyai tegangan 70 kV, 150 kV, dan 500 kV. Khusus untuk tegangan 500 kV dalam prakteknya saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi. Masih ada beberapa saluran transmisi dengan tegangan 30 kV, namun tidak dikembangkan lagi oleh PLN. Saluran transmisi ada yang berupa saluran udara dan ada pula yang berupa kabel tanah. Karena saluran udara harganya jauh lebih murah dibandingkan dengan kabel tanah maka saluran transmisi PLN kebanyakan berupa saluran udara.

2.1.2.2 Saluran Distribusi Tenaga Listrik

Saluran Distribusi adalah bagian infrastruktur sistem penyaluran daya yang mengambil daya dari rangkaian transmisi tegangan tinggi melalui GI dan mendistribusikan ke konsumen. Untuk penyaluran daya listrik yang beroperasi pada tegangan menengah dan tegangan rendah disebut sistem distribusi. Penyaluran daya listrik dengan tegangan menengah disebut jaringan tengan menengah (JTM), sedangkan yang beroperasi pada tegangan rendah disebut jaringan tegangan rendah (JTR).

Fungsi Sistem Distribusi adalah :

1. Menyalurkan tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan).
2. Merupakan subsistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Sistem distribusi memiliki tujuan yaitu untuk menyalurkan daya listrik dari sumber daya besar kepada setiap konsumen pada besar tegangan yang dibutuhkan. Sumber daya besar dapat berupa pembangkit, Gardu Induk (GI) atau gardu distribusi. Ada beberapa hal yang harus diperhatikan pada sistem distribusi tenaga listrik.

Syarat-syarat yang harus diperhatikan adalah sebagai berikut :

1. Tegangan jatuh tidak melebihi batas tertentu.
2. Gangguan terhadap pelayanan tidak boleh terlalu sering dan lama.
3. Sistem harus mudah disesuaikan dengan peningkatan beban

2.1.3 Instalasi Pengguna Tenaga Listrik

Dalam sistem tenaga listrik yang dimaksud instalasi pengguna tenaga listrik adalah semua instalasi pengguna yang memerlukan tenaga listrik dalam pengoperasiannya. Instalasi pengguna tenaga listrik yang terpasang pada umumnya letaknya jauh dari pembangkit dan populasinya menyebar ke berbagai tempat. Sedangkan pemakai biasanya terletak jauh dari pusat pembangkit, sehingga untuk memanfaatkan energi listrik yang telah dibangkitkan diperlukan saluran atau jaringan listrik. Oleh karena itu, untuk menunjang proses penyaluran energi secara memadai maka dibutuhkan sistem transmisi dan sistem distribusi yang baik, agar beban-beban yang tersebar mendapat kiriman daya listrik sesuai kebutuhannya.

2.2 Sistem Distribusi Tegangan Menengah

Dikarenakan mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang dapat merupakan suatu industri atau suatu kota, tegangan tinggi diturunkan menjadi Tegangan Menengah (TM). Hal ini juga dilakukan pada suatu GI dengan mempergunakan transformator penurun (*step-down transformer*). Di Indonesia tegangan menengah adalah 20 kV. Saluran 20 kV ini menelusuri jalan-jalan seluruh kota. Sistem distribusi tegangan menengah atau jaringan distribusi primer adalah jaringan pendistribusian tegangan menengah yang disalurkan oleh gardu induk atau gardu hubung yang kemudian akan diubah menjadi tegangan rendah setelah melalui gardu distribusi. Bilamana transmisi tenaga listrik dilakukan dengan mempergunakan saluran-saluran udara dengan menara-menara transmisi, sistem distribusi primer di kota biasanya terdiri atas kabel-kabel tanah yang tertanam di tepi jalan, sehingga tidak terlihat. Di tepi-tepi jalan biasanya berdekatkan dengan persimpangan, terdapat gardu-gardu distribusi, yang mengubah tegangan menengah menjadi tegangan Rendah (TR) melalui transformator distribusi, melalui tiang-tiang listrik yang terlihat di tepi jalanan, energi listrik tegangan rendah disalurkan kepada para pemakai atau konsumsi listrik.²

2.2.1. Operasi Sistem Tenaga Listrik

Dalam mengoperasikan sistem jaringan distribusi, ada beberapa hal pokok yang perlu menjadi perhatian, adalah :

1. Mutu

Dalam pengoperasian sistem penyaluran energi listrik ke pelanggan akan mengalami terjadinya gangguan sehingga mempengaruhi mutu tenaga listrik dan keandalan sistem penyaluran. Gangguan yang terjadi tersebut mengakibatkan buruknya mutu dan keandalan. Mutu dan keandalan diukur dengan frekuensi, tegangan

² Abdul Kadir, *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik* (Universitas Indonesia : 2006),hlm 6

dan jumlah gangguan. Masalah mutu tenaga listrik tidak semata-mata merupakan masalah operasi sistem tenaga listrik tetapi erat kaitannya dengan pemeliharaan instalasi tenaga listrik dan juga berkaitan erat dengan pengembangan sistem penyaluran tenaga listrik, mengingat bahwa konsumsi tenaga listrik oleh para pelanggan selalu bertambah dari waktu ke waktu.

2. Keandalan (*Reliability*)

Keandalan penyaluran adalah menyangkut kontinuitas suplai tenaga listrik. Artinya kontinuitas adalah menyangkut angka padam yang disebabkan oleh gangguan. Angka padam itu ada 2 yaitu dinyatakan dalam SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) dan SAIDI (*System Interruption Duration Index*).

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{Seringnya padam rata-rata}}{\text{Pelanggan}} \text{ (bulan)}$$

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{Lama Padam rata-rata}}{\text{Pelanggan}} \text{ (bulan)}$$

3. Rugi-rugi Energi (*Losses*)

Pemilihan jenis penghantar yang digunakan pada saluran tegangan menengah sangat berpengaruh pada nilai rugi-rugi saluran. Pemilihan jenis penghantar dengan nilai resistansi yang kecil dapat menekan nilai rugi-rugi saluran sehingga penyaluran tenaga listrik ke pelanggan menjadi efisien. Pengaruh nilai resistansi terhadap rugi-rugi saluran dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$P_{Loss} = I^2 \times R$$

Dimana :

P_{Losses} = rugi-rugi saluran (Watt)

I = arus saluran (A)

R = nilai resistensi saluran (Ω)

4. Kualitas (*Quality*)

Ada beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam pendistribusian tenaga listrik, yaitu :

a. Nilai Tegangan

Dalam pengoperasian tenaga listrik, tegangan pada setiap titik harus memenuhi kriteria sesuai SPLN No 01 Tahun 1995 yang menjelaskan bahwa tegangan operasi tidak boleh melebihi 0.9 V nominal $\leq V \text{ operasi} \leq 1.05 V \text{ nominal}$.

b. Nilai Frekuensi

Pada umumnya peralatan listrik memiliki toleransi perubahan frekuensi yang kecil. Persyaratan ini tidak saja untuk mendapatkan performansi yang maksimum dari alat tersebut tetapi juga untuk menjaga mutu produk alat tersebut. Standar variasi frekuensi adalah $\pm 1\%$ dari frekuensi nominal 50 Hz.

c. THD (*Total Harmonic Distortion*)

Ada dua masalah harmonik, harmonik tegangan dan harmonik arus. Timbulnya harmonik tegangan tidak saja disebabkan oleh peralatan pemakai yang kurang memenuhi syarat, tetapi juga bisa karena peralatan atau sistem penyuplai listrik. Sedangkan harmonik arus timbul karena adanya beban yang tidak linier. Harmonik arus dapat menyebabkan besarnya nilai arus di

penghantar netral dan dapat meningkatkan rugi-rugi jaringan karena energi harmonik tidak dapat terbaca oleh kWh meter standar.

d. Hilang Tegangan Sekejap (*Voltage Dip*)

Hilang tegangan sekejap adalah hilangnya tegangan atau merosotnya tegangan yang sangat besar (lebih dari 9%) dalam waktu yang sangat pendek. Hilang tegangan sekejap dapat disebabkan oleh adanya hubung singkat pada sebuah saluran, dan beroperasinya Penutup Balik Otomatis (PBO) pada jaringan *radial*.

e. Kelip Tegangan

Penyebab kelip tegangan adalah susut tegangan yang mendadak dan berulang-ulang yang ditimbulkan tanur busur pada motor dengan asutan langsung. Besarnya susut tegangan diatas adalah 5% sampai 6,5%. Kelip tegangan sangat merugikan pelanggan khususnya pelanggan industri dan juga dapat mengganggu keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

5. Biaya

Biaya operasi khususnya biaya bahan bakar adalah biaya yang terbesar dari suatu perusahaan listrik sehingga perlu dipakai teknik-teknik optimasi untuk menekan biaya ini.

2.2.2. Konfigurasi Sistem Jaringan Tegangan Menengah

2.2.2.1. Konfigurasi Jaringan Distribusi *Radial*

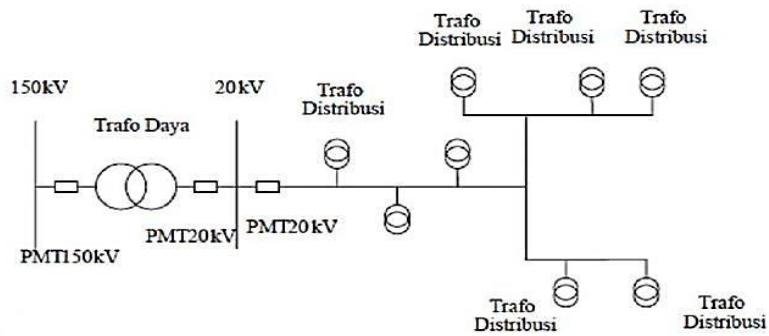
Pada sistem *radial*, tersusun bila antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (*line*), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan *radial* karena saluran ini ditarik secara *radial* 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 percabangan-percabangan 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.

Kelebihan sistem jaringan *radial* :

1. Bentuknya konfigurasi jaringannya sederhana.
2. Biaya investasinya relatif lebih murah dibandingkan konfigurasi lainnya.

Kelemahan sistem jaringan *radial* :

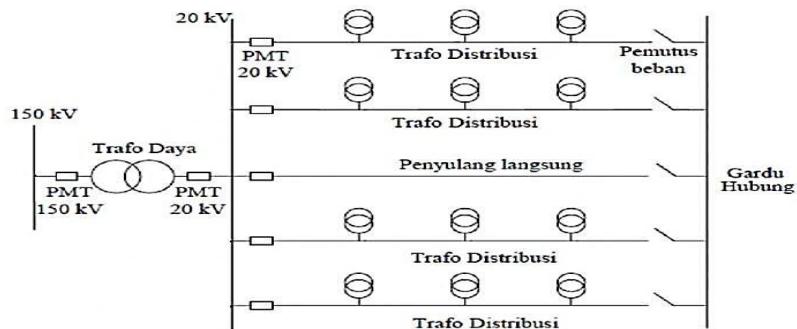
1. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
2. Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami "*black out*" secara total.



Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Radial

2.2.2.2. Konfigurasi Jaringan Distribusi Spindel

Pada sistem *radial* salah satu cara untuk meningkatkan keandalan ialah membuat semua penyulang yang keluar dari Gardu Induk (GI) menuju kesatu titik pertemuan sehingga membentuk suatu lingkaran yang terbuka pada titik pertemuan tersebut dengan kata lain semua penyulang ini sudah direncanakan berakhir disuatu titik yang disebut titik refleksi. Titik refleksi ini dalam praktek merupakan Gardu-Hubung (GH) (*switching substation*) atau disingkat GH. Struktur seperti ini dikenal sebagai struktur *spindel*.



Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Spindel

Pada struktur *spindel* ini selalu ada penyulang cadangan khusus yang lebih dikenal dengan sebutan penyulang ekspres. Penyulang ekspres ini tidak mencatu gardu-gardu distribusi, tetapi merupakan penyulang penghubung antara gardu induk dengan gardu hubung dan dimaksud untuk menjaga kelangsungan pemasokan tenaga listrik pada pelanggan-pelanggan, bila terjadi gangguan pada suatu penyulang yang memasok gardu-gardu distribusi. Jadi penyulang ekspres ini dalam keadaan normal merupakan kabel yang bertegangan sampai di GH (tanpa beban).

Kelebihan sistem jaringan *spindel* :

1. Kontinuitas pelayanan daya lebih terjamin, sebab di sistem jaringan *spindel* terdapat penyulang cadangan (penyulang ekspres) untuk menjaga kelangsungan pemasokan tenaga listrik pada pelanggan.
2. Kualitas pelayanan dayanya relatif baik, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif lebih kecil.

Kelemahan sistem jaringan *spindel* :

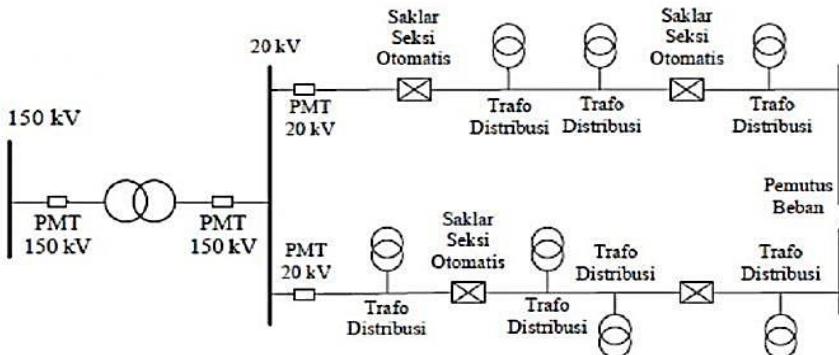
1. Jumlah penyulang pada setiap jaringan *spindel* dibatasi maksimum 7 buah penyulang, dan satu diantaranya merupakan penyulang ekspres.
2. Biaya investasinya relatif lebih mahal dibandingkan dengan *radial*.³

2.2.2.3. Konfigurasi Jaringan Distribusi 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 *loop*, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih

³ Hasan Basri, *Sistem Distribusi Daya Listrik* (Jakarta: ISTN, 1997), hlm.54-55

baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil.



Gambar 2.6 Konfigurasi Jaringan Loop

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.

Kelebihan sistem jaringan *loop* :

1. Kontinuitas pelayanan daya memang lebih baik, sebab susunan rangkaian penyulang membentuk *loop*, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang.
2. Kualitas pelayanan dayanya baik, rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif lebih kecil. Karena banyak menggunakan alat proteksi yang dapat bekerja dengan cepat terhadap gangguan yang terjadi pada penyulang tersebut.
3. Mengurangi tenaga operator.

Kelemahan sistem jaringan *loop* :

1. Bentuk jaringannya lebih kompleks dibandingkan sistem jaringan *radial*.
2. Biaya investasinya relatif lebih mahal karena memerlukan pemutus beban yang lebih banyak. Bila digunakan dengan pemutus beban yang otomatis (dilengkapi dengan *recloser* atau AVS)

2.3 Tegangan Operasi Sistem Distribusi

Tegangan operasi sistem distribusi terbagi menjadi 2 yaitu: tegangan operasi sistem distribusi tegangan menengah dan tegangan operasi sistem distribusi tegangan rendah.

Biasanya besar tegangan yang dipergunakan tergantung dari pada besarnya daya, jarak dan tenaga yang hendak disalurkan dari pusat-pusat pembangkit (titik penyaluran) ke pemakai.

2.3.1 Tegangan Operasi Sistem Distribusi Tegangan Menengah

Tegangan operasi pada sistem distribusi tegangan menengah nilainya dibatasi oleh SPLN No 01 Tahun 1995 yang menjelaskan bahwa tegangan operasi tidak boleh melebihi $0.9 \text{ V nominal} \leq V \text{ operasi} \leq 1.05 \text{ V nominal}$. Untuk menjaga agar nilai tegangan operasi pada sistem distribusi tegangan menengah memenuhi standar yang ditetapkan, maka dalam operasinya harus diperhatikan beberapa hal antara lain:

1. Beban maksimum dari saluran atau penghantar

Pembentangan maksimum dari penghantar mengacu pada Kemampuan Hantar Arus (KHA) dari suatu penghantar. Nilai KHA tersebut ditentukan oleh jenis penghantar dan ukuran diameter penghantar, *ambient temperature* (temperatur sekitar).

2. Panjang saluran

Panjang saluran sebaiknya mengacu pada ketentuan $1\text{kV} = 1.5\text{ km}$, sehingga pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV dibatasi *radius suplai* sepanjang 30 km .

Hal tersebut mengingat jatuh tegangan total $\Delta V = |V \text{ kirim}| - |V \text{ terima}|$ ini dipengaruhi oleh beban/arus pada saluran dan impedansi saluran. Besar impedansi saluran tergantung dengan panjang, jenis penghantar, dan ukuran diameter penghantar. Sehingga agar tegangan ujung saluran tidak terlalu rendah maka tegangan sisi kirim biasanya di-setting sebesar 1.05 V nominal yaitu 21 kV , dengan menggunakan peralatan pengubah sadapan berbeban (*On Load Tap Charger*).

Tegangan nominal yang dipakai umumnya : $3,6,7,10,13,20,30\text{ kV}$ dan yang banyak digunakan di Indonesia ialah tegangan 20 kV menggunakan tiga kawat.

2.3.2 Tegangan Operasi Sistem Distribusi Tegangan Rendah

Tegangan Sistem Distribusi pada Tegangan Rendah (TR) adalah tegangan dibawah 1 kV . Tegangan ini digunakan untuk menyalurkan listrik dari gardu distribusi menuju pelanggan tegangan rendah.

Tegangan nominal yang dipakai ialah $127/220\text{ Volt}$ dan $220/380\text{ Volt}$ dan yang digunakan di Indonesia ialah sebesar $220/380\text{ Volt}$ dengan penyaluran secara tiga fasa menggunakan empat kawat. Tegangan antar fasa ialah 380 Volt dan tegangan fasa netral ialah 220 Volt .⁴

⁴ Rudy Anto Hutapea, Skripsi, *Jatuh Tegangan dan Susut Jaringan Pada Sistem Distribusi* (Universitas Indonesia: 1991), hlm12