

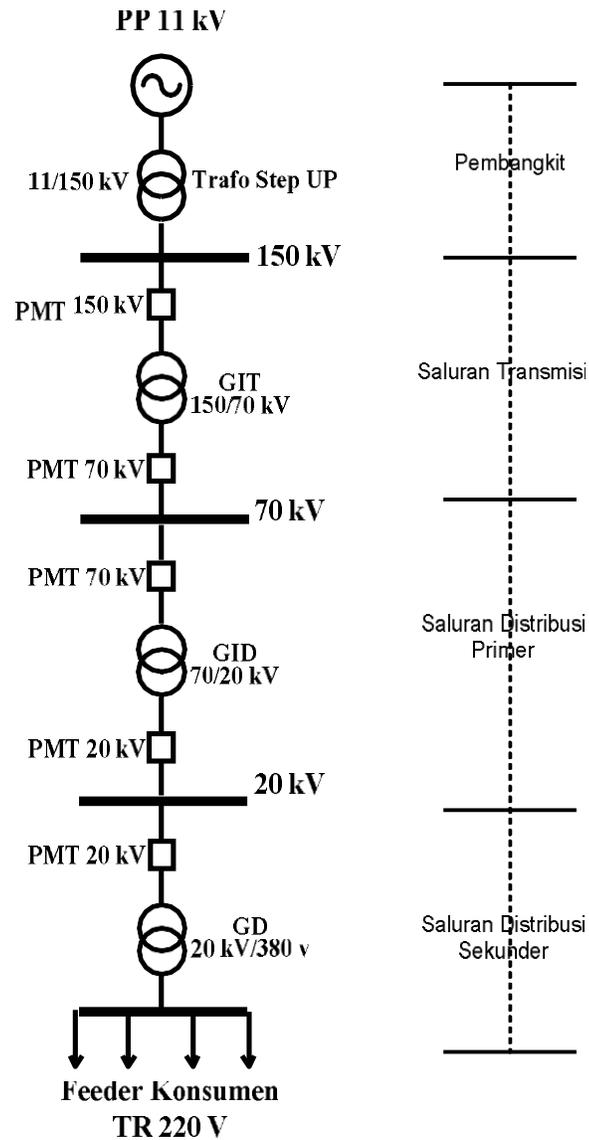


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik^[18]

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar sampai ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk menggunakan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV 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 ($I^2 \cdot R$). 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 menggunakan 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 220V/380V. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen. Pada sistem penyaluran daya jarak jauh 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 perlengkapannya, selain itu 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 yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik^[7]

Keterangan:

TR = Tegangan Rendah

PP = Power Plan

GIT = Gardu Induk Transmisi

GID = Gardu Induk Distribusi

GD = Gardu Distribusi

Pada gambar 2.1 digambarkan bagian-bagian dari sistem jaringan distribusi tenaga listrik secara umum. Untuk jaringan distribusi pada umumnya terdiri dari dua bagian besar yaitu :

- a. Jaringan Distribusi Primer, yaitu jaringan tenaga subtransmisi ke gardu distribusi. Jaringan ini merupakan jaringan tegangan menengah (20 kV).
- b. Jaringan Distribusi Sekunder, yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke beban/konsumen. Jaringan ini merupakan jaringan tegangan rendah (220 V/380V).

Setelah saluran transmisi mendekati pusat pemakaian tenaga listrik, yang merupakan suatu daerah industri atau suatu kota, tegangan melalui gardu induk (GI) diturunkan menjadi tegangan menengah (TM) 20 kV. Setiap gardu induk (GI) merupakan pusat beban untuk suatu daerah pelanggan tertentu. Bebannya berubah-ubah sepanjang waktu sehingga daya yang dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik selalu berubah. Perubahan daya yang terjadi di pusat pembangkit ini bertujuan untuk mempertahankan tenaga listrik tetap pada frekuensi 50 Hz. Proses perubahan ini dikoordinasikan dengan Pusat Pengaturan Beban.

Tegangan yang diterima di titik-titik beban pada jaringan distribusi lebih kecil dari tegangan yang disalurkan. Hal ini disebabkan adanya rugi tegangan di sepanjang jaringan listrik yang diakibatkan oleh pemakaian beban listrik, panjang saluran, luas penampang saluran, impedansi saluran dan nilai faktor kerja yang buruk. Akibat dari rugi tegangan ini ialah menimbulkan rugi daya dan mempengaruhi efisiensi penyaluran ke konsumen.

Baik buruknya suatu sistem distribusi dinilai dari beberapa faktor, diantaranya^[19]:

- a) Kontinuitas pelayanan
- b) Fleksibilitas
- c) Kualitas daya
- d) Pertimbangan ekonomis
- e) Kondisi dan situasi lingkungan

2.2 Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik^[18]

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

2.2.1 Menurut Jenis/Tipe Konduktornya

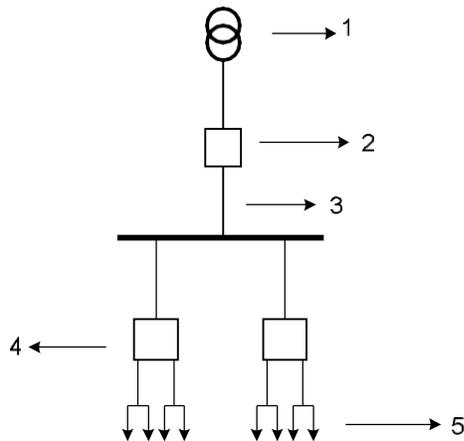
1. Saluran udara, dipasang pada udara terbuka dengan bantuan tiang dan perlengkapannya yang dibedakan atas :
 - Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus.
 - Saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.
2. Saluran bawah tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (*ground cable*).
3. Saluran bawah laut, dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (*submarine cable*).

2.2.2. Menurut Susunan Rangkaiannya

Dari uraian diatas telah disinggung bahwa sistem distribusi dibedakan menjadi dua yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder.

1. Jaringan Distribusi Primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder trafo substation (G.I.) dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20 kV. 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 di suplay tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer. Berikut adalah gambar bagian-bagian distribusi primer secara umum.



Gambar 2.2 Bagian-Bagian Sistem Distribusi Primer

Keterangan :

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. Transformator daya | 4. Gardu Hubung |
| 2. Pemutus tegangan | 5. Gardu Distribusi |
| 3. Penghantar | |

Bagian-bagian sistem distribusi primer terdiri dari :

1. Transformator daya, berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya.
2. Pemutus tegangan, berfungsi sebagai pengaman yaitu pemutus daya.
3. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya.
4. Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa mengubah tegangan.
5. Gardu distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

a. Jaringan Distribusi Primer Menurut Bahan Konduktornya^[6]

Jaringan distribusi SUTM 20 KV pada umumnya menggunakan jenis kawat yaitu saluran yang konduktornya tidak dilapisi isolasi sebagai pelindung luar (telanjang). Tipe demikian digunakan pada pasangan luar yang diharapkan



terbebas dari sentuhan misalnya untuk jenis kabel yaitu saluran yang konduktornya dilindungi/dibungkus lapisan isolasi.

Bahan konduktor 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 memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*). Oleh karena itu ada beberapa macam jenis konduktor, yaitu:

a. AAC (*All-Aluminium Konduktor*)

Kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.

b. AAAC (*All-Aluminium-Alloy Konduktor*)

Kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium.

c. ACSR (*All Konduktor, Steel-Reinforce*)

Kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.

d. ACAR (*Aluminium Konduktor, Alloy-Reinforced*)

Kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

b. Jaringan Distribusi Primer Menurut Susunan Rangkaian

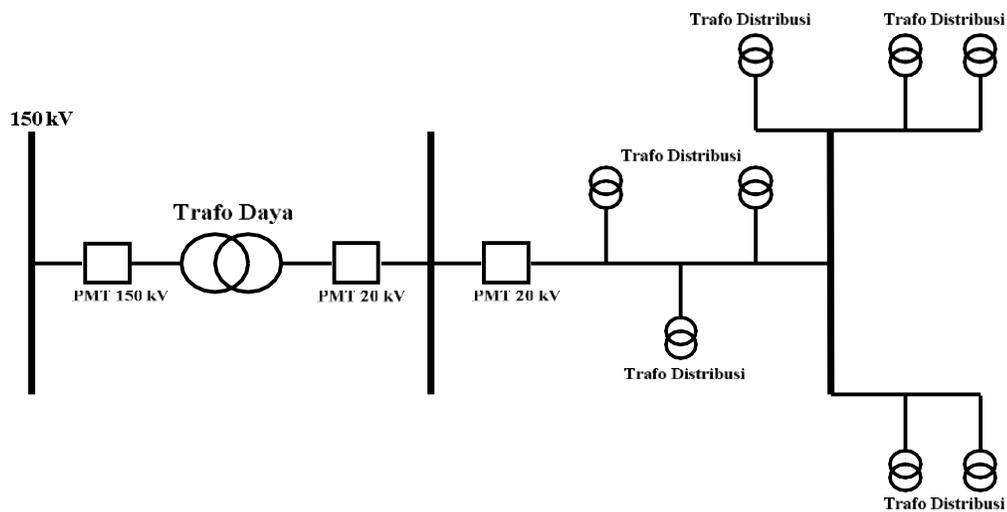
Susunan rangkaian sistem jaringan distribusi ada beberapa macam, yaitu :

1. Sistem Radial

Sistem radial ini merupakan suatu sistem distribusi tegangan menengah yang paling sederhana, murah, banyak digunakan terutama untuk sistem yang kecil/kawasan pedesaan. Proteksi yang digunakan tidak rumit dan keandalannya paling rendah.

Keuntungan :

1. Mudah mengoperasikannya.
2. Sistem pemeliharaannya lebih murah.
3. Bentuknya sederhana.



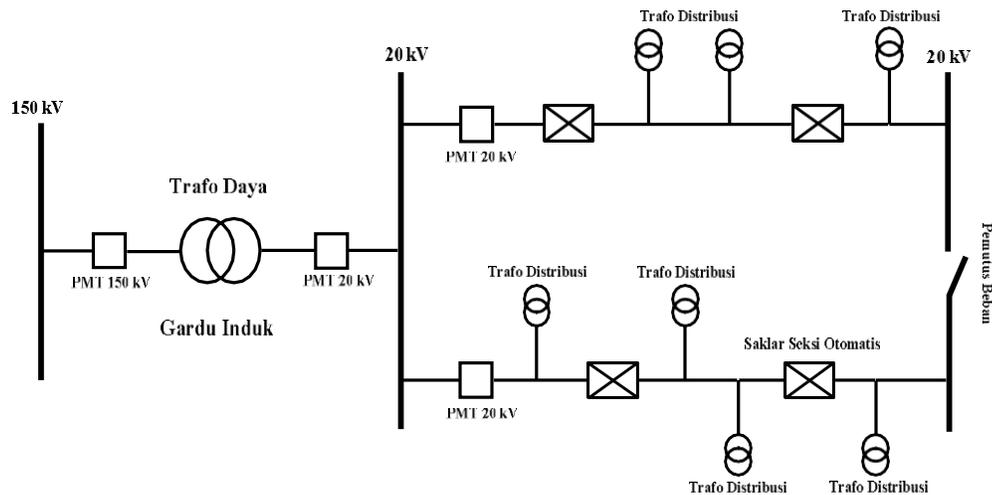
Gambar 2.3 Jaringan Distribusi Sistem Radial^[1]

Kerugiannya :

1. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
2. Kontinuitas pelayanannya 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.

2. Sistem Loop

Pada sistem loop terbuka, bagian-bagian *feeder* tersambung melalui alat pemisah (*disconnectors*), dan kedua ujung *feeder* tersambung pada sumber energi. Pada suatu tempat tertentu di *feeder*, alat pemisah sengaja dibiarkan dalam keadaan terbuka. Pada dasarnya, sistem ini terdiri atas dua *feeder* yang dipisahkan oleh suatu pemisah, yang dapat berupa sekering, alat pemisah dan saklar daya. Terlihat pada gambar 2.4 bila terjadi gangguan, bagian saluran dari *feeder* yang terganggu dapat dilepas dan disambung pada *feeder* yang tidak terganggu. Sistem demikian biasanya dioperasikan secara manual dan dipakai pada jaringan yang relatif kecil.



Gambar 2.4 Jaringan Distribusi Sistem Loop^[1]

Jaringan ini merupakan pengembangan dari sistem radial. Dengan diperlukannya kehandalan yang lebih tinggi dan umumnya sistem ini dapat dipasang dalam satu gardu induk. Dimungkinkan juga dari gardu induk lain tetapi harus dalam satu sistem di sisi tegangan tinggi, karena hal ini diperlukan untuk manuver beban pada saat terjadi gangguan.

Keuntungan dan Kerugian :

1. Secara teknis lebih baik dari sistem radial karena kualitas dan kontinuitas pelayanan daya lebih baik. (+)
2. Biaya sedikit lebih mahal karena dibutuhkan pemutus beban lebih banyak. (-)

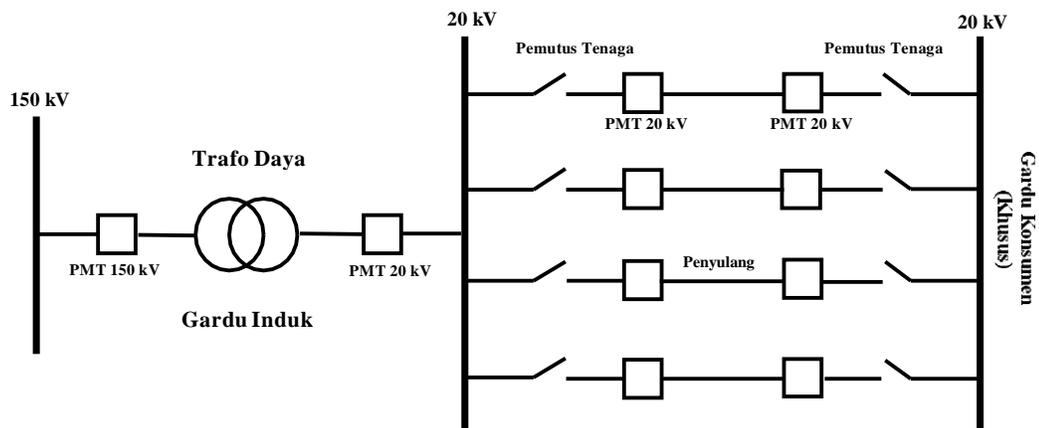
3. Sistem Ring

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 susut tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil.

Keuntungan :

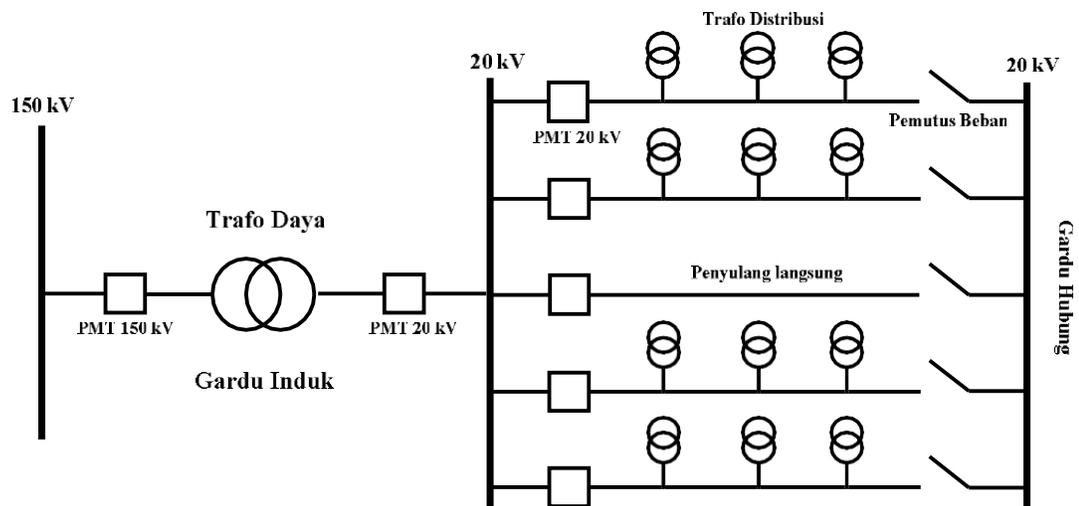


1. Jumlah konsumen yang besar bisa dijangkau.
2. Gangguan salah satu sisi penghantar harus sanggup menampung seluruh beban yang terpasang pada sistem, disini erat hubungannya dengan rugi tegangan.
3. Mudah operasi.



Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Sitem Ring^[1]

4. Sistem *Spindle*



Gambar 2.6 Jaringan Sistem Distribusi *Spindle*^[1]



Sistem *spindle* merupakan sistem yang relatif handal karena disediakan satu buah *express feeder* yang merupakan *feeder*/penyulang tanpa beban dari gardu induk sampai gardu hubung/GH refleksi. Sistem ini banyak digunakan pada jaringan SKTM. Sistem ini relatif mahal karena biasanya dalam pembangunannya sekaligus untuk mengatasi perkembangan beban dimasa yang akan datang. Proteksinya relatif sederhana hampir sama dengan sistem *open loop*. Biasanya ditiap-tiap feeder dalam sistem *spindel* disediakan gardu tengah (*middle point*) yang berfungsi untuk titik manufer apabila terjadi gangguan pada jaringan tersebut.

2.2 Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban (Lihat Gambar 2.1).

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 sebagai berikut :

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

2.3 Parameter Saluran Distribusi

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 jauh (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. Resistansi penghantar sangat penting dalam evaluasi efisiensi distribusi dan studi ekonomis.

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 analisis sistem tenaga.

a. Resistansi Saluran

Nilai tahanan saluran transmisi dipengaruhi oleh resistivitas konduktor, suhu, dan efek kulit (*skin effect*). Tahanan merupakan sebab utama timbulnya susut tegangan pada saluran transmisi. Dikenal dua macam tahanan, yaitu tahanan arus searah dan tahanan arus bolak-balik. Tahanan arus searah ditentukan oleh nilai resistivitas material konduktor:

$$R_{dc} = q \frac{1}{A} \Omega \quad (2.1)^{[1]}$$

dimana:

R_{dc} = tahanan arus searah (Ω)

q = tahanan jenis penghantar / resistivitas ($\Omega \text{ m}$)

l = panjang saluran/konduktor (m)

A = Iuas penampang penghantar (m^2)

Sehingga didapatkan tahanan arus bolak-balik (AC),

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + Y_s + Y_p) \quad (2.2)^{[11]}$$

dimana, $Y_s = \text{skin effect}$ (efek kulit)

$Y_p = \text{proximity effect}$ (efek sekitar)



Efek kulit adalah gejala pada arus bolak balik, bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut makin besar ke arah permukaan kawat. Akan tetapi bila kita hanya meninjau frekuensi kerja (50 *Hertz* atau 60 *Hertz*) maka pengaruh efek kulit itu sangat kecil dan dapat diabaikan.

Efek sekitar ialah pengaruh dari kawat lain yang berada di samping permukaan kawat yang pertama (yang ditinjau) sehingga distribusi fluks tidak simetris lagi. Tetapi bila radius konduktor kecil terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

b. Reaktansi Saluran

Dalam hal arus bolak-balik, medan sekeliling konduktor tidaklah konstan melainkan berubah-ubah dan berkaitan dengan konduktor itu sendiri maupun konduktor lain yang berdekatan oleh karena adanya fluks yang memiliki sifat induktansi. Untuk besarnya reaktansi sangat ditentukan oleh induktansi dari kawat dan frekuensi arus bolak-balik yaitu :

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

dimana, X_L = reaktansi kawat penghantar (Ω)

c. Induktansi Saluran

Menurut Saadat (1999) suatu penghantar yang membawa arus menghasilkan suatu medan magnetik di sekeliling penghantar. Fluks magnetik saluran merupakan lingkaran konsentris tertutup dengan arah yang diberikan oleh kaidah tangan kanan. Dengan penunjukan ibu jari sebagai arah arus, jari tangan kanan yang melingkari titik kawat sebagai arah medan magnetik. Apabila arus berubah, fluks berubah dan suatu tegangan diinduksikan dalam rangkaian. Dengan mendefinisikan material magnetik, induktansi L merupakan rasio lingkup fluks (*flux linkage*) magnetik total terhadap arus,

$$L = \frac{\oint}{I} \quad (2.4)^{[10]}$$

Dimana \oint merupakan lingkup fluks dalam weber lilit (*weber turn*).

$$\oint = \frac{1}{2\pi} \mu_0 \cdot \mu_r \ln \frac{D}{r} \text{ weber}$$



$$\begin{aligned}
 L &= \frac{\mu_0 \mu_r}{8n} + \frac{\mu_0 \mu_r}{2n} \ln \frac{D-r}{r} \text{ H} \\
 &= \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8n} \{1 + 4 \ln \frac{D-r}{r}\} \text{ H/m} \\
 &= 10^{-7} \{0.5 + 2 \ln \frac{D-r}{r}\} \text{ H/m} \\
 &= \{0.5 + 4.6 \log_{10} \frac{D-r}{r}\} \times 10^{-7} \text{ H/m}
 \end{aligned}$$

dimana, μ_r = permeabilitas bahan konduktor

μ_0 = permeabilitas pada udara bebas ($4\pi \times 10^{-7}$)

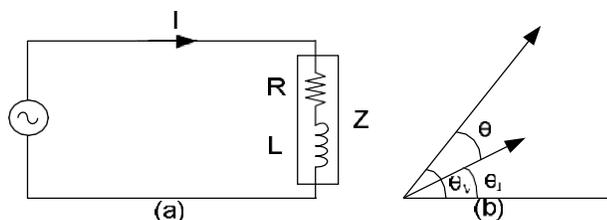
Pada saluran transmisi 3 fasa, nilai induktansi/phase adalah sama dengan nilai induktansi per konduktor, yaitu :

$$L = \{0.5 + 4.6 \log_{10} \frac{D-r}{r}\} \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.5)$$

dimana D adalah jarak antara konduktor dan r adalah radius masing-masing konduktor tersebut.

Induktansi dihitung dengan konsep *Geometric Means Radius* (GMR). Karakteristik penghantar dapat dicari dari buku penghantar atau literature pabrik pembuat yang menyediakan nilai induktansi dari suatu penghantar dalam satuan mH/km. Pabrik pembuat penghantar menyediakan karakteristik standard penghantar dengan ukuran penghantar.

2.4 Daya Listrik



Gambar 2.7 (a) Tegangan AC yang diterapkan pada beban^[9], (b) diagram fasor.

Apabila suatu sumber listrik arus bolak-balik (AC) diterapkan pada komponen impedansi kompleks $Z = R + jX$ dimana $X = 2\pi fL$ seperti



ditampilkan pada gambar 2.7 (a) , menghasilkan fasor tegangan $V = |V| \angle \theta$, dan fasor arus $I = |I| \angle \theta$, dalam nilai efektif (rms) seperti digambarkan pada gambar 2.7 (b).

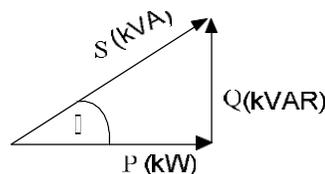
Ungkapan daya pada rangkaian diatas adalah perkalian tegangan dan arus VI^* yang menghasilkan,

$$VI^* = |V||I| \angle \theta$$

$$VI^* = |V||I|\cos \theta + j|V||I| \sin \theta \quad (2.6)^{[10]}$$

Persamaan diatas menentukan kuantitas daya kompleks dimana bagian realnya merupakan daya nyata P dan bagian imajinernya merupakan daya reaktif Q sedangkan θ merupakan sudut daya.

Menurut Smith (1990) konsep daya kompleks memberikan pendekatan lain untuk pemecahan persoalan AC. Perhitungan yang mengikuti kaidah aljabar kompleks, teknik vektor dan metode grafik dapat diterapkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Segitiga Daya Kompleks^[9]

Selanjutnya daya kompleks ditandai dengan S dan diberikan melalui,

$$S = VI^* \quad (2.7)^{[10]}$$

$$S = P + jQ \quad (2.8)^{[10]}$$

magnitud dari S,

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.9)^{[10]}$$

Persamaan diatas merupakan daya terlihat (*apparent power*), satuannya dalam volt-ampere dan satuan besarnya dalam kVA atau MVA. Daya terlihat memberikan indikasi langsung dari energi listrik dan digunakan sebagai suatu rating satuan perangkat daya. Dari uraian diatas maka daya listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga macam, daya semu, daya aktif (nyata) dan daya



reaktif.

1. Daya Semu^[9]

Daya semu adalah daya yang melewati suatu saluran penghantar yang ada pada jaringan transmisi maupun distribusi atau hasil penjumlahan daya aktif dan daya reaktif. Daya semu ini umumnya tertera di kWh meter. Dimana daya semu ini dibentuk oleh besaran tegangan yang dikalikan dengan besaran arus.

$$\text{Untuk } 1\phi : S = V_{\phi} \times I_{\phi}^* \quad (2.10)$$

$$\text{Untuk } 3\phi : S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L^* \quad (2.11)$$

dimana, S = daya semu (VA)

2. Daya Aktif^[9]

Daya aktif (daya nyata) adalah daya yang dipakai untuk menggerakkan berbagai macam seperti : gerakan motor listrik atau mekanik. Daya aktif ini merupakan pembentuk dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

$$\text{Untuk } 1\phi : P = V_{\phi} \times I_{\phi} \times \cos \phi \quad (2.12)$$

$$\text{Untuk } 3\phi : P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \phi \quad (2.13)$$

dimana, P = daya aktif (watt)

V = tegangan yang ada (KV)

I = besar arus yang mengalir (A)

$\cos \phi$ = faktor kerja

3. Daya Reaktif^[9]

Daya reaktif merupakan daya yang tidak terpakai dalam suatu sistem tenaga listrik. Adanya daya reaktif juga sering dipengaruhi oleh beban induktif atau kapasitif suatu rangkaian listrik.

$$\text{Untuk } 1\phi : Q = V_{\phi} \times I_{\phi} \times \sin \phi \quad (2.14)$$

$$\text{Untuk } 3\phi : Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \phi \quad (2.15)$$

dimana, Q = daya reaktif (VAR)

$\sin \phi =$ faktor kerja (tergantung besarnya ϕ)

2.5 Model Saluran Distribusi

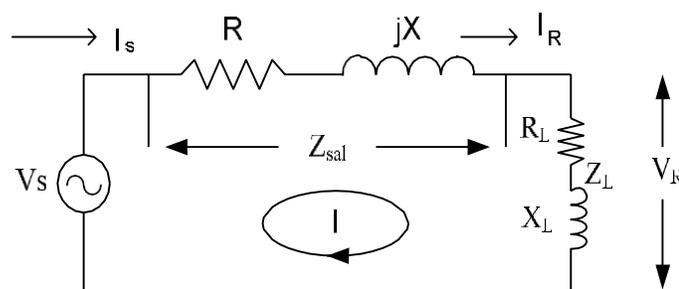
Saluran distribusi digambarkan melalui suatu model ekuivalen dengan mengambil parameter rangkaian pada suatu basis per fasa. Tegangan terminal digambarkan dari satu saluran ke netral, arus dari satu fasa saluran sehingga sistem distribusi tiga fasa berkurang menjadi ekuivalen sistem distribusi fasa tunggal.

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.

$$Z = (r + jmL)l \quad (2.16)^{[8]}$$

$$Z = R + jX \quad (2.17)^{[8]}$$

Dimana r dan L merupakan resistansi dan induktansi perfasa per-satuan panjang, dan l merupakan panjang saluran. Model saluran distribusi pada suatu basis perfasa ditunjukkan pada gambar (2.9). V_S dan I_S merupakan tegangan dan arus pada ujung kirim saluran, V_R dan I_R merupakan tegangan dan arus pada ujung penerima saluran.



Gambar 2.9 Model saluran distribusi^[5]

Keterangan :

V_S = tegangan sumber/ pada ujung pengirim (Volt)

V_R = tegangan pada sisi penerima/beban (Volt)



I_R = arus pada ujung pengirim (A)

I_S = arus pada ujung penerima (A)

$Z_L = (R + jX)$ impedansi beban (Ω)

Jika daya terlihat (*apparent power*) tiga fasa didistribusikan ke beban pada sisi penerima, arus ujung pengirim diperoleh melalui,

$$I_S = \frac{S_{S(3\phi)}^*}{3V_S^*} \quad (2.18)$$

dimana,

$S_{S(3\phi)}$ = daya terlihat tiga fasa pada sisi pengirim (MVA)

V_S = tegangan sisi pengirim (kV)

Oleh karena arus rangkaian saluran distribusi merupakan hubungan seri dimana kapasitansi *shunt* saluran diabaikan maka arus ujung pengirim dan ujung penerima adalah sama,

$$I_S = I_R \quad (2.19)$$

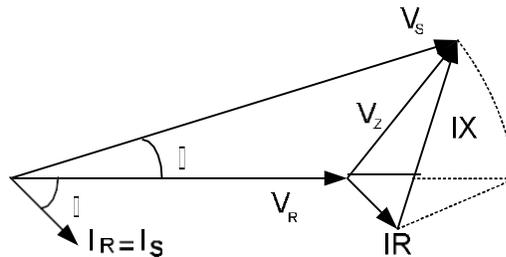
2.6 Rugi Tegangan Saluran

Rugi tegangan (*voltage losses*) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dengan kriteria rugi tegangan yang dapat diijinkan tidak boleh lebih dari 5% dan minimum -10% ($\Delta V \geq 5\%$). Besarnya rugi tegangan pada saluran transmisi tersebut diukur pada titik yang paling jauh (ujung).

Adapun penyebab jatuh tegangan (drop tegangan) adalah :

1. Jauhnya jaringan, jauhnya transformator dari gardu induk.
2. Rendahnya tegangan yang diberikan GI atau rendahnya tegangan transformator distribusi.
3. Sambungan penghantar yang tidak baik, penjumlahan saluran distribusi tidak tepat sehingga bermasalah di sisi TM dan TR.
4. Jenis penghantar dan konektor yang digunakan.
5. Arus yang dihasilkan terlalu besar.

Berdasarkan rangkaian ekuivalen saluran pada gambar (2.9) dan uraian dari persamaan (2.16) sampai (2.19) dapat digambarkan diagram fasor arus dan tegangan untuk beban dengan sudut daya tertinggal (*lagging*) seperti ditunjukkan pada gambar (2.10).



Gambar 2.10 Diagram fasor saluran distribusi^[11]

Untuk mendapatkan susut tegangan distribusi primer dengan sistem pendekatan seperti pada diagram phasor diatas yaitu dengan mengamsusikan bahwa V_S dan V_R berhimpitan maka didapat persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah :

$$V_Z = I (R \cos\phi + X \sin\phi) \quad (2.20)^{[18]}$$

Rugi tegangan saluran merupakan tegangan jatuh (*voltage drop*) sepanjang saluran dan dapat ditentukan,

$$\text{atau } V_Z = I_S \times Z_L \quad (2.21)$$

Tegangan sisi penerima atau tegangan sampai ke beban merupakan tegangan sisi pengirim dikurangi teganga jatuh saluran,

$$V_R = V_S - V_Z \quad (2.22)$$

Besar persentase susut tegangan pada saluran distribusi primer dapat dihitung dengan :

$$\% V_{\text{rugi}} = \frac{V_Z}{V_S} \times 100\% \quad (2.23)^{[4]}$$

2.7 Rugi Daya Saluran^[3]

Berdasarkan gambar (2.9), rugi daya saluran timbul oleh 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 magnetik dan atau medan listrik. Arus yang mengalir pada saluran akan menghasilkan rugi daya terlihat saluran,

$$S_{Z(3\phi)} = 3 \cdot V_Z I_S^* \quad (2.24)$$

Rugi daya terlihat yang dihasilkan pada saluran terdiri dari rugi daya aktif dan rugi daya reaktif yang ditulis dalam bentuk bilangan kompleks dimana rugi daya aktif sebagai bilangan real dan rugi daya reaktif sebagai bilangan imajiner,

$$S_{Z(3\phi)} = P_{Z(3\phi)} + jS_{z(3\phi)} \quad (2.25)$$

Berdasarkan diagram fasor pada gambar (2.10), rugi daya aktif perfasa dapat ditentukan dari variable arus, tegangan dan sudut perbedaan fasa jatuh

tegangan dan arus saluran,

$$P_Z = V_Z I_S \cos \phi \quad (2.26)$$

$$P_R = P_S - P_Z \quad (2.27)$$

Sudut perbedaan fasa antara jatuh tegangan dan arus saluran, $\cos \phi$ disebut juga sebagai sudut daya saluran atau faktor daya.

2.8 Efisiensi Penyaluran

Efisiensi penyaluran adalah perbandingan antara daya nyata yang diterima dengan daya nyata yang disalurkan atau dengan kata lain perhitungan efisiensi ini berguna untuk mengetahui seberapa persenkah energi listrik tersebut diterima setelah didalam penyalurannya terdapat rugi-rugi. Adapun untuk mendapatkan nilai efisiensi itu adalah sebagai berikut :

Setelah tegangan jatuh saluran dihitung dari persamaan (2.21), rugi daya terlihat total saluran dapat diperoleh melalui persamaan (2.25).

Daya terlihat pada sisi penerima dapat ditentukan,

$$S_{R(3\phi)} = S_{S(3\phi)} - S_{z(3\phi)} \quad (2.28)$$



dimana daya terlihat merupakan resultan vektor dari daya nyata dan daya reaktif, sehingga dapat dituliskan,

$$S_{R(3\phi)} = P_{R(3\phi)} + jQ_{R(3\phi)} \quad (2.29)^{[10]}$$

$$S_{S(3\phi)} = P_{S(3\phi)} + jQ_{S(3\phi)} \quad (2.30)^{[10]}$$

Dan efisiensi saluran dapat diperoleh,

$$\eta = \frac{P_{S(3\phi)}}{P_{R(3\phi)}} \times 100\% \quad (2.31)$$

dimana,

P_R = daya yang diterima/input (kW)

P_S = daya yang disalurkan/output (kW)