



### **b. 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 :

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

#### **2.1 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:

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \Omega \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana:

- $R_{dc}$  = tahanan arus searah ( $\Omega$ )
- $\rho$  = tahanan jenis penghantar / resistivitas ( $\Omega m$ )
- $l$  = panjang saluran/konduktor (m)
- $A$  = Iuas penampang penghantar ( $m^2$ )

Sehingga didapatkan tahanan arus bolak-balik

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + Y_S + Y_P)\dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana,  $Y_S = \text{skin effect}$  (efek kulit)

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

#### 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 :

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

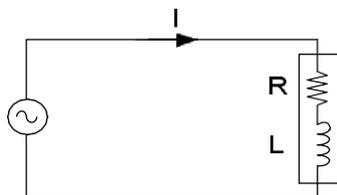
dimana,  $X_L$  = reaktansi kawat penghantar ( $\Omega$ )

### 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.

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** Tegangan AC yang diterapkan pada beban,

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  $V = |V| \angle \phi$ , dan fasor arus  $I = |I| \angle \phi$ , dalam nilai efektif (rms) seperti digambarkan pada gambar 2.7.

Ungkapan daya pada rangkaian diatas adalah perkalian tegangan dan arus

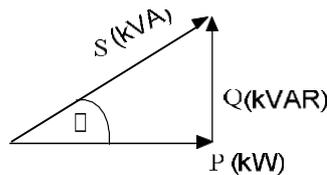
$VI^*$  yang menghasilkan,

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

$$VI^* = |V||I|\cos \phi + j|V||I| \sin \phi \dots\dots\dots(2.6)$$

Persamaan diatas menentukan kuantitas daya kompleks dimana bagian realnya merupakan daya nyata P dan bagian imajinernya merupakan daya reaktif Q sedangkan  $\phi$  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**

Selanjutnya daya kompleks ditandai dengan S dan diberikan melalui,

$$S = VI^* \dots\dots\dots(2.7)$$

$$S = P + jQ \dots\dots\dots(2.8)$$

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.

#### a. Daya Semu<sup>[9]</sup>

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.

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

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

dimana, S = daya semu (VA)

#### b. Daya Aktif<sup>[9]</sup>

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.

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

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

dimana, P = daya aktif (watt)

V = tegangan yang ada (KV)

I = besar arus yang mengalir (A)

Cos  $\phi$  = faktor kerja (standard PLN 0,85)

#### c. Daya Reaktif<sup>[9]</sup>

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.

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

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

dimana:  $Q$  = daya reaktif (VAR)

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

## 2.2 Model Saluran Distribusi

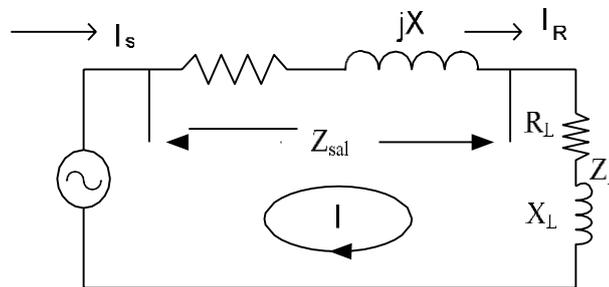
Saluran distribusi digambarkan melalui suatu model ekuivalen dengan mengambil parameter rangkaian pada suatu basis per fasa. Tegangan terminal digambarkan dari satu saluran ke netral, arus dari satu fasa saluran sehingga sistem distribusi tiga fasa berkurang menjadi ekuivalen sistem distribusi fasa tunggal.

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.

$$Z = (r + jmL) \dots \dots \dots (2.16)$$

$$Z = R + jX \dots \dots \dots (2.17)$$

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**

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 ( $\Omega$ )

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

### 2.3 Rugi Tegangan Saluran

Rugi tegangan (*voltage losses*) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Berdasarkan SPLN 72:1987 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 :

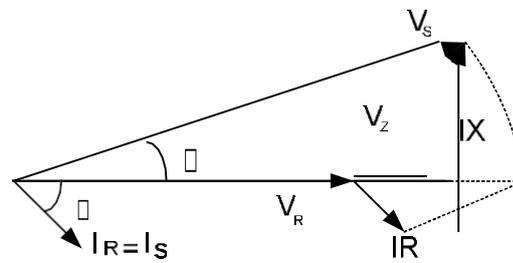
- a. Jauhnya jaringan, jauhnya transformator dari gardu induk.
- b. Rendahnya tegangan yang diberikan GI atau rendahnya tegangan transformator distribusi.
- c. Sambungan penghantar yang tidak baik , penjumperan



saluran distribusi tidak tepat sehingga bermasalah di sisi TM dan TR.

- d. Jenis penghantar dan konektor yang digunakan.
- e. Arus yang dihasilkan terlalu besar.

Berdasarkan rangkaian ekivalen 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<sup>[11]</sup>

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 :

$$V_Z = I ( R \cos \phi + X \sin \phi) \dots \dots \dots (2.20)$$

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

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

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

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



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

$$\% V_{\text{Rugi}} = \frac{V_Z}{V_S} \times 100\% \dots\dots\dots(2.23)$$

#### 2.4 Rugi Daya Saluran<sup>[3]</sup>

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,

$$S_{Z(3\phi)} = 3 \cdot V_Z I_S \dots\dots\dots(2.24)$$

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,

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

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

$$P_Z = V_Z \cdot I_S \cdot \cos \phi \dots\dots\dots(2.26)$$

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

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



## 2.5 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,

$$S_{R(3\phi)} = S_S(3\phi) - S_Z(3\phi) \dots \dots \dots (2.28)$$

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

$$S_{R(3\phi)} = P_R(3\phi) + jQ_R(3\phi) \dots \dots \dots (2.29)$$

$$S_S(3\phi) = P_S(3\phi) + jQ_S(3\phi) \dots \dots \dots (2.30)$$

Dan efisiensi saluran dapat diperoleh,

$$\eta = \frac{P_{R3\phi}}{P_{S3\phi}} \times 100\%$$

dimana,

$P_R$  = daya yang diterima (kW)

$P_S$  = daya yang disalurkan (kW)