

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

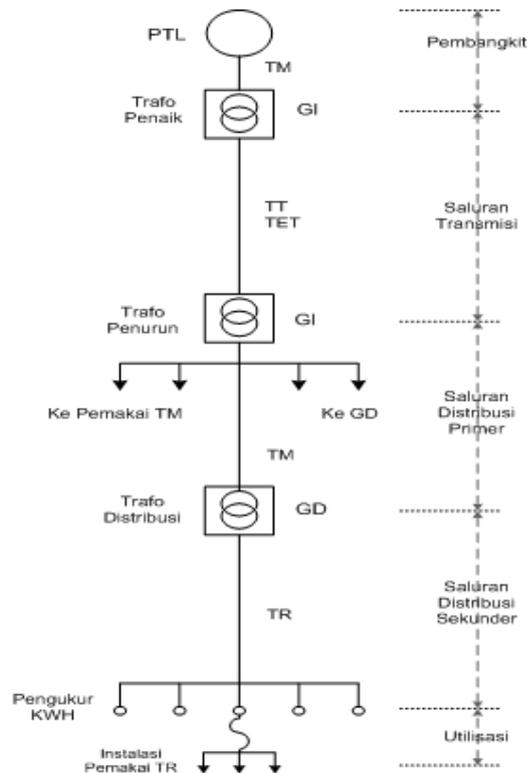
2.1 Sistem Tenaga Listrik^{[5]*}

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 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 yang utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakaian besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi. Gambar 2.1 memperlihatkan skema suatu system tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu system dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem terinterkoneksi.

Berdasarkan fungsi dari masing–masing subsistem dapat dijelaskan sebagai berikut:^[10]

1. Pembangkitan berperan sebagai sumber daya tenaga listrik.
2. Sistem transmisi berfungsi sebagai penyalur daya listrik secara besar-besaran dari pembangkit ke bagian sistem distribusi/konsumen.
3. Sistem distribusi berperan sebagai distributor energi listrik ke konsumen-konsumen yang membutuhkan energi listrik tersebut.

* Diurut Berdasarkan Daftar Pustaka



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Catatan :

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 Sistem Distribusi Tenaga Listrik^[9]

Jaringan distribusi tenaga listrik merupakan semua bagian dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan sumber daya besar (*big power source*) dengan rangkaian pelayanan pada konsumen. Sumber daya besar tersebut dapat berupa :



- a. Pusat pembangkit tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan jaringan distribusi.
- b. Gardu induk, yaitu gardu yang di *supply* dari pusat pembangkit tenaga listrik melalui jaringan – jaringan transmisi dan sub transmisi. Salah satu fungsi dari gardu induk adalah untuk mensupply tenaga listrik ke gardu distribusi melalui jaringan distribusi.
- c. Gardu distribusi, yaitu gardu yang di *supply* dari gardu induk melalui jaringan distribusi. Salah satu fungsi dari gardu distribusi adalah sebagai sarana *supply* tenaga listrik kekonsumen yang lataknya jauh dari gardu induk maupun pusat pembangkit tenaga listrik.

Adapun fungsi utama dari sistem distribusi adalah menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya (pembangkit) ke pemakai atau konsumen, baik buruk suatu jaringan distribusi dapat dinilai dari bermacam-macam factor, antara lain mengenai hal-hal sebagai berikut :

- a. Regulasi tegangan
- b. Kontinuitas pelayanan
- c. Efisiensi
- d. Fleksibilitas
- e. Harga system

Dari 5 faktor diatas, masalah-masalah yang dihadapi dalam suatu system jaringan distribusi adalah bagaimana menyalurkan tenaga listrik ke konsumen dengan cara sebaik-baiknya untuk saat tertentu dan juga untuk masa yang akan datang. System distribusi tenaga listrik harus memenuhi beberapa syarat sebagai berikut :

- a. Gangguan terhadap pelayanan pada suatu daerah tidak boleh terlalu lama.
- b. Gangguan terhadap pelayanan (*interruption*) tidak boleh terlalu sering.
- c. Harus fleksibel (mudah menyesuaikan diri dengan keadaan yang terjadi, seperti perubahan-perubahan pada sistem perubahan beban yang tidak



menelan biaya yang tinggi).

- d. Regulasi tegangan tidak terlampau besar.
- e. Biaya sistem operasional harus serendah mungkin.

Bagian – bagian dari system jaringan distribusi tenaga listrik secara garis besar. Untuk jaringan distribusi pada umumnya terdiri dari dua bagian besar, yaitu sebagai berikut :

a. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk sub transmisi ke gardu distribusi. Jaringan ini merupakan jaringan tegangan menengah atau jaringan tegangan primer. Biasanya jaringan ini menggunakan 6 jenis jaringan yaitu sistem radial dan sistem lup (loop), sistem ring, sistem network, sistem spindel dan system cluster.

b. Jaringan Distribusi Sekunder

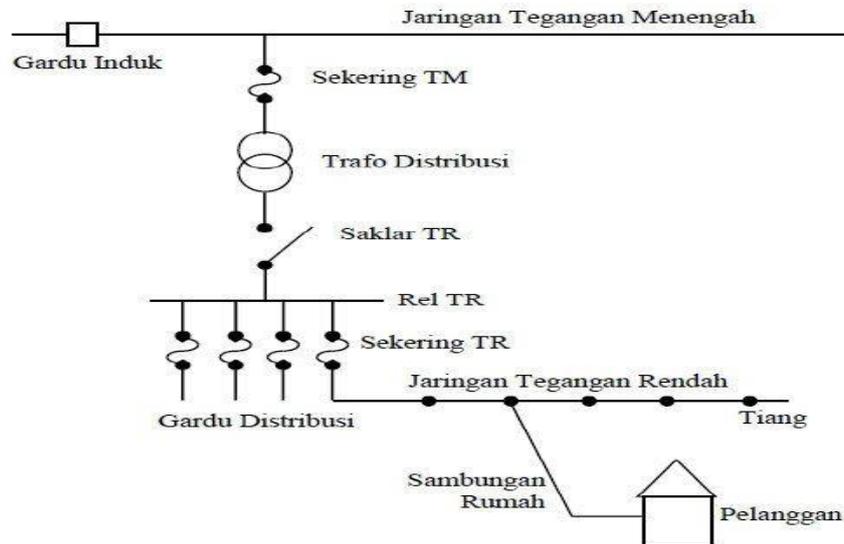
Jaringan distribusi sekunder mempergunakan tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan distribusi primer, terdapat pula pertimbangan-pertimbangan perihal keadaan pelayanan dan regulasi tegangan, distribusi sekunder Yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Jaringan ini sering disebut jaringan tegangan rendah.

Sistem Distribusi Sekunder (Jaringan Tegangan Rendah 380/220V) seperti pada gambar 2.2 merupakan salah satu bagian dalam system distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.

Pada umumnya daya yang sampai ke titik-titik beban pada sistem distribusi primer lebih kecil dibandingkan daya yang dibangkitkan. Hal ini disebabkan karena adanya rugi-rugi daya sepanjang jaringan yang disebabkan pemakaian beban oleh konsumen, panjang saluran yang dipakai dan luas penampang penghantar. Rugi-rugi daya ini akan berbeda-beda pada setiap penyulang, tergantung dari besarnya pemakaian beban dan luasnya daerah pelayanan dari masing-masing penyulang. Dari rugi-rugi daya inilah yang akan mempengaruhi



berapa nilai efisiensi penyaluran untuk menentukan besar energi itu sampai kepada konsumen.



Gambar 2.2 Sistem Jaringan Tegangan Menengah^[6]

2.3 Komponen-Komponen Utama Saluran Distribusi^[4]

Komponen-komponen utama dari saluran transmisi udara terdiri dari :

A. Tiang Distribusi

Tiang distribusi adalah suatu bangunan penopang saluran distribusi yang bisa berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang dan tiang kayu. Tiang-tiang baja, beton atau kayu umumnya digunakan pada saluran dengan tegangan kerja relatif rendah (di bawah 70 kV).



Gambar 2.3 Tiang Distribusi



B. Isolator

Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Isolator jenis pasak digunakan pada saluran transmisi dengan tegangan kerja (20 – 30 kV).



Gambar 2.4 Isolator Jenis Pasak

C. Kawat Penghantar

Jenis kawat penghantar udara yang biasa digunakan pada saluran transmisi tegangan menengah adalah : AAC (*All Aluminium Conductor*), yaitu penghantar yang seluruh terbuat dari aluminium. AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*), yaitu penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium campuran. AAACS (*All Aluminium Alloy Conductor Shielded*), yaitu penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium campuran yang memiliki isolasi.

1. Kabel Udara^[5]

a. Kabel jenis AAC

AAC (*All Aluminium Conductor*), yaitu penghantar yang terbuat dari kawat-kawat aluminium keras yang dipilin, tidak berisolasi dan tidak berinti baja. Kabel jenis ini bentuknya berurat banyak dengan ukuran luas penampang antara 16 - 1000 mm².



Gambar 2.5 Kabel Jenis AAC



b. Kabel jenis AAAC

AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*) yaitu penghantar yang terbuat dari kawat-kawat aluminium campuran yang dipilin, tidak berisolasi dan tidak berinti. Kabel jenis ini mempunyai ukuran diameter antara 1,50 – 4,50 mm, dengan bentuk fisiknya berurat banyak.



Gambar 2.6 Kabel Jenis AAAC

c. Kabel tembaga jenis AAACS

AAACS (*All Aluminium Alloy Conductor Shielded*) merupakan penghantar AAAC yg berselubung polietilen ikat silang (XPLE). Penghantarnya berupa aluminium paduan dipilin bulat tidak dipadatkan. Isolasi kabel AAACS memiliki ketahanan isolasi, sampai dengan 6 kV sehingga penghantar jenis ini harus diperlakukan seperti halnya penghantar udara telanjang.



Gambar 2.7 Kabel Jenis AAACS



d. Kabel bawah tanah (NYFGbY)

Kabel ini berisolasi dan berselubung PVC berperisai kawat baja atau aluminium untuk tegangan kerja sampai dengan 0,6/1 kV. Dengan adanya pelindung kawat pita baja, kabel ini memungkinkan ditanam langsung ke dalam tanah tanpa pelindung tambahan.



Gambar 2.8 Kabel Jenis NYFGbY

2. Konstruksi dan Penandaan

Jenis kawat berisolasi maupun kabel untuk instalasi listrik harus sesuai dengan pertelaan dari pabrik dan penggunaannya disesuaikan dengan PUIL 87. Penghantar yang lazim digunakan adalah tembaga atau aluminium. Tembaga atau aluminium yang digunakan harus mempunyai kemurnian yang tinggi, yaitu 99,5 % sehingga daya hantarnya tinggi. Aluminium lebih ringan dibanding tembaga, namun kekuatan tarik aluminium lebih kecil daripada kekuatan tarik tembaga. Untuk itu, penghantar aluminium yang ukurannya besar dan pemasangannya direntangkan memerlukan penguat baja atau paduan aluminium pada bagian tengahnya. Perbandingan beberapa sifat antara aluminium dan tembaga dilihat di tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan antara aluminium dan tembaga

Sifat	Aluminium	Tembaga
Massa Jenis	2,7 g/cm ³	8,96 g/cm ³
Kekuatan Tarik	20 – 30 kg/cm ²	40 kg/cm ²
Daya tahan jenis	0,0175 ohm.m/mm ²	0,029 ohm.m/mm ²
Daya hantar jenis	57 mm ² /ohm.m	35 mm ² /ohm.m

Catatan: Nilai-nilai pada table 2.2 tidaklah mutlak dan tergantung pada bahan.^[7]



3. Jenis Kabel

Untuk sambungan melalui bawah tanah, jenis kabel yang di pakai adalah NYFGbY. Pelindung metal shield kabel dibumikan pada panel APP, dijadikan satu dengan pembumian instalasi pelanggan (sistem pembumian TN-C).

Untuk sambungan luar pelayanan yang di pasang pada dinding bangunan (clipped on wall), dapat memakai kabel jenis NYY namun harus di lindungi dengan pelindung kabel (PVC, sejenis). Jika pelindung memakai logam, harus dibumikan menjadi satu dengan metal shield kabel NYFGbY.

Tabel 2.2 Penghantar Kabel Udara Jenis NFA2X-T untuk Sambungan Pelayanan Fasa 1 dan Fasa 3, $t = 30^{\circ}\text{C}$, ΔU 1%, panjang maksimum 30 meter sirkit.^[11]

Daya Tersambung (MCB)	Sistem Fasa -1		Sistem Fasa -3	
	Tunggal	Seri 5 Sambungan	Tunggal	Seri 3 sambungan
2 A	2x10 mm ²	2x 10 mm ²	-	-
4 A	2x10 mm ²	2x10 mm ²	-	-
6 A	2x10 mm ²	2x10 mm ²	-	-
10 A	2x10 mm ²	2x10 mm ²	-	-
16 A	2x10 mm ²	-	4x10 mm ²	-
20 A	2x16 mm ²	-	4x10 mm ²	-
25 A	2x25 mm ²	-	4x16 mm ²	-
30 A	2x25 mm ²	-	4x16 mm ²	-
43 A	2x25 mm ²	-	4x16 mm ²	-
50 A	2x35 mm ²	-	4x25 mm ²	-

Catatan : Untuk daya lebih besar dari 50 Ampere di gunakan jenis Kabel Pilin Saluran Udara Tegangan rendah.

Tabel 2.3 Penghantar Kabel Bawah Tanah Jenis NYFGbY untuk Sambungan Pelayanan Fasa -3 pada Saluran Udara Tegangan Rendah dengan $t = 30^{\circ}\text{C}$, dan $\Delta U=1\%$, (panjang maksimum 30 meter sirkit)^[11]

Intensitas Beban	Panjang Sirkit sesuai Intensitas		Beban
		4x10 mm ²	4x25 mm ²



10 A	80 m	-	-
16 A	80 m	-	-
20 A	60 m	-	-
25 A	48 m	-	-
30 A	40 m	80 m	-
40 A	30 m	70 m	-
50 A	24 m	58 m	106 m

2.4 Gardu Distribusi Menurut Pemasangannya

Gardu distribusi menurut pemasangannya dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

a. Gardu distribusi pasangan luar

Peralatan gardu induk pasang luar dipasang di udara terbuka. Berdasarkan cara pemasangannya gardu distribusi pasangan luar dibagi menjadi empat bagian, yaitu :

1. *Pole Mounting* (Pemasangan di tiang)

Gardu distribusi dan peralatannya dipasang langsung pada tiang, cara pemasangan ini cukup baik untuk trafo kecil sampai kapasitas 50KVA.

2. *H-Pole mounting* (Pemasangan di antara 2 tiang)

Gardu distribusi ini dipasang pada lengan antara dua tiang, cara pemasangan ini cocok untuk gardu berkapasitas sampai 200 KVA.

3. *Plat Form Mounting* (Pemasangan Bentuk Plat)

Gardu distribusi ini dipasang pada konstruksi tersendiri dari empat tiang untuk penempatan trafo, cara ini cocok untuk tempat dimana diperlukan peralatan yang membahayakan. Pemasangan ini sesuai dengan gardu berkapasitas 200KVA.

4. Pemasangan di Lantai

Gardu distribusi ini cocok untuk semua ukuran gardu, tetapi biasanya untuk kapasitas besar dari 250 KVA.



b. Gardu Distribusi Pasangan Didalam

Gardu distribusi pasangan didalam memiliki jarak minimum yang harus dipenuhi sebagai persyaratan bangunan rumah trafo, yaitu :

1. Jarak dari sisi dinding pada satu sisi minimum 1,25 m.
2. Jarak dari sisi dinding pada dua sisi minimum 0,75 m.
3. Jarak dari sisi dinding pada tiga sisi minimum 100 m.
4. Jarak untuk sisi minimum 1,25 m.

2.5 Parameter-Parameter Saluran Distribusi

2.5.1. Resistansi saluran^[12]

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:

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

Keterangan :

R_{DC} = tahanan arus searah (Ω)

ρ = tahanan jenis penghantar / resistivitas ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

l = panjang saluran/konduktor (m)

A = luas penampang penghantar (mm^2)

Dimana :

$$\rho_{Al} \text{ (aluminium)} = 2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} [20^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho_{Cu} \text{ (tembaga)} = 1,77 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} [20^{\circ}\text{C}]$$

Kenaikan resistansi karena pembentukan lilitan diperkirakan mencapai 1% untuk penghantar dengan tiga serat dan 2% untuk penghantar dengan lilitan konsentris. Jika suhu dilukiskan pada sumbu tegak dan resistansi pada sumbu mendatar maka titik pertemuan perpanjangan garis dengan sumbu suhu dimana



resistansinya sama dengan nol adalah suatu konstanta untuk bahan logam bersangkutan.

Sehingga didapatkan tahanan arus bolak-balik (AC),

$$R_{AC} = R_{DC} [1 + \alpha_{t1}(t_2 - t_1)] \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{Atau, } \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \dots\dots\dots(2.3)^{[4]}$$

Keterangan :

R_{AC} = tahanan pada temperatur t_2

R_{DC} = tahanan pada temperatur t_1

t_1 = temperatur awal beroperasi ($^{\circ}\text{C}$)

t_2 = temperatur operasi konduktor ($^{\circ}\text{C}$)

α_{t1} = koefisien temperatur dari tahanan pada temperatur

T = konstanta yang ditentukan oleh grafik

Nilai-nilai konstanta T adalah sebagai berikut:

$T = 234,5$ (untuk tembaga dengan konduktivitas 100%)

$T = 241$ (untuk tembaga dengan konduktivitas 97,3%)

$T = 228$ (untuk aluminium dengan konduktivitas 61%)

2.5.2. Reaktansi Saluran

Dalam hal arus bolak-balik medan sekeliling konduktor tidaklah konstan melainkan berubah-ubah dan mengait dengan konduktor itu sendiri maupun konduktor lain yang berdekatan oleh karena adanya fluks yang memiliki sifat induktansi.

Untuk besarnya reaktansi ditentukan oleh induktansi dari kawat dan frekuensi arus bolak-balik yaitu :

$$X_L = 2\pi \times f \times L \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

X_L = reaktansi kawat penghantar (Ω)

f = frekuensi (Hz)

L = induktansi dari kawat (Henri)



2.5.3. Induktansi Saluran^[8]

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.

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

$$L = \left\{ 0,5 + 4,6 \log 10 \frac{D-r}{r} \right\} \times 10^{-7} \frac{H}{m} \dots\dots\dots(2.5)$$

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

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots\dots\dots(2.7)$$

2.6 Faktor Daya^[12]

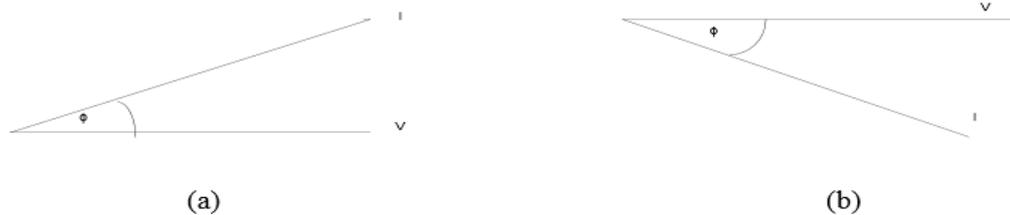
Faktor daya atau biasa disebut $\cos \mu$ dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya aktif dan daya tampak. Faktor daya dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Faktor Daya} = \frac{P}{S} = \frac{P}{VI} = \cos \emptyset \dots\dots\dots(2.8)$$

Faktor daya menentukan nilai guna dari daya yang dapat dipakai/ digunakan. Faktor daya yang optimal adalah sama dengan satu. Faktor daya yang lagging maupun leading bersifat memperkecil nilai guna tersebut. Umumnya



pemakaian tenaga di industri sebagian besar bebannya bersifat induktif, sehingga dayanya bersifat lagging.

Beban kapasitif(*leading*)Beban bersifat induktif(*lagging*)

Gambar 2.9 Aljabar Fasor

2.6.1. Daya Semu

Daya semu adalah daya yang lewat pada suatu saluran transmisi atau distribusi. Daya semu adalah tegangan dikali arus.

Daya semu untuk satu phasa dan tiga phasa.

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \times V \times I \dots \dots \dots (2.9)$$

$$S_{1\phi} = V \times I \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana :

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir (A)

$S_{1\phi}$ = Daya semu satu phasa (VA, KVA, MVA)

$S_{3\phi}$ = Daya semu tiga phasa (VA, KVA, MVA)

2.6.2. Daya Aktif (Daya Nyata)

Daya aktif adalah daya yang dipakai untuk keperluan menggerakkan mesin atau mekanik, dimana daya tersebut dapat diubah menjadi panas. Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tagangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

Daya aktif untuk satu phasa :

$$P_{1\phi} = V \cdot I \cdot \cos \phi \dots \dots \dots (2.11)$$



Daya aktif untuk tiga fasa :

$$P_{3\Phi} = \sqrt{3} V.I.\cos \emptyset \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

$P_{1\Phi}$ = Daya aktif satu fasa (W,KW,MW)

$P_{3\Phi}$ = Daya aktif tiga fasa (W,KW,MW)

V = Tegangan yang ada (V,KV)

I = Besar arus yang mengalir (A)

$\cos \emptyset$ = Faktor daya

2.6.3. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah selisih antara daya semu yang masuk dalam saluran dengan daya aktif yang terpakai untuk daya mekanis panas.

Daya reaktif untuk satu fasa :

$$Q_{1\Phi} = V.I.\sin \emptyset \dots\dots\dots(2.13)$$

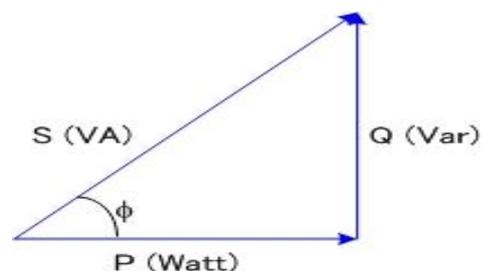
Daya reaktif untuk tiga fasa :

$$Q_{3\Phi} = \sqrt{3} V.I.\sin \emptyset \dots\dots\dots(2.14)$$

dengan :

Q = Daya reaktif (VAR)

Dari ketiga jenis daya diatas yaitu daya semu, daya aktif, dan daya reaktif, maka untuk hubungan daya-daya tersebut dapat digambarkan dalam bentuk hubungan segitiga daya yang dapat dilihat pada gambar 2.10



Gambar 2.10 Segitiga Daya



Gambar diatas merupakan gambar segitiga daya, yang artinya merupakan hubungan dari ketiga jenis daya yaitu : daya semu, daya aktif, dan daya reaktif.

2.6.4. 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 besar energi listrik tersebut diterima, setelah didalam penyalurannya terdapat rugi-rugi. Adapun untuk mendapatkan nilai efisiensi itu adalah sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_r}{P_r + P_{loss}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{P_r}{P_s} \times 100\% \dots\dots\dots(2.15)$$

$$P_r = P_s - P_{loss} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

P_r = Daya yang diterima (W,KW,MW)

P_s = Daya yang disalurkan (W,KW,MW)

P_{loss} = Daya yang hilang (W,KW,MW)

2.6.5. Rugi Daya^[3]

Dalam proses penyaluran tenaga listrik ke para pelanggan (dimulai dari pembangkit, transmisi dan distribusi) terjadi rugi-rugi teknis (losses) yaitu rugi daya dan rugi energi. Hal ini disebabkan karena saluran distribusi mempunyai tahanan, induktansi, dan kapasitas sehingga saluran distribusi primer ataupun sekunder berjarak pendek maka kapasitas dapat diabaikan. Dengan demikian, dapat dibuat rangkaian ekuivalen dari saluran distribusi.

Rugi teknis adalah pada penghantar saluran, adanya tahanan dari penghantar yang dialiri arus sehingga timbullah rugi teknis (I^2R) pada jaringan tersebut. Misalnya pada mesin-mesin listrik seperti generator, trafo dan sebagainya, adanya histerisis dan arus pusar pada besi dan belitan yang dialiri arus sehingga menimbulkan rugi teknis pada peralatan tersebut. Rugi teknis pada



pembangkit dapat diperbaiki dengan meningkatkan efisiensi dan mengurangi pemakain sendiri.

Rumus Rugi Daya pada saluran 3 phasa :

$$\Delta P_{loss} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \cdot LLF \cdot LDF \dots \dots \dots (2.17)$$

Keterangan :

- I = Arusnya yang mengalir pada penghantar (A)
- R = Tahanan pada penghantar per km (Ω/km)
- L = Panjang penghantar (km)
- LDF = Load Density Factor (0,333)
- LLF = Loss Load Factor
- LF = Load Factor sistem regional

LLF merupakan koefisien yang diperhitungkan dalam menghitung susut sebagai perbandingan antara rugi-rugi daya rata-rata terhadap rugi daya beban puncak.

$$LLF = 0,3 LF + 0,7 (LF)^2 \dots \dots \dots (2.18)$$

Rugi teknis pada sistem distribusi merupakan penjumlahan dari I^2R atau rugi tahanan dan dapat dengan mudah diketahui bila arus puncaknya diketahui. Rugi teknis dari jaringan tenaga listrik tergantung dari macam pembebanan pada saluran tersebut (beban merata, terpusat). Rugi teknis pada transformator terdiri dari rugi beban nol dan rugi pada waktu pembebanan. Rugi pada beban nol dikenal dengan rugi besi, dan tidak tergantung dari arus beban, sedangkan rugi pada waktu pembebanan dikenal dengan rugi tembaga yang nilainya bervariasi sesuai dengan kuadrat arus bebannya.

Rugi energi (rugi kWh) biasanya dinyatakan dalam bentuk rupiah. Biaya untuk mencatu kerugian ini dapat dibagi dalam 2 bagian yang utama :

- 1) Komponen energi atau biaya produksi untuk membangkitkan kehilangan kWh.
- 2) Komponen demand/beban atau biaya tahunan yang tercakup di dalam



sistem investasinya yang diperlukan mencatu rugi beban rugi beban puncak.

Kedua komponen tersebut biasanya digabungkan menjadi satu, baik dalam bentuk Rp/kWh untuk rugi energi maupun dalam Rp/kW rugi daya puncak. Biasanya rugi teknis itu tergantung pada titik yang diamati dari sistem tersebut, titik yang terjauh dari sumber, sudah tentu biayanya lebih besar. Untuk mendapatkan kurva rugi daya versus beban, perlu diketahui hubungan antara rugi daya (P) dan beban atau rugi daya/beban hariannya.

2.7 Trafo Distribusi^[2]

Transformator adalah suatu alat listrik yang digunakan untuk mentransformasikan daya atau energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet.

Trafo yang umum digunakan untuk sistem distribusi yaitu trafo 1 phasa dan trafo 3 phasa. Rugi yang terjadi pada transformator terdiri dari rugi tembaga dan rugi besi. Dapat dilihat dalam rumus berikut :

$$\text{Rugi Tembaga (Pcu)} = I^2 \times R \dots\dots\dots(2.19)$$

$$\text{Rugi Besi (Pi)} = P_H + P_E \dots\dots\dots(2.20)$$

$$\text{Dimana, } P_H = k_h \times f \times B_{\text{maksimum}} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$P_E = K_e \times f \times t_e \times B_{\text{maksimum}} \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan:

I = Arusnya yang mengalir pada penghantar (*Ampere*)

R = Tahanan pada penghantar (*ohm*)

P_H = Rugi *Hysteresis* / fluks bolak balik pada inti besi (kVA)

P_E = Rugi *Eddy Current* / arus pusar pada inti besi (kVA)

K_h = konstanta *hysteresis* (berkisar antara 1,6 - 3,0)

K_e = konstanta arus pusar (*Eddy Current*)

f = frekuensi jala-jala (Hz)



B_{maksimum} = kerapatan fluksi maksimum (tesla)

t_c = ketebalan laminasi (m)

Pembebanan trafo bisa dilakukan melebihi daya pengenalnya pada suhu sekitar trafo tersebut pada nilai tertentu tetapi harus dibatasi oleh lamanya pembebanan lebih, agar susut umur trafo sesuai dengan yang direncanakan.

2.8 ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*)^[1]

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. ETAP ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Amerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem *monitor manajemen energi secara real time*, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik, (Awaluddin, 2007). ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aliran daya, hubungan singkat, *starting motor*, *transient stability*, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

Etap *Power Station* memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan tampilan gambar *single line diagram* (diagram satu garis). Program ini dirancang sesuai dengan tiga konsep utama:



1. *Virtual Reality Operation*

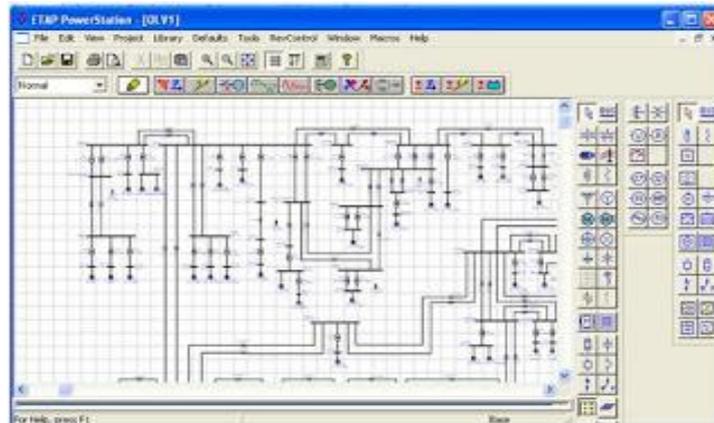
Sistem operational yang ada pada program sangat mirip dengan sistem operasi pada kondisi real nya. Misalnya, ketika Anda membuka atau menutup sebuah *circuit breaker*, menempatkan suatu elemen pada sistem, mengubah status operasi suatu motor, dan untuk kondisi *de-energized* pada suatu elemen dan sub-elemen sistem ditunjukkan pada gambar *single line diagram* dengan warna abu-abu.

2. *Total Integration Data*

Etap *Power Station* menggabungkan informasi sistem elektrikal, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang dimasukkan dalam sistem *database* yang sama. Misalnya, untuk elemen sebuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisik nya, tapi juga memberikan informasi melalui *raceways* yang di lewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk menganalisa aliran beban (*load flow analysis*) dan analisa hubung singkat (*short-circuit analysis*) yang membutuhkan parameter listrik dan parameter koneksi serta perhitungan *capacity derating* suatu kabel yang memerlukan data fisik *routing*.

3. *Simplicity in Data Entry*

Etap *Power Station* memiliki data yang detail untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses entri data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah di masukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.



Gambar 2.11 Contoh *Single Line* pada ETAP

ETAP *Power Station* dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni Load Flow (aliran daya), Short Circuit (hubung singkat), motor starting, harmonisa, transient stability, protective device coordination, dan cable derating.

ETAP *Power Station* juga menyediakan fasilitas *Library* yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. *Library* ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP *Power Station* adalah :

- a) *One Line Diagram*, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
- b) *Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektrik maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
- c) *Standar* yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai.
- d) *Study Case*, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.



2.8.1 Elemen AC Proteksi



Komponen elemen *ac* pada *software power station* ETAP dalam bentuk diagram satu garis ditunjukkan pada Gambar, kecuali elemen-elemen IDs, penghubung bus dan status. Semua data elemen *ac* dimasukkan dalam editor yang telah dipertimbangkan oleh para ahli teknik. Daftar seluruh elemen *ac* pada *software power station* ETAP ada pada AC *toolbar*.

Disamping ini Gambar 2.12 merupakan komponen dari elemen AC pada *toolbar*.

2.8.2 Elemen Aliran Daya

Program analisis aliran daya pada *software* ETAP dapat menghitung tegangan pada tiap-tiap cabang, aliran arus pada sistem tenaga listrik, dan aliran daya yang mengalir pada sistem tenaga listrik. Metode perhitungan aliran daya dapat dipilih untuk efisiensi perhitungan yang lebih baik.



Gambar 2.13 *ToolbarLoad Flow* di ETAP

Gambar dari kiri ke kanan, yaitu:

- a) *Run Load Flow* adalah *icon toolbar* aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya sistem distribusi tenaga listrik dalam diagram satu garis.
- b) *Update Cable Load Current* adalah *icon toolbar* untuk merubah kapasitas arus pada kabel sebelum *load flow* di running
- c) *Display Option* adalah bagian tombol untuk menampilkan hasil aliran daya.
- d) *Alert* adalah *icon* untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik.
- e) *Report Manager* adalah *icon* untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk report yang dapat dicetak.