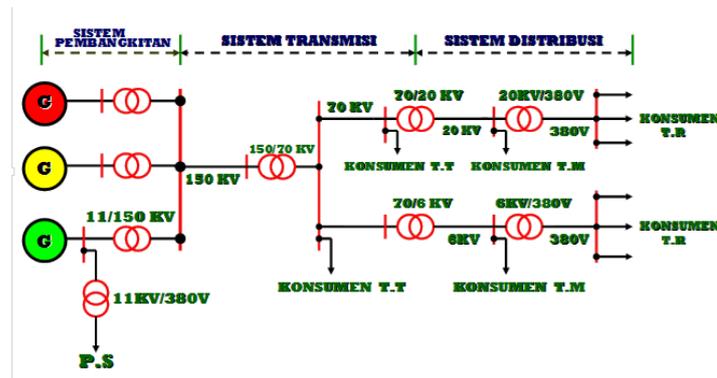


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen - komponen listrik, seperti generator, transformator, jaringan tenaga listrik dan beban- beban listrik. Peranan utama dari suatu sistem tenaga listrik adalah menyalurkan energi listrik yang dibangkitkan generator ke konsumen yang membutuhkan energi listrik tersebut.



Gambar 2.1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

2.2 Sistem Distribusi^[1]

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen.

Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah;

1. Pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan
2. Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.



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

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo-trafo step-up. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (HV,UHV,EHV) menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapanperlengkapannya, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo-trafo step-down. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.

2.3 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik^[1]

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, dapat dilakukan pembagian serta pembatasan-pembatasan dalam sistem distribusi tenaga listrik, yakni :

- Daerah I : Bagian pembangkitan (Generation)
- Daerah II : Bagian penyaluran (Transmission), bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV)
- Daerah III : Bagian distribusi primer, bertegangan menengah (6 atau 20 kV).
- Daerah IV : Instalasi bertegangan rendah (220/380 Volt)

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi jaringan distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat. Dengan demikian ruang lingkup Jaringan Distribusi adalah :

a. SUTM

Terdiri dari tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan per-lengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.

b. SKTM

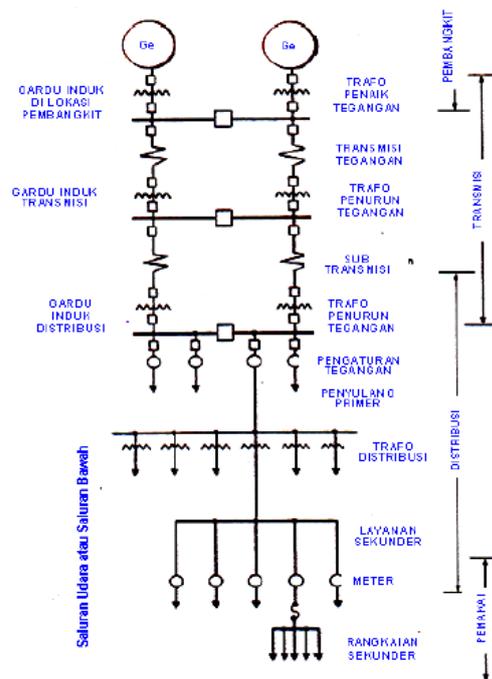
Terdiri dari kabel tanah, indoor dan outdoor termination, batu bata, pasir dan lain-lain.

c. Gardu trafo

Terdiri dari transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat trafo, LV panel, pipa-pipa pelindung, Arrester, kabel-kabel, transformer band, peralatan grounding, dan lain-lain.

d. SUTR dan SKTR

Terdiri dari perlengkapan/ material yang sama dengan perlengkapan pada SUTM dan SKTM. Hal yang membedakan hanya dimensinya.



Gambar 2.2 Pembagian/Pengelempokan Tegangan Sistem Tenaga Listrik



2.4 Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik^[1]

Secara umum saluran distribusi dapat diklasifikasikan menjadi 5 macam, yakni berdasarkan nilai tegangan, bentuk tegangan, jenis/tipe konduktor, susunan/konfigurasi saluran, dan susunan rangkaiannya.

2.4.1 Menurut nilai tegangannya

a. Saluran distribusi primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik Sekunder trafo substation (G.I.D.) dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20 kV.

b. Saluran distribusi sekunder

Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban (konsumen TR)

2.4.2 Menurut bentuk tegangannya

a. Saluran distribusi DC (Direct Current) menggunakan sistem tegangan searah.

b. Saluran distribusi AC (Alternating Current) menggunakan sistem tegangan bolak-balik.

2.4.3 Menurut jenis/tipe konduktornya

a. Saluran udara

Dipasang pada udara terbuka dengan bantuan tiang dan perlengkapannya serta dibedakan atas saluran kawat udara (tanpa isolasi) dan saluran kabel udara (dengan isolasi).

b. Saluran bawah tanah

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

2.4.4 Menurut susunan salurannya

a. Saluran konfigurasi horizontal

Bila saluran fasa terhadap fasa yang lain/terhadap netral membentuk garis horizontal.

b. Saluran konfigurasi vertikal

Bila saluran-saluran tersebut membentuk garis vertikal.



- c. Saluran konfigurasi delta (segitiga)

Bila kedudukan saluran satu sama lain membentuk suatu segitiga

2.4.5 Menurut susunan rangkaiannya

- Primer :
 - a. Jaringan distribusi radial
 - b. Jaringan distribusi ring (loop)
 - c. Jaringan distribusi hantaran penghubung (*Tie Line*)
 - d. Jaringan distribusi spindle
 - e. Sistem Gugus atau Kluster
- Sekunder :
 - a. Jaringan distribusi radial

2.5 Jaringan pada Sistem Distribusi Primer^[1]

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 suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban.

Berdasarkan konfigurasinya, jaringan pada sistem distribusi tegangan menengah (primer 20 kv) dapat diklasifikasikan menjadi 2 macam yakni menurut bahan konduktornya dan menurut susunan rangkaian.

2.5.1 Jaringan distribusi primer menurut bahan konduktornya^[6]

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 itulah kawat penghantar aluminium biasanya digunakan sebagai komponen utama suatu penghantar dengan bahan lain

sebagai campurannya. Beberapa macam jenis konduktor dengan komponen utama aluminium, yaitu :

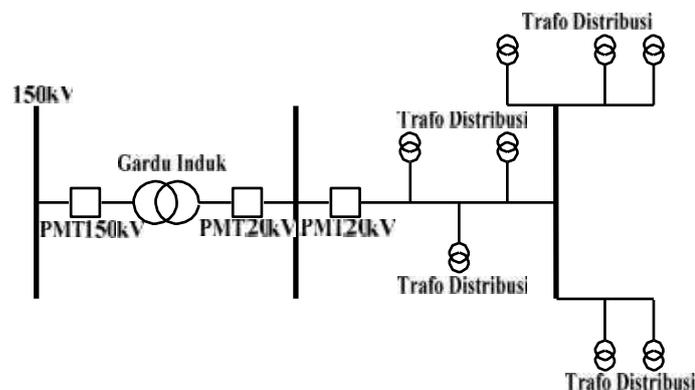
- a. AAC (All-Aluminium Konduktor)
Kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium
- b. AAAC (All-Aluminium-Alloy Konduktor)
Kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium
- c. AAACS (All-Aluminium-Alloy Konduktor Stell)
Kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium dengan pembungkus lapisan PVC ditegahnya ada kawat baja sebagai penguatnya
- d. ACSR (All Konduktor, Stell-Reinforce)
Kawat penghantar aluminium berinti kawat baja
- e. ACAR (Aluminium Konduktor, Alloy- Reinforced)
Kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran

2.5.2 Jaringan distribusi primer menurut susunan rangkaian

Menurut susunan rangkaian, jaringan distribusi primer dikelompokkan menjadi 5 model yaitu jaringan radial, jaringan lingkaran, jaringan hantaran penghubung, jaringan spindel dan sistem gugus atau kluster.

- a. Jaringan Radial

Sistem jaringan radial adalah yang paling sederhana dan paling banyak dipakai, terdiri atas fider (feeders) atau rangkaian tersendiri, yang seolah-olah keluar dari suatu sumber atau wilayah tertentu secara radial.

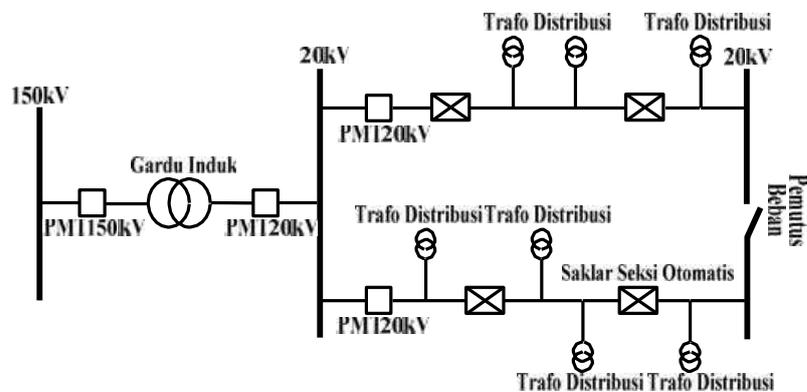


Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Radial

Keuntungan dari sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain. Sedangkan kerugiannya adalah keandalan sistem yang lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran.

b. Jaringan Lingkar (Loop)

Pada jaringan tegangan menengah struktur lingkaran (Loop) seperti pada gambar 2.4 dimungkinkan pemasokannya dari beberapa gardu induk, sehingga tingkat keandalannya relatif lebih baik.

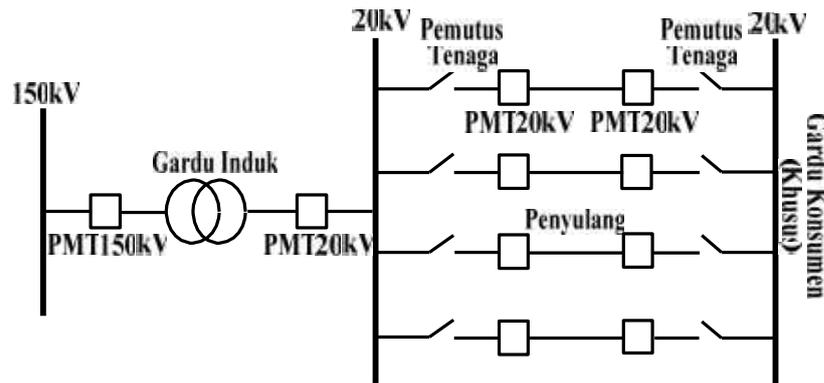


Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Loop

c. Jaringan Hantaran Penghubung (Tie Line)

Sistem distribusi Tie Line seperti pada gambar 2.5 digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam (Bandar Udara, Rumah Sakit, dan lain lain).

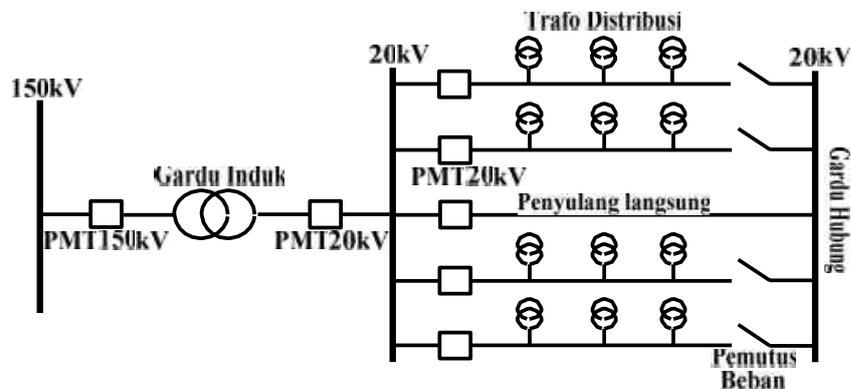
Sistem ini memiliki minimal dua penyulang sekaligus dengan setiap penyulang langsung terkoneksi ke gardu pelanggan khusus. Sehingga bila salah satu penyulang mengalami gangguan maka pasokan listrik akan di pindah ke penyulang lain.



Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Hantaran Penghubung

d. Jaringan Spindel

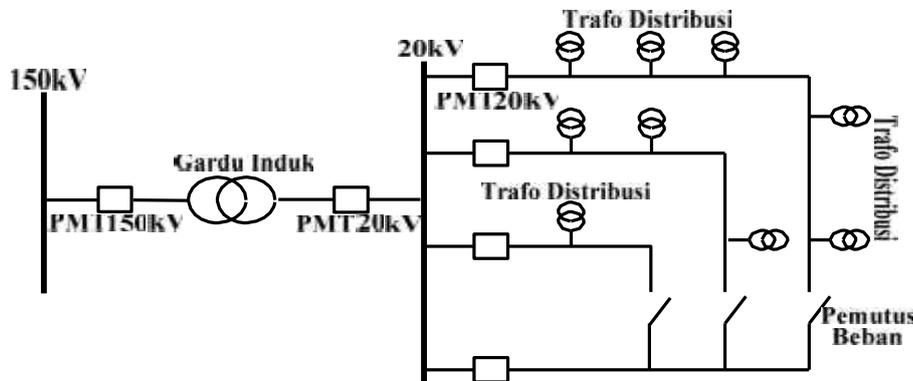
Pada jaringan tegangan menengah struktur spindel seperti pada gambar 2.6 umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu penyulang cadangan (*standby* atau *express feeder*) dan penyulang operasi (*working feeder*). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai back-up supply jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep *Spindel* jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang langsung dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).



Gambar 2.6 Konfigurasi Jaringan Spindel

e. Sistem Gugus atau Sistem Kluster

Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem tertutup, namun beroperasi radial (*Radial Open Loop*). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.



Gambar 2.7 Konfigurasi Sistem Kluster

2.6 Jaringan pada Sistem Distribusi Sekunder

Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan adalah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini akan menghubungkan tegangan rendah 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

2.7 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 30 kV maka kapasitansi 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.

Sedangkan 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.

2.7.1 Resistansi Saluran^[5]

Resistansi dari konduktor saluran transmisi/distribusi adalah sangat penting karena menyebabkan power loss didalam saluran. Dikenal dua macam tahanan, yaitu tahanan arus searah (R_{dc}) dan tahanan arus bolak-balik (R_{ac}). Nilai tahanan arus searah dapat ditentukan dari persamaan :

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

dimana :

ρ = resistivitas penghantar

L = panjang kawat

A = luas penampang kawat

sedangkan menurut AS. Pabla (1991) tahanan arus bolak-balik dapat diperoleh dari,

$$R_{ac} = R_{dc} (1 + Y_s + Y_p) \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana :

Y_s = skin effect

Y_p = proximity effect

Efek kulit atau *skin effect* adalah gejala pada arus bolak balik, bahwa kerapatan arus dalam penampang konduktor tersebut semakin besar ke arah permukaan kawat. Tetapi bila ditinjau dari frekuensi kerja (50 Hz), maka efek kulit sangat kecil dan dapat diabaikan.

Efek sekitar adalah pengaruh dari kawat lain yang berbeda disamping kawat yang pertama (yang ditinjau) sehingga distribusi fluks tidak simtris lagi. Tetapi

bila radius konduktor kecil terhadap jarak antara kedua kawat maka efek sekitar ini sangat kecil dan dapat diabaikan.

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, maka tahanan searahnya dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana:

R_1 = resistansi penghantar pada suhu t_1 (temperatur sebelum operasi konduktor)

R_2 = resistansi penghantar pada suhu t_2 (temperatur operasi konduktor)

t_1 = temperatur awal (°C)

t_2 = temperatur akhir (°C)

T = konstanta yang ditentukan oleh grafik.

Nilai-nilai konstanta T adalah sebagai berikut:

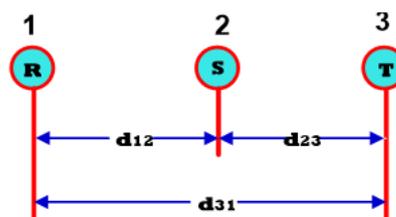
$T = 234,5$ untuk tembaga dengan konduktivitas 100%

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

$T = 228$ untuk aluminium dengan konduktivitas 61%

2.7.2 Induktansi Saluran

Reaktansi saluran (X_L) dapat diperoleh setelah melakukan perhitungan induktansi saluran terlebih dahulu. Untuk menentukan besarnya induktansi saluran pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :



Gambar 2.8 Konfigurasi horizontal konduktor 3 Fasa



$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} \left[1 + 4 \ln \left(\frac{d-r}{r} \right) \right] H/m \dots\dots\dots (2.4)^{[3]}$$

Dimana ;

$$\mu_0 = \text{permeabilitas pada udara bebas (free space)} = 4\pi \times 10^{-7}$$

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 :

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \dots\dots\dots (2.5)^{[4]}$$

Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi r^2 \dots\dots\dots (2.6)$$

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

Dari persamaan 2.4 maka dapat dicari nilai reaktansi induktif saluran dengan menggunakan persamaan 2.7 di bawah ini :

$$X = 2\pi \cdot f \cdot L \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana :

X = Reaktansi induktif saluran (Ω/km)

2π = Sudut arus bolak balik

f = Frekuensi sistem (50 Hz)

L = Induktansi dari konduktor (H/km)

2.8 Drop Tegangan

Drop tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. *Drop* tegangan pada saluran tenaga listrik umumnya berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban, serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besar *Drop* tegangan dapat dinyatakan dalam persen maupun dalam satuan volt. Perhitungan *Drop* tegangan dapat diketahui dengan menggunakan metode perhitungan. Berdasarkan SPLN No.72:1987, *Drop* tegangan atau jatuh tegangan yang diperbolehkan untuk sistem distribusi tegangan menengah adalah sebesar 5%.



Meskipun kelangsungan catu daya dapat diandalkan, dana yang tersedia dan pekerjaan yang dilakukan secara ekonomis, dan tidak mungkin untuk mempertahankan tegangan tetap pada sistem distribusi karena susut tegangan akan terjadi di semua bagian sistem dan akan berubah dengan adanya perubahan beban ukuran penghantar. Secara singkat kualitas pelayanan tergantung pada kelangsungan pelayanan sistem dan pengatur tegangan.

Besarnya *drop* tegangan pada jaringan distribusi primer didefinisikan sebagai selisih tegangan antara sisi pangkal pengirim (V_S) dengan tegangan pada sisi ujung pengirim (V_R) atau dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta V = V_S - V_R \dots\dots\dots (2.9)$$

untuk saluran distribusi primer perhitungan besar *drop* tegangan pada saluran distribusi primer 3 fasa adalah :

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I_B (R \cos \varphi + X \sin \varphi)L \dots\dots\dots (2.10)$$

Besar presentase *drop* tegangan pada saluran distribusi primer dapat dihitung dengan:

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V_S} \times 100\% \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

ΔV = Drop tegangan (V)

V_S = Tegangan Sumber (V)

R = Resistansi Jaringan (Ω /km)

X = Reaktansi Jaringan (Ω /km)

I_B = Arus Beban Penuh (A)

L = Panjang saluran (km)

$\text{Cos } \varphi = 0,85$ dan $\text{Sin } \varphi = 0,526$

2.9 Etap^[7]

Dalam perancangan dan analisis sebuah sistem tenaga listrik, sebuah software aplikasi sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi real. Hal ini dikarenakan sulitnya meng-uji coba suatu sistem tenaga listrik dalam skala yang besar terhadap kondisi transien yang ekstrim. ETAP *Power Station*

merupakan salah satu *software* aplikasi yang banyak digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik. Secara umum ETAP dapat digunakan untuk simulasi hasil perancangan dan analisis suatu sistem tenaga listrik yang meliputi:

1. Menggambarkan denah beban-beban
2. Men-setting data-data beban dan jaringan
3. Merancang diagram satu garis (One Line Diagram)
4. Menganalisis aliran daya (Load Flow)
5. Menghitung gangguan hubung singkat (Short Circuit)
6. Menganalisis Motor Starting atau keadaan Transien.

ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, ANSI dan IEC. Pada dasarnya perbedaan yang terjadi di antara kedua standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan, yang berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan ETAP pun berbeda.



Gambar 2.9 Elemen standar ANSI

Beberapa elemen yang digunakan dalam suatu diagram saluran tunggal adalah :

- a. Generator Merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tenaga listrik.



Gambar 2.10 Simbol Generator di ETAP

- b. Transformator Berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan dengan rasio tertentu sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik.



Gambar 2.11 Simbol Transformator di ETAP

- c. Pemutus Rangkaian Merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek.



Gambar 2.12 Simbol pemutus rangkaian di ETAP

- e. Beban Di ETAP terdapat dua macam beban, yaitu beban statis dan beban dinamis.



Gambar 2.13 Simbol beban statis di ETAP