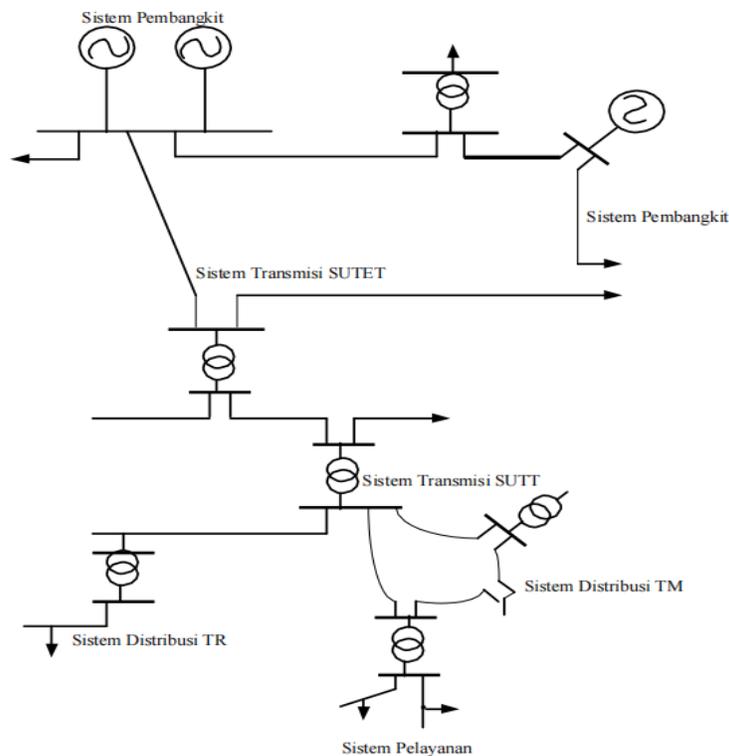




BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar Sistem Distribusi Tenaga Listrik¹

Suatu Sistem Distribusi Tenaga Listrik secara sederhana terdiri atas sistem pembangkit, sistem transmisi dan Gardu Induk, sistem distribusi serta sistem sambungan pelayanan. Sistem-sistem ini saling berkaitan dan membentuk suatu sistem tenaga listrik. Sistem distribusi adalah sistem yang berfungsi mendistribusikan tenaga listrik kepada para konsumen. Sistem distribusi terbagi 2 bagian yaitu sistem distribusi tegangan menengah (JTM) dan sistem distribusi tegangan rendah.



Gambar 2.1 Pola Sistem Tenaga Listrik

¹ Ratno, dkk, *Kriteria Desain Enjinereng Konstruksi Jaringan Distrubusi Tenaga Listrik* (Jakarta:PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 53-54.



Sistem Distribusi Tegangan Menengah mempunyai tegangan kerja di atas 1 kV dan setinggi-tingginya 35 kV. Sistem Distribusi Tegangan Rendah mempunyai tegangan kerja setinggi-tingginya 1 kV. Jaringan Distribusi Tegangan Menengah berawal dari Gardu Induk/Pusat Listrik pada sistem terpisah/isolated. Pada beberapa tempat berawal dari pembangkit listrik. Bentuk jaringan dapat berbentuk radial atau tertutup. Jaringan distribusi Tegangan Rendah berbentuk radial murni. Sambungan Tenaga Listrik (SLT) adalah bagian paling hilir dari sistem distribusi tenaga listrik. Pada Sambungan Tenaga Listrik tersambung Alat Pembatas dan Pengukur (APP) yang selanjutnya menyalurkan tenaga listrik kepada pemanfaat. Konstruksi keempat sistem tersebut dapat berupa Saluran Udara atau Saluran Bawah Tanah disesuaikan dengan kebijakan manajemen, masalah kontinuitas pelayanan, jenis pelanggan, pada beban atas permintaan khusus dan masalah biaya investasi.

2.2 Aspek Perencanaan Jaringan Distribusi²

Jaringan distribusi Tegangan Menengah saluran udara dipakai umumnya untuk daerah dengan jangkauan luas, daerah padat beban rendah atau daerah-daerah penyangga antara kota dan desa.

Biaya investasi Saluran Udara relatif murah, mudah dalam pembangunannya, mudah pada aspek pengoperasian, akan tetapi padat pemeliharaan. Jaringan Distribusi Menengah saluran bawah tanah dipakai umumnya untuk daerah padat beban tinggi (beban puncak lebih dari 2,5 MVA/km² dengan luas minimal 10 km²) dengan jangkauan terbatas. Biaya investasi mahal, sulit dalam pembangunan, mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan, tingkat kontinuitas tinggi. Pada jaringan dengan saluran bawah tanah selalu direncanakan dalam bentuk “loop” guna menghindari pemadaman (black-out) akibat gangguan.

² Ratno, dkk, *Kriteria Desain Enjinereng Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik* (Jakarta:PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 54-55.



2.3 Konfigurasi Sistem Saluran Distribusi³

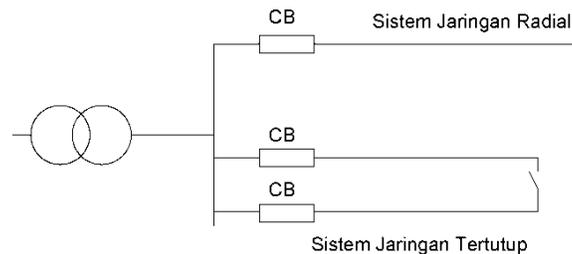
Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi :

1. Jaringan radial

Yaitu jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga listrik, jika terjadi gangguan akan terjadi “black-out” atau padam pada bagian yang tidak dapat dipasok.

2. Jaringan bentuk tertutup

Yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (black- out) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.



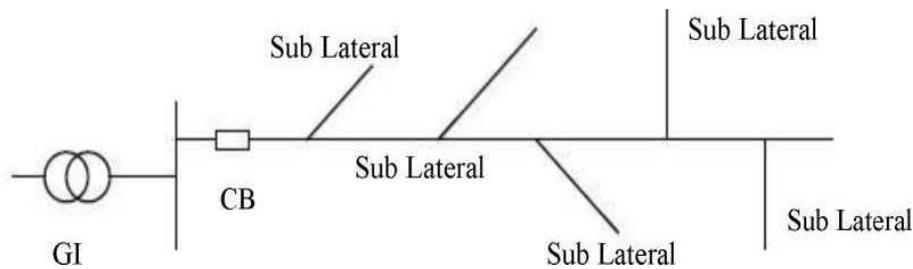
Gambar 2.2 Pola Jaringan Distribusi Dasar

Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaannya sebagai berikut :

a. Konfigurasi tulang ikan (*fish-bone*)

Konfigurasi fishbone ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah.

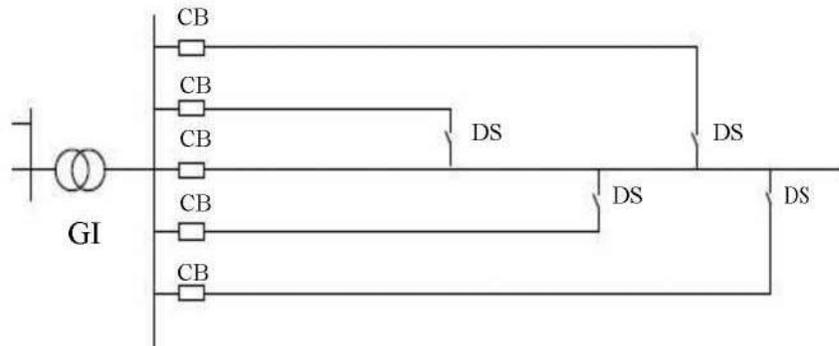
³ Ratno, dkk, *Kriteria Desain Enjinerig Konstruksi Jaringan Distrubusi Tenaga Listrik* (Jakarta:PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 55-59.



Gambar 2.3 Konfigurasi Tulang Ikan (Fishbone)

b. Konfigurasi Kluster (*Cluster /Leap Frog*)

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

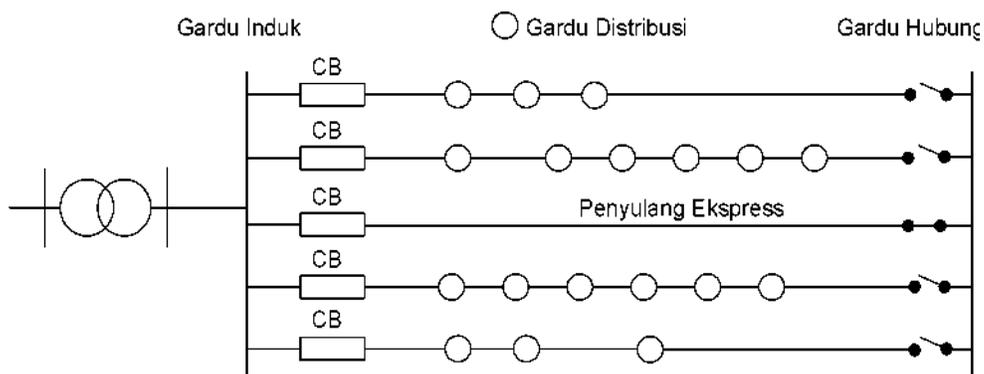
Gambar 2.4 Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*)

c. Konfigurasi spindel (*spindle configuration*)

Konfigurasi spindel 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.



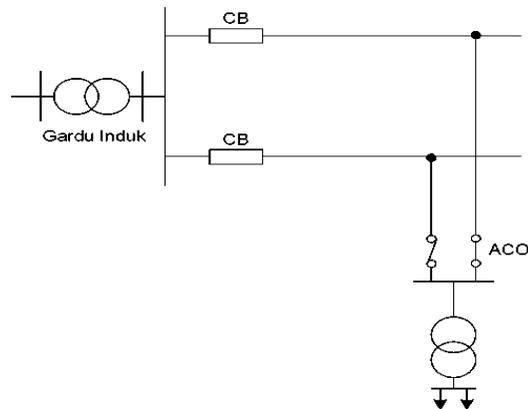
Berdasarkan konsep Spindel jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).



Gambar 2.5 Jaringan Spindel (*Spindle Configuration*)

d. Konfigurasi fork

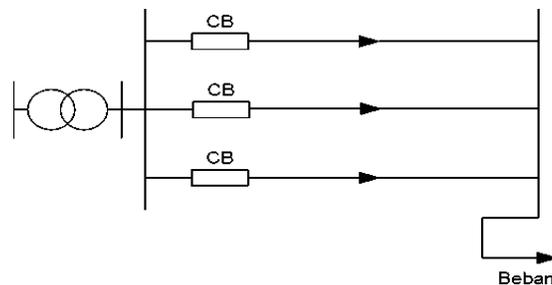
Konfigurasi ini memungkinkan 1 (satu) Gardu Distribusi dipasok dari penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (*Short Break Time*). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu sangat singkat dengan menggunakan fasilitas *Automatic Change Over Switch* (ACOS). Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan *Tee-Off* (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi.



Gambar 2.6 Konfigurasi Fork

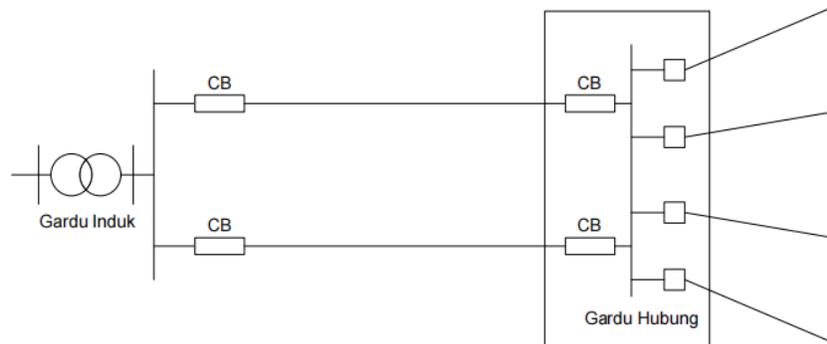
e. Konfigurasi spotload (*parallel spot configuration*)

Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (*Directional Relay*) pada Gardu Hubung. Gardu Hubung & Directional Relay

Gambar 2.7 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

f. Konfigurasi Jala-Jala (Grid, Mesti)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban dan umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi.



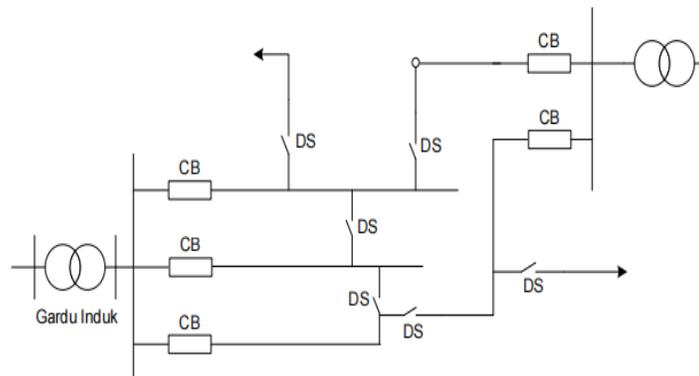
Gambar 2.8 Konfigurasi Jala-jala (Grid, Mesti)

g. Konfigurasi Lain-Lain

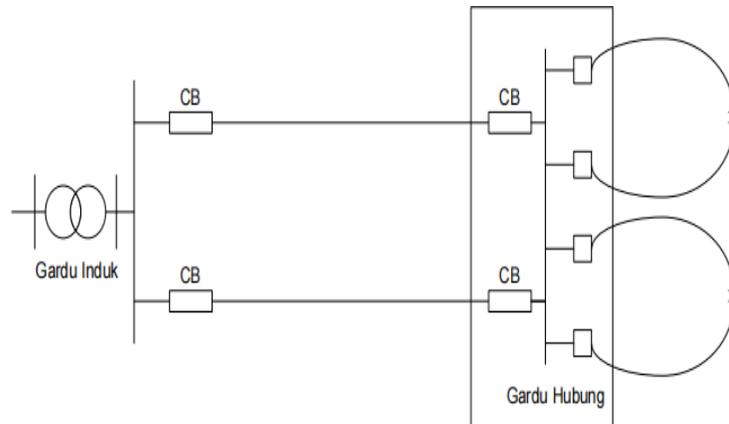
Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana diatas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif model-model struktur jaringan.

1. Struktur Garpu dan Bunga

Struktur ini dipakai jika pusat beban berada jauh dari pusat listrik/Gardu Induk. Jaringan Tegangan Menengah (JTM) berfungsi sebagai pemasok, Gardu Hubung sebagai Gardu Pembagi, Pemutus Tenaga sebagai pengaman dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah.



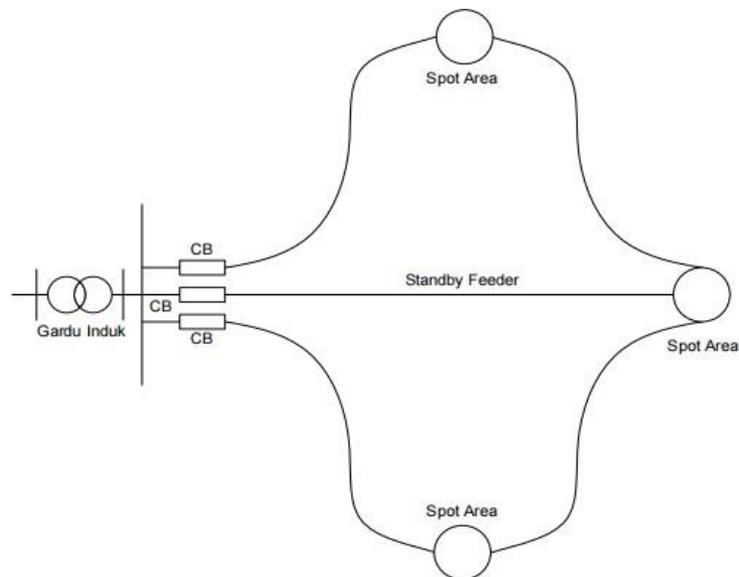
Gambar 2.9 Konfigurasi Struktur Garpu



Gambar 2.10 Konfigurasi Struktur Bunga

2. Struktur Rantai

Struktur ini dipakai pada suatu kawasan yang luas dengan pusat-pusat beban yang berjauhan satu sama lain. Spot area merupakan daerah pembebanan.



Gambar 2.11 Konfigurasi Struktur Rantai



2.4 Saluran Saluran Udara Tegangan Menengah⁴

(SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan solator pada tiang besi/beton.

2.4.1 Konsep perencanaan

Jaringan distribusi tenaga listrik saluran udara ini, terutama untuk distribusi tenaga listrik yang beroperasi secara radial, dengan jangkauan luas, biaya murah, dengan keandalan kontinuitas penyaluran minimal tingkat-2. Untuk mengurangi luasnya dampak pemadaman akibat gangguan dipasang fasilitas-fasilitas *Pole Top Switch/Air Break Switch*, PBO, SSO, FCO pada posisi tertentu. Pemakaian Saluran Udara sebagai sistem distribusi daerah perkotaan dapat dilakukan dengan memperpendek panjang saluran dan didesain menjadi struktur “*Radial Open Loop*”. Pemakaian penghantar berisolasi guna mengurangi akibat gangguan tidak menatap dan pemasangan kawat petir dapat meningkatkan tingkat kontinuitas penyaluran. Untuk perencanaan di suatu daerah baru, pemilihan PBO, SSO, FCO merupakan satu kesatuan yang memperhatikan koordinasi proteksi dan optimasi operasi distribusi dan sistem pembumian transformator Gardu Induk pada jaringan tersebut.

2.4.2 Proteksi jaringan

Tujuan dari pada suatu sistem proteksi pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) adalah mengurangi sejauh mungkin pengaruh gangguan pada penyaluran tenaga listrik serta memberikan perlindungan yang maksimal bagi operator, lingkungan dan peralatan dalam hal terjadinya gangguan yang menetap.

^{4 4} Ratno, dkk, *Kriteria Desain Enjineriing Konstruksi Jaringan Distrubusi Tenaga Listrik* (Jakarta:PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 62-72.



Sistem proteksi pada SUTM memakai :

1. Relai hubung tanah dan relai hubung singkat fasa-fasa untuk kemungkinan gangguan penghantar dengan bumi dan antar penghantar.
2. Pemutus Balik Otomatis PBO (*Automatic Recloser*), Saklar Seksi Otomatis SSO (*Automatic Sectionaizer*). PBO dipasang pada saluran utama, sementara SSO dipasang pada saluran pencabangan, sedangkan di Gardu Induk dilengkapi dengan *auto reclosing relay*.
3. *Lightning Arrester* (LA) sebagai pelindung kenaikan tegangan peralatan akibat surja petir. *Lightning Arrester* dipasang pada tiang awal/tiang akhir, kabel *Tee-Off* (TO) pada jaringan dan gardu transformator serta pada isolator tumpu.
4. Pembumian bagian konduktif terbuka dan bagian konduktif extra pada tiap-tiap 4 tiang atau pertimbangan lain dengan nilai pentanahan tidak melebihi 10 Ohm.
5. Kawat tanah (*shield wire*) untuk mengurangi gangguan akibat sambaran petir langsung. Instalasi kawat tanah dapat dipasang pada SUTM di daerah padat petir yang terbuka.
6. Penggunaan *Fused Cut-Out* (FCO) pada jaringan pencabangan.
7. Penggunaan Sela Tanduk (*Arcing Horn*).

2.4.3 Konstruksi saluran udara tegangan menengah

Konstruksi jaringan dimulai dari sumber tenaga listrik / Gardu Induk dengan kabel tanah Tegangan Menengah ke arah tiang pertama saluran udara. Tiang pertama disebut tiang awal, tiang tengah disebut tiang penumpu (*line pole*) atau tiang penegang (*suspension pole*), jika jalur SUTM membelok disebut tiang sudut dan berakhir pada tiang ujung (*end pole*).



Untuk saluran yang sangat panjang dan lurus pada titik-titik tertentu dipasang tiang peregang. Fungsi tiang peregang adalah untuk mengurangi besarnya tekanan mekanis pada tiang awal / ujung serta untuk memudahkan operasional dan pemeliharaan jaringan. Topang tarik (*guy wire*) dapat dipakai pada tiang sudut dan tiang ujung tetapi tidak dipasang pada tiang awal. Pada tempat-tempat tertentu jika sulit memasang *guy wire* pada tiang akhir atau tiang sudut, dapat dipakai tiang dengan kekuatan tarik besar.

Isolator digunakan sebagai penumpu dan pemegang penghantar pada tiang, hanya dipakai 2 jenis isolator yaitu isolator peregang (*hang isolator/suspension isolator*) dan isolator penumpu (*line-post/pin-post/pin-insulator*). Isolator peregang dipasang pada tiang awal / akhir / sudut. Isolator penumpu dipasang pada tiang penumpu dan sudut.

Konfigurasi konstruksi (*Pole Top Construction*) dapat berbentuk vertikal, horizontal atau delta. Konstruksi sistem pembumian dengan tahanan ($R = 12 \text{ Ohm}$, 40 Ohm dan 500 Ohm) atau dengan *multi grounded common neutral (solid grounded)* yaitu dengan adanya penghantar netral bersama TM, TR. Isolator dipasang pada palang (*cross arm/bracket/travers*) tahan karat (*Galvanized Steel Profile*).

Penghantar Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) ini dapat berupa:

1. A3C (*All Aluminium Alloy Conductor*)
2. A3C-S (*Half insulated A3C, HIC*) ; atau *full insulated (FIC)*.
3. *Full insulated A3C twisted (A3C-TC)*

Luas penampang penghantar 35 mm^2 , 50 mm^2 , 70 mm^2 , 150 mm^2 , 240 mm^2 .

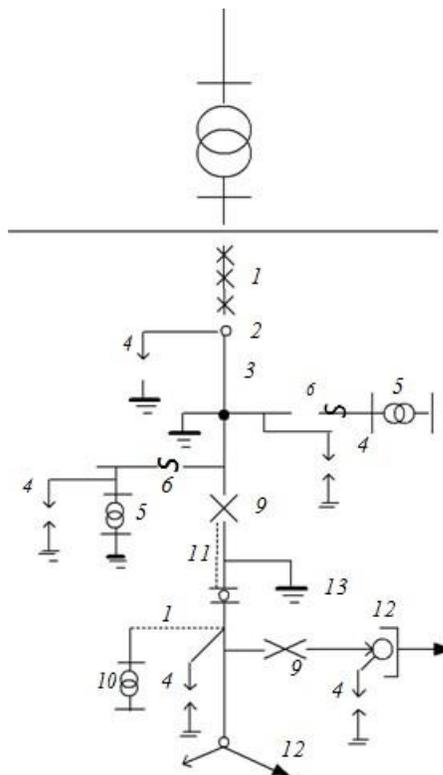
2.4.4 Penggunaan tiang

Saluran udara Tegangan Menengah memakai tiang dengan beban kerja (working load) 200 daN, 350 daN dan 500 daN, dengan panjang tiang 11 meter, 12 meter, 13 meter dan 14 meter.

Penggunaan tiang dengan beban kerja tertentu disesuaikan dengan banyaknya sirkuit perjalur saluran udara, besar penampang penghantar dan posisi/fungsi tiang (tiang awal, tiang tengah, tiang sudut).

2.4.5 Area jangkauan pelayanan saluran udara tegangan menengah

Mengingat sifat perencanaannya, jangkauan SUTM dibatasi atas besarnya jatuh tegangan yaitu pada besaran sadapan/tap changer transformator distribusi. Dalam hal ini optimalisasi susut energi tidak diperhitungkan.



Gambar 2.12 Monogram Saluran Udara Tegangan Menengah

Keterangan Gambar 2.12

1. Saluran Kabel bawah tanah
2. Tiang Pertama



3. Saluran Udara
4. Lightning Arrester (LA)
5. Gardu Distribusi portal + FCO + LA
6. Fused Cut Out (FCO)
7. PBO (automatic recloser)
8. Pole Top Switch/ABSW
9. SSO (Sectionalizer)
10. Gardu Distribusi beton
11. Kawat tanah
12. Guy-Wire
13. Pembedaan bagian konduktif terbuka

2.5 Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah

2.5.1 Konsep Perencanaan

Mengingat biaya investasi yang mahal dan keunggulannya dibandingkan dengan saluran udara tegangan menengah, saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM) dipakai pada hal-hal khusus :

1. Daerah padat beban tinggi
2. Segi estetika
3. Jenis Pelanggan Kritis
4. Permintaan khusus

Pada tingkat keandalan kontinuitas sedikitnya tingkat-3, kabel tanah digunakan untuk pemakaian :

1. Kabel Keluar (Opstik kabel dari pembangkit / GI ke tiang SUTM)
2. Kabel Tee-Off dari SUTM ke gardu beton
3. Penyeberangan sungai, jalur kereta api



Konfigurasi jaringan kabel tanah didesain dalam bentuk “*Radial Open Loop*”, sebaiknya dengan sesama kabel tanah. Apabila “loop” dengan hanya 1 (satu) penyulang, maka pembebanan kabel hanya 50 %. Jika sistem memakai penyulang cadangan (*Express Feeder*) dapat dibebani 100 % kapasitas kabel.

Bentuk konfigurasi yang umum adalah :

1. Struktur Spindel, minimal 2 penyulang berbeban dan 1 penyulang cadangan / tanpa beban.
2. Struktur Kluster.
3. *Spotload* untuk pelanggan dengan beban lebih besar daripada kapasitas kabel.
4. "Loop" antara 2 penyulang baik dari 1 sumber pembangkit atau dari sumber yang berbeda (*Fork system*).

2.5.2 Proteksi Jaringan

Proteksi jaringan kabel tanah hanya dilindungi dari 2 penyebab gangguan, gangguan fasa-fasa dan gangguan fasa-tanah. Relai terpasang pada kubikel 20 kV di Gardu Induk, relai tipe arus lebih. Fase-fase dan arus lebih hubung tanah dengan karakteristik sesuai kebutuhan (IDMT atau Inverse Relay). Jenis kabel yang dipakai adalah multicore atau *single core belted cable* dengan *copper screen*. *Cooper screen* pada terminal Gardu Induk dan atau Gardu Distribusi dapat dibumikan atau tidak, sesuai dengan konsep proteksinya dengan kemampuan dialiri arus listrik 1000 Ampere selama 1 detik. Sambungan kabel dengan saluran udara Tegangan Menengah dipasang Lightning Arrester untuk melindungi kabel akibat surja petir dengan nilai arus pengenal 10 kA pada tiang pertama dan ujung serta 5 kA pada tiang tengah. Tambahan pemakaian *fused cut-out* dapat dipertimbangkan sesuai kebutuhan.



Untuk sambungan sistem spot load ditambahkan rele diferensial atau directional pada Gardu Hubung sisi pelanggan Spotload.

2.5.3 Konstruksi saluran kabel tanah tegangan menengah

Sesuai standar pabrik, kabel tanah pada kondisi tanah (*specific thermal resistivity of soil*) 1000 C cm/w dengan kedalaman 70 cm, untuk penggelaran 1 kabel mempunyai Kemampuan Hantar Arus (KHA) 100%. Kemampuan hantar arus kabel harus dikoreksi jika persyaratan tersebut berubah.

Penggunaan kabel dengan penampang yang lebih besar pada jalur keluar dari Gardu Induk atau sumber tenaga listrik harus dipertimbangkan. Kabel harus dilindungi terhadap kemungkinan gangguan mekanis dengan pasir, pipa pelindung, buis beton atau pelat beton. Jalur jaringan kabel, titik belok dan sambungan kabel harus diberi tanda guna memudahkan inspeksi, pemeliharaan, dll.

2.5.4 Area jangkauan pelayanan Saluran kabel tanah tegangan menengah

Pada sistem Spindel, berdasarkan data statistik, laju kegagalan dan tingkat kontinuitas pelayanan, panjang kabel SKTM hendaknya tidak lebih dari 8 kms. Pada sistem Radial, jangkauan pelayanan dibatasi oleh persyaratan tegangan pelayanan.

2.6. Macam – Macam Saluran Jaringan Distribusi Primer

Sesuai dengan fungsinya, maka suatu sistem jaringan distribusi dengan bagian-bagiannya dapat merupakan bentuk, susunan dan macam yang berbeda-beda disesuaikan dengan tujuan tertentu. Pelaksanaan pemasangan jaringan distribusi dibagi menjadi dua macam yaitu hantaran udara dan hantaran bawah tanah.

2.6.1. Jaringan penghantar udara (*over head line*)

Hantaran udara sering juga disebut saluran udara merupakan penghantar



energi listrik, tegangan menengah ataupun tegangan rendah, yang dipasang di atas tiang listrik di luar bangunan. Bahan yang banyak dipakai untuk kawat penghantar terdiri atas jenis :

- AAAC-S⁹ : *All Aluminium Alloy Conductor Shielded reinforced* yaitu penghantar AAAC yang berselubung polietilen ikat silang (XLPE). Penghantarnya berupa aluminium paduan yang 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.
- AAAC⁸ : *All Aluminium Alloy Conductor* yaitu penghantar yang terbuat dari kawat-kawat aluminium yang dipilin, tidak berisolasi dan tidak berinti. Kabel jenis ini mempunyai ukuran diameter antara 1,50 – 4,50 mm dengan bentuk fisiknya berurat banyak.
- AAC¹ : *All Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya dibuat dari aluminium
- ACSR : *Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja
- ACAR : *Aluminium Conductor, Alloy Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran

Keuntungan atau kelebihan berupa :

1. Investasi, atau biaya untuk membangun saluran udara jauh lebih rendah dibanding dengan kabel tanah, yaitu berbanding sekitar 1 : 5-6, bahkan lebih tinggi untuk tegangan yang lebih tinggi
2. Kawat untuk daerah yang lahannya merupakan bebatuan, lebih mudah membuat lubang untuk tiang listrik dari pada membuat jalur hubung kabel tanah.
3. Mudah melakukan pemeliharaan pada saluran distribusi
4. Pembangunan jaringan tidak terlalu sulit.

Kekurangan jaringan hantar udara :



1. Mudah terjadi gangguan pada jaringan.
2. Setiap melakukan pemeliharaan biayanya besar.
3. Tidak mengutamakan keandalan (keandalannya rendah).
4. Pencurian melalui jaringan mudah dilakukan.

2.6.2. Jaringan hantaran bawah tanah (*under ground line*)

Untuk daerah kerapatan beban tinggi, seperti pusat kota ataupun pusat industri pemasangan jaringan hantaran udara akan mengganggu baik dari segi keamanan maupun dari segi keindahan. Bahan untuk inti kabel dan kabel tanah pada umumnya terdiri atas tembaga dan aluminium. Sebagai isolasi dipergunakan bahan-bahan berupa kertas serta perlindungan mekanikal berupa tinta hitam. Untuk tegangan menengah sering juga dipakai minyak sebagai isolasi.

2.7 Parameter Listrik Saluran Distribusi

Saluran distribusi tenaga listrik adalah merupakan sarana penyaluran tenaga listrik bagian hilir setelah saluran transmisi yang telah dibangkitkan oleh suatu sistem pembangkit, mempunyai konstanta-konstanta yang dapat mempengaruhi karakteristik dalam menyalurkan tenaga listrik. Adapun konstanta-konstanta tersebut adalah resistansi, induktansi, kapasitansi. Kapasitansi pada saluran distribusi dengan saluran pendek (short lines < 80 km) nilai kapasitansinya 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.



2.7.1 Resistansi saluran (R)⁵

Resistansi dari penghantar saluran distribusi adalah penyebab yang utama dari rugi daya (losses) pada saluran distribusi. Resistansi dari suatu konduktor (kawat penghantar) diberikan oleh:

Power Loss dalam konduktor:

$$R = \frac{\text{power loss dalam konduktor}}{(I)^2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Resistansi direct-current (R_{DC}) diberikan dengan formula :

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

ρ : resistivity konduktor (Q.m)

l : panjang konduktor (m)

A : cross sectional area (mm²)

Nilai resistivity konduktor pada temperatur 20°C :

- untuk tembaga, $\rho = 10,66 \Omega \cdot \text{cmil/ft}$ atau $= 1,77 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.
- untuk aluminium, $\rho = 17 \Omega \cdot \text{cmil/ft}$ atau $= 2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

Konduktor pilin 3 strand menyebabkan kenaikan resistansi sebesar 1%. Konduktor dengan strand terkonsentrasi (*concentrically stranded conductors*), menyebabkan kenaikan resistansi 2%. Pengaruh kenaikan temperatur terhadap resistansi dapat ditentukan dari formula berikut :

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

Dimana R₁ dan R₂ adalah resistansi masing-masing konduktor pada temperatur t₁ dan t₂, dan T adalah suatu konstanta yang nilainya sebagai berikut :

T = 234,5 untuk tembaga dengan konduktivitas 100%

⁵ Stevenson, William D, *Analisis Sistem Tenaga Listrik* (Jakarta: Erlangga, 1994), hlm. 56-58.



T = 241 untuk tembaga dengan konduktivitas 97,3%

T = 228 untuk aluminium dengan konduktivitas 61%.

2.7.2 Induktansi saluran (L)⁶

Induktansi saluran menggambarkan besarnya fluks magnet T yang dihasilkan untuk setiap ampere arus dari saluran, atau menggambarkan besarnya tegangan induksi untuk setiap perubahan arus terhadap waktu. Karena fluks magnet yang dihasilkan oleh setiap ampere arus sangat tergantung dari konfigurasi saluran, maka induktansi ditentukan oleh konfigurasi saluran. Induktansi rata-rata per fasa per satuan panjang untuk saluran tiga fasa dirumuskan sebagai :

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

$$L = \left(0,5 + 4,6 \log \frac{D-r}{r} \times 10^{-7} \right) H/m \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana D adalah jarak antara konduktor dan r adalah radius masing-masing konduktor tersebut. Untuk menentukan besarnya jarak antar konduktor pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan persamaan :

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

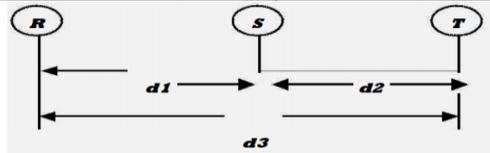
Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan :

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

Maka:

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

^{6 7} Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya* (Jakarta : Gramedia, 1995), hlm. 152.



Gambar 2.13 Konfigurasi Horizontal Konduktor Tiga Fasa

Dari persamaan 2.5 maka dapat dicari nilai reaktansi induktif saluran dengan menggunakan persamaan 2.6 di bawah ini:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \dots \dots \dots (2.8)^7$$

dimana:

- X_L = Reaktansi induktif saluran (H/km)
- 2π = Konstanta
- f = frekuensi sistem (50 Hz)
- L = Induktansi konduktor (H/m)

Dari persamaan 2.8 kita bisa mencari kapasitas penyaluran dengan persamaan :

$$P = \sqrt{3} V I \cos \theta \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana:

- P = Daya Penyaluran (Watt)
- V = Tegangan jalur tegangan menengah (V)
- I = Beban puncak (A)
- $\cos \theta$ = Faktor phi

2.8 Korelasi Susut Tegangan dan Susut Daya Terhadap Standar Jaringan⁸

Di dalam merencanakan sistem distribusi tenaga listrik sangat diperlukan adanya kriteria dalam mendesain sebuah Sistem Distribusi Tenaga Listrik, mulai dari

⁷ Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya* (Jakarta : Gramedia, 1995), hlm. 152.

⁸ PT. PLN (Persero), *Desain Kriteria Jaringan Distribusi* (Jakarta: PT. PLN (Persero) Pusat Pelatihan dan Pendidikan, 2012), hlm. 12-17.



SUTM, Gardu Distribusi (Gardu Trafo Tiang = GTT), SUTR maupun Sambungan Rumah (SR).

Kriteria yang akan dijadikan patokan adalah :

1. Besaran Susut Tegangan
2. Besaran Susut Daya
3. F aktor Daya (Cos O)
4. Loss Load Factor (LLF)

Sistem Distribusi Tenaga Listrik yang akan ditinjau adalah: Sistem Tegangan Menengah 20 kV. Untuk membuat kriteria desain akan berpedoman kepada SPLN yang ada dan ketentuan - ketentuan lain yang berlaku.

Panjang sebuah Jaringan Tegangan Menengah dapat didesain dengan mempertimbangkan susut tegangan dan susut daya jaringan. Untuk mendapatkan nilai rugi tegangan dan rugi daya yang dikehendaki perlu memasukkan parameter - parameter antara lain :

1. Ukuran (luas penampang) Penghantar
2. Beban Nominal Penghantar
3. Panjang Jaringan

Berdasarkan SPLN 72: 1987 dapat didesain sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dengan kriteria rugi tegangan sebagai berikut :

1. Susut Tegangan Spindel maksimum 2 %
2. Susut Tegangan Open Loop dan Radial maksimum 5 %

Untuk mendesain jaringan dengan pertimbangan susut jaringan, maka susut jaringan maksimum yang diizinkan :

1. Susut daya maksimum Spindel maksimum 1 %



2. Susut daya maksimum Open Loop dan Radial maksimum 2,3 %

Dalam pengoperasian Jaringan Listrik Tegangan Menengah, pembebanan tidak boleh melebihi kemampuan nominal jaringan yang telah direncanakan, sehingga susut tegangan dan susut daya dapat tercapai. Untuk diujung saluran dan beban seimbang pada sistem 3 fasa 3 kawat dan 3 fasa 4 kawat, susut tegangan dapat dihitung dengan formula :

$$\% \Delta V = \{ P \times \ell \times (R \cdot \cos \theta + X \cdot \sin \theta) \times 100 \} / (KV)^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana :

- P = Daya Nominal yang tersalur (MVA)
- R = Resistansi Jaringan (Q/km)
- X = Reaktansi Jaringan (Q/km)
- L = Panjang Jaringan (km)
- $\cos \theta = 0,85$ (0,90) dan $\sin \theta = 0,526$ (0,435)
- KV = Tegangan L - L (20kV)

Korelasi rugi daya (losses) terhadap standar jaringan pada saluran dan beban seimbang pada sistem 3 fasa 3 kawat dan 3 fasa 4 kawat, susut daya dapat dihitung dengan formula :

$$\Delta P = 3 \times I^2 \times R \times L \times LLF \text{ (watt)} \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana :

- I = Arus beban yang mengalir pada Jaringan (A)
- R = Resistansi Jaringan (Ohm/km)
- L = Panjang Jaringan (km)
- LLF = Loss Load Factor



Loss Load Factor sebagai koefisien yang diperhitungkan dalam menghitung rugi daya sebagai perbandingan antara rugi - rugi daya rata-rata terhadap rugi daya beban puncak.

$$LLF = 0,3. LF + 0,7.LF^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana :

LF = Load Factor Sistem Regional

$$LF = \frac{\text{Beban rata-Rata}}{\text{Beban puncak}} \dots\dots\dots(2.13)$$

2.9 Perhitungan Perkiraan Kerugian Dana Akibat Rugi-rugi Daya

Perusahaan pemasok listrik mengalami kerugian yang cukup besar setiap bulannya karena hilangnya energy akibat rugi0rugi daya. Besaran yang hilang saat proses pentramisian harus dihitung dan diantisipasi, sehingga besar daya yang hilang maka dapat dilakukan perhitungan untuk mengetahui energy yang hilang. Perhitungan dilakukan dengan persamaan :

$$W = p \times t = V \times I \times t \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

- W = Energi listrik (Watt.jam)
- P = Daya alat listrik (Watt)
- t = Lama pemakaian (jam)
- V = Tegangan beban (Volt)
- I = Arus yang mengalir (Ampere)

$$\text{Rata-rata } P_{\text{losses}} = \frac{P_{\text{losses siang}} + P_{\text{losses Malam}}}{2} \dots\dots\dots(2.15)$$

2.10 Electric Transient and Analysis Program (ETAP)

ETAP 19.0.1 adalah suatu Software analisis yang comprehensive untuk



mendesain dan mensimulasikan suatu sistem rangkaian tenaga. Analisis yang ditawarkan oleh ETAP yang digunakan penulis adalah drop tegangan dan losses jaringan. ETAP juga bisa memberikan warning terhadap bus - bus yang under voltage dan over voltage sehingga pengguna bisa mengetahui bus mana yang tidak beroperasi optimal. Untuk menganalisa suatu rangkaian diperlukan data rangkaian yang lengkap dan akurat sehingga hasil perhitungan ETAP bisa dipertanggung jawabkan.

ETAP mengintegrasikan data - data rangkaian tenaga listrik seperti kapasitas pembangkit, panjang jaringan, resistansi jaringan per km, kapasitas busbar, rating trafo, impedansi urutan nol, positif dan negatif suatu peralatan listrik seperti trafo, generator dan penghantar.

ETAP memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan diagram satu garis grafis dan sistem kabel bawah tanah raceway. Program ini telah dirancang berdasarkan tiga konsep kunci:

1. Virtual reality operasi

Program operasi menyerupai sistem operasi listrik nyata sedekat mungkin.

2. Integrasi total data

ETAP menggabungkan listrik, atribut logis, mekanik dan fisik dari elemen sistem dalam database yang sama.

3. Kesederhanaan di data entri

ETAP melacak data rinci untuk setiap alat listrik. Editor data dapat proses entri data dengan meminta data minimum untuk studi tertentu.

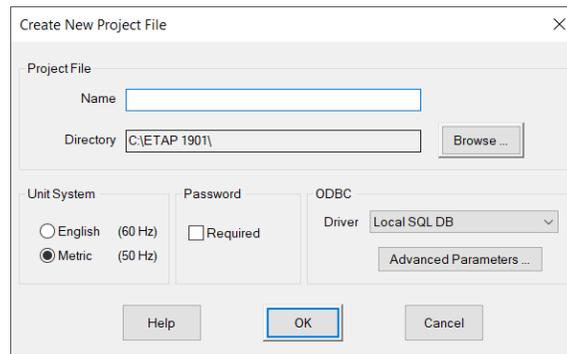
2.10.1 Mempersiapkan plant

Persiapan yang perlu dilakukan dalam analisa/desain dengan bantuan ETAP adalah:

1. Single line diagram.
2. Data peralatan baik elektris maupun mekanis.
3. Library untuk mempermudah mengedit data.

2.10.2 Membuat proyek baru

Berikut ini merupakan langkah - langkah untuk membuat proyek baru. Klik tombol New atau klik menu file lalu akan muncul kotak dialog sebagai berikut.



Gambar 2.14 Membuat File Proyek Baru

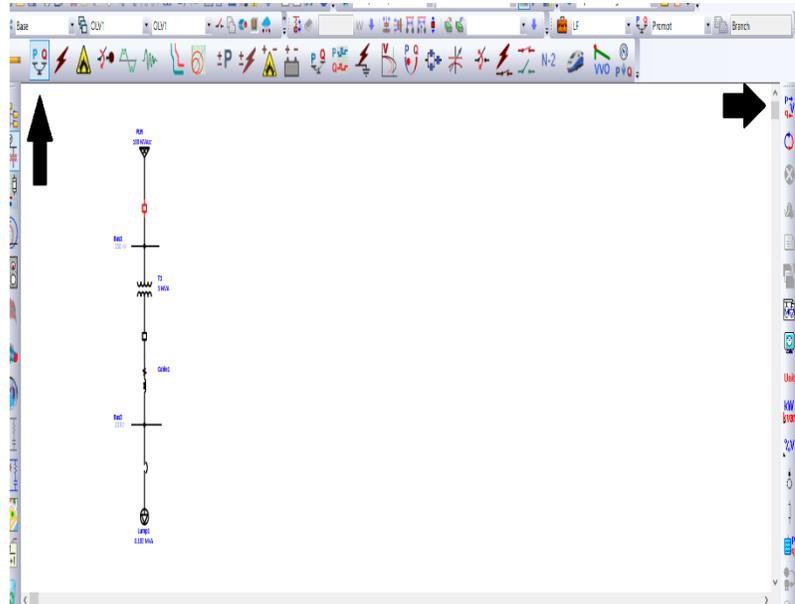
1. Lalu ketik nama di kolom project file. Lalu klik OK.
2. Lalu akan muncul kotak dialog User Information yang berisi data pengguna software. Isi nama dan deskripsikan proyek yang akan dibuat. Lalu klik OK.
3. File proyek baru telah dibuat dan siap untuk menggambar one line diagram.

2.10.3 Menggambar single line diagram

Menggambar single line diagram dilakukan dengan cara memilih simbol peralatan listrik pada menu bar disebelah kanan layar. Klik pada simbol, kemudian arahkan kursor pada media gambar. Untuk menempatkan peralatan pada media gambar, klik kursor pada media gambar. Untuk mempercepat proses penyusunan single line diagram, semua komponen dapat diletakkan secara langsung pada media gambar. Untuk mengetahui kontinuitas antar komponen dapat di cek dengan Continuty Check pada menu bar utama.

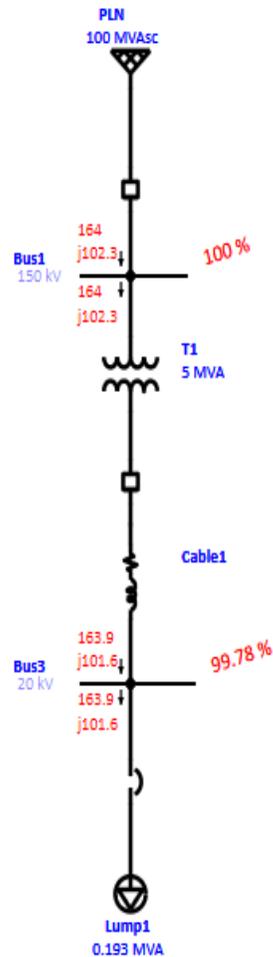
2.10.4 Menjalankan simulasi load flow

Setelah SLD selesai dibuat, maka bisa diketahui aliran daya satu system kelistrikan yang telah dibuat dengan melakukan dengan melakukan running *load flow*. Langkahnya sebagai berikut.



Gambar 2.15 Lembar Simulasi *Load Flow*

1. Klik *load flow* 
2. Klik run *load flow* 

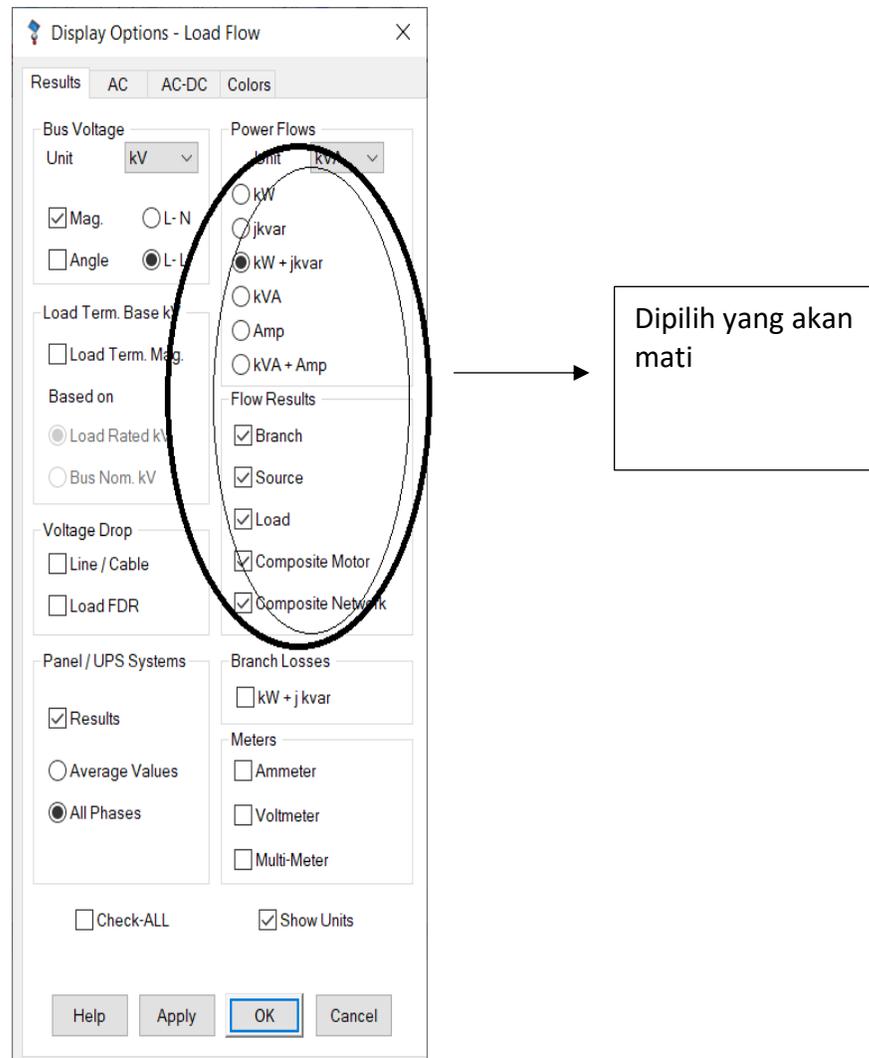


Gambar 2.16 Hasil Simulasi *Load Flow*

Maka akan didapatkan hasil simulasi yang digunakann dengan huruf berwarna merah seperti pada gambar di atas, terdapat nilai daya aktif dan daya reaktif ($P + JQ$) serta presentase tegangan. Kita dapat mengatur nilai apa yang akan ditampilkan pada simulasi bisa berupa arus, faktor daya, yaitu dengan cara mengubah *display option*.

3. Klik *display option*

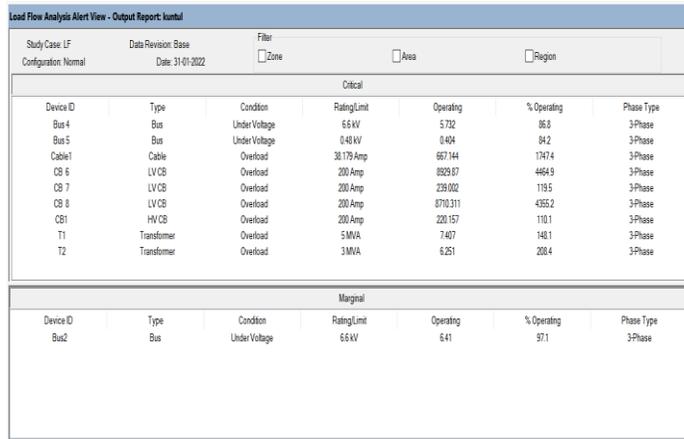




Gambar 2.17 Hasil Menu Display Option

Kita juga dapat melihat kondisi hasil yang kurang bagus baik itu presentase tegangan maupun peralatan yang spesifikasinya kurang baik, dalam hal ini bisa overload dengan menggunakan *alert view*.

4. Klik *alert view* 



Load Flow Analysis Alert View - Output Report: kumbal

Study Case: LF
Configuration: Normal

Data Revision Base: Date: 31-01-2022

Filter: Zone Area Region

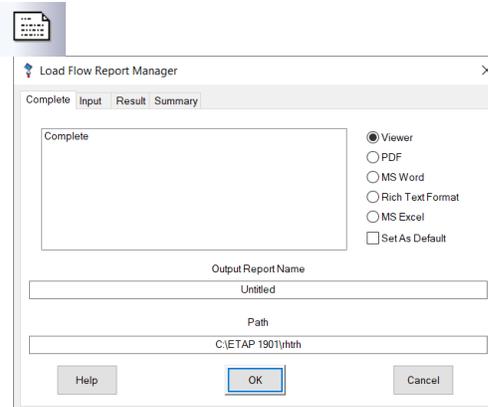
Critical						
Device ID	Type	Condition	RatingLimit	Operating	% Operating	Phase Type
Bus 4	Bus	Under Voltage	6.6kV	5.732	86.8	3Phase
Bus 5	Bus	Under Voltage	0.48kV	0.404	84.2	3Phase
Cable1	Cable	Overload	38.179 Amp	667.144	1747.4	3Phase
CB 6	LV CB	Overload	200 Amp	829.87	464.9	3Phase
CB 7	LV CB	Overload	200 Amp	226.002	113.5	3Phase
CB 8	LV CB	Overload	200 Amp	870.311	435.2	3Phase
CB1	HV CB	Overload	200 Amp	226.157	113.1	3Phase
T1	Transformer	Overload	5MVA	7.407	148.1	3Phase
T2	Transformer	Overload	3MVA	6.251	208.4	3Phase

Marginal						
Device ID	Type	Condition	RatingLimit	Operating	% Operating	Phase Type
Bus2	Bus	Under Voltage	6.6kV	6.41	97.1	3Phase

Gambar 2.18 Menu Alert View

Dari gambar diatas ditunjukkan bahwa CB 6, CB 7, CB 8, mengalami overload, artinya harus diganti dengan rating CB yang lebih besar. Untuk menampilkan hasil simulasi loadflow yang lengkap yaitu dengan menggunakan menu report manager.

5. Klik *report manager*



Gambar 2.19 Report Manager

Maka dengan mendapatkan file lengkap hasil simulasi loadflow data bisa di analisis dari segi tegangan, arus, daya antar bus, losses, dll.