



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar Jaringan Distribusi

Sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik ke konsumen (beban), merupakan hal penting untuk dipelajari. Mengingat penyaluran tenaga listrik ini prosesnya melalui beberapa tahap, yaitu dari pembangkit tenaga listrik penghasil energi listrik, disalurkan ke jaringan transmisi (SUTET) langsung ke gardu induk. Dari gardu induk tenaga listrik disalurkan ke jaringan distribusi primer (SUTM), dan melalui gardu distribusi langsung ke jaringan distribusi sekunder (SUTR), tenaga listrik dialirkan ke konsumen. Dengan demikian sistem distribusi tenaga listrik berfungsi membagikan tenaga listrik kepada pihak pemakai melalui jaringan tegangan rendah (SUTR), sedangkan suatu saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban dalam daya yang besar (melalui jaringan distribusi).^[1]

Sistem-sistem ini saling berkaitan dan membentuk suatu sistem tenaga listrik. Sistem distribusi adalah sistem yang berfungsi mendistribusikan tenaga listrik kepada para konsumen. Distribusi tenaga listrik ini merupakan tahap akhir dalam pengiriman tenaga listrik. Ini merupakan proses membawa listrik dari sistem transmisi listrik menuju ke konsumen listrik. Gardu distribusi terhubung ke sistem transmisi dan menurunkan tegangan transmisinya dengan menggunakan transformator. Fungsi dari system Distribusi Tenaga Listrik ini adalah sebagai:

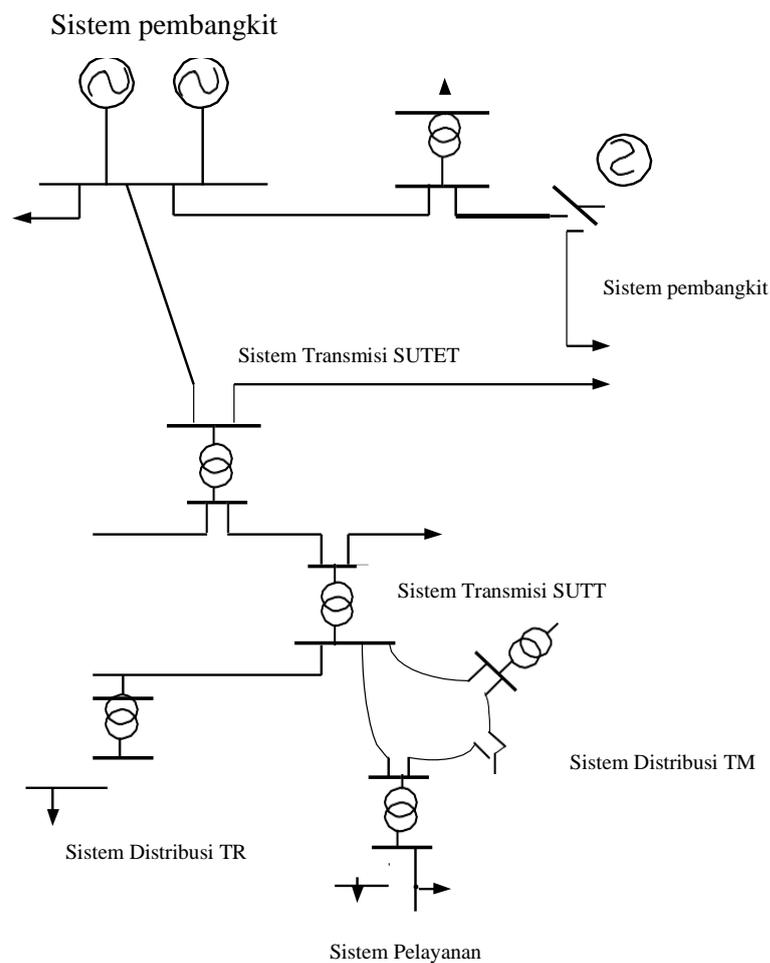
- a. Pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat yaitu konsumen baik industri maupun rumah tangga.

¹ Daman Suswanto. *Konsep Dasar Jaringan Distribusi 1*. 2018. Hal – 1



- b. Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.^[2]

Sistem distribusi terbagi 2 bagian yaitu sistem distribusi tegangan menengah (JTM) dan sistem distribusi tegangan rendah. Berikut gambar pola system tenaga listrik



Gambar 2.1 Pola Sistem Tenaga Listrik ^[3]

Sistem Distribusi Tegangan Menengah mempunyai tegangan kerja di atas

² Wikipedia. *Distribusi tenaga listrik*. 2016. Dalam : https://id.wikipedia.org/wiki/Distribusi_tenaga_listrik (diakses : 6 Mei 2020)

³ Ratno, dkk, *Kriteria Desain Enjinerig Konstruksi Jaringan Distrubusi Tenaga Listrik* (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 53.



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 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.^[4]

2.2. Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik^[5]

Sistem jaringan tenaga listrik adalah penyaluran energi listrik dari pembangkit tenaga listrik (power station) hingga sampai kepada konsumen (pemakai) pada tingkat tegangan yang diperlukan. Sistem tenaga listrik ini terdiri dari unit pembangkit, unit transmisi dan unit distribusi.

Sistem pendistribusian tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu sistem pendistribusian langsung dan sistem pendistribusian tak langsung.

a. Sistem Pendistribusian Langsung

Sistem pendistribusian langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan secara langsung dari Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, dan tidak melalui jaringan transmisi terlebih dahulu. Sistem pendistribusian langsung ini digunakan jika Pusat Pembangkit Tenaga Listrik berada tidak jauh dari pusat-pusat beban, biasanya terletak daerah pelayanan

⁴ Ratno, dkk, *Kriteria Desain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik* (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 54.

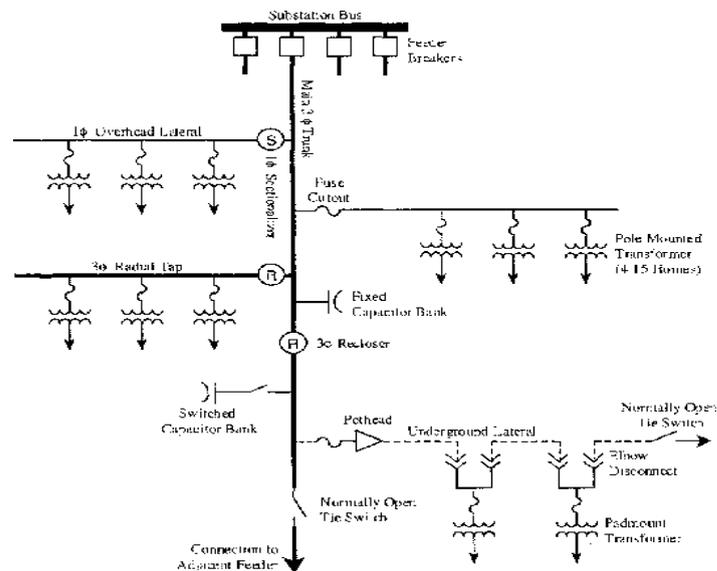
⁵ Daman Suswanto. *Konsep Dasar Jaringan Distribusi 1*. 2018. Hal – 3



beban atau dipinggiran kota.

b. Sistem Pendistribusian tak Langsung

Sistem pendistribusian tak langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan jika Pusat Pembangkit Tenaga Listrik jauh dari pusat - pusat beban, sehingga untuk penyaluran tenaga listrik memerlukan jaringan transmisi sebagai jaringan perantara sebelum dihubungkan dengan jaringan distribusi yang langsung menyalurkan tenaga listrik ke konsumen.



Gambar 2.2 Sistem Pendistribusian Langsung dan Tak Langsung

2.3. Konfigurasi Sistem Saluran Distribusi^[6]

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

- **Jaringan radial**

Yaitu jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga

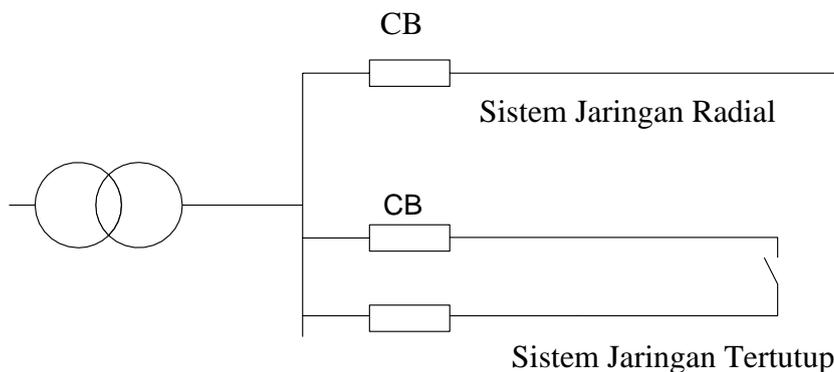
⁶ Ratno, dkk, *Kriteria Desain Enjinerig Konstruksi Jaringan Distrubusi Tenaga Listrik* (Jakarta: PT. PLN (Persero), 2010), hlm. 55-59



listrik, jika terjadi gangguan akan terjadi “*black-out*” atau padam pada bagian yang tidak dapat dipasok.

- **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.

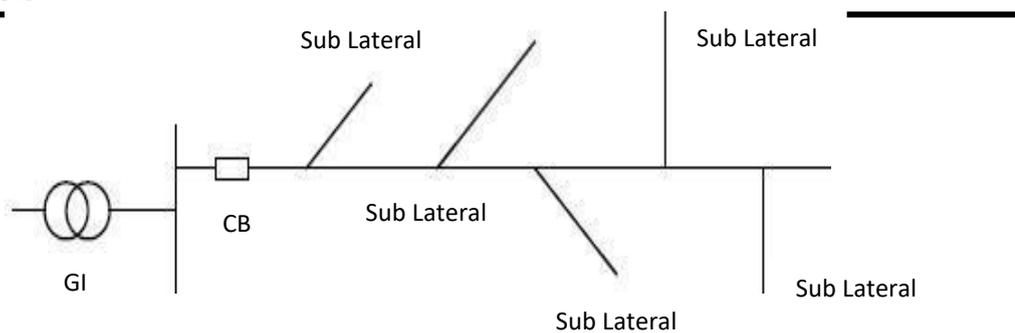


Gambar 2.3 Pola Jaringan Distribusi Dasar

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

2.3.1. Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish – Bone*)

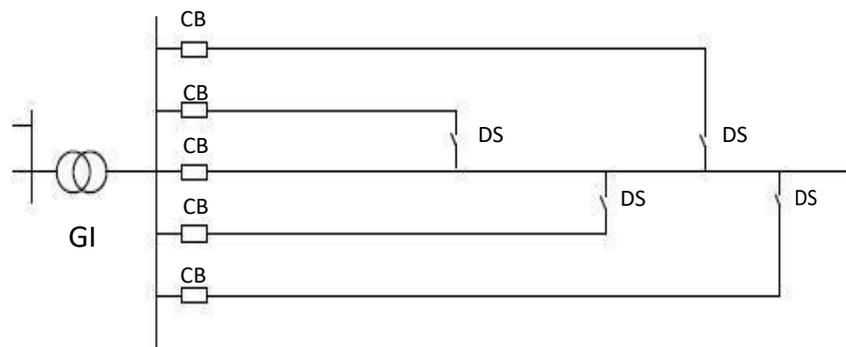
Konfigurasi *fish-bone* ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi Radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah *Pole Top Switch (PTS)*, *Air Break Switch (ABSW)* dengan koordinasi relai atau dengan sistem SCADA. Pemutus balik otomatis PBO (*Automatic Recloser*) dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (*Automatic Sectionalizer*) pada pencabangan.



Gambar 2.4 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish-Bone*)

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

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.



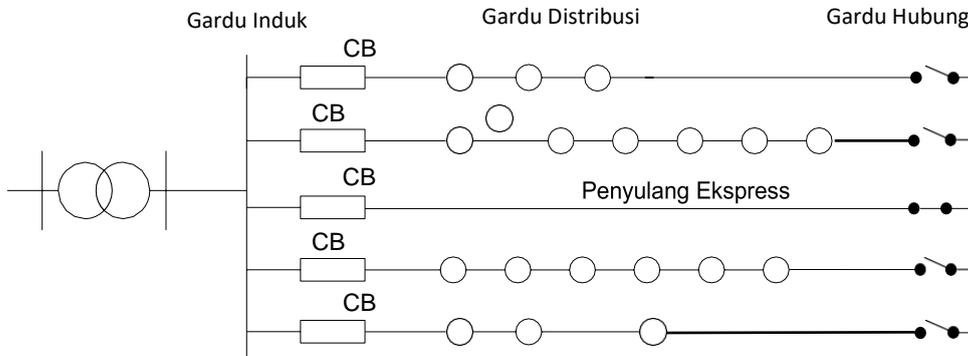
Gambar 2.5 Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*)

2.3.3. 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



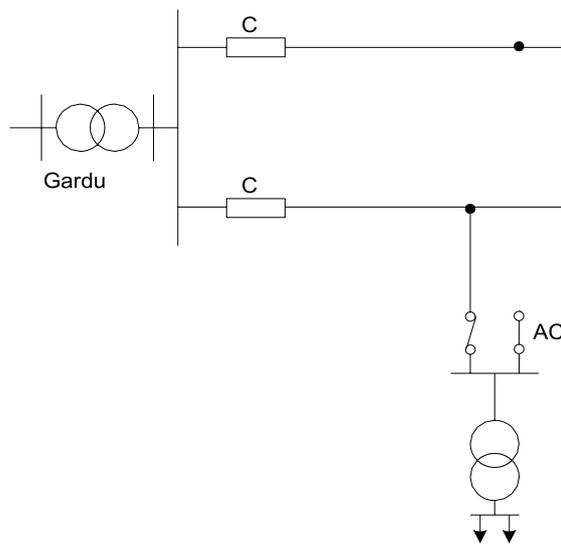
berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).



Gambar 2.6 Konfigurasi Spindel

2.3.4. Konfigurasi *Fork*

Konfigurasi ini memungkinkan 1 (satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 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.

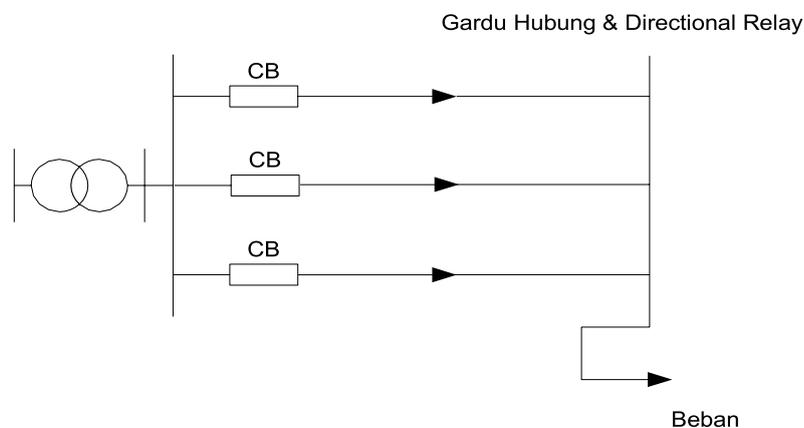


Gambar 2.7 Konfigurasi *Fork*



2.3.5. Konfigurasi SpotLoad (*Parallel Spot Configuration*)

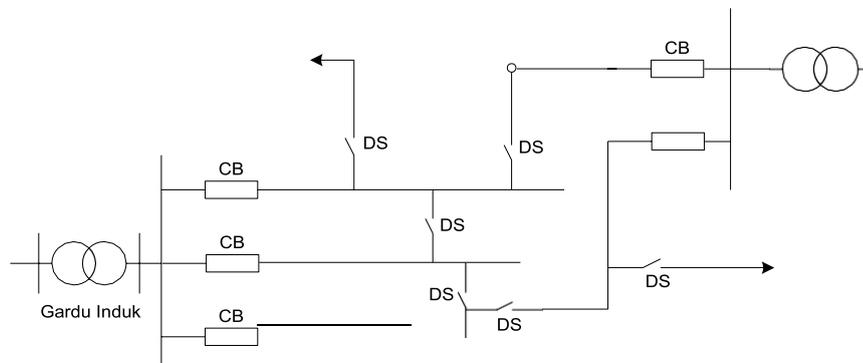
Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas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



Gambar 2.8 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

2.3.6. Konfigurasi Jala – Jala (*Grid, Mesh*)

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



Gambar 2.9 Konfigurasi Jala-jala (*Grid, Mesh*)

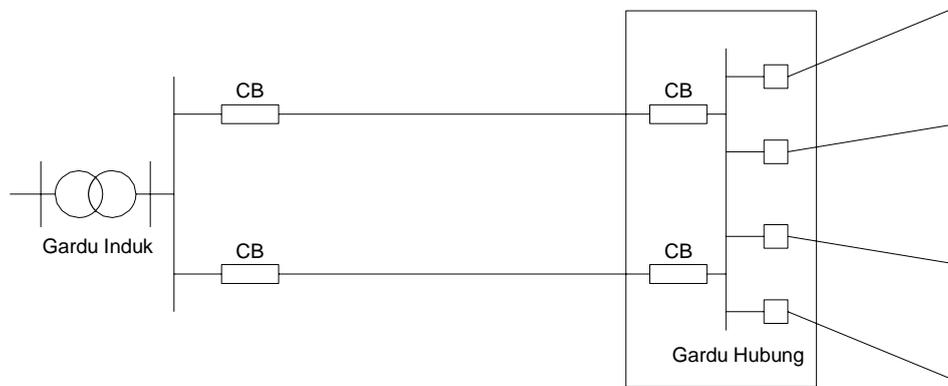


2.3.7. Konfigurasi Lain – lain

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

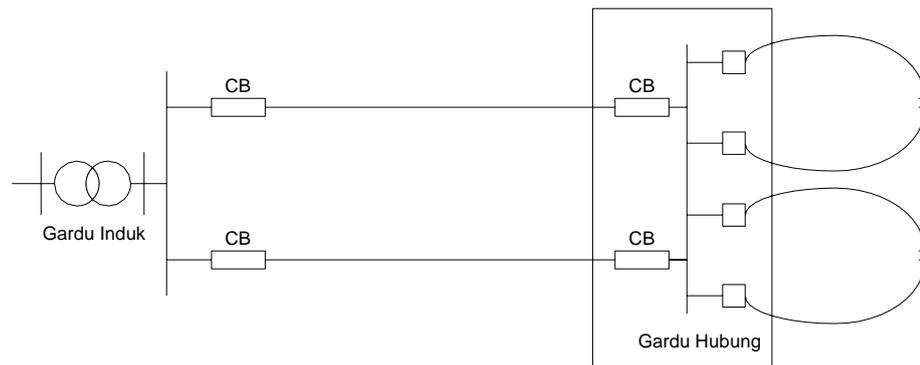
- Struktur Garpu dan Bunga

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 pada JTM yang berawal dari Gardu Hubung.

Gambar 2.10 Konfigurasi Struktur Garpu

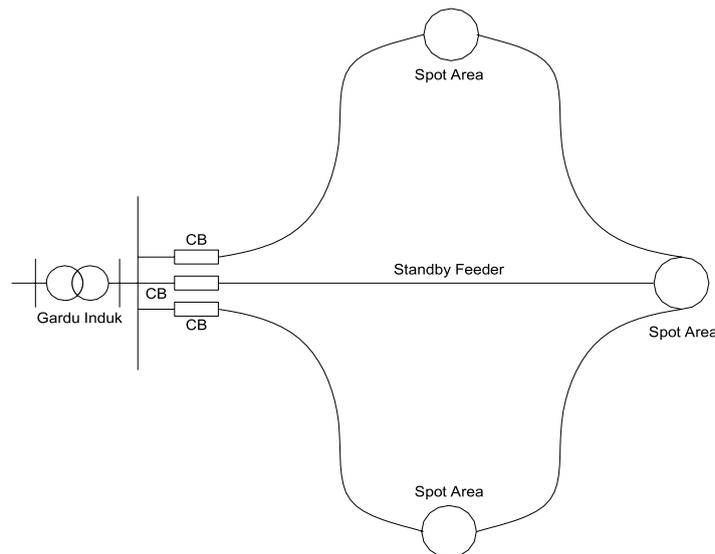


Gambar 2.11 Konfigurasi Struktur Bunga



- Struktur Rantai

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



Gambar 2.12 Konfigurasi Struktur Rantai

2.4. Jaringan Tegangan Menengah

Pada pendistribusian tenaga listrik di suatu kawasan, sistem tegangan menengah dijadikan jaringan utama pendistribusian tenaga listrik ke pelanggan. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk menghindarkan rugi-rugi penyaluran (*losses*) dengan kualitas persyaratan tegangan yang harus dipenuhi oleh PT PLN Persero selaku pemegang Kuasa Usaha Utama sebagaimana diatur dalam UU ketenagalistrikan No 30 tahun 2009. Tegangan operasi dari jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia sendiri telah ditetapkan sebesar 20 kV. Jaringan tegangan menengah pada sistem distribusi di Indonesia dimulai dari terminal keluar (*out-going*) pemutus tenaga dari transformator penurun tegangan Gardu Induk atau transformator penaik tegangan pada pembangkit untuk sistem distribusi skala kecil, hingga peralatan pemisah/proteksi sisi masuk (*in-coming*) transformator distribusi 20 kV - 231/400V.



2.4.1. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Saluran Udara Tegangan Menengah (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 isolator pada tiang besi atau beton. Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan faktor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum yang harus dipenuhi penghantar bertegangan 20 kV tersebut antara Fase atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia. Termasuk dalam kelompok yang diklasifikasikan SUTM adalah juga bila penghantar yang digunakan adalah penghantar berisolasi setengah AAAC-S (*half insulated single core*). Penggunaan penghantar ini tidak menjamin keamanan terhadap tegangan sentuh yang dipersyaratkan akan tetapi untuk mengurangi resiko gangguan temporer khususnya akibat sentuhan tanaman.^[7]

Jarak aman minimal pada penggunaan penghantar telanjang adalah 60 cm kecuali terhadap jaringan telekomunikasi. Jarak aman terhadap saluran telekomunikasi minimal 2,5 meter. Jarak aman terhadap benda-benda lainnya dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2.1 Jarak Aman Saluran Udara Tegangan Menengah

No.	Uraian	Jarak aman
1	Terhadap permukaan jalan raya	≥ 6 meter
2	Balkon Rumah	$\geq 2,5$ meter
3	Atap rumah	≥ 2 meter

⁷ Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia. *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tegangan Listrik*. Penerbit PT. PLN (PERSERO). 2010. Hal 3



4	Dinding bangunan	$\geq 2,5$ meter
5	Antena TV/Radio, menara	$\geq 2,5$ meter
6	Pohon	$\geq 2,5$ meter
7	Lintasan kereta api	≥ 2 meter dari atap kereta
8	Under build TM-TM	≥ 1 meter
9	Under build TM-TR	≥ 1 meter

2.4.2. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin.^[8]

Saluran kabel udara tegangan menengah adalah saluran udara tegangan menengah yang menggunakan kabel sebagai sarana penghantar. Terdapat dua jenis kabel yang dipakai^[9]

- Kabel udara dengan ketahanan isolator 6 kV/half insulated-AAAC-S yang berukuran 150 mm² dan 70 mm². Hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan AAAC-S ini adalah apabila melakukan penggantian AAAC menjadi AAAC-S, mengingat beban massa jaringan bertambah 37 %. Perlu dipertimbangkan pemasangan penopang tiang/*guy wire* pada tiang- tiang sudut dan tiang akhir.
- Kabel udara dengan ketahanan isolator penuh / 24 kV/ fasa-fasa dari jenis NFA2XSEY-T, berukuran (3x150 Al+90 SE) dan (3x70 Al+70 SE). Mengingat berat massa kabel ini, kekuatan tiang untuk SKUTM

⁸ Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia. *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tegangan Listrik*. Penerbit PT. PLN (PERSERO). 2010. Hal 4

⁹ Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia. *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tegangan Listrik*. Penerbit PT. PLN (PERSERO). 2010. Hal 15



memakai tiang 350 daN.

Ruang bebas (*right of way*) dan jarak aman (*safety clearance*) pada konstruksi SKUTM harus tetap memenuhi syarat keamanan lingkungan dan keandalan. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah yang menggunakan kabel twisted, jarak aman sekurang-kurangnya 60 cm, dan ruang bebas kabel tidak boleh bersentuhan dengan pohon/bangunan. Pada titik sambungan SKUTM kabel twisted dan SUTM AAAC, jarak aman sama dengan ketentuan pada SUTM AAAC.

2.4.3. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM)

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik Tegangan Menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama. Keadaan ini dimungkinkan dengan Konstruksi isolasi penghantar per Fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, bila dibandingkan dengan penggunaan conduit atau bahkan tunneling (terowong beton).

Penggunaan Saluran Kabel bawah tanah Tegangan Menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah sebagai upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan SUTM, penggunaan SKTM akan memperkecilkan resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal / meningkatkan keamanan ketenagalistrikan. Secara garis besar, termasuk dalam kelompok SKTM adalah :

- SKTM bawah tanah – *underground MV cable*
- SKTM laut – *Submarine MV cable*

Selain lebih aman, namun penggunaan SKTM lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama, sebagai akibat konstruksi isolasi penuh penghantar per Fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan sesuai keamanan ketenagalistrikan

Penerapan instalasi SKTM seringkali tidak dapat lepas dari Instalasi Saluran Udara Tegangan Menengah sebagai satu kesatuan sistem distribusi



sehingga masalah transisi konstruksi diantara tetap harus dijadikan perhatian.^[10]

2.5. 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.

2.5.1. Resistansi Saluran (R)^[11]

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

$$R = \frac{\text{Power loss dalam konduktor}}{(I)^2} \quad (\Omega)$$

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

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

Dimana :

ρ : resistivity konduktor ($\Omega.m$)

l : Panjang konduktor (m)

A : cross sectional area (mm^2)

Nilai resistivity konduktor pada temperatur $20^{\circ}C$:

¹⁰ Kelompok Kerja Standar Konstruksi Distribusi Jaringan Tenaga Listrik dan Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Universitas Indonesia. *Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tegangan Listrik*. Penerbit PT. PLN (PERSERO). 2010. Hal 4

¹¹ Stevenson, William D, *Analisis Sistem Tenaga Listrik* (Jakarta: Erlangga, 1994), hlm. 56-58.



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

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 :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana R_1 dan R_2 adalah resistansi masing-masing konduktor pada temperatur t_1 dan t_2 , dan T adalah suatu konstanta yang nilainya 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. Induktansi Saluran (L)^[12]

Induktansi saluran menggambarkan besarnya fluks magnet ϕ 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 (X_L) dapat diperoleh setelah melakukan perhitungan induktansi saluran terlebih dahulu. Untuk menentukan besarnya induktansi saluran pada jaringan distribusi dapat

¹² Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya* (Jakarta : Gramedia, 1995), hlm. 152



dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$L = \left(0,5 + 4,6 \log \frac{D-r}{r} \times 10^{-7} \right) H/m \dots \dots \dots (2.3)$$

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:

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{23} \times D_{31}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi r^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

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

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \dots \dots \dots (2.6)^{[13]}$$

Dimana :

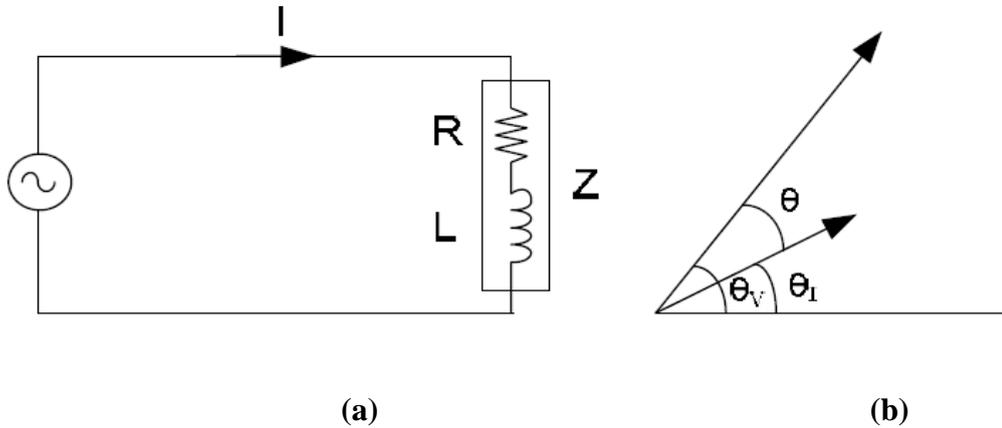
- X_L = Reaktansi induktif saluran (Ω/km)
- 2 = Sudut arus bolak – balik
- F = Frekuensi sistem (50 Hz)
- L = Induktansi Konduktor (H/m)

2.6. Daya Listrik ^[14]

Apabila suatu sumber listrik arus bolak-balik (AC) diterapkan pada komponen impedansi kompleks $Z = R + jX$ dimana $X = 2\pi \cdot f \cdot L$ seperti ditampilkan pada gambar 2.13 (a) , menghasilkan fasor tegangan $V = |V| \angle \theta$, dan fasor arus $I = |I| \angle \theta$, dalam nilai efektif (rms) seperti digambarkan pada gambar 2.13 (b)

¹³ Theraja, B.L, *Worked Examples In Electrical Technology* (New Delhi: Techouse, 1983), hlm. 75.

¹⁴ Kothari, D. P dan I. J. Nagrath. 2008. *Power System Engineering*. Hal 156



Gambar 2.13 Tegangan AC yang diterapkan pada beban dan diagram fasor.

(a) Rangkaian R dan X

(b) Diagram Vektor I dan V

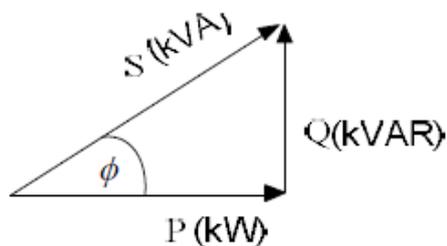
Ungkapan daya pada rangkaian diatas adalah perkalian tegangan dan arus VI^* yang menghasilkan,

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

$$VI^* = |V||I| \cos \theta + j|V||I| \sin \theta \dots\dots\dots (2.7)$$

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

Menurut Smith (1992) konsep daya kompleks memberikan pendekatan lain untuk pemecahan persoalan rangkaian arus AC. Perhitungan yang mengikuti kaidah aljabar kompleks, teknik vektor dan metode grafik dapat diterapkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.14



Gambar 2.14 Segitiga Daya Kompleks



Selanjutnya daya kompleks ditandai dengan S dan diberikan melalui,

$$S = VI^* \dots\dots\dots (2.8)$$

$$S = P + jQ \dots\dots\dots (2.9)$$

magnitud dari S .

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (2.10)^{15}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

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.

2.6.1. Daya Semu

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.

$$\text{Untuk } 1\phi : S = V_{\phi} \times I_{\phi}^* \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\text{Untuk } 3\phi : S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L^* \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana, S = daya semu (VA)

2.6.2. Daya Aktif

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.

$$\text{Untuk } 1\phi : P = V_{\phi} \times I_{\phi} \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.14)$$

¹⁵ Subir Ray. 2007. Electrical Power System. Hal 17



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

dimana, P = daya aktif (watt)

V = tegangan yang ada (KV)

I = besar arus yang mengalir (A)

$\cos \phi$ = faktor kerja (standard PLN = 0.85)

2.6.3 Daya Reaktif

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.

$$\text{Untuk } 1 \phi : Q = V_\phi \times I_\phi \times \sin \phi \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\text{Untuk } 3\phi : P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin\phi \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana : Q = daya reaktif (VAR)

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

2.7 Model Saluran Distribusi¹⁶

Saluran distribusi digambarkan melalui suatu model ekivaian 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 ekivalen 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.

$$Z = (r + j\omega L)l \dots\dots\dots(2.18)$$

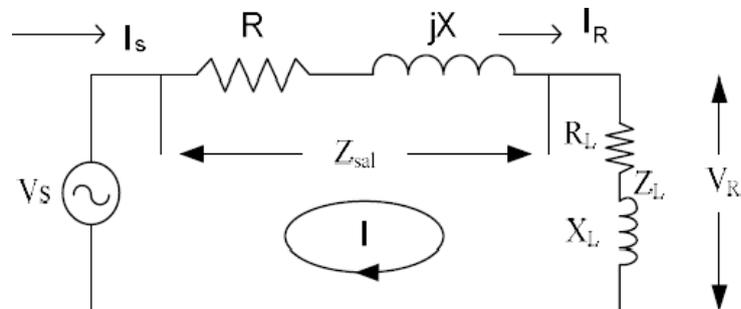
$$Z = R + jX \dots\dots\dots(2.19)$$

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 (2.15). V_s dan I_s merupakan tegangan dan

¹⁶ Abdul Kadir. 2000. *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Hal 88



arus pada ujung kirim saluran, V_R dan I_R merupakan tegangan dan arus pada ujung penerima saluran.



Gambar 2.15 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 penerima (A)

I_s = arus pada ujung pengirim (A)

$Z_L = (R + jX)$ impedansi beban (Ω)

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

$$I_s = \frac{S_{S(3\phi)}}{3V_{S^*}} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana:

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

V_S = tegangan sisi pengirim (kV)

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

$$I_S = I_R \dots\dots\dots(2.21)$$



2.8. Korelasi Susut Tegangan dan Susut Daya Terhadap Standar Jaringan^[17]

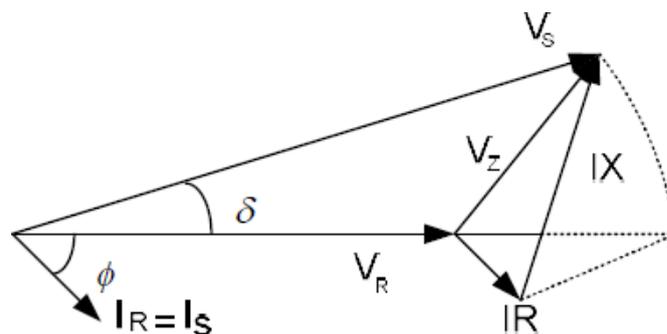
Berdasarkan SPLN 72: 1987 dapat didesain sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dengan kriteria rugi tegangan sebagai berikut :

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 %

Berdasarkan rangkaian ekuivalen saluran pada gambar (2.15) dan uraian dari persamaan (2.18) sampai (2.21) dapat digambarkan diagram fasor arus dan tegangan untuk beban dengan sudut daya tertinggal (*lagging*) seperti ditunjukkan pada gambar (2.16).



Gambar 2.16 Diagram fasor saluran distribusi

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

$$\text{atau } V_Z = I_S \times Z_L \dots\dots\dots (2.22)$$

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

$$V_R = V_S - V_Z \dots\dots\dots (2.23)$$

Besar persentase susut tegangan pada saluran distribusi primer dapat

¹⁷ Carlos, 2008. *Rugi Daya Aktif Saluran Pada Jaringan Distribusi Daya Listrik*. Karya Ilmiah. Tidak Diterbitkan.



dihitung dengan.

$$\%V_{rugi} = \frac{V_z}{V_s} \times 100\% \dots\dots\dots(2.24)$$

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

$$\Delta P = \frac{S^2 \cdot R \cdot \ell}{V^2} \dots\dots\dots(2.25)$$

Dan persentase susut daya :

$$\Delta P = \frac{100 \cdot S \cdot \ell \cdot R}{V^2 \cdot \cos \phi} \% \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana :

- ΔP = Susut Daya (%)
- S = Daya terpasang (MVA)
- R = Resistansi Jaringan (Ohm/km)
- ℓ = Panjang Jaringan (km)
- V = Tegangan Kerja Sistem (kV)
- $\cos \phi$ = Faktor kerja beban

2.9 Electric Transient and Analysis Program (ETAP)^[18]

Dalam perancangan dan analisa sebuah sistem tenaga listrik, sebuah software aplikasi sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi real sebelum sebuah sistem direalisasikan. ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) *PowerStation 12.6.0* merupakan salah satu *software* aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik.

ETAP mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, dan *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.

Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

¹⁸ Multa, Lesnanto S.T.,M.Eng, *Modul Pelatihan ETAP*, (Universitas Gadjah Mada: Tidak Diterbitkan, 2013), hlm. 1-27.



- Analisa aliran daya
- Analisa hubung singkat
- Arc Flash Analysis
- Starting motor
- Koordinasi proteksi
- Analisa kestabilan transien, dll.

Dalam menganalisa sistem tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (*single line diagram*) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, busbar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah distandardisasi untuk diagram saluran tunggal. Elemen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan listrik, tetapi merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah.

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.

Percobaan load flow atau aliran daya ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran daya yang berupa pengaruh dari variasi beban dan rugi-rugi transmisi pada aliran daya dan juga mempelajari adanya tegangan jatuh di sisi beban .

Aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik secara garis besar adalah suatu peristiwa daya yang mengalir berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari suatu sistem pembangkit (sisi pengirim) melalui suatu saluran atau jaringan transmisi hingga sampai ke sisi beban (sisi penerima). Pada kondisi ideal, maka daya yang diberikan oleh sisi pengirim akan sama dengan daya yang diterima beban. Namun



pada kondisi real, daya yang dikirim sisi pengirim tidak akan sama dengan yang diterima beban. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa hal:

1. Impedansi di saluran transmisi.

Impedansi di saluran transmisi dapat terjadi karena berbagai hal dan sudah mencakup resultan antara hambatan resistif, induktif dan kapasitif. Hal ini yang menyebabkan rugi-rugi daya karena terkonversi atau terbuang menjadi energi lain dalam transfer energi.

2. Tipe beban yang tersambung jalur.

Ada 3 tipe beban, yaitu resistif, induktif, dan kapasitif. Resultan antara besaran hambatan kapasitif dan induktif akan mempengaruhi P.F. sehingga mempengaruhi perbandingan antara besarnya daya yang ditransfer dengan yang diterima.

Sedangkan untuk melakukan kalkulasi aliran daya, terdapat 3 metode yang biasa digunakan:

a. Accelerated Gauss-Seidel Method

- Hanya butuh sedikit nilai masukan, tetapi lambat dalam kecepatan perhitungan.

$$[P + jQ] = [V^T] [Y_{BUS}^*] [V^*]$$

b. Newton Raphson Method

- Cepat dalam perhitungan tetapi membutuhkan banyak nilai masukan dan parameter.
- *First Order Derivative* digunakan untuk mempercepat perhitungan.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

c. Fast Decoupled Method

- Dua set persamaan iterasi, antara sudut tegangan, daya



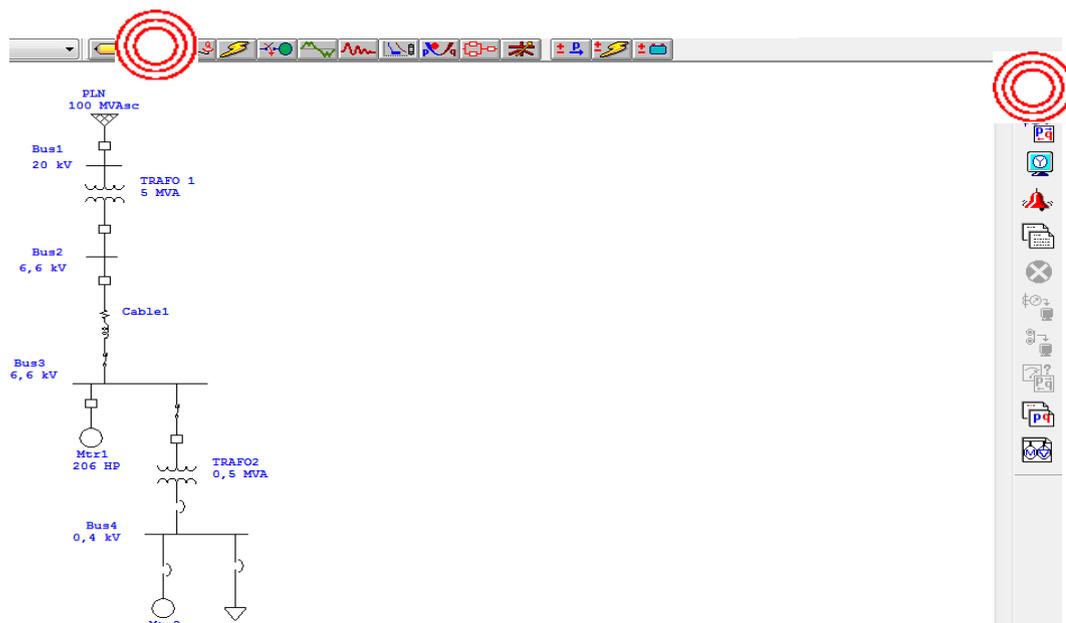
reaktif dengan magnitudo tegangan

- Cepat dalam perhitungan namun kurang presisi
- Baik untuk sistem radial dan sistem dengan jalur panjang

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [J_1] [\Delta \delta] \\ [\Delta Q] &= [J_4] [\Delta V] \end{aligned}$$

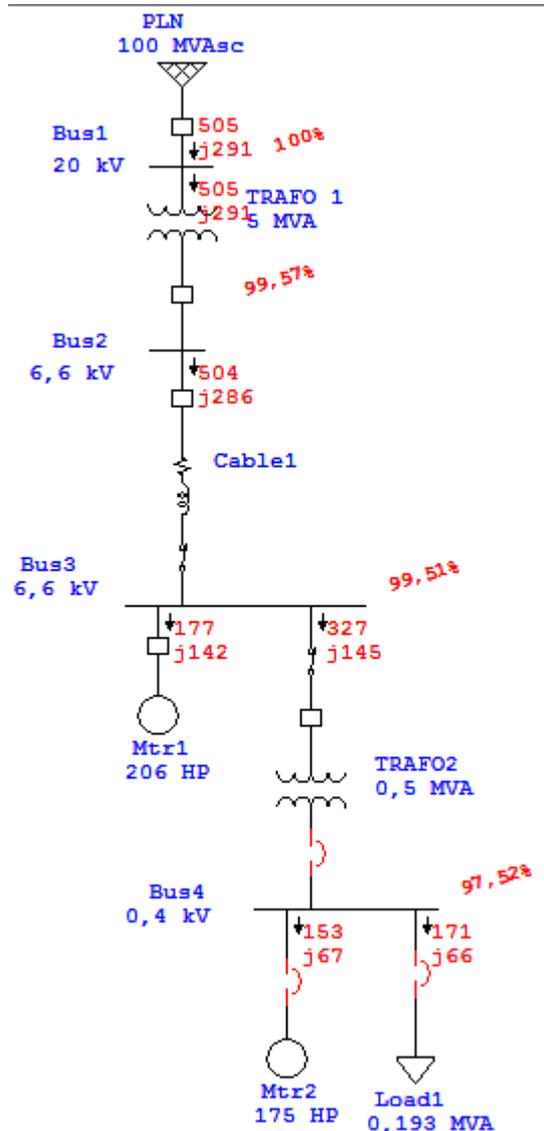
Menjalankan Simulasi *Load Flow*

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



Gambar 2.17 Lembar Simulasi *Load Flow*

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

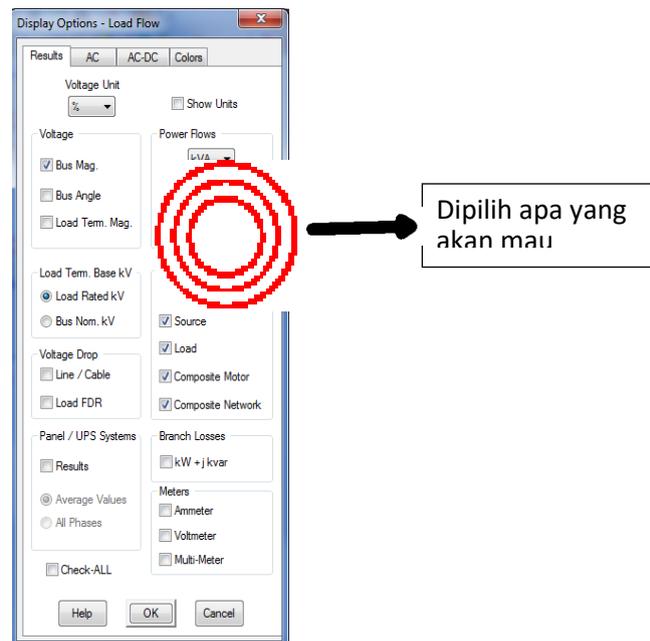


Gambar 2.18 Hasil Simulasi Load Flow

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

3. Klik *display option*





Gambar 2.19 Hasil Menu *Display Option*

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

4. Klik *alert view*

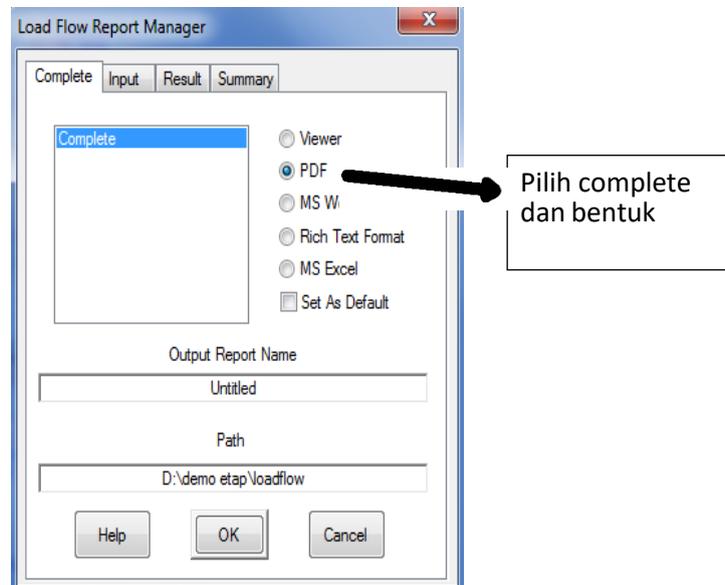
Critical						
Device ID	Rating/Limit	Operating	% Operating	Phase Type		
CB6	50 Amp	513.173	346,1	3Phase		
CB7	50 Amp	247.631	165,1	3Phase		
CB8	50 Amp	271.675	181,1	3Phase		

Marginal						
Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Operating	% Operating	Phase Type

Gambar 2.20 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 2.21 Report Manager

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