

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik¹¹

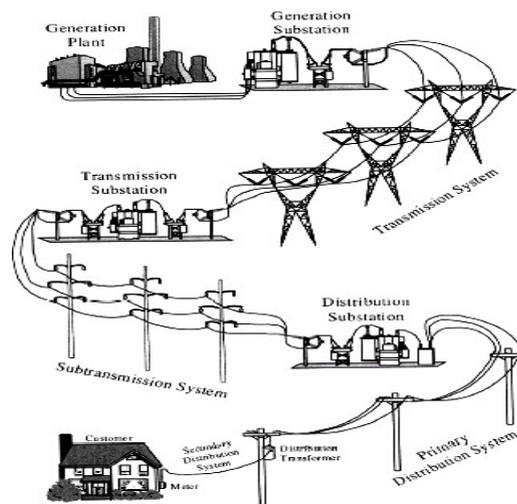
Suatu sistem tenaga listrik merupakan rangkaian instalasi tenaga listrik yang terdiri dari pembangkit, saluran transmisi dan gardu induk, dan jaringan distribusi. Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Proses penyaluran tenaga listrik terdiri dari beberapa tahap, yaitu mula-mula energi listrik dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik dengan tegangan mulai dari 11 kV hingga 24 kV. Lalu, tegangan tersebut dinaikkan dengan menggunakan trafo *step up* menjadi 70 kV, 150 kV, 275 kV, atau 500 kV. Kemudian energi listrik tersebut disalurkan melalui jaringan transmisi (SUTET) 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.

Pada gambar 2.1 dapat dilihat bahwa tenaga listrik yang dihasilkan dan dikirimkan ke konsumen melalui pusat pembangkit tenaga listrik, saluran transmisi, gardu induk, saluran distribusi, dan kemudian ke beban (konsumen tenaga listrik).

Tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik dinaikkan terlebih dahulu dengan menggunakan transformator *step up* sebelum disalurkan melalui jaringan transmisi. Hal ini bertujuan untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini rugi daya (*losses*) berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir ($P_{\text{loss}} = I^2 \cdot R$).

¹¹ Daman Suswanto, *Sistem Distribusi Tenaga Listrik Edisi Pertama*, (Padang: Universitas Negeri Padang, 2009), hlm. 1

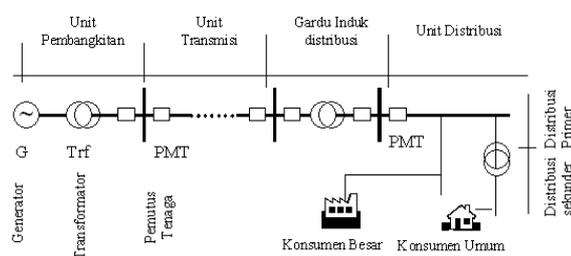
Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan menggunakan transformator *step down* pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan dengan transformator distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt.⁹



Gambar 2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik

Sumber : <https://jaringandistribusitenagalistrik.wordpress.com/2015/04/29/bab-1-konsep-dasar-jaringan-distribusi/>, diakses pada 20 Februari 2022

Selanjutnya energi listrik disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen. Hal ini membuktikan bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan seperti ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik

Sumber : <http://distribusitenaga.blogspot.com/2013/11/sistem-distribusi-tenaga-listrik.html>

⁹ Suhadi,dkk, *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*, (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008), hlm. 11

2.2 Klasifikasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik⁹

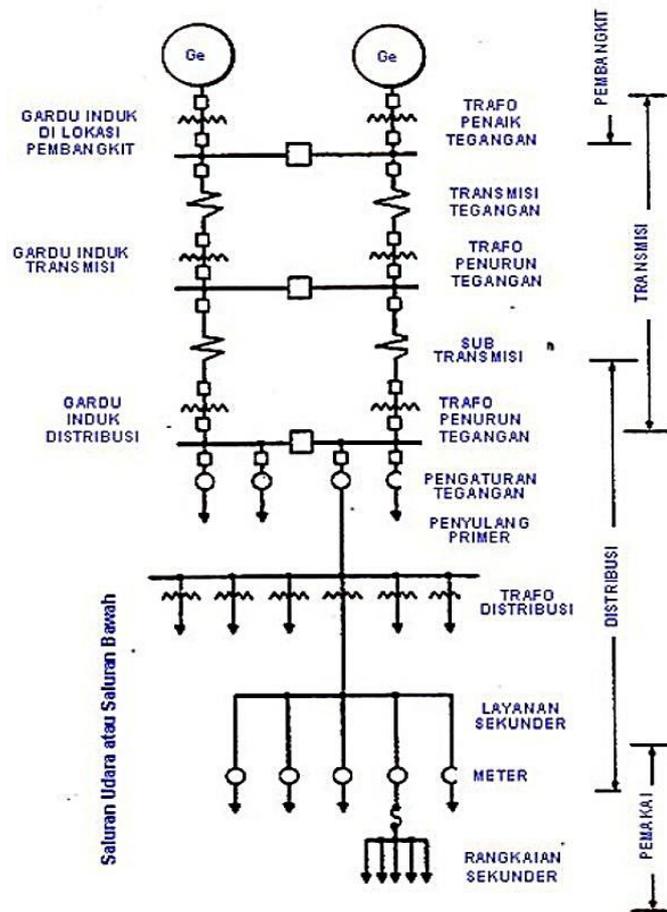
Untuk kemudahan dan penyederhanaan, maka diadakan pembagian serta pembatasan-pembatasan seperti pada Gambar 2.3:

- a. Daerah I : Bagian pembangkitan (*Generation*)
- b. Daerah II : Bagian penyaluran (*Transmission*), bertegangan tinggi (HV, UHV, EHV)
- c. Daerah III : Bagian distribusi primer, bertegangan menengah (6 atau 20 kV).
- d. Daerah IV : (Di dalam bangunan pada beban/konsumen), instalasi bertegangan rendah.

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi sistem 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:

1. SUTM, terdiri dari tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan perlengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.
2. SKTM, terdiri dari kabel tanah, *indoor* dan *outdoor termination*, batu bata, pasir dan lain-lain.
3. Gardu distribusi, terdiri dari transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat transformator, LV panel, pipa-pipa pelindung, arrester, kabel-kabel, peralatan *grounding*, dan lain-lain.
4. SUTR, terdiri dari perlengkapan/material yang sama yang terdapat pada SUTM dan SKTM. Yang membedakan hanya dimensinya.

⁹ Ibid, hlm.12



Gambar 2.3 Pembagian/Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik
Sumber : Buku Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1, 2008

2.2.1 Berdasarkan Ukuran Tegangan

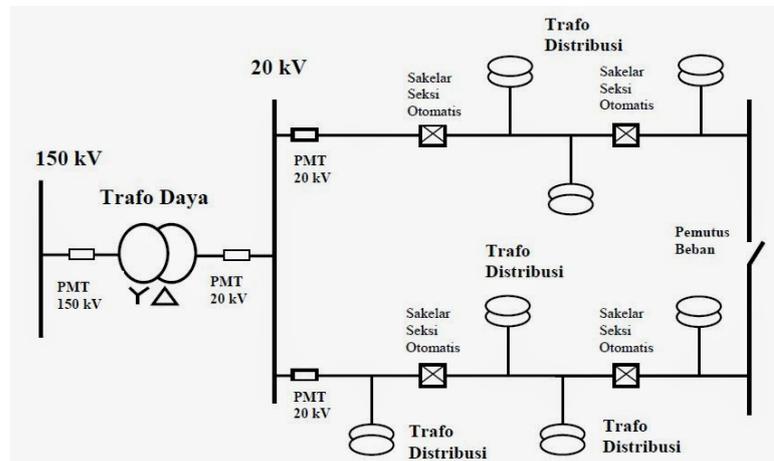
Berdasarkan ukuran tegangan, jaringan distribusi tenaga listrik dapat dibedakan pada dua sistem, yaitu :

1. Sistem jaringan distribusi primer¹¹

Jaringan distribusi primer merupakan awal penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik ke konsumen untuk sistem pendistribusian langsung. Sedangkan untuk sistem pendistribusian tak langsung merupakan tahap berikutnya dari jaringan transmisi dalam upaya menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) memiliki

¹¹ Daman Suswanto, Op. Cit., hlm. 5

tegangan sistem sebesar 20 kV. Untuk wilayah kota tegangan diatas 20 kV tidak diperkenankan, mengingat pada tegangan 30 kV akan terjadi gejala-gejala korona yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, telekomunikasi, dan telepon.



Gambar 2.4 Jaringan distribusi primer 20 kV

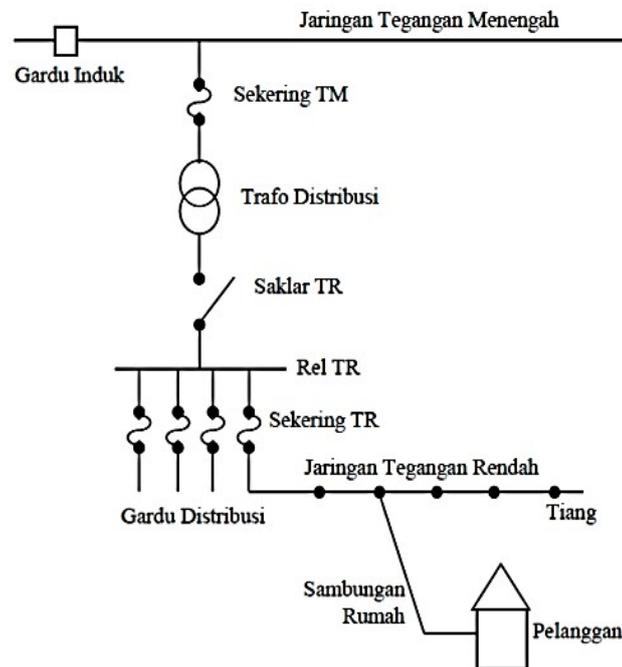
Sumber : <https://iaeeta.org/2017/09/29/tipe-tipe-jaringan-distribusi-listrik/>, diakses pada tanggal 20 Maret 2022

Jaringan distribusi primer berfungsi menyalurkan daya listrik, menjelajahi daerah asuhan ke gardu/transformator distribusi. Jaringan distribusi primer dilayani oleh gardu hubung atau langsung dari gardu induk atau dari pusat pembangkit. Sistem distribusi primer ini dapat dibagi berdasarkan sistem penyaluran serta konfigurasi jaringannya.

2. Sistem jaringan distribusi sekunder¹⁵

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.10 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari transformator gardu distribusi sampai pada pemakai akhir atau konsumen.

¹⁵ A Ardiansyah, *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*, (Medan: Universitas Sumatera Utara, 2010)



Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Sekunder
 Sumber : Ardiansyah, A. 2010, diakses pada 19 Februari 2022

2.2.2 Berdasarkan Sistem Penyaluran¹⁰

Berdasarkan sistem penyalurannya, jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu :

1. Saluran Udara (*Overhead Lines*)

Saluran udara merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kawat penghantar yang ditopang pada tiang listrik. Sedangkan saluran bawah tanah merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kabel-kabel yang ditanamkan di dalam tanah. Keuntungan dari saluran udara antara lain sebagai berikut:

- Lebih fleksibel dan leluasa dalam upaya untuk perluasan beban.
- Dapat digunakan untuk penyaluran tenaga listrik pada tegangan diatas 66 kV.
- Lebih mudah dalam pemasangannya.
- Bila terjadi gangguan hubung singkat, mudah diatasi dan dideteksi.

Kerugian dari saluran udara antara lain sebagai berikut :

¹⁰ Sulasno, *Teknik dan Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, (Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2001)

- a. Mudah terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb.
- b. Untuk wilayah yang penuh dengan bangunan yang tinggi, sukar untuk menempatkan saluran.
- c. Masalah efek kulit, induktansi, dan kapasitansi yang terjadi akan mengakibatkan *drop* tegangan lebih tinggi.
- d. Ongkos pemeliharaan lebih mahal, karena perlu jadwal pengecatan dan penggantian material listrik bila terjadi kerusakan.

2. Saluran Bawah Tanah (*Underground Lines*)

Keuntungan dari saluran bawah tanah diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon, dsb.
- b. Tidak mengganggu pandangan, bila adanya bangunan yang tinggi.
- c. Dari segi keindahan, saluran bawah tanah lebih sempurna dan lebih indah dipandang.
- d. Mempunyai batas umur pakai dua kali lipat dari saluran udara.
- e. Ongkos pemeliharaan lebih murah, karena tidak perlu adanya pengecatan.
- f. *Drop* tegangan lebih rendah karena masalah induktansi bisa diabaikan.

Kerugian dari saluran bawah tanah diantaranya adalah sebagai berikut :

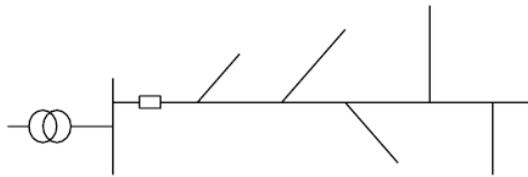
- a. Biaya investasi pembangunan lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara.
- b. Usaha pencarian titik gangguan hubung singkat tidak mudah.
- c. Dalam perencanaannya, diperlukan pertimbangan-pertimbangan teknis yang lebih mendalam, khususnya untuk kondisi tanah yang dilalui.
- d. Tidak dapat menghindari bila terjadi bencana banjir, desakan akar pohon, dan ketidakstabilan tanah.

2.2.3 Berdasarkan Bentuk Konfigurasi Jaringan

Struktur konfigurasi jaringan distribusi primer, secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi :

a. 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 percabangan.

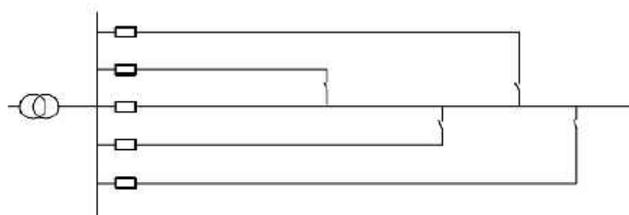


Gambar 2.8 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish-Bone*)

Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

b. 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.



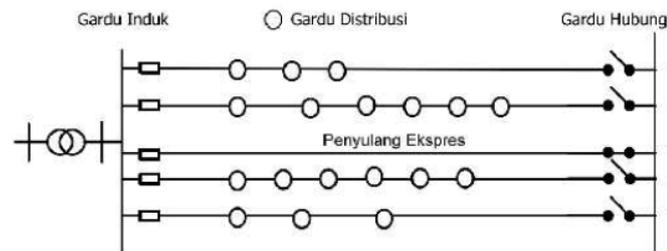
Gambar 2.9 Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*)

Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

c. Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal dua 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 dua penyulang, maka faktor pembebanan

hanya 50%. Berdasarkan konsep spindel jumlah penyulang pada satu spindel adalah enam penyulang operasi dan satu 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 2.10 Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

d. Konfigurasi *Fork*

Konfigurasi ini memungkinkan satu gardu distribusi dipasok dari dua 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.

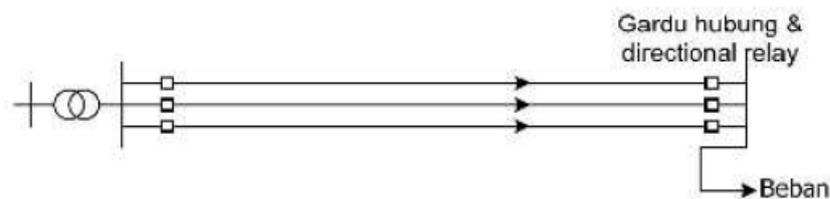


Gambar 2.11 Konfigurasi *Fork*

Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

e. Konfigurasi *Spotload (Parallel Spot Configuration)*

Konfigurasi yang terdiri dari 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.

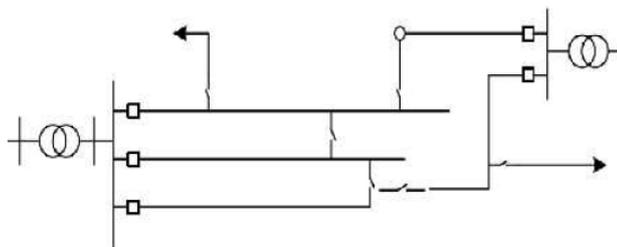


Gambar 2.12 Konfigurasi *Spotload (Parallel Spot Configuration)*

Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

f. Konfigurasi Jala-Jala (*Grid, Mesh*)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus.



Gambar 2.13 Konfigurasi Jala-Jala

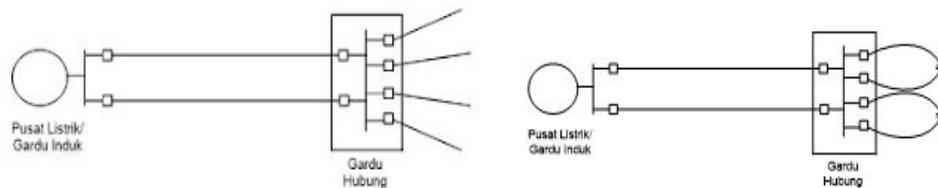
Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

g. Konfigurasi lain-lain

Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana di atas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif 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, sebagai pemutus tenaga, sebagai pengamanan dengan rele proteksi gangguan fasa-fasa dan fasa-tanah pada JTM yang berawal dari gardu hubung.

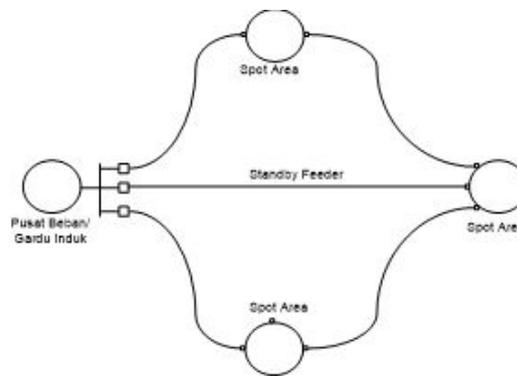


Gambar 2.14 Konfigurasi Struktur Garpu dan Bunga

Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

2. Struktur Rantai

Struktur ini dipakai pada suatu kawasan yang luas dengan pusat-pusat beban yang berjauhan satu sama lain.



Gambar 2.15 Konfigurasi Struktur Rantai

Sumber : <http://sirbeh.blogspot.com/2019/10/konfigurasi-sistem-distribusi.html>, diakses pada 17 Februari 2022

2.3 Kriteria Desain Jaringan Distribusi Tegangan Menengah²²

Dalam merencanakan sistem distribusi tenaga listrik sangat diperlukan adanya pedoman untuk menetapkan suatu kriteria bagi perencanaan saluran udara

²² <https://yantekbansel.wordpress.com/2012/04/17/jaringan-tegangan-menengah-jtm/> (diakses pada tanggal 1 Maret 2022)

tegangan menengah dan tegangan rendah. Desain kriteria ini akan menjadi rujukan dalam mendesain sebuah sistem distribusi tenaga listrik, mulai dari SUTM, trafo, JTR maupun SR.

Tujuan pembuatan desain kriteria ialah untuk memberikan pegangan yang terarah dalam penyusunan desain sistem dan standar-standar konstruksi distribusi yang akan dipergunakan serta perencanaan perluasan jaringan untuk mendapatkan tingkat efisiensi distribusi yang tinggi.

Kriteria yang akan dijadikan patokan adalah:

1. Besaran *drop* tegangan
2. Besaran susut daya
3. Cos phi
4. *Loss Load Factor* (LLF)

Untuk membuat desain kriteria akan berpedoman kepada SPLN yang ada dan ketentuan-ketentuan lain yang berlaku. Sistem distribusi tenaga listrik untuk tegangan menengah yang akan dikembangkan adalah sistem distribusi tegangan 20 kV menggunakan hantaran udara dan atau kabel tegangan menengah 20 kV dengan memperhatikan kepadatan beban, tingkat mutu dan keandalan serta kebutuhan pelanggan. Beberapa kriteria yang dipertimbangkan adalah :

- 1) Kriteria kerapatan beban
- 2) Pola konfigurasi
- 3) Korelasi *drop* tegangan
- 4) Korelasi susut daya terhadap standar jaringan
- 5) Pengembangan jaringan baru
- 6) Konsistensi antara pembebanan jaringan terhadap standar pola pembebanan

2.4 Parameter Saluran Distribusi

Seluruh saluran yang menggunakan penghantar dari suatu sistem tenaga listrik memiliki sifat-sifat listrik sebagai parameter saluran seperti resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi. Oleh karena saluran distribusi memiliki saluran yang tidak begitu jauh (kurang dari 80 km) dan menggunakan tegangan tidak lebih besar dari 69 kV maka kapasitansi dan konduktansi sangat kecil dan

dapat diabaikan. Resistansi yang timbul pada saluran dihasilkan dari jenis penghantar yang memiliki tahanan jenis dan besar resistansi pada penghantar tergantung dari jenis material, luas penampang dan panjang saluran. Resistansi penghantar sangat penting dalam evaluasi efisiensi distribusi dan studi ekonomis.

Induktansi timbul dari efek medan magnet di sekitar penghantar jika pada penghantar terdapat arus yang mengalir. Parameter ini penting untuk pengembangan model saluran distribusi yang digunakan dalam analisis sistem tenaga.

2.4.1 Resistansi Saluran¹

Resistansi adalah tahanan pada suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang dapat menyebabkan kerugian daya. Nilai tahanan suatu penghantar dapat ditentukan dari persamaan :

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

Dimana :

- ρ = resistivitas penghantar
- L = panjang kawat
- A = luas penampang

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 ρ adalah suatu konstanta untuk bahan logam bersangkutan, maka tahanan searahnya dapat ditentukan dengan persamaan :

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

Dimana :

- R_1 = resistansi penghantar pada suhu t_1 (temperatur sebelum operasi)
- R_2 = resistansi penghantar pada suhu t_2 (temperatur operasi konduktor)

¹ William D Stevenson, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Edisi Keempat (1994), hlm. 58

- $t_1 = 20^\circ\text{C}$, suhu terendah penghantar SUTM (SPLN 87:1991)
- $t_2 = 60^\circ\text{C}$, suhu tertinggi penghantar SUTM (SPLN 87:1991)
- T = Temperatur transisi bahan

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%

2.4.2 Induktansi Saluran

Untuk menentukan besarnya induktansi saluran pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3.

$$L = \{ 0,5 + 4,6 \log_{10} \frac{D-r}{r} \} \times 10^{-7} \text{ H/m} \dots\dots\dots (2.3)^{14}$$

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 :

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

Induktansi dihitung dengan konsep *Geometric Means Radius* (GMR). Karakteristik penghantar dapat dicari dari buku penghantar atau literatur pabrik pembuat yang menyediakan nilai induktansi dari suatu penghantar dalam satuan mH/km. Pabrik pembuat penghantar menyediakan karakteristik standar penghantar dengan ukuran penghantar. Untuk menghitung nilai luas penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots\dots\dots (2.5)$$

¹⁴ Zuhail, *Dasar Teknik Listrik dan Elektronika Daya*, (1995), hlm. 152

2.4.3 Reaktansi Saluran

Jika induktansi dalam satuan Henry dikalikan dengan $2.\pi.f$ (frekuensi dalam satuan Hz), maka hasilnya dikenal sebagai reaktansi induktif yang diukur dalam satuan ohm. Jadi besarnya nilai satuan reaktansi induktif saluran:

$$X_L = 2 .\pi .f .L \dots\dots\dots (2.6)^{12}$$

Dimana :

X_L = Reaktansi induktif saluran

L = Induktansi saluran (H)

f = Frekuensi (Hz)

2.4.4 Impedansi Saluran

Impedansi suatu saluran distribusi dapat kita tentukan dengan persamaan dasar sebagai berikut :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

Z = Impedansi Saluran

R = Resistansi Saluran

X = Reaktansi Saluran

2.4.5 Daya Listrik

Ada beberapa jenis daya listrik yang akan dibahas pada sub-bab ini, yaitu:

1. Daya Semu

Daya semu adalah daya yang melewati suatu saluran penghantar yang ada pada jaringan transmisi maupun jaringan distribusi. Dimana untuk daya semu ini dibentuk oleh besaran tegangan yang dikalikan dengan besaran arus.

Untuk satu phasa yaitu :

$$S = V \times I \dots\dots\dots (2.8)^5$$

Untuk tiga phasa yaitu :

¹² B.L Theraja, *Worked Examples in Electrical Technology*, (New Delhi: Techouse, 1983), hlm. 481

⁵ Subir Ray, *Electrical Power System*, (New Delhi : Prentice Hall of India Private Limited, 2007), hlm. 17

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots (2.9)^{13}$$

Dari persamaan di atas, maka persamaan yang digunakan untuk mencari nilai arus adalah sebagai berikut :

Untuk satu phasa yaitu :

$$I = \frac{S}{V} \dots\dots\dots (2.10)$$

Untuk tiga phasa yaitu :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan yang ada (V)

I = Besar arus yang mengalir (A)

2. Daya Aktif

Daya aktif atau disebut juga dengan daya nyata adalah daya yang dipakai untuk menggerakkan berbagai macam peralatan mekanik. Daya aktif ini merupakan pembentuk dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

Untuk satu phasa :

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.12)$$

Untuk tiga phasa :

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

P = Daya aktif (watt)

V = Tegangan (V)

I = Besar arus yang mengalir (A)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

¹³ Y Kothari, D.P dan I.J. Nagrath, Power System Engineering, (Tata MCGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008), hlm. 158

3. Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang hilang atau selisih daya semu yang masuk pada saluran dengan daya aktif yang terpakai pada daya mekanis dan daya panas.

Untuk satu fasa :

$$Q = V \times I \times \sin \phi \dots\dots\dots (2.14)$$

Untuk tiga fasa :

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Besar arus yang mengalir (A)

$\sin \phi$ = Faktor daya

2.4.6 Susut Daya Dalam Jaringan (*Losses*)¹⁸

Dalam suatu sistem distribusi tenaga listrik, selalu diusahakan agar susut daya yang terjadi pada jaringan distribusi sekecil-kecilnya. Hal ini dimaksudkan agar daya yang disalurkan ke konsumen tidak terlampau berkurang. Berdasarkan SPLN No. 72 Tahun 1987 tentang batas toleransi rugi-rugi daya disebutkan bahwa batas standar rugi-rugi daya pada sistem yaitu sebesar 5%.⁶

a. Sistem 3 fasa 3 kawat dan 3 fasa 4 kawat beban di ujung (seimbang)

$$P_{\text{loss}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \cdot \text{LLF} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana :

I = Arus beban yang mengalir pada jaringan (Ampere)

R = Resistansi jaringan (ohm/km)

L = Panjang jaringan (km)

LLF = *Loss Load Factor*

b. Sistem 3 fasa 3 kawat dan 3 fasa 4 kawat beban di tengah dan di ujung (seimbang)

¹⁸ PT PLN (Persero) Pusdiklat, *Kinerja Distribusi*, (Bogor: PT PLN (Persero) Pusdiklat, 2017)

⁶ SPLN No. 72, *Spesifikasi Desain Untuk Jaringan Menengah dan Jaringan Rendah*, (Jakarta : PT PLN (Persero), 1987.

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

Dimana :

I = Arus beban yang mengalir pada Jaringan (Ampere)

R = Resistansi Jaringan (Ohm/km)

L = Panjang Jaringan (km)

LLF = *Loss Load Factor*

LDF = *Load Density Factor* (0,625)

c. Sistem 3 phasa 3 kawat dan 3 phasa 4 kawat beban merata (seimbang)

$$P_{\text{loss}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \cdot \text{LLF} \cdot \text{LDF} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana :

I = Arus beban yang mengalir pada Jaringan (Ampere)

R = Resistansi Jaringan (Ohm/km)

L = Panjang Jaringan (km)

LLF = *Loss Load Factor*

LDF = *Load Density Factor* (0,333)

d. Load Factor (LF)

Faktor beban (*load factor*) didefinisikan sebagai perbandingan antara beban rata-rata dengan beban puncak yang diukur untuk suatu periode waktu tertentu.

$$\text{LF} = \frac{P_{\text{Rata-rata}}}{P_{\text{Puncak}}} \dots\dots\dots (2.19)^{11}$$

e. Loss Load Factor (LLF)

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

Dimana:

$$\text{LLF} = 0,3 \text{ LF} + 0,7 (\text{LF})^2 \dots\dots\dots (2.20)^5$$

Jika besar kerugian daya telah diketahui, maka besar daya yang diterima :

¹¹ Daman Suswanto, *Sistem Distribusi Tenaga Listrik Edisi Pertama*, (Padang: Universitas Negeri Padang, 2009)

⁵ Subir Ray, Op. Cit., hlm. 100

$$P_r = P_s - P_{\text{loss}} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana :

P_{loss} = Susut daya pada saluran (W)

P_r = Besar daya yang diterima (W)

P_s = Besar daya yang disalurkan (W)

2.4.7 Efisiensi Penyaluran

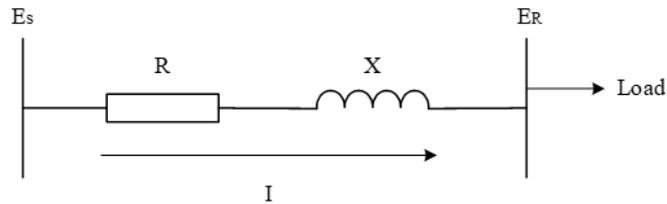
Efisiensi penyaluran adalah perbandingan antara daya nyata yang diterima dengan daya nyata yang disalurkan atau dengan kata lain perhitungan efisiensi ini berguna untuk mengetahui persentase energi listrik tersebut diterima setelah di dalam penyalurannya terdapat rugi-rugi.

$$\eta = \frac{P_r}{P_s} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.22)$$

2.4.8 Drop Tegangan

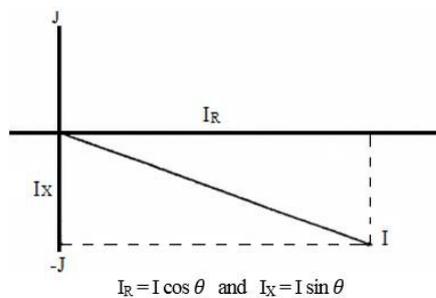
Panjang sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dapat didesain dengan mempertimbangkan *drop* tegangan. *Drop* tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. *Drop* tegangan selalu terjadi pada jaringan, baik pada pelanggan maupun pada perusahaan listrik. Dalam saluran distribusi, persoalan tegangan sangat penting, baik dalam keadaan operasi maupun dalam perencanaan sehingga harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik saluran. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan. Besarnya rugi tegangan pada saluran distribusi tersebut, diukur pada titik yang paling jauh (ujung). Jika karakteristik beban resistansi (R) dan reaktansi (X) dari saluran distribusi diketahui dan juga *power factor* ($\cos \phi$) beban diketahui maka dapat langsung dihitung *drop* tegangannya.

Pada Gambar 2.19 terlihat bahwa beban pada saluran distribusi merupakan beban R (resistif) dan X (reaktif). Contoh beban ini adalah motor yang bersifat reaktif yang mengakibatkan arus *lagging* terhadap tegangan.



Gambar 2.16 Voltage Drop Pada Saluran Distribusi

Penurunan tegangan sama dengan $E_s - E_R$. Jika diproyeksikan pada sumbu axis E_R dapat dilihat pada gambar bahwa penurunan tegangan hampir sama dengan $I R.R + I_X.X$ dan komponen penurunan tegangan di luar fasa ($-j I_X.R$ dan $j I_R.X$) tidak mempengaruhi hasil totalnya. Untuk alasan ini, persamaan berikut ini berlaku untuk hampir seluruh penggunaan:



Gambar 2.17 Hubungan Fasa dengan Beban Induktif

Formula ini memberikan penurunan tegangan pada satu konduktor, *line to netral*. Drop tegangan satu fasa adalah 2 kali nilai persamaan di atas. Drop tegangan tiga fasa *line to line* adalah $\sqrt{3}$ kali dari nilai persamaan di atas. Dengan demikian persamaan untuk *drop* tegangan 3 fasa menjadi sebagai berikut:

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times L \times (R \cos \phi + X_L \sin \phi) \dots \dots \dots (2.23)^{21}$$

Besar persentase *drop* tegangan pada saluran distribusi dapat dihitung dengan :

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V_{nominal}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana :

ϕ = Sudut *power factor*

²¹ Feri Siswoyo Hadisantoso. *Analisa Penurunan Tegangan (Voltage Drop) dan Rugi-rugi (Losses) Penyulang Menggunakan ETAP di Gardu Induk Bandung Selatan*. (2016)

ΔV	= <i>Drop</i> tegangan (Volt)
R	= Resistansi saluran (Ω)
X	= Reaktansi saluran (Ω)
I	= Arus beban (A)
L	= Panjang penghantar (km)

Besar tegangan nominal pada sistem distribusi tegangan menengah yaitu sebesar 20 kV. Berdasarkan SPLN T6.001 Tahun 2013, disebutkan bahwa variasi tegangan pelayanan sebagai akibat *drop* tegangan adalah maksimal sebesar +10% dan minimal -10% pada sisi pelayanan tegangan nominalnya (standar tegangan pelayanan sistem distribusi tegangan menengah yaitu minimal 18 kV dan maksimal 22 kV). Salah satu penyebab adanya *drop voltage* sendiri adalah jauhnya sistem pendistribusian tenaga listrik ke pelanggan khusus dari pusat-pusat konsumsi tenaga listrik atau Gardu Induk (GI).⁷

2.5 Rekonfigurasi Jaringan Distribusi¹⁶

Rekonfigurasi jaringan distribusi adalah proses merubah nilai arus maupun impedansi penyulang atau memindahkan suplai suatu titik beban trafo distribusi dari suatu penyulang ke penyulang yang lain. Memindahkan beban ke penyulang lain berarti mengurangi arus yang mengalir sehingga *drop* tegangan menjadi lebih kecil. Tujuan utama pemindahan beban ini tidak hanya untuk perbaikan tegangan tetapi juga untuk peningkatan keandalan pertimbangan pembebanan transformator gardu induk atau pertimbangan karena adanya pertumbuhan beban.

Rekonfigurasi dapat merubah parameter-parameter saluran distribusi antara lain, seperti impedansi dan arus penyulang. Akibat perubahan kedua parameter tersebut, turut merubah rugi daya dan *drop* tegangan pada penyulang, keseimbangan arus fasa dan keseimbangan arus penyulang serta arus hubung singkat pada sisi ujung penyulang. Oleh sebab itu, proses rekonfigurasi suatu sistem

⁷ SPLN T6.001, *Tegangan-Tegangan Standar*, (Jakarta : PT PLN (Persero), 2013), hlm. 4

¹⁶ Leonardus Budiman, *Perencanaan Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN (Persero) Rayon Sekadau*, (Kalimantan Barat: Universitas Tanjungpura, 2010)

distribusi harus mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, terutama rugi daya dan *drop* tegangan.

Rekonfigurasi jaringan distribusi dilakukan dengan mengubah status buka/tutup saklar pada jaringan distribusi. Rekonfigurasi jaringan listrik dapat digunakan untuk menjaga keseimbangan sistem dan mengurangi rugi-rugi saluran. Dalam kondisi operasi normal, rekonfigurasi jaringan dilakukan karena dua alasan:

1. Mengurangi rugi-rugi daya pada sistem (*loss reduction*).
2. Mendapatkan pembebanan yang seimbang untuk mencegah pembebanan yang berlebih pada jaringan (*load balancing*).

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pemindahan pembebanan pada penyulang yaitu :

1. Arus beban

Pemindahan beban penyulang dilakukan dengan memindahkan sebagian beban penyulang yang berbeban besar ke penyulang yang berbeban kecil. Sehingga pembebanan pada masing-masing penyulang jadi rata dan mencegah terjadinya pembebanan lebih pada jaringan (penyulang).

2. *Drop* Tegangan

Pemindahan beban dapat mengubah *drop* tegangan pada penyulang karena berubahnya arus yang mengalir pada penyulang tersebut. Pemindahan beban dilakukan ke penyulang yang *drop* tegangannya belum terlalu besar atau belum sampai 5%. Sehingga saat dilakukannya pemindahan beban, maka penyulang yang menerima beban dari penyulang lain tersebut tidak terjadi *drop* tegangan yang melebihi 5%.

3. Jenis Beban

Pemindahan beban harus juga memperhatikan jenis beban. Faktor beban antara pemakaian industri dengan pemakaian rumah tangga berbeda. Sehingga jika digabungkan, dapat mengurangi kualitas penyaluran energi listrik ke pelanggan.

2.6 ETAP 19.0.1⁴

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisis pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Pada studi kali ini akan digunakan fitur *load flow* untuk mengetahui tegangan ujung dari sistem distribusi yang disimulasikan. Pada *software* ini dibutuhkan data penunjang seperti arus yang mengalir serta jenis dan panjang saluran yang digunakan. Dalam menganalisis tenaga listrik, dibutuhkan 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 analisis rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah distandarisasi 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, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili.

2.6.1 Load Flow Analysis

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 *drop* tegangan 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

⁴ Lestanto Multa, dkk, *Modul Pelatihan Etap*, (2013)

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:

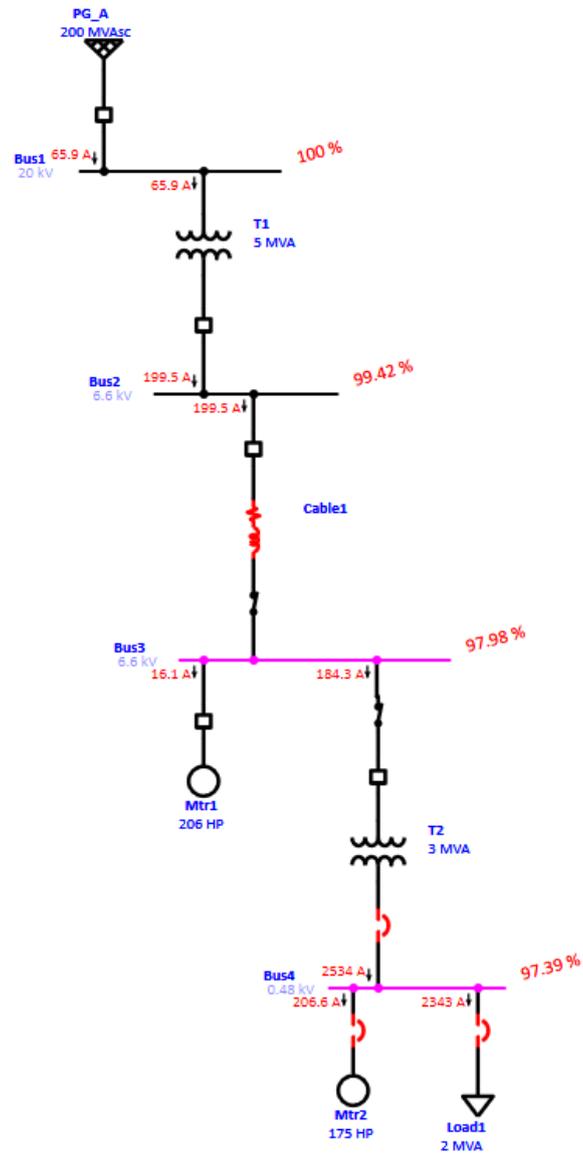
1. Impedansi di saluran transmisi

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 PF sehingga mempengaruhi perbandingan antara besarnya daya yang ditransfer dengan yang diterima.

Contoh simulasi *load flow* pada *software* ETAP dapat dilihat pada gambar 2.18. Dari gambar 2.18 didapatkan hasil simulasi yang ditunjukkan dengan huruf berwarna merah, terdapat nilai daya aktif dan daya reaktif ($P + JQ$) serta persentase tegangan. Kemudian, kita dapat mengatur nilai apa yang akan ditampilkan pada simulasi bisa berupa arus, faktor daya, yaitu dengan cara merubah *display option*.



Gambar 2.18 Contoh simulasi etap