

BAB II

KERANGKA TEORITIK DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1. Kerangka Teoritik

2.1.1. Hakikat Simulasi

Menurut kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), simulasi adalah metode pelatihan yang meragakan sesuatu dalam bentuk tiruan yang mirip dengan keadaan yang sesungguhnya. Simulasi merupakan penggambaran suatu sistem/proses dengan peragaan berupa model penyerupaan.¹ Menurut Udin Syaefudin Sa'ud, simulasi adalah sebuah replika atau visualisasi dari perilaku sebuah sistem, misalnya sebuah perencanaan pendidikan yang berjalan pada kurun waktu tertentu.² Sehingga dapat dikatakan bahwa simulasi adalah suatu proses peniruan dari sesuatu yang nyata beserta keadaan sekelilingnya. Aksi melakukan simulasi ini secara umum menggambarkan sifat-sifat karakteristik kunci dari kelakuan sistem abstrak tertentu. Menurut Sandi Setiawan yang dikutip dari Shanon, simulasi adalah proses merencanakan suatu model dari sebuah sistem nyata dan melakukan eksperimen dengan model tersebut dengan tujuan memahami tingkah laku sistem, dan serta mengevaluasi berbagai strategi untuk mengoperasikan sistem tersebut.³

¹Depdiknas. *Kamus Besar Bahasa Indonesia edisi ke-4*. (Jakarta, Majalah Media Watch *Habibie Center*, 2008), h. 100

²Syaefudin Udin, Syamsudin, *Perencanaan Pendidikan Pendekatan Komprehensif*, (Bandung, PT Remaja Rosdakarya, 2005), h.129

³Mulyana Deddy, *Ilmu Komunikasi Suatu Pengantar*, (Bandung, PT Remaja Rosdakarya, 2011), h.148

Dari pengertian simulasi di atas, peneliti menyimpulkan bahwa simulasi adalah suatu cara untuk menduplikasi atau menggambarkan ciri, tampilan dan karakteristik dari suatu sistem nyata. Ide awal dari simulasi adalah untuk meniru situasi dunia nyata secara matematis kemudian mempelajari sifat dan karakter operasionalnya. Sehingga pada akhirnya membuat kesimpulan dan membuat keputusan berdasarkan hasil dari simulasi. Dengan menggunakan cara ini, sistem di dunia nyata tak disentuh/dirubah sampai keuntungan dan kerugian dari apa yang menjadi kebijakan utama suatu keputusan diuji cobakan dalam sistem model.

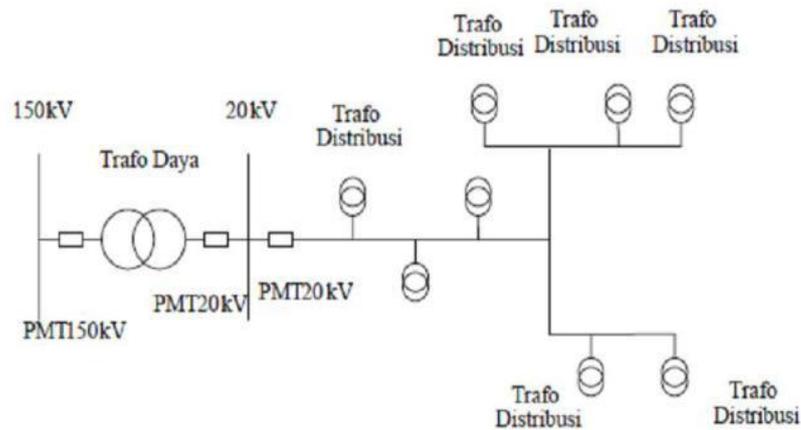
2.1.2. Konfigurasi Sistem Jaringan Distribusi

Berdasarkan konfigurasi jaringan, maka sistem jaringan distribusi dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) macam, yaitu : Jaringan Distribusi *Radial*, Jaringan Distribusi *Ring (Loop)*, Jaringan Distribusi *Spindle*, Jaringan Distribusi *Cluster*, dan Jaringan Hantaran Hubung (*Tie Line*).

Semua jaringan distribusi tersebut akan dijelaskan pada sub bab di bawah ini.

1. Konfigurasi Sistem *Radial*

Sistem distribusi dengan pola *radial* seperti gambar 2.1 di bawah ini adalah sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara *radial*.



Gambar 2.1 Konfigurasi Jaringan *Radial*
Sumber: Dokumentasi

Dalam penyulang tersebut dipasang gardu-gardu distribusi untuk konsumen. Gardu distribusi adalah tempat dimana trafo untuk konsumen dipasang dan bisa terdapat dalam bangunan beton atau diletakan di atas tiang. Keuntungan dari sistem ini adalah sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibanding dengan sistem yang lain.

Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Hal ini disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik. Hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada diujung saluran.

Bentuk jaringan ini merupakan bentuk yang paling sederhana, banyak digunakan dan murah. Dinamakan *radial* karena saluran ini ditarik secara *radial* dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabangkan ke titik-titik beban yang dilayani, seperti terlihat pada gambar 2.1 di atas.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir disepanjang saluran menjadi tidak sama sehingga luas penampang konduktor pada jaringan bentuk *radial* ini ukurannya tidak sama karena arus yang paling besar mengalir pada jaringan yang paling dekat dengan gardu induk. Sehingga saluran yang paling dekat dengan gardu induk ini ukuran penampangnya relatif besar dan saluran cabang-cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil mempunyai ukuran konduktornya lebih kecil pula. Spesifikasi dari jaringan bentuk *radial* ini adalah :

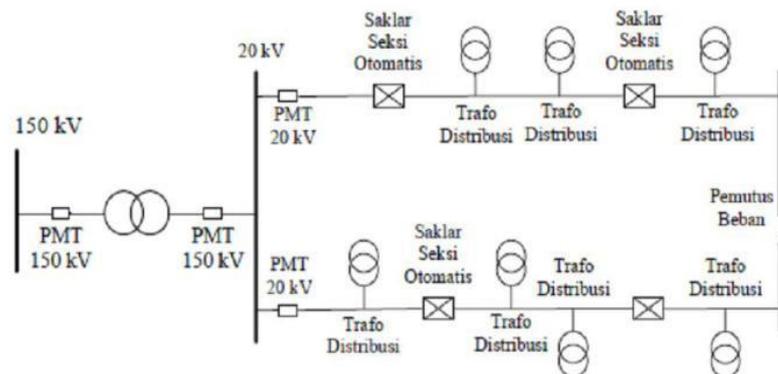
1. Bentuknya sederhana.
2. Biaya investasinya murah.
3. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya besar.
4. Kontinuitas pelayanan daya kurang terjamin sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

Untuk melokalisir gangguan pada bentuk *radial* ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman, fungsinya untuk membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

2. Konfigurasi Sistem *Loop*

Sistem jaringan distribusi primer tipe *loop* merupakan jaringan distribusi primer yang dimulai dari gardu induk atau sumber daya melalui daerah beban dan kemudian kembali lagi ke rel gardu induk atau sumber daya yang sama. Sedangkan sistem jaringan distribusi primer tipe *ring* merupakan sistem jaringan distribusi primer yang dimulai dari rel gardu induk atau sumber daya yang lain dihubungkan dengan rel gardu induk atau sumber daya yang pertama. Pada dasarnya konfigurasi jaringan *loop* dan *ring* adalah sama.

Pada jaringan tegangan menengah struktur lingkaran (*loop*) seperti gambar 2.2. di bawah ini dimungkinkan pemasokannya dari beberapa gardu induk, sehingga dengan demikian tingkat keandalannya relatif lebih baik.



Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan *Loop/Ring*

Sumber: Dokumentasi

Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan *ring*. Susunan rangkaian saluran membentuk *ring*, seperti terlihat pada gambar 2.2 yang memungkinkan titik beban terlayani dari dua arah

saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena jatuh tegangan dan rugi daya saluran menjadi lebih kecil. Bentuk sistem jaringan distribusi *loop* ini ada 2 macam yaitu :

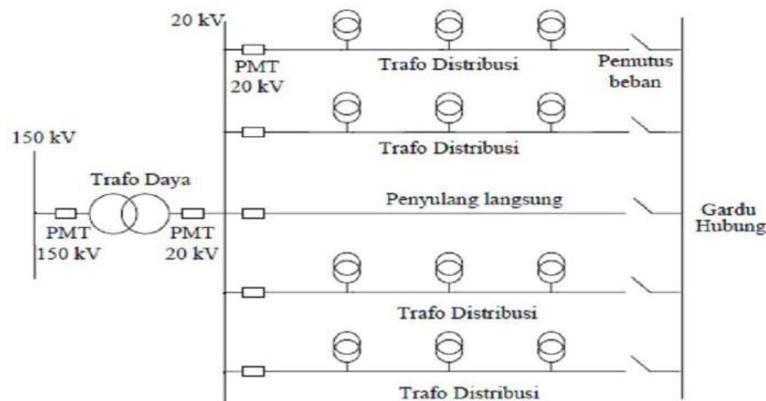
- a) Bentuk *open loop*, bila dilengkapi dengan *normallly open switch* yang terletak pada salah satu bagian gardu distribusi, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka. Pada sistem *loop* terbuka, bagian-bagian fider tersambung melalui alat pemisah (*disconnectors*), dan kedua ujung fider tersambung pada sumber energi. Pada suatu tempat tertentu pada fider, alat pemisah sengaja dibiarkan dalam keadaan terbuka. Pada dasarnya, sistem ini terdiri atas dua fider yang dipisahkan oleh suatu pemisah, yang dapat berupa *sekring*, alat pemisah, atas daya. Bila terjadi gangguan, bagian saluran dari fider yang tidak terganggu dapat dilepas dan menyambungkannya pada fider yang tidak terganggu. Sistem demikian biasanya dioperasikan secara manual dan dipakai pada jaringan-jaringan yang relatif kecil.
- b) Bentuk *close loop*, bila dilengkapi dengan *normally close switch* yang terletak pada salah satu bagian diantara gardu distribusi, dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup. Pada sistem *loop* tertutup diperoleh suatu tingkat keandalan yang lebih tinggi. Pada sistem ini alat-alat pemisah biasanya berupa saklar daya yang lebih mahal. Saklar-saklar daya itu digerakkan oleh relai yang membuka saklar daya pada tiap ujung dari bagian saluran yang terganggu, sehingga bagian fider yang tersisa tetapi berada dalam keadaan berenergi.

Pengoperasian relai yang baik diperoleh dengan menggunakan kawat pilot yang menghubungkan semua saklar daya. Kawat pilot ini cukup mahal untuk dipasang dan dioperasikan. Kadang-kadang rangkaian telepon yang disewa dapat dipakai sebagai pengganti kawat pilot. Struktur jaringan ini merupakan gabungan dari dua buah struktur jaringan *radial*, dimana pada ujung dari dua buah jaringan dipasang sebuah pemutus (PMT), pemisah (PMS). Pada saat terjadi gangguan, setelah gangguan dapat diisolir, maka pemutus atau pemisah ditutup sehingga aliran daya listrik ke bagian yang tidak terkena gangguan tidak terhenti. Pada umumnya penghantar dari struktur ini mempunyai struktur yang sama, ukuran konduktor tersebut dipilih sehingga dapat menyalurkan seluruh daya listrik beban struktur *loop*, yang merupakan jumlah daya listrik beban dari kedua struktur *radial*. Jaringan distribusi *loop* mempunyai kualitas dan kontinuitas pelayanan daya yang lebih baik, tetapi biaya investasi lebih mahal dan cocok digunakan pada daerah yang padat dan memerlukan keandalan tinggi. Pada konfigurasi *radial* apabila terjadi gangguan pada salah satu fider maka semua pelanggan yang terhubung pada fider tersebut terganggu. Apabila gangguan tersebut bersifat permanen dan memerlukan perbaikan terlebih dahulu sebelum dapat dioperasikan kembali, maka pelanggan yang mengalami interupsi pelayanan jumlahnya relatif banyak. Pada konfigurasi *ring* jumlah ini dapat dikurangi.⁴

⁴Djiteng Marsudi, Operasi Sistem Tenaga Listrik, (Yogyakarta, Graha Ilmu,1990),h448

3. Konfigurasi Sistem Spindel

Sistem spindel seperti pada gambar 2.3 di bawah ini adalah suatu pola kombinasi jaringan dari pola *radial* dan *ring*.



Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Spindel

Sumber: Dokumentasi

Spindel terdiri dari beberapa penyulang (fider) yang tegangannya diberikan dari gardu induk dan tegangan tersebut berakhir pada sebuah gardu hubung (GH). Pada sebuah spindel biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (*express*) yang akan dihubungkan melalui gardu hubung. Pola spindel biasanya digunakan pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah atau saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM). Namun pada pengoperasiannya, sistem spindel berfungsi sebagai sistem *radial*. Di dalam sebuah penyulang aktif terdiri dari gardu distribusi yang berfungsi untuk mendistribusikan tegangan kepada konsumen baik konsumen tegangan rendah (TR) atau tegangan menengah (TM).

Jaringan distribusi spindel seperti gambar 2.3. di atas merupakan saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM) yang penerapannya sangat cocok di kota-kota besar. Adapun operasi sistem jaringan sebagai berikut :

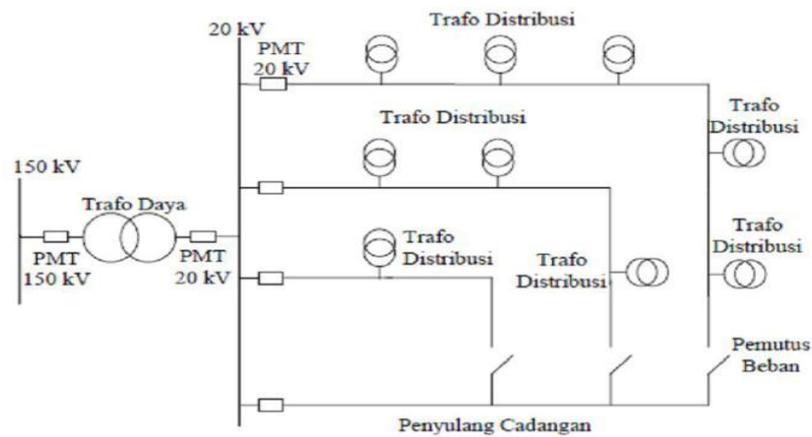
- a. Dalam keadaan normal semua saluran digardu hubung (GH) terbuka sehingga semua SKTM beroperasi *radial*.
- b. Dalam keadaan normal saluran ekspres tidak dibebani dan dihubungkan dengan rel di gardu hubung dan digunakan sebagai pemasok cadangan dari gardu hubung.
- c. Bila salah satu seksi dari SKTM mengalami gangguan, maka saklar beban di kedua ujung seksi yang terganggu dibuka. Kemudian seksi-seksi sisi gardu induk (GI) mendapat suplai dari GI, dan seksi-seksi gardu hubung mendapat suplai dari gardu hubung melalui saluran ekspres.

Sistem jaringan distribusi spindel sangat cocok untuk memenuhi kebutuhan–kebutuhan antara lain :

- a. Peningkatan keandalan atau kontinuitas pelayanan sistem.
- b. Menunukan atau menekan rugi-rugi akibat gangguan.
- c. Sangat baik untuk mensuplai daerah beban yang memiliki kerapatan beban yang cukup tinggi.
- d. Perluasan jaringan mudah dilakukan.

4. Konfigurasi Sistem *Cluster*

Konfigurasi sistem *cluster* seperti pada gambar 2.4 di bawah banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi.

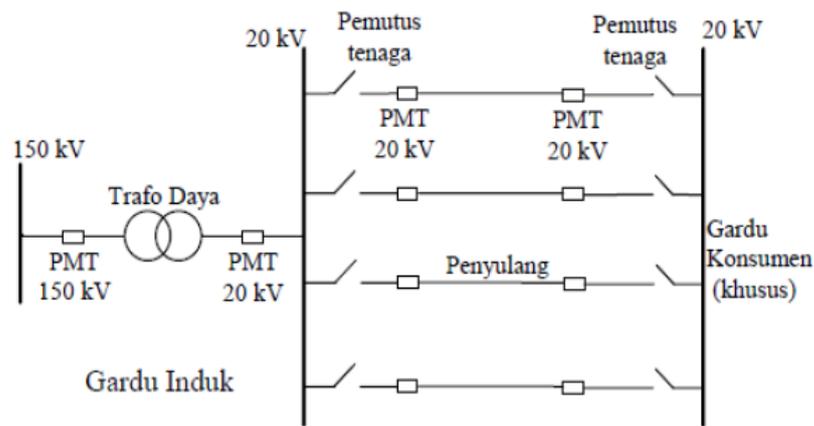


Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan *Cluster*
Sumber: Dokumentasi

Dalam sistem ini terdapat saklar pemutus beban, dan penyulang cadangan. Dimana penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai ke konsumen.

5. Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

Sistem distribusi *tie line* seperti gambar 2.5 di bawah ini digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam (Bandar Udara, Rumah Sakit, dan lain-lain). Sistem ini memiliki minimal dua penyulang sekaligus dengan tambahan *Automatic Change Over Switch/Automatic Transfer Switch*, setiap penyulang terkoneksi ke gardu pelanggan khusus tersebut sehingga bila salah satu penyulang mengalami gangguan maka pasokan listrik akan dipindah ke penyulang lain.



Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Hantaran Hubung
Sumber: Dokumentasi

2.1.3. Deskripsi Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun reaktif yang terdapat pada berbagai titik jaringan listrik pada keadaan operasi normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang. Adapun tujuan dari studi analisa aliran daya antara lain :

- Untuk mengetahui tegangan-tegangan pada setiap bus yang terdapat dalam sistem, baik *magnitude* maupun sudut fasa tegangan.
- Untuk mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada setiap saluran yang ada dalam sistem.
- Untuk mengetahui kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan.
- Untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.

- e. Untuk memperoleh kondisi awal untuk studi-studi selanjutnya, seperti : studi hubung singkat, stabilitas dan pembebanan ekonomis.

2.1.4. Dasar Kelistrikan, Tegangan, Arus dan Impedansi

a. Tegangan

Tegangan adalah perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik. Tegangan listrik merupakan ukuran beda potensial yang mampu membangkitkan medan listrik sehingga menyebabkan timbulnya arus listrik dalam sebuah konduktor listrik.⁵ Tegangan dinyatakan dalam satuan volt.

Untuk menentukan kualitas daya listrik, maka yang harus diperhatikan pertama kali adalah tegangan yang konstan, walaupun dalam kenyataan pada lapangan tidak selalu konstan sehingga tegangan dapat naik dan tegangan dapat turun.

Dalam skripsi ini tegangan yang dilihat adalah tegangan pada sisi tegangan menengah. Toleransi tegangan yang digunakan adalah $\pm 2\%$ ².

Adapun persamaan untuk mencari besarnya tegangan sebagai berikut :

1. Untuk 1 fasa, maka persamaan tegangannya adalah :

$$V_{L-N} = I \times R \dots \dots \dots (2.1)$$

2. Untuk 3 fasa, maka persamaan tegangannya adalah :

$$V_{L-N} = \frac{I \times R}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.2)$$

⁵ Rohim Ibnu Ahmad, 2009. Tegangan, Arus dan Daya Listrik. (Diunduh) <https://rohimbnuahmad.wordpress.com/2009/02/24/tegangan-arus-dan-daya-listrik/> (Tanggal 18 November 2015)

$$V_{L-L} = I \times R \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana : I = Arus (A)
 R = Hambatan (ohm)

b. Arus

Arus adalah aliran muatan yang dipengaruhi oleh medan listrik. Arus juga dikatakan sebagai aliran elektron dalam suatu konduktor. Arah aliran arus adalah melalui terminal positif menuju terminal negatif. Besarnya arus listrik diukur dengan satuan banyaknya elektron per detik, namun demikian ini bukan satuan yang praktis karena harganya terlalu kecil. Satuan yang dipakai adalah ampere, dimana 1 ampere = 1 coulomb/det.

Adapun persamaan dalam mencari besar arus adalah sebagai berikut :

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana : V = Tegangan (volt)
 R = Hambatan (ohm)

c. Impedansi

Impedansi saluran terdiri dari resistansi, reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif.

▪ Resistansi

Resistansi tergantung pada jumlah elektron bebas per satuan volume atau material. Resistansi suatu bahan tergantung pada hambatan jenis suatu beban misalnya kabel/kawat penghantar. Luas penampang kabel berbanding terbalik dengan besarnya resistansi. Sehingga jika luas penampang dinaikkan, maka nilai resistansi akan turun. Adapun persamaan yang mendeskripsikannya adalah sebagai berikut :

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana : ρ = Resistivitas penghantar (ohm. meter)
 R = Resistansi (ohm)
 L = Panjang kabel (meter)
 A = Luas penampang (m^2)

▪ Reaktansi Induktif

Induktansi adalah komponen listrik yang nilainya berbanding terbalik terhadap perubahan arus. Nilai induktansi merupakan fungsi dari konstruksi fisik, jumlah lilitan, permeabilitas bahan dan geometris menentukan induktansi suatu komponen.

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana : X_L = Reaktansi induktif (ohm)
 F = Frekuensi (Hz)
 L = Induktansi (henry)

▪ Reaktansi Kapasitif

Kapasitansi dihasilkan dari dua buah konduktor sejajar yang dipisahkan oleh isolator. Ketika dua buah konduktor pada potensial yang berbeda medan listrik mengkonsentrasikan muatan pada permukaan konduktor yang terdekat. Apabila dielektrik dimana molekulnya mudah terpolarisasi ditempatkan diantara konduktor tersebut seolah-olah lebih dekat dibandingkan jarak fisiknya. Hal ini disebabkan atom yang terpolarisasi atau molekul di dalam dielektrik mentransfer medan listrik melewati dielektrik. Kapasitansi suatu kapasitor berbanding lurus terhadap konstanta dielektrik, luas penampang konduktor dan berbanding terbalik terhadap jarak diantara kedua konduktor.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana : X_C = Reaktansi kapasitif (ohm)
 f = Frekuensi (Hz)
 C = Kapasitansi (farad)

Sehingga impedansi adalah total hambatan arus yang mengalir, dimana hanya elemen resistif yang mendisipasikan daya.

$$Z = R + j(X_L - X_C) \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana : Z = Impedansi (ohm)
 R = Resistansi (ohm)
 X_L = Reaktansi induktif (ohm)
 X_C = Reaktansi kapasitif (ohm)

2.1.5. Konsep Daya

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau *Horse Power* (HP). *Horse Power* merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara dengan 746 Watt. Sedangkan Watt merupakan unit daya listrik dimana 1 Watt memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus listrik sebesar 1 Ampere dan tegangan listrik sebesar 1 volt.

Pada sistem tenaga listrik, dikenal dengan sebutan daya aktif, daya reaktif, dan daya tampak yang membentuk sebuah segitiga, dan dikenal dengan segitiga daya.

a. Daya Aktif

Daya aktif (*Active Power*) adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan dari daya aktif adalah Watt. Daya aktif digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

Line to netral / 1 fasa

$$P = V \times I \times \cos\theta \dots\dots\dots (2.9)$$

Line to line / 3 fasa

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\theta \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana : P = Daya nyata (watt)
 V = Tegangan (volt)
 I = Arus yang mengalir pada penghantar (A)
 $\cos\theta$ = Faktor daya

b. Daya Reaktif

Daya reaktif (*Reactive Power*) adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh alat-alat pada sistem tenaga listrik yang dapat menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar, dan lain-lain. Satuan dari daya reaktif adalah VAR.

Line to netral / 1 fasa

$$Q = V \times I \times \sin\theta \dots\dots\dots (2.11)$$

Line to line / 3 fasa

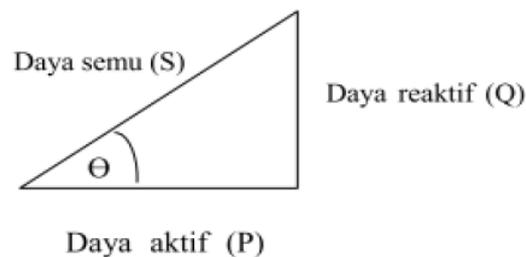
$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin\theta \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\text{arc sin} \left(\frac{Q}{S} \right) = \theta \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana : $\cos \theta$ = Faktor daya
 $\sin \theta$ = Perbandingan daya reaktif dan daya semu sehingga
 nilai arcus $\sin \left(\frac{Q}{S} \right) = \theta$
 P = Daya aktif (Watt)
 Q = Daya reaktif (VAR)
 S = Daya semu (VA)

e. Segitiga Daya

Dari penjelasan macam-macam daya di atas tersebut, dikenal juga dengan segitiga daya. Dimana pengertian umum dari segitiga daya adalah segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara tipe-tipe daya yang berbeda (daya aktif, daya reaktif, dan daya nyata) berdasarkan prinsip trigonometri.⁶ Gambar 2.6 di bawah memperlihatkan segitiga daya dengan daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S).



Gambar 2.6 Segitiga Daya
 Sumber: Buku Dasar-Dasar Kelistrikan

Dimana :

$$P = S \times \cos \theta \text{ (watt)} \dots\dots\dots (2.18)$$

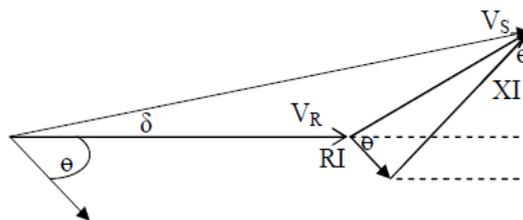
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (VA)} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$Q = S \times \sin \theta \text{ (VAR)} \dots\dots\dots (2.20)$$

⁶ Riyadus, Lutfi2012. Segitiga Daya.(Diunduh) <http://lutfiriyadus.blogspot.co.id/2012/12/segitiga-daya.html?m=1>(Tanggal 20 November 2015)

2.1.6. Jatuh Tegangan

Panjang sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dapat didesain dengan mempertimbangkan jatuh tegangan (*drop voltage*) dan susut teknis jaringan. Jatuh tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Maka pemilihan penghantar untuk tegangan menengah harus diperhatikan.



Gambar 2.7 Diagram Vektor

Sumber : Yuniar Abi Sabputra. 2011. Analisa Susut Energi Non Teknis Pada Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) UPJ Kendal (Diunduh).
http://elektro.undip.ac.id/elkapta/wpcontent/uploads/2012/05/L2F305254_MTA.pdf (Tanggal 5 Juni 2015)

Pada gambar 2.7 di atas dapat diperhatikan bahwa persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah :

$$V_S = V_R + I \cdot R \cdot \cos \theta + I \cdot X \cdot \sin \theta \dots\dots\dots (2.21)$$

Karena faktor $I \cdot R \cdot \cos \theta + I \cdot X \cdot \sin \theta$, pada gambar 2.7 sama dengan $= I \cdot Z$, maka persamaan menjadi :

$$V_S = V_R + I \cdot Z \text{ atau } V_S - V_R = I \cdot Z \dots\dots\dots (2.22)$$

Sehingga ;

$$\Delta V = I \cdot Z \dots\dots\dots (2.23)$$

$$\Delta V = I \{ (R \cdot \cos \theta) + (X \cdot \sin \theta) \} \dots\dots\dots (2.24)$$

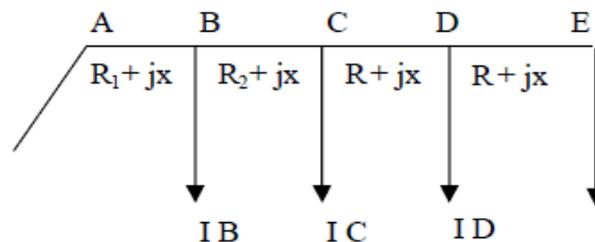
Maka untuk saluran distribusi primer perhitungan besar jatuh tegangan pada saluran distribusi primer untuk sistem tiga fasa adalah :

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \{ (R \cdot \cos\theta) + (X \cdot \sin\theta) \} \dots \dots \dots (2.25)$$

Besar persentase *drop voltage* pada saluran distribusi primer dapat dihitung dengan :

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V_L} \times 100\% \dots \dots \dots (2.26)$$

Keterangan :
 R = Resistansi saluran (ohm)
 X = Reaktansi saluran (ohm)
 V_S = Tegangan di sisi pengirim (volt)
 V_R = Tegangan di sisi penerima (volt)
 Cos θ = Faktor daya
 ΔV = Tegangan jatuh (volt)



Gambar 2.8. Penyaluran Distribusi

Sumber : Yuniar Abi Sabputra. 2011. Analisa Susut Energi Non Teknis Pada Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) UPJ Kendal (Diunduh).
http://elektro.undip.ac.id/el-kapta/wp-content/uploads/2012/05/L2F305254_MTA.pdf.
 (Tanggal 5 Juni 2015)

Dari gambar 2.8 di atas, besarnya level tegangan akibat tegangan jatuh adalah :

Di titik B, $V_B = V_A - \Delta V_{AB}$;

Di titik D, $V_D = V_C - \Delta V_{CD}$

Di titik C, $V_C = V_B - \Delta V_{BC}$;

Di titik E, $V_E = V_D - \Delta V_{DE}$

2.1.7. Rugi-Rugi Pada Jaringan Distribusi

Dalam proses transmisi dan distribusi tenaga listrik seringkali dialami rugi-rugi daya yang cukup besar yang diakibatkan oleh rugi-rugi pada saluran dan juga rugi-rugi pada trafo yang digunakan dan memberikan pengaruh yang besar terhadap kualitas daya serta tegangan yang dikirimkan ke sisi pelanggan. Nilai tegangan yang melebihi batas toleransi akan dapat menyebabkan tidak optimalnya kerja dari peralatan listrik di sisi konsumen serta menimbulkan kerugian finansial di sisi perusahaan pengelola listrik. Akan tetapi dalam skripsi ini penulis mengabaikan rugi-rugi trafo dan hanya menggunakan faktor rugi-rugi saluran. Berikut ini rumus rugi-rugi saluran :

- Untuk 1 fasa, maka persamaanya adalah sebagai berikut :

$$Losses = I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.27a)$$

- Untuk 3 fasa, maka persamaanya adalah sebagai berikut :

$$Losses = I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.27b)$$

Keterangan : $Losses$ = Rugi-rugi pada saluran (watt)
 I = Arus yang mengalir pada saluran (A)

Nilai resistansi dari suatu penghantar merupakan penyebab utama rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi. Nilai resistansi dari suatu penghantar dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti parameter pada persamaan sebelumnya, yakni persamaan (2.1).

2.1.8. Kuantitas Setiap Unit

Saluran transmisi tenaga dioperasikan pada tingkat tegangan dimana kilovolt merupakan unit yang sangat memudahkan untuk menyatakan

tegangan. Karena besarnya daya harus disalurkan, kilowatt atau megawatt dan kilovolt-ampere atau megavolt-ampere adalah istilah-istilah yang sudah biasa dipakai. Tetapi kuantitas-kuantitas tersebut, bersama dengan ampere dan ohm sering juga dinyatakan sebagai suatu persentas atau per unit dari suatu nilai dasar atau referensi yang ditentukan untuk masing-masing.

Definisi nilai per unit suatu kuantitas istilah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dengan desimal. Perbandingan (*ratio*) dalam persentase adalah 100 kali nilai dalam per unit, lebih sederhana menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm, dan volt yang sebenarnya. Metode per unit mempunyai sedikit kelebihan dari metode persentase, karena hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam per unit sudah langsung diperoleh dalam per unit juga, sedangkan hasil perkalian dari dua kuantitas yang dinyatakan dalam persentase masih harus dibagi dengan 100 untuk mendapatkan hasil dalam persentase.

$$\text{Arus dasar, } A = \frac{kVA_{3\phi} \text{ dasar}}{\sqrt{3} \times \text{tegangan dasar } .kV_{LL}} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar } .kV_{LL})^2}{MVA_{3\phi} \text{ .dasar}} \dots\dots\dots (2.29)$$

$$\text{Daya dasar, } MVA_{3\phi} = \text{dasar } MW_{3\phi} \dots\dots\dots (2.30)$$

Dalam suatu studi aliran daya, daya dasar $MVA_{3\phi}$ biasanya telah ditentukan nilai dasarnya sebesar 100 MVA dan juga nilai tegangan dasar serta impedansi dasar yang tergantung pada sistem.

- **Kuantitas Per Unit (pu) :**

$$\text{Tegangan pu, } V = \frac{\text{Tegangan sebenarnya, } V}{\text{Tegangan dasar, } V} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$\text{Arus pu, } A = \frac{\text{Arus sebenarnya, } A}{\text{Arus dasar, } A} \dots\dots\dots (2.32)$$

$$\text{Impedansi pu, } \Omega = \frac{\text{Impedansi sebenarnya, } \Omega}{\text{Impedansi dasar, } \Omega} \dots\dots\dots (2.33)$$

- **Daya Aktif pu, Watt**

$$P_{pu} = \frac{\text{Daya sebenarnya, Watt}}{\text{Daya dasar, Watt}} \dots\dots\dots (2.34)$$

- **Daya Reaktif pu, VAR**

$$Q_{pu} = \frac{\text{Daya sebenarnya, VAR}}{\text{Daya dasar, VAR}} \dots\dots\dots (2.35)$$

- **Daya Semu pu, VA**

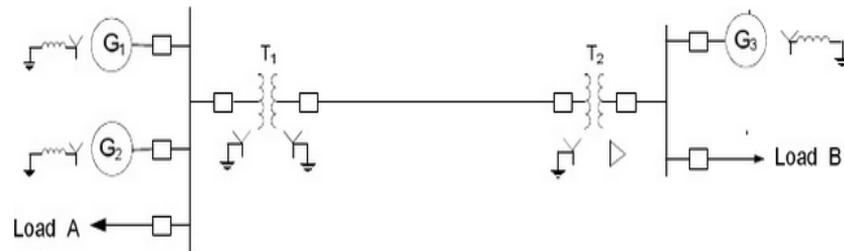
$$S_{pu} = \frac{\text{Daya sebenarnya, VA}}{\text{Daya dasar, VA}} \dots\dots\dots (2.36)$$

2.1.9. Representasi Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sebelum melakukan studi aliran daya sistem distribusi tenaga listrik yang akan dianalisa harus terlebih dahulu direpresentasikan dengan suatu diagram pengganti beserta parameter-parameter yang lainnya.

Suatu sistem tiga fasa yang simetris selalu dipecahkan per satu fasa dengan menggambarkan diagram segaris atau *single line* diagram. Maksud diagram segaris itu adalah untuk memberikan semua informasi yang perlu dan dalam bentuk yang sesuai dengan sistem itu. Diagram segaris itu

berbeda-beda sesuatu dengan studi yang akan dilakukan seperti pada gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 Diagram Segaris Suatu Sistem Listrik

Sumber : <https://id.scribd.com/doc/78740212/1/Diagram-Segaris-Single-Line-Diagram>
(Tanggal 3 Juni 2015)

a. Representasi Generator Sinkron

Generator sinkron biasanya dihubungkan langsung pada rel atau sering juga melalui transformer daya. Karena tujuan dari analisa ini adalah untuk mengetahui besar tegangan rel dan aliran daya, maka generator sinkron direpresentasikan sebagai suatu sumber daya, dan tegangan yang diperoleh dari analisa ini adalah tegangan rel dimana generator itu terhubung.

b. Representasi Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Dalam studi aliran daya transformator dapat direpresentasikan sebagai reaktansi x saja dengan mengabaikan sirkuit eksitasi dari transformator itu. Transformator juga diidentikan dengan beban pada tegangan rendah.

c. Representasi Jaringan Distribusi Listrik

Fungsi sistem jaringan adalah menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari pusat suplai (gardu induk) ke pusat-pusat atau kelompok beban (gardu trafo/distribusi) dan konsumen dengan mutu memadai.

Jaringan distribusi berdasarkan letak jaringan terhadap posisi gardu distribusi, dibedakan menjadi 2 (dua) yaitu :

1. Jaringan Distribusi Primer (Jaringan Distribusi Tegangan Menengah)

Jaringan distribusi primer (JDTM) merupakan suatu jaringan yang letaknya sebelum gardu distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan menengah (misalnya 6 kV atau 20 kV). Hantaran dapat berupa kabel dalam tanah atau saluran/kawat udara yang menghubungkan gardu induk (sekunder trafo) dengan gardu distribusi atau gardu hubung (sisi primer trafo didistribusi).

2. Jaringan Distribusi Sekunder (Jaringan Distribusi Tegangan Rendah)

Jaringan distribusi sekunder (JDTR) merupakan suatu jaringan yang letaknya setelah gardu distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah (misalnya 220 V/380 V). Hantaran berupa kabel tanah atau kawat udara yang menghubungkan dari gardu distribusi (sisi sekunder trafo distribusi) ke tempat konsumen atau pemakai (misalnya industri atau rumah-rumah). Sedangkan untuk gardu distribusi sendiri adalah suatu tempat/sarana, dimana terdapat transformator *step down* yaitu transformator yang menurunkan tegangan dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah (sesuai kebutuhan konsumen).

d. Representasi Beban-beban

Beban-beban dapat dibagi dalam dua golongan, yaitu : beban statis dan beban berputar, motor sinkron atau motor asinkron. Beban statis dan beban berputar biasanya direpresentasikan sebagai impedansi konstan Z atau sebagai daya konstan P dan Q , tergantung dari alat hitung yang digunakan. Perhitungan dengan tangan atau *Network Analyzer* dengan impedansi konstan, sedang bila dihitung dengan komputer digital direpresentasikan dengan daya P dan Q konstan. Dalam skripsi ini beban pada tegangan rendah akan ditotal untuk mewakili tegangan menengahnya.

e. Representasi Bus

Jenis bus pada sistem tenaga, yaitu :

1. *Load Bus* (bus beban)

Setiap bus yang tidak memiliki generator disebut dengan *load bus*. Pada bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sehingga sering juga disebut PQ bernilai positif, sementara daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi bernilai negatif. Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah V dan θ .

2. *Generator Bus* (bus generator)

Generator bus dapat disebut dengan *voltage controlled bus* karena tegangan pada bus dibuat selalu konstan. Setiap bus generator dimana memiliki daya megawatt yang dapat diatur melalui *prime mover* (penggerak mula) dan besaran tegangan yang dapat diatur melalui arus eksitasi generator sehingga bus ini sering juga disebut dengan PV bus. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah Q dan θ .

3. *Slack Bus*

Slack bus sering disebut dengan *swing us* atau rel berayun. Adapun besaran yang diketahui dari bus ini adalah tegangan (V) dan sudut beban (θ). Suatu sistem tenaga biasanya didesign memiliki bus ini yang dijadikan referensi yaitu besaran $\theta = 0^0$. Besaran yang dapat dihitung dari bus ini adalah daya aktif dan reaktif.

Secara singkat klasifikasi bus dalam sistem tenaga terdapat pada tabel 2.1 berikut ini yaitu besaran yang dapat diketahui dan tidak dapat diketahui pada bus tersebut.

Tabel 2.1 Klasifikasi Bus Pada Sistem Tenaga

Type Bus	Besaran yang diketahui	Besaran yang tidak diketahui
<i>Slack</i>	$V = 1.0 ; \theta = 0^0$	P , Q
Generator (PV Bus)	P , V	Q , θ
<i>Load (PQ Bus)</i>	P , Q	V , θ

Salah satu yang harus diingat dalam analisa aliran daya adalah tanda daya nyata (P) dan daya reaktif (Q). Daya reaktif *lagging* adalah daya reaktif positif menunjukkan arusnya bersifat induktif dan daya reaktif *leading* adalah daya negatif menunjukkan arusnya bersifat kapasitif dan arus positifnya adalah arus yang arahnya menuju bus.

2.1.10. Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui kondisi sistem dalam keadaan normal, sehingga sangat

dibutuhkan dalam perencanaan sistem untuk masa yang akan datang dan merupakan bahan evaluasi terhadap sistem yang ada.⁷ Analisis ini meliputi penentuan besarnya nilai tegangan (V), daya aktif (P) dan reaktif (Q) dan sudut fasa (δ) setiap bus dalam sistem. Selanjutnya menurut Saadat (1999), bus dalam sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Bus referensi (*Swing* atau *Slack bus*)

Bus ini berfungsi untuk mensuplai kekurangan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dalam sistem. Parameter atau besaran yang ditentukan adalah tegangan (V) dan sudut fasa (δ). Setiap sistem tenaga listrik hanya terdapat 1 bus referensi, yaitu bus yang didalamnya terdapat pembangkit atau generator yang memiliki kapasitas terbesar di antara pembangkit yang lain di dalam sistem. Bus ini mempunyai besar tegangan dan nilai sudut fasa tertentu, biasanya diberikan nilai $1,06 + j0,00$ pu. Bus berayun ini harus mampu membangkitkan daya aktif dan daya reaktif yang dibutuhkan untuk melayani bus beban dan mengimbangi rugi daya saluran.

2. Bus generator (*Voltage Control Bus*)

Bus ini merupakan bus yang tegangannya dapat dikontrol melalui pengaturan daya reaktif agar tegangannya tetap. Parameter atau besaran yang diketahui adalah daya aktif (P) dan tegangan (V). Bus ini dinamakan PV bus.

⁷Stevenson, dkk. *Analisis sistem tenaga listrik edisi ke-4*. (Jakarta, Erlangga, 1996), h. 26

3. Bus Beban (*Load bus*)

Bus ini adalah bus yang terhubung dengan beban sistem. Parameter atau besaran yang ditentukan adalah daya aktif (P) dan daya reaktif (Q), maka bus ini disebut juga PQ bus. Sebelum analisis aliran daya dilakukan, komponen sistem yang terdiri dari pembangkit (generator), transformator, saluran transmisi dan beban harus direpresentasikan atau dimodelkan melalui diagram satu garis (*oneline diagram*) dengan menganggap sistem tiga fasa dalam keadaan seimbang. Diagram ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran secara ringkas suatu sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Untuk itu dibutuhkan data-data yang terkait dengan komponen-komponen tersebut. Menurut Stevenson (1996), data-data yang dibutuhkan untuk analisis aliran daya adalah sebagai berikut :

a. Data Pembangkit (Generator)

Yaitu kapasitas daya aktif (P) dalam satuan Megawatt (MW) dan reaktif (Q) dalam satuan Megavolt Ampere (MVA), tegangan terminal (V) dalam satuan Kilovolt (KV) dan reaktansi sinkron (X) dalam satuan Ohm (Ω).

b. Data Transformator Daya

Yaitu kapasitas tiap trafo dalam satuan Megavolt Ampere (MVA), tegangan (V) dalam satuan Kilovolt (KV) dan reaktansi bocor (X) dalam satuan Ohm (Ω).

c. Data saluran Transmisi

Yaitu resistansi (R) dalam ohm (Ω) dan reaktansi (X) dalam ohm (Ω).

d. Data beban,

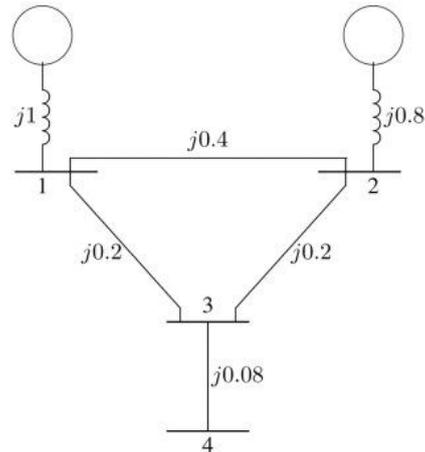
Yaitu daya aktif (P) dalam Megawatt (MW) dan daya reaktif (Q) dalam satuan Megavolt Ampere (MVA).

2.1.10.1. Metode *Newton Raphson* untuk Perhitungan Aliran Daya

Pada dasarnya ada 3 metode yang sering digunakan untuk perhitungan aliran daya. Untuk sistem tenaga listrik yang berskala besar metode *Newton Raphson* lebih efisien dan praktis, dimana jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk perhitungan lebih sedikit jika dibandingkan dengan metode yang lainnya. Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar.

1. Matrik Admitansi dan Impedansi Bus Pada Metode *Newton Raphson*

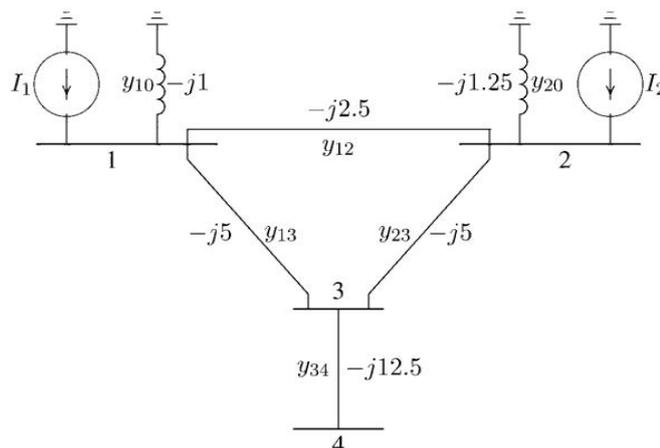
Untuk menghitung dan menganalisis aliran daya, langkah awal yang dilakukan adalah membentuk matrik admitansi bus sistem tenaga listrik. Gambar 2.10 berikut ini merupakan sebuah contoh sistem tenaga listrik sederhana, dimana impedansinya dinyatakan dalam perunit pada dasar MVA dan resistansi diabaikan untuk penyederhanaan (Saadat,1999).



Gambar 2.10. Diagram Impedansi Pada Sistem Tenaga Listrik Sederhana
 Sumber : Imaduddin. 2011. Contoh Penyelesaian Aliran Daya dengan Menggunakan Metode Newton Raphson (Diunduh).
<https://imaduddin.wordpress.com/category/electrical-stuff/>
 (Tanggal 30 November 2015)

Berdasarkan hukum arus *Kirchoff* impedansi-impedansi pada gambar diatas dapat diubah ke bentuk admitansi-admitansi dengan menggunakan persamaan, berikut :

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \dots \dots \dots (2.37)$$



Gambar 2.11. Diagram Admitansi Pada Sistem Tenaga Listrik Sederhana
 Sumber : Imaduddin. 2011. Contoh Penyelesaian Aliran Daya dengan Menggunakan Metode Newton Raphson (Diunduh). <https://imaduddin.wordpress.com/category/electrical-stuff/>
 (Tanggal 30 November 2015)

Dari gambar 2.11 dapat diturunkan persamaan antara simpul-simpul akan menghasilkan persamaan arus :

$$I_1 = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) \dots\dots\dots (2.38)$$

$$I_2 = y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3) \dots\dots\dots (2.39)$$

$$0 = y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4) \dots\dots\dots (2.40)$$

$$0 = y_{34}(V_4 - V_3) \dots\dots\dots (2.41)$$

Persamaan tersebut disusun kembali dan akan diperoleh :

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 \dots\dots\dots (2.42)$$

$$I_2 = -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3 \dots\dots\dots (2.43)$$

$$0 = -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4 \dots\dots\dots (2.44)$$

$$0 = -y_{34}V_3 + y_{34}V_4 \dots\dots\dots (2.45)$$

Dengan :

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13} \dots\dots\dots (2.46)$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23} \dots\dots\dots (2.47)$$

$$Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{34} \dots\dots\dots (2.48)$$

$$Y_{44} = y_{34} \dots\dots\dots (2.49)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12} \dots\dots\dots (2.50)$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13} \dots\dots\dots (2.51)$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23} \dots\dots\dots (2.52)$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34} \dots\dots\dots (2.53)$$

Sehingga persamaan arus pada simpul menjadi :

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \dots \dots \dots (2.54)$$

$$I_2 = Y_{12}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \dots \dots \dots (2.55)$$

$$I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \dots \dots \dots (2.56)$$

$$I_4 = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 \dots \dots \dots (2.57)$$

Untuk sistem tenaga listrik dengan jumlah n-bus, persamaan arus simpul dalam bentuk matrik dapat ditulis :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{12} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & & Y_{ii} & & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & & Y_{ni} & & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Atau

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \dots \dots \dots (2.58)$$

Dengan I_{bus} adalah vektor arus bus yang diinjeksikan. Arus positif jika menuju bus dan negatif jika meninggalkan bus. V_{bus} adalah vektor tegangan bus yang diukur dari simpul referensi. Y_{bus} adalah matrik admitansi bus. Matrik ini dibentuk dari elemen diagonal masing-masing simpul dan diagonal antara simpul-simpul. Jika arus bus diketahui, persamaan (2.58) dapat diselesaikan untuk tegangan n-bus, yaitu :

$$V_{bus} = Y^{-1} bus I_{bus} \dots \dots \dots (2.59)$$

Y^{-1} bus adalah invers matrik admitansi bus atau lebih dikenal sebagai matrik impedansi bus (Z_{bus}).

2. Persamaan Aliran Daya Pada Metode *Newton Raphson*

Jaringan sistem tenaga listrik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 di atas, saluran transmisinya dapat digambarkan dengan model yang impedansi-impedansinya sudah diubah menjadi admitansi-admitansi perunit dengan dasar MVA. Penggunaan Hukum Arus Kirchoff pada bus ini diberikan dalam persamaan :

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{ia}(V_i - V_a) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{ia}V_a \dots \dots \dots (2.60) \end{aligned}$$

Atau

$$\begin{aligned} I_i &= V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \\ j &\neq i \dots \dots \dots (2.61) \end{aligned}$$

Daya aktif dan reaktif pada bus ke- i adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i \dots \dots \dots (2.62)$$

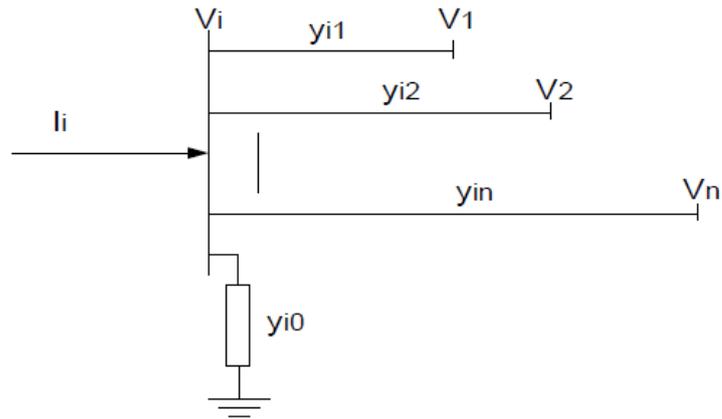
Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \dots \dots \dots (2.63)$$

Substitusikan persamaan (2.61) ke persamaan (2.62), maka akan diperoleh persamaan :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j$$

$j \neq i$(2.64)



Gambar 2.12. Model Bus Sistem Tenaga Listrik Sederhana
 Sumber : Dokumentasi

Dari gambar 2.12 di atas dapat ditulis persamaan :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots \dots \dots (2.65)$$

Persamaan diatas bila ditulis dalam bentuk polar akan diperoleh seperti berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots \dots \dots (2.66)$$

Berikutnya daya kompleks pada bus i dapat ditulis :

$$P_i - jQ_i = V_i I_i \dots \dots \dots (2.67)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.66) ke persamaan (2.67), maka akan diperoleh persamaan :

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots \dots \dots (2.68)$$

Bagian riil dan imajiner persamaan (2.68) kemudian dipisahkan, maka akan didapatkan persamaan :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (2.69)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (2.70)$$

Persamaan diatas dikembangkan dari deret *Taylor* seperti persamaan berikut ini :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.71)$$

Dalam hal ini dimisalkan bus 1 adalah bus referensi (*Swing bus*). Maka matrik *Jacobian* memberikan perbandingan linier antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta\delta_1^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta|V_i^{(k)}|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif $\Delta P_i^{(k)}$ dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$) dalam bentuk yang mudah dapat ditulis :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.72)$$

Banyaknya elemen matrik *Jacobian* persamaan (2.72) ditentukan dengan $(2n-2-2m) \times (2n-2-2m)$ dengan n adalah banyaknya bus pada sistem dan m adalah banyak bus pembangkit atau generator. J_1 diperoleh dari $(n-1) \times (n-1)$, J_2 diperoleh dari $(n-1) \times (n-1-m)$, J_3 diperoleh dari $(n-1-m) \times (n-1-m)$ dan J_4 diperoleh dari $(n-1-m) \times (n-1-m)$. Sehingga elemen diagonal dan bukan diagonal untuk J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.73)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.74)$$

Elemen diagonal dan bukan diagonal untuk J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} \left| \dots\dots\dots (2.75) \right.$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (2.76)$$

Elemen diagonal dan bukan diagonal untuk J_3 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (2.77)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots \dots \dots (2.78)$$

Elemen diagonal dan bukan diagonal untuk J_4 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (2.79)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \dots \dots \dots (2.80)$$

Harga dari $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan dan ini disebut sisa daya yang diberikan dengan :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots \dots \dots (2.81)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots \dots \dots (2.82)$$

Perhitungan untuk sudut fasa dan tegangan bus yang baru adalah :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots \dots \dots (2.83)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots \dots \dots (2.84)$$

Langkah-langkah perhitungan aliran daya dengan metode *Newton Raphson* adalah sebagai berikut :

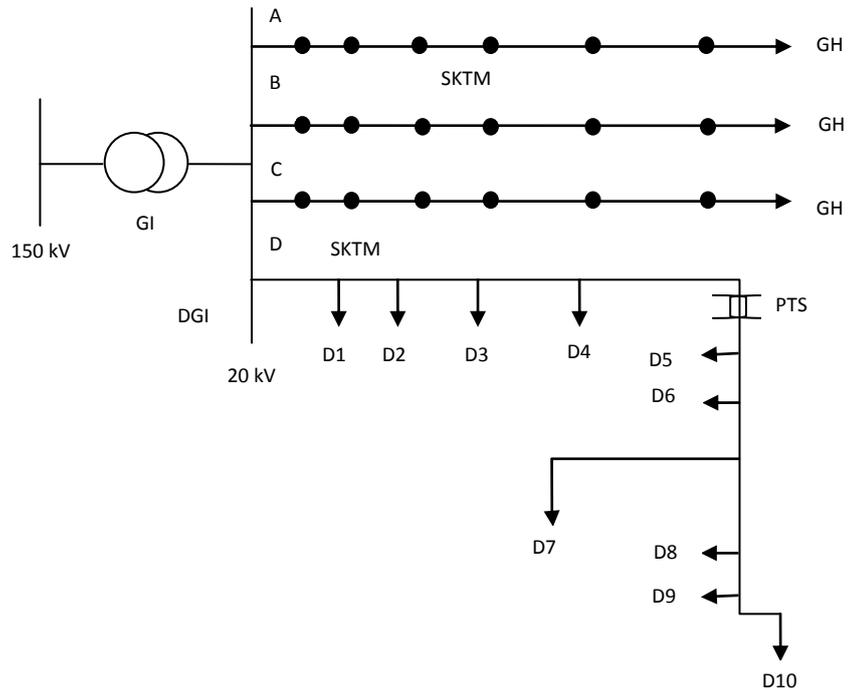
1. Pada bus berbeda dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} harganya ditentukan. Besarnya tegangan dan sudut fasa disamakan dengan nilai bus referensi yaitu 1,0 dan 0,0, sehingga $|V_i^{(0)}| = 1,0$ dan $\delta_i^{(0)} = 0,0$. Untuk bus pembangkit dimana dan diatur, sedangkan sudut fasa disamakan dengan sudut bus referensi, maka $\delta_i^{(0)} = 0$.
2. Hitung $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ pada bus beban menggunakan persamaan (2.69) dan (2.70), $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ dihitung dengan persamaan (2.81) dan (2.82).
3. Hitung Δ pada bus pembangkit dengan persamaan (2.71).
4. Hitung elemen-elemen matrik *Jacobian* J_1 , J_2 , J_3 dan J_4 dengan persamaan (2.73) sampai persamaan (2.80).
5. Hitung nilai $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan $\Delta|V_i^{(k)}|$ menggunakan persamaan (2.72).
6. Hitung nilai-nilai baru dari sudut fasa dan tegangan, $\delta_i^{(k+1)}$ dan $|V_i^{(k+1)}|$ dengan persamaan (2.83) dan (2.84).
7. Proses ini berlangsung sampai : $|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq \epsilon$

2.1.10.2. Metode *Gauss Seidel* untuk Perhitungan Aliran Daya

1. Persamaan Aliran Daya Pada Metode *Gauss Seidel*

Studi aliran daya adalah bagian yang penting karena studi ini digunakan dalam perencanaan perluasan sistem tenaga listrik dan juga dalam menentukan pengoperasian sistem tenaga listrik yang terbaik. Berikut perhitungan aliran daya metode *Gauss Seidel*:

a. Perhitungan Secara Manual



Gambar 2.13 Jaringan Tegangan Menengah (JTM)
 Sumber : Anonim. 2011. Aliran Beban Beserta Tegangan Jatuh Jaringan Tegangan Menengah. Jakarta : Diklat PLN

Dari gambar 2.13 di atas, titik D aliran daya dirumuskan :

$$P_{DGI-D1} = P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} + P_{D4} + P_{D5} + P_{D6} + P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85a)$$

$$P_{D1-D2} = P_{D2} + P_{D3} + P_{D4} + P_{D5} + P_{D6} + P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85b)$$

$$P_{D2-D3} = P_{D3} + P_{D4} + P_{D5} + P_{D6} + P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85c)$$

$$P_{D3-D4} = P_{D4} + P_{D5} + P_{D6} + P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85d)$$

$$P_{D4-D5} = P_{D5} + P_{D6} + P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85e)$$

$$P_{D5-D6} = P_{D6} + P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85f)$$

$$P_{D6-D7} = P_{D7} + P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85g)$$

$$P_{D7-D8} = P_{D8} + P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85h)$$

$$P_{D8-D9} = P_{D9} + P_{D10} \dots (2.85i)$$

$$P_{D9-D10} = P_{D10} \dots (2.85j)$$

Persamaan di atas berlaku untuk daya nyata (Watt) dan daya semu (Volt Ampere). Sehingga aliran daya dari sumber merupakan aliran daya yang diperoleh dari *substation-substation* penerimaanya dari hilir ke hulu⁸.

Langkah-langkah perhitungan aliran daya dengan menggunakan *Gauss Seidel* adalah sebagai berikut :

1. Mengkonversi data-data parameter yang diketahui menjadi kuantitas per unit dengan menggunakan persamaan yang telah dipaparkan sebelumnya, yaitu persamaan (2.31), (2.32), (2.33), (2.34), (2.35) dan (2.36).
2. Menghitung nilai admitansi :

$$y = \frac{1}{z} \dots\dots\dots (2.86)$$

dimana : z = Impedansi (ohm)
 y = Admitansi (ohm)

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} \dots\dots\dots (2.87)$$

dimana : z_{ij} = Impedansi antara simpul-simpul (ohm)
 y_{ij} = Admitansi antara simpul-simpul (ohm)

Admitansi antara simpul-simpul menjadi admitansi bersama :

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \dots\dots\dots (2.88)$$

⁸ Anonim. 2011. Aliran Beban Beserta Tegangan Jatuh Jatingan Tegangan Menengah Jakarta : Diklat PLN

Dan juga terdapat admitansi dimana jumlah dari admitansi-admitansi yang terhubung padanya :

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n Y_{ij} \dots \dots \dots (2.89)$$

3. Tentukan bus referensi (*slack bus*) untuk besaran tegangan dan sudut fasa yang tidak diketahui yaitu :

$$V = 1.0 ; \theta = 0^0 \dots \dots \dots (2.90)$$

4. Untuk bus beban (*load bus*), tentukan V_i dengan persamaan berikut ini.

$$V_i = \frac{\frac{(P_i - jQ_i)}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j}{Y_{ii}} \dots \dots \dots (2.91)$$

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{(P_i - jQ_i)}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j \right] \dots \dots \dots (2.92)$$

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{(P_i - jQ_i)}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j \right] \dots \dots \dots (2.93)$$

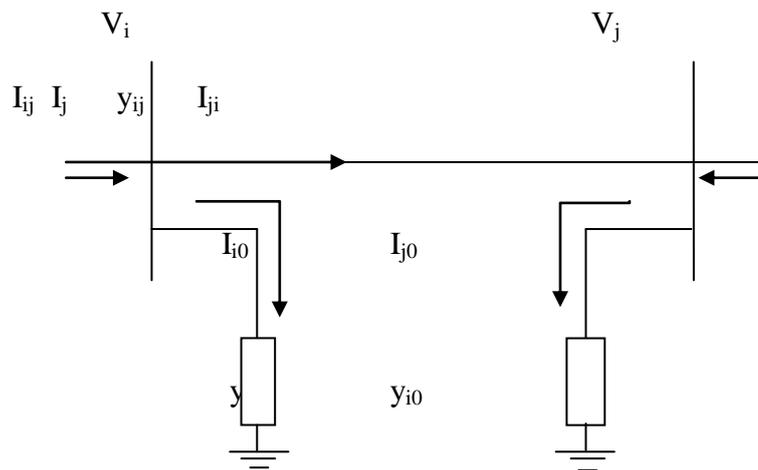
Dimana : k = Iterasi
* = Konjugate

Persamaan yang digunakan untuk menentukan V_i adalah persamaan (2.93). Dengan titik konvergensi :

$$|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq e \dots \dots \dots (2.94)$$

Dimana : Nilai toleransi e bergantung pada ketetapan yang diinginkan.

5. Setelah penyelesaian iterasi dari tegangan bus, langkah berikutnya adalah menghitung aliran daya dan rugi-rugi pada saluran.



Gambar 2.14 Model Saluran Distribusi Perhitungan Aliran Daya
 Sumber : Sudaryanto Sudirham. 2012. Analisis Sistem Tenaga. Bandung: Darpublic

Berdasarkan skema model saluran distribusi untuk perhitungan aliran daya yang ditunjukkan pada gambar 2.14 di atas, arus saluran I_{ij} diukur pada bus i dan didefinisikan positif dalam arah $i \rightarrow j$ dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{ij} = -I_i + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \dots\dots\dots (2.95)$$

Dengan cara yang sama, arus saluran diukur pada bus j dan didefinisikan positif dalam arah $j \rightarrow i$ dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{ji} = -I_j + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \dots\dots\dots (2.96)$$

Daya kompleks S_{ij} dari bus i ke j dan S_{ji} dari bus j ke i adalah :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \dots\dots\dots (2.97)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \dots\dots\dots (2.98)$$

Rugi-rugi daya dalam saluran $i \rightarrow j$ adalah jumlah aljabar dari aliran daya dan dirumuskan sebagai berikut:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \dots\dots\dots (2.99)$$

6. Setelah besaran-besaran tegangan, arus, aliran daya dan rugi saluran (*losses*) didapatkan selanjutnya adalah mengembalikan nilai nilai per unit dari besaran-besaran yang telah didapatkan tersebut menjadi nilai yang sebenarnya dengan menggunakan persamaan kuantitas per unit.

2.1.11. Software ETAP 12.6

Software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) merupakan suatu *software* yang menampilkan secara GUI (*Graphical User Interface*) mengenai analisis sistem tenaga listrik. *Software ETAP* dibuat oleh perusahaan *Operation Technology, Inc (OTI)* dari tahun 1995. *Software ETAP 12.6* merupakan salah satu produk OTI yang berhasil dikembangkan fiturnya setelah versi sebelumnya yaitu *software ETAP 4.0* dan *software ETAP 7.0*.

Software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) 12.6 merupakan suatu *software* (perangkat lunak) yang digunakan suatu sistem tenaga listrik. Perangkat ini dapat bekerja dalam keadaan *offline* yaitu untuk simulasi tenaga listrik, dan juga dalam keadaan *online* untuk pengelolaan data *real time*. Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan dengan *software ETAP12.6* antara lain :

1. Analisa Aliran Daya (*Load flow Analysis*)
2. Analisa Hubung Singkat (*Short Circuit Analysis*)
3. Analisa *Starting Motor (Motor Starting Analysis)*
4. Analisa Harmonisa (*Harmonics Analysis*)
5. Analisa Kestabilan Transien (*Transient Stability Analysis*)
6. Koordinasi Relay (*Relay Coordination*)
7. Analisa Aliran Daya Optimal (*Optimal Power Flow Analysis*)
8. Analisa Aliran Daya DC (*DC Load flow Analysis*)
9. Analisa Hubung Singkat DC (*DC Short-Circuit Analysis*)
10. Ukuran *Battery (Battery Sizing)*

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menggunakan *Software ETAP 12.6* antara lain :

1. **One 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.

2. **Library**, merupakan informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi ataupun analisa.
3. **Standar yang dipakai**, biasanya mengacu pada standar *IEC (International Electrotechnical Commission)* dan *ANSI (American National Standards Institute)*. Perbedaan antara standar *IEC* dan *ANSI* terletak pada simbol peralatan dan standar frekuensi yang digunakan yang mengakibatkan perbedaan spesifikasi peralatan yang digunakan. Pada standar *IEC* nilai frekuensi yang digunakan adalah 50 Hz, sedangkan pada standar *ANSI* nilai frekuensi yang digunakan adalah 60 Hz.

Berikut ini cara menggunakan *Software ETAP 12.6* secara singkat, beserta penjelasan *Toolbar Software ETAP 12.6* yang telah di-*instal* di komputer.

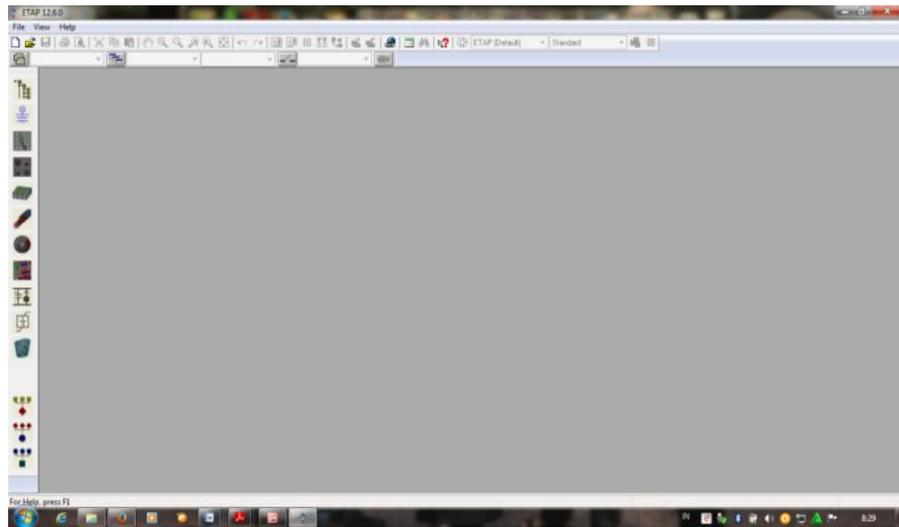
1. Jalankan/*running software ETAP 12.6* yang telah diinstal, dengan cara klik 2 kali *icon software ETAP 12.6* seperti pada gambar 2.15 di bawah ini.



Gambar 2.15 *Icon Software ETAP 12.6*

Sumber: Dokumentasi

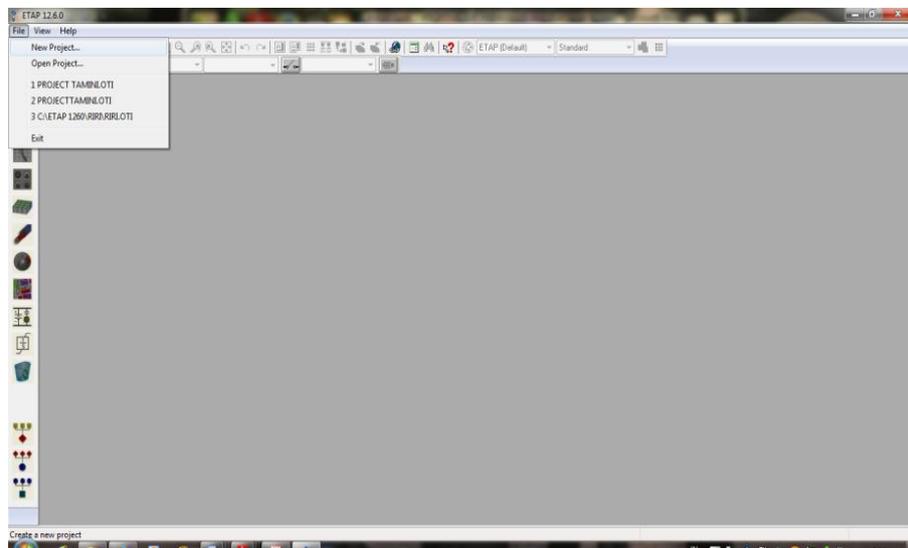
2. Tampilan awal ketika *Icon Software ETAP 12.6* di-*running* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16 di bawah ini.



Gambar 2.16 Tampilan Pertama *Software ETAP 12.6*
Sumber: Dokumentasi

3. Membuat *New Project* pada *Software ETAP 12.6* dengan langkah-langkah seperti pada gambar 2.17 di bawah ini.

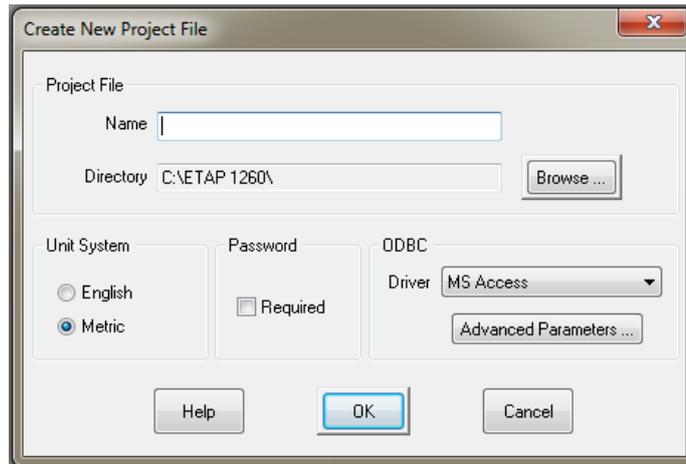
a. Klik *File > New Project*



Gambar 2.17 Tampilan Awal Membuat *New Project* Pada *Software ETAP 12.6*

Sumber: Dokumentasi

b. Selanjutnya akan muncul seperti pada gambar 2.18 berikut ini.



Gambar 2.18 Tampilan *Create New Project File* Pada Software ETAP 12.6

Sumber: Dokumentasi

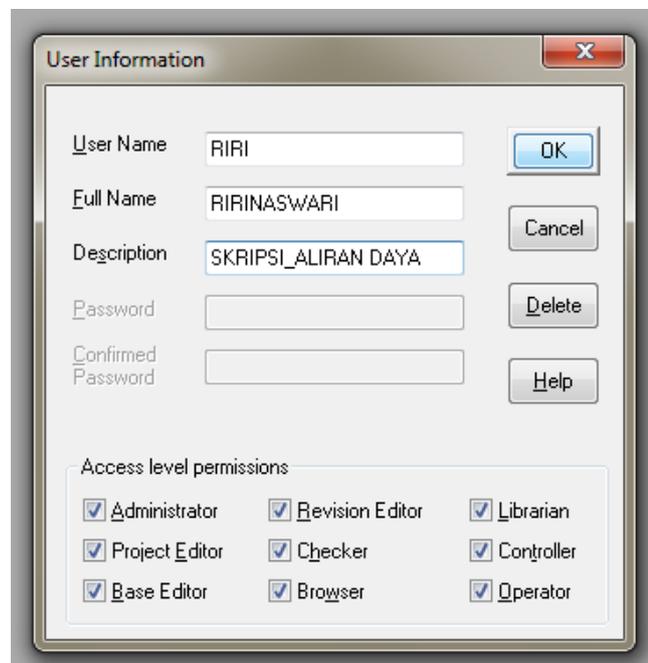
Setelah itu isikan dengan data berikut:

Name *Project* : (sesuai kebutuhan)

Unit Sistem : (sesuai kebutuhan)

RequiredPassword : (sesuai kebutuhan/ceklist)

Data isian di atas dapat diisi sesuai dengan kebutuhan.



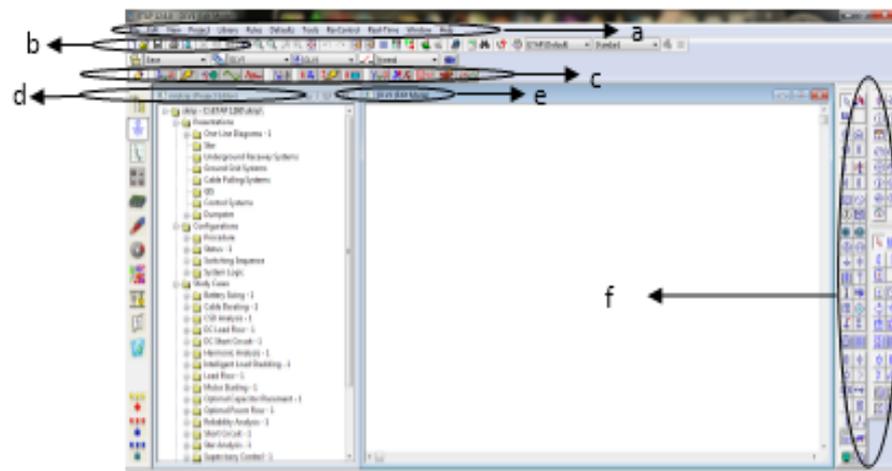
Gambar 2.19 Tampilan *User Information* Software ETAP 12.6

Sumber : Dokumentasi

Setelah itu isikan data-data pada gambar 2.19 sesuai kebutuhan.

user name : (sesuai kebutuhan)
full name : (sesuai kebutuhan)
description : (sesuai kebutuhan)
Password : (sesuai kebutuhan, digunakan jika form *Required Password* sebelumnya di-ceklist.

c. Selanjutnya klik > OK, maka akan tampil gambar 2.20 seperti di bawah ini.



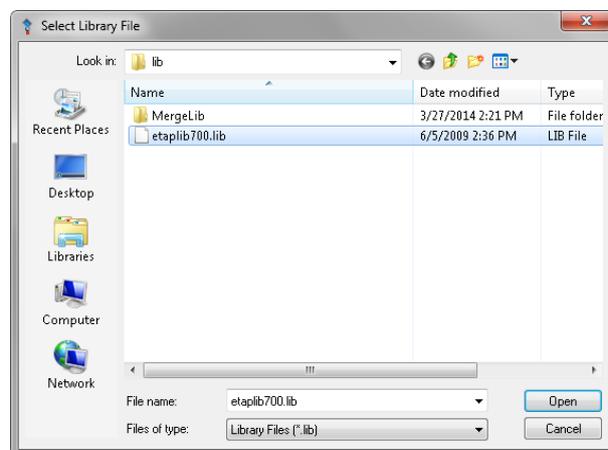
Gambar 2.20 Tampilan Lembar Kerja Pada *Software ETAP 12.6*

Sumber : Dokumentasi

Dimana :

- Pada lingkaran a, merupakan *Main Toolbar* yang berfungsi untuk menambahkan informasi pada *Project*, *setting Project*, dan menyimpan *Project*.
- Pada lingkaran b, merupakan *Project Toolbar* yang berfungsi untuk membuat, membuka, dan menyimpan *Project* serta melakukan *print out* dari *Project* yang telah dibuat.
- Pada lingkaran c, merupakan *Mode Toolbar* yang berfungsi untuk melakukan analisa atau simulasi.

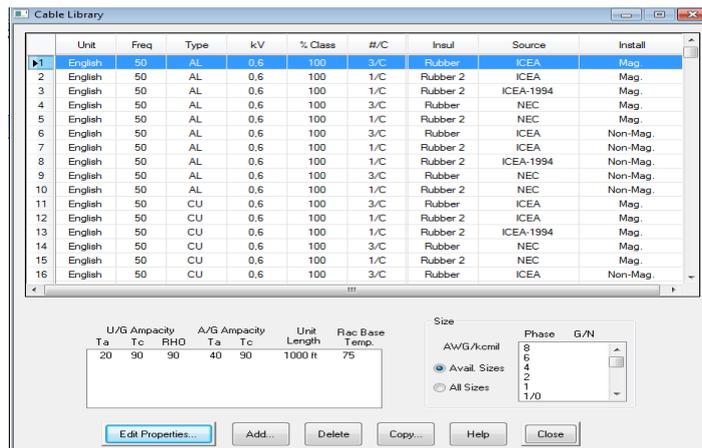
- Pada lingkaran d, merupakan *Window Project Editor* yang berfungsi untuk melakukan perubahan atau *editing* parameter-parameter yang digunakan.
 - Pada lingkaran e, merupakan *Window OLVI* yang berfungsi untuk membuat *online* diagram (*single line diagram*) yang diinginkan.
 - Pada lingkaran f, merupakan AC dan DC *Edit Toolbar* yang di dalamnya terdapat komponen-komponen tenaga listrik.
4. Melakukan *update library*, yaitu klik *Tab Library* pada *Main Toolbar*, pilih *File library* lalu *open* seperti pada gambar 2.21 di bawah ini.



Gambar 2.21 Tampilan Membuka *File Library* Pada *Software ETAP 12.6*

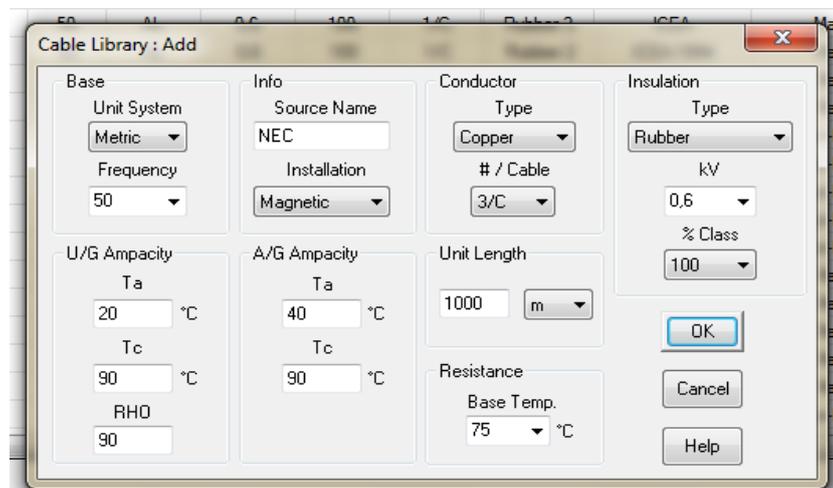
Sumber : Dokumentasi

Selanjutnya klik kembali *Tab Library* pada *Main Toolbar* dan pilih komponen yang akan di-*update* datanya. Misalnya data komponen yang akan di-*update* adalah data *Cable*, maka klik > *Cable* dan akan muncul kotak dialog seperti pada gambar 2.22 berikut ini.



Gambar 2.22 Tampilan *Add Cable Library* Pada Software ETAP 12.6
Sumber: Dokumentasi

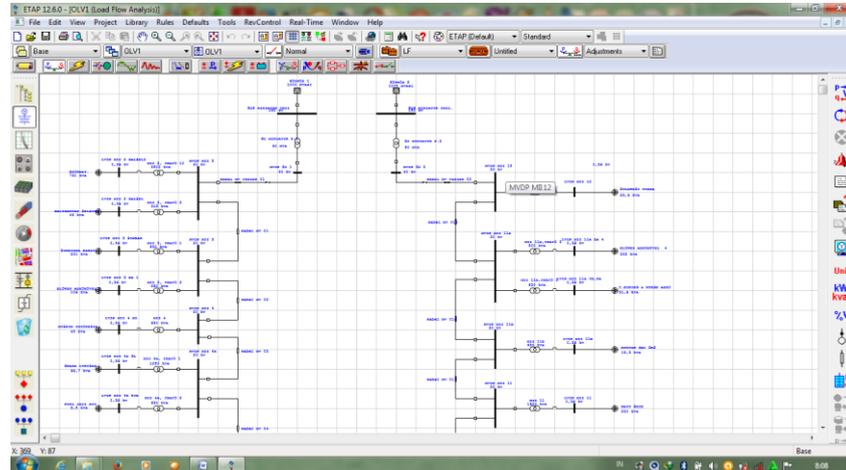
Dan klik > *Add* untuk melakukan *update* atau menambahkan *Cable* yang akan digunakan. Sehingga muncul kotak dialog seperti pada gambar 2.23 di bawah ini :



Gambar 2.23 Tampilan *Update Cable Library* Software ETAP 12.6
Sumber: Dokumentasi

Setelah data spesifikasi *Cable* yang akan digunakan terisi pada kotak dialog di atas selanjutnya klik > OK.

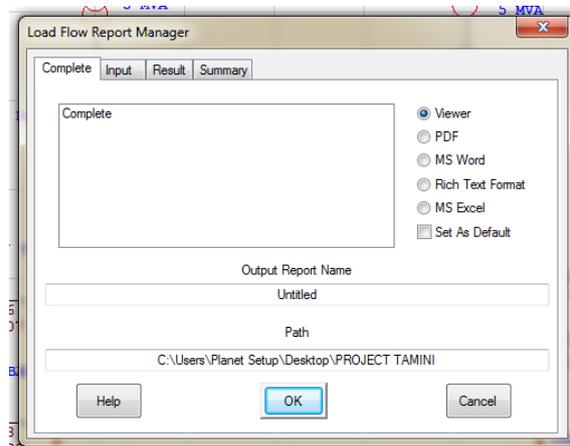
5. Kemudian melakukan *printout* dari hasil simulasi yang telah dibuat dengan cara klik > *Icon Report Manager*, seperti pada gambar 2.24 berikut ini.



Gambar 2.24 *Icon Print Out Report Manager* Pada *Software ETAP 12.6*

Sumber: Dokumentasi

Maka akan muncul kotak dialog seperti pada gambar 2.25 di bawah.



Gambar 2.25 Tampilan untuk *Print Out Report Manager* Pada *Software ETAP 12.6*

Sumber: Dokumentasi

Dimana :

1. *Tab Complete*, untuk mencetak hasil analisa atau simulasi secara lengkap atau keseluruhan.

2. *Tab Input*, untuk mencetak hasil analisa atau simulasi hanya berdasarkan data-data *input* yang digunakan di setiap komponen.
3. *Tab Result*, untuk mencetak hasil analisa atau simulasi hanya berupa topik atau kategori yang dikerjakan.
4. *Tab Summary*, untuk mencetak hasil analisa atau simulasi hanya berupa peringatan dari kondisi yang ada pada sistem yang dibuat.

Untuk melihat hasilnya klik > OK.

Dari keterangan di atas, adapun prosedur penggunaan *software ETAP 12.6* untuk perhitungan aliran daya dari awal hingga keluaran yaitu:

1. Membuat diagram segaris jaringan.
2. Memasukkan data peralatan jaringan.
3. Menentukan sebuah atau beberapa generator ayun.
4. Memasukkan data studi kasus yang akan ditinjau.
5. Jalankan *software ETAP 12.6* dengan memilih *icon load flow analysis* pada *Toolbar*.
6. Keluaran perhitungan aliran daya dapat diketahui setelah program dijalankan.

Hasil keluaran aliran daya dapat dilihat di *load flow report manager*. Pada perhitungan aliran daya menggunakan *ETAP* akan dihitung tegangan rel, faktor daya, arus, dan aliran daya yang melalui sistem tenaga

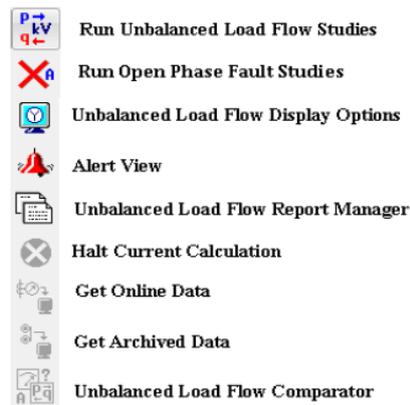
listrik. *Software ETAP* dapat menggunakan sumber tenaga ayun (*swing*), pengaturan tegangan dan tanpa pengaturan tegangan dengan banyak generator dan peralatan. *Software* ini dapat digunakan untuk jaringan *loop*, *radial*, maupun *kombinasi*.⁹

2.1.11.1. Load Flow Analysis Pada Software ETAP 12.6

Load flow analysis atau yang lebih umum dikenal dengan nama analisis aliran daya merupakan salah satu analisa yang dapat dilakukan dengan menggunakan *software ETAP 12.6*. Pada buku modul panduan *ETAP*, analisis aliran daya bertujuan untuk menghitung tegangan bus, faktor daya percabangan, arus, dan aliran daya yang melewati sepanjang sistem kelistrikan tersebut. Pada *ETAP* juga menyediakan *icon swing* (ayunan), *voltage regulated* (pengaturan tegangan), dan *unregulated power sources* (sumber tenaga yang tidak diatur) dengan banyak jaringan tenaga dan juga *generation connections*.¹⁰ Dengan adanya *icon* tersebut mampu menampilkan analisis dari kedua sistem jaringan, baik sistem *radial* dan juga sistem *loop*. Pada *ETAP* versi 12.6 ini juga memberikan pengguna untuk memilih beberapa metode yang berbeda untuk mencapai perhitungan efisiensi yang terbaik.

⁹ Edi Riwanto. *Simulasi aliran daya pada sistem jaringan distribusi 20 KV menggunakan software ETAP (Electrical Transient analysis Program) 4.0 di Bandara Soekarno-Hatta: studi pada main power station* [skripsi]. (Jakarta, Fakultas Teknik, UNJ, 2013), h. 46

¹⁰ Operation Technology, Inc. *ETAP 12.6 User Guide*. (Southern California, 2014), h.19



Gambar 2.26 Tampilan *Toolbar Load Flow* Pada *Software ETAP 12.6*

Sumber: Dokumentasi

Pada bagian *Toolbar load flow* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.26 menjelaskan pengguna dapat memproses *load flow calculation*, membukan dan melihat *output report*, atau memilih tampilan *display option*. Pada *bagian load flow study case editor* menjelaskan bagaimana pengguna dapat membuat sebuah studi kasus baru, apa parameter yang diperlukan untuk menetapkan sebuah studi kasus baru tersebut, dan bagaimana cara mengaturnya. Pada bagian tampilan *display option* menjelaskan pilihan apa yang tersedia untuk menampilkan beberapa kunci parameter sistem dalam hasil keluaran pada *one-line diagram*, dan bagaimana cara mengaturnya. Pada bagian *load flow calculation methods* menunjukkan formula/rumus yang berbeda dengan perhitungan. Perbandingan antara dasar konvergensi, meningkatkan konvergensi berdasarkan perbedaan sistem parameter dan konfigurasi, dan beberapa tips untuk memilih ketepatan metode perhitungan juga dapat ditemukan pada bagian ini.

Software ETAP 12.6 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, dan berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan *ETAP* pun berbeda.¹¹



Gambar 2.27 Tampilan Elemen Standar ANSI
Sumber: Dokumentasi

¹¹Prof.Dr. Ir. Salama, MT, *Penguasaan ETAP Untuk Aplikasi Sisten Tenaga Listrik*, (UnHas, Dua Satu Press, 2012), h.31



Gambar 2.28 Tampilan Elemen Standar IEC
Sumber: Dokumentasi

Beberapa elemen standar baik ANSI yang ditunjukkan pada gambar 2.27 dan standar IEC pada gambar 2.28 akan digunakan pada suatu diagram saluran tunggal untuk analisis aliran daya. Diantaranya adalah : generator, transformator, pemutus rangkaian, dan beban.

1. Generator

Pada gambar 2.29 dan gambar 2.30 di bawah ini merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tenaga listrik.



Gambar 2.29 Simbol Generator Standar ANSI di *ETAP*
Sumber: Dokumentasi



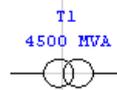
Gambar 2.30 Simbol Generator Standar IEC di *ETAP*
Sumber: Dokumentasi

A. Transformator

Pada gambar 2.31 dan gambar 2.32 di bawah ini merupakan simbol yang berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan dengan rasio tertentu sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik.



Gambar 2.31 Simbol Transformator Standar ANSI di *ETAP*
Sumber: Dokumentasi



Gambar 2.32 Simbol Transformator Standar IEC di *ETAP*
Sumber: Dokumentasi

B. Pemutus Rangkaian

Pada gambar 2.33 di bawah ini merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek.



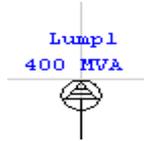
Gambar 2.33 Simbol CB di *ETAP*
Sumber: Dokumentasi

C. Beban

Pada *Software ETAP* terdapat dua macam beban, yaitu beban statis dan beban dinamis. Gambar 2.34 dan gambar 2.35 di bawah ini merupakan simbol dari *load* yang terdapat dalam *software ETAP 12.6*.



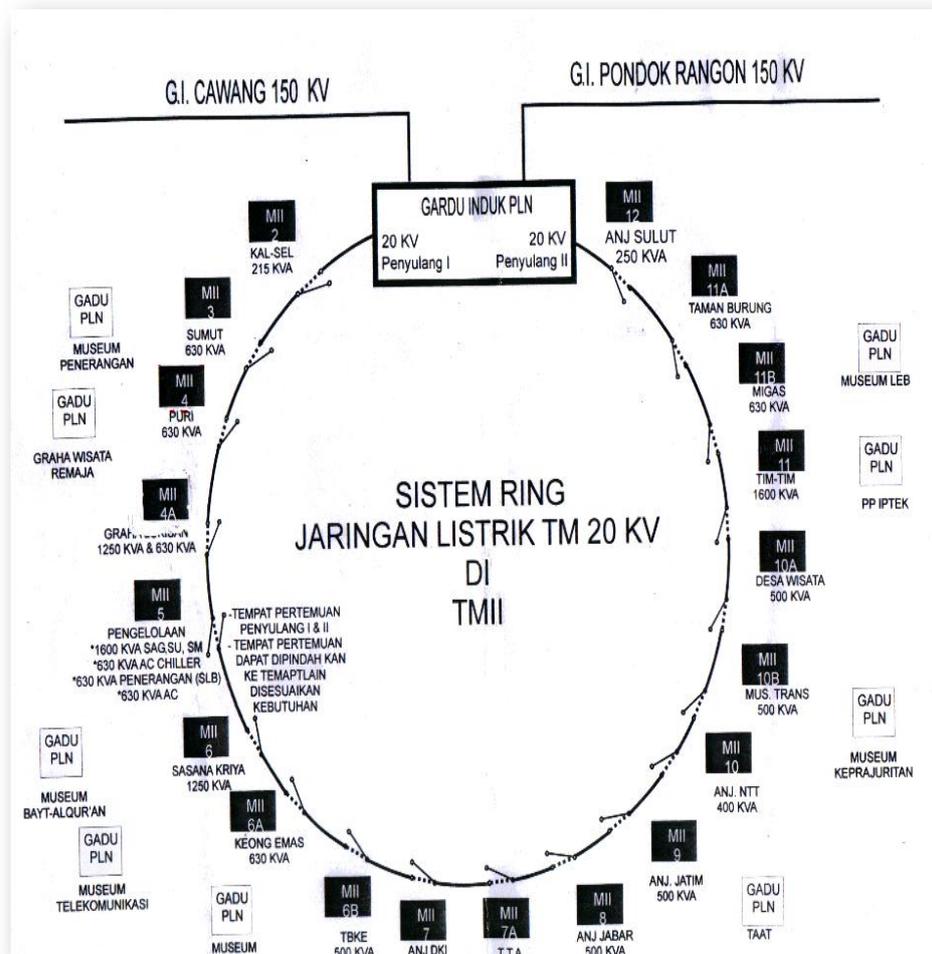
Gambar 2.34 Simbol *Load* Standar ANSI di *ETAP*
Sumber: Dokumentasi



Gambar 2.35 Simbol *Load* Standar IEC di *ETAP*
Sumber: Dokumentasi

2.1.12. Sistem Distribusi Taman Mini Indonesia Indah

Seperti yang diketahui, sebanyak 20 gardu distribusi yang dikelola oleh Taman Mini Indonesia Indah disuplai dari dua penyulang yaitu dari PLN Cawang dan PLN Pondok Rangon. Kemudian dalam pengoperasiannya, Taman Mini Indonesia Indah menggunakan sistem *ring* dalam pendistribusian jaringan tegangan menengah (JTM 20 kV) antar gardu distribusi. Berikut ini adalah daftar gardu dengan penyulangnya masing-masing yang dapat dilihat pada gambar 2.36 di bawah ini.



Gambar 2.36 Sistem *Ring* Jaringan Listrik TM 20 kV Taman Mini Indonesia Indah

Sumber: Dokumentasi

1. Gardu distribusi pada penyulang 1 : MII 2, MII 3, MII 4, MII 4A, MII 5, MII 6.
2. Gardu distribusi pada penyulang 2 : MII 6A, MII 6B, MII 7, MII 7A, MII 8, MII 9, MII 10, MII 10B, MII 10A, MII 11, MII 11B, MII 11A, MII 12.

Pada gambar 2.37 berikut ini adalah skema penyambungan kabel pada 19 gardu distribusi 20 kV di Taman Mini Indonesia Indah.

Misalkan yang mengalami gangguan yaitu pada gardu MII 4 yang menggunakan penyulang 1 dan harus dikondisikan dalam keadaan *off*. Supaya gardu-gardu distribusi setelah gardu MII 4 yang berada pada satu *line* (MII 4A, MII 5, dan MII 6) tetap aktif dan mendapatkan sumber energi listrik untuk melayani beban, maka gardu-gardu tersebut menggunakan sumber energi listrik dari penyulang 2. Adapun cara menonaktifkan gardu MII 4 yaitu dengan mengatur *handle* kubikel *In Coming* pada gardu terdekat yang berada di jalur sebelum dan sesudah MII 4, yaitu kubikel pada gardu MII 3 dan MII 4A. Kemudian disiapkan sumber penyulang 2 untuk mengaktifkan gardu MII 4A, MII 5 dan MII 6. Setelah itu, saklar NO yang terdapat pada gardu MII 6 diaktifkan atau diubah ke keadaan *close* (terhubung). Sehingga kondisi pada gardu MII 4A, MII 5, dan MII 6 sudah mendapatkan sumber energi listrik dari penyulang 2 dan bisa terus melayani bebannya masing-masing.

Berikut cara pengoperasian yang bisa dilakukan apabila terjadi kerusakan pada salah satu komponen pada gardu distribusi.

- a. Jika terjadi kerusakan pada salah satu fuse pada rak tegangan rendah (TR), maka cara membetulkannya cukup menggantikan fuse yang rusak tanpa harus menonaktifkan *handle home* saklar (LBS).
- b. Jika ingin menambah jumlah *line* pada rak TR atau terjadi kerusakan pada seluruh *line* di rak (TR), maka cukup *home* saklar (LBS) yang dinonaktifkan.

- c. Jika terjadi kerusakan pada sisi trafo, maka cukup kubikel PB Trafo yang dinonaktifkan.
- d. Jika terjadi kerusakan pada kubikel PB Trafo, maka cukup memutuskan rel yang menghubungkan kubikel *In Coming* ke PB Trafo yang berada pada bagian atas kubikel.
- e. Jika terjadi kerusakan pada kubikel *In Coming* di gardu distribusi, maka jalur distribusi yang mengarah ke gardu yang mengalami kerusakan harus dinonaktifkan dengan cara mengatur *handle* kubikel *In Coming* (PMS/PMT) ke keadaan *off* pada gardu terdekat yang berada di jalur sebelum dan sesudah gardu distribusi yang mengalami kerusakan.
- f. Jika terjadi kerusakan pada jalur sambungan kabel tanah tegangan menengah (SKTM), maka dua gardu yang terhubung oleh SKTM tersebut harus dinonaktifkan.

2.2. Kerangka Berfikir

Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun daya reaktif yang terdapat pada bagian titik jaringan listrik pada keadaan operasi normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang. Jaringan distribusi 20 kV di Taman Mini Indonesia Indah sebagai subjek penelitian. Jaringan distribusi dianalisa pada keadaan beban normal yang nantinya akan menghasilkan data aliran beban, total beban, tegangan jatuh, serta rugi-rugi daya yang dihasilkan.

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil data aktual yang terdapat pada fasilitas jaringan distribusi 20 kV Taman Mini Indonesia Indah. Simulasi aliran daya pada *software ETAP 12.6* menggunakan 2 metode perhitungan aliran daya, yaitu metode *Newton Raphson* dan *Gauss Seidel* guna mengetahui kondisi jaringan distribusi tegangan menengah yakni mengetahui besar nilai tegangan pada setiap busbar tegangan menengah (MVDP), dan *losses* yang dihasilkan. Sehingga dari hasil besar nilai tegangan tiap busbar dari masing-masing penyulang (GI) dapat diketahui profil dan kualitas tegangan di Taman Mini Indonesia Indah

Kami berharap dengan adanya simulasi aliran daya ini dapat dijadikan referensi dan masukan bagi divisi kelistrikan yang menangani bidang kelistrikan di Taman Mini Indonesia Indah.