

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya adalah tahapan yang dilakukan guna menemukan atau mengumpulkan informasi dan teori mengenai aliran daya dalam sebuah objek kelistrikan (Fasha, 2020) terutama dalam bidang jaringan tenaga listrik. Studi aliran daya pada sistem tenaga listrik adalah studi yang merupakan bagian penting dalam analisis aliran daya. Studi aliran daya menjelaskan kinerja dan aliran daya baik itu daya nyata maupun daya reaktif untuk suatu keadaan tertentu ketika sistem bekerja saat keadaan *steady state* (dalam keadaan tunak). Studi aliran daya juga dapat menyajikan informasi mengenai beban saluran transmisi pada sistem, tegangan pada setiap lokasi evaluasi regulasi kinerja sistem tenaga listrik dan bertujuan untuk menentukan besarnya daya nyata (*real power*), daya reaktif (*reactive power*) di berbagai titik pada sistem daya yang dalam keadaan berlangsung atau diharapkan untuk operasi normal (Otniel et al., 2019).

Menurut Yunus et al., (2016) studi aliran daya adalah masalah aliran daya yang mencakup perhitungan aliran dan tegangan sistem pada terminal tertentu atau bus tertentu. Representasi fasa tunggal selalu dilakukan karena sistem dianggap seimbang. Dalam setiap bus selalu terdapat empat besaran yaitu daya aktif, daya reaktif, magnitudo tegangan dan sudut fasa. dalam studi aliran daya terdapat tiga tipe bus, dalam masing- masing tipe bus minimal diketahui dua dari empat besaran yang ada. Pada setiap perhitungan harus dipilih salah satu bus sebagai slack bus. Hubungan antar bus oleh jaringan dijelaskan dengan memakai nomor bus. Kondisi kerja harus selalu ditentukan untuk setiap studi.

Ali et al., (2017) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus dan daya yang terdapat pada berbagai titik suatu jaringan pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang akan datang. Aliran daya pada penelitian ini tidak dibahas secara khusus dan mendetail, karena hanya digunakan sebagai studi untuk menentukan tegangan dan daya yang dijadikan sebagai dasar untuk melakukan rekonfigurasi jaringan pada jaringan distribusi daya listrik tipe radial.

Selanjutnya studi aliran daya sangat diperlukan guna menentukan kondisi operasi sistem tenaga listrik dalam kondisi tunak (*steady state*), melalui pemecahan persamaan aliran daya pada jaringan. Tujuan utama dari studi aliran daya adalah untuk menentukan magnitude tegangan, sudut tegangan, aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran serta rugi-rugi transmisi yang muncul dalam sistem tenaga. Hasil dari studi aliran daya ini juga dapat dijadikan pedoman untuk perencanaan, pengoperasian sistem, atau penjadwalan sistem pembangkit dan juga dibutuhkan dalam banyak analisis seperti stabilitas transien dan studi kontingensi (Pondaag et al., 2020).

Sedangkan menurut Santoso et al., (2017) studi aliran daya atau yang biasa disebut *load flow* dilakukan untuk menentukan kondisi pada operasi *steady state* atau dalam kondisi tunak. Studi aliran daya sangat penting untuk perencanaan yang berkaitan dengan daya dalam sistem tenaga listrik, operasi pada sistem, atau optimasi dan kontrol pada sistem. Banyak faktor yang dapat berpengaruh pada sistem distribusi radial dan salah satunya adalah tidak stabilnya beban atau naik turunnya beban.

Santoso et al., (2017) dalam penelitiannya menggunakan metode agak sedikit berbeda dari tiga metode yang sudah disebutkan sebelumnya yaitu *Fast Decoupled*, *Gauss Seidel*, *Newton Raphson* dimana ia dalam penelitiannya menggunakan metode *forward and backward sweep*. Hasil pengujian menggunakan *forward and backward sweep* menunjukkan bahwa metode tersebut dapat digunakan untuk menganalisis aliran

daya pada tes IEEE 33 bus. Metode tersebut menggunakan aljabar sederhana untuk menghitung secara interaktif serta mempunyai konvergensi yang cepat pada sistem distribusi yang membutuhkan 4 sampai 5 kali iterasi. Hal tersebut yang membuat algoritma sangat baik serta efisien untuk konvergensi dan dapat diaplikasikan pada variasi jaringan distribusi yang cukup luas.

Selanjutnya Pangloli et al., (2020) mengatakan metode *Fast Decoupled* digunakan agar mempermudah dalam perhitungan aliran daya. Metode *Fast Decoupled* merupakan metode diantara metode lainnya dalam perhitungan aliran daya. Metode tersebut dinilai sederhana dan praktis serta sangat cepat dan hasil pengukuran yang bisa diandalkan. Metode ini merupakan penyederhanaan dari pengembangan metode *Newton Raphson* yang menggunakan prinsip *Decoupled* yaitu dengan adanya ketergantungan yang kuat diantara daya reaktif dengan besarnya tegangan.

Menurut Silalahi et al., (2017) menyatakan bahwa metode *Newton Raphson* lebih unggul dibandingkan dengan metode *Gauss Seidel*. Alasannya adalah jumlah iterasi metode *Newton Raphson* lebih sedikit dibandingkan dengan metode *Gauss Seidel*. Hal itu sangat berdampak pada waktu analisa yang memakan waktu lebih singkat. Fikri & Anggani (2018) mengungkapkan bahwa metode *Newton Raphson* digunakan untuk mendapatkan rekonfigurasi jaringan yang paling optimal. Sedangkan menurut Otniel et al., (2019) dalam metode *Newton Raphson* secara luas dapat digunakan untuk permasalahan non linear. Penyelesaian persamaan ini menggunakan permasalahan yang linear dengan solusi pendekatan. Metode ini dapat diaplikasikan untuk satu persamaan atau beberapa persamaan dengan beberapa variabel yang tidak diketahui.

Sedangkan Satriawan & Hakim (2017) menulis bahwa metode analisis aliran daya menggunakan injeksi arus dalam bentuk vektor dengan format polar dan rectangular dinilai lebih cepat dalam perhitungannya, lebih akurat, dan jumlah itearsi yang lebih sedikit. Metode injeksi arus ini merupakan pengembangan dari metode

*Newton Raphson* yang dikembangkan oleh para peneliti yaitu Vender dkk. Vender dkk, mengubah *missmatch* injeksi daya dan dijadikan persamaan *missmatch* injeksi arus dan masih berupa bentuk konvensional. Persamaan analisis aliran daya dalam bentuk konvensional masih berupa bentuk persamaan kompleks yang sulit untuk dikonversi ke dalam bahasa pemrograman. Namun setelahnya seorang peneliti yang bernama Alvarado telah mengembangkan metode *Newton Raphson* dalam bentuk vektor berbasis daya ke dalam bahasa atau *script Matlab*. Implementasi dari bentuk vektor pada persamaan aliran daya akan menjadi lebih sederhana dan dapat digunakan pada bahasa atau *script python*.

Analisis aliran daya dalam penelitian Matchfudiah dan Amirullah (2019), listrik mempunyai berbagai macam metode dalam menganalisis sebuah sistem tenaga listrik. *Topology network* merupakan salah satu metode analisis aliran daya listrik yang dalam penyelesaiannya menggunakan pemodelan bentuk topologi jaringan menjadi bentuk persamaan matematika, yang selanjutnya dihitung dan diiterasi sehingga diperoleh nilai arus, tegangan, rugi – rugi daya dan total daya pembangkitan yang diperlukan oleh sistem. Analisis aliran daya *topology network* sangat cocok diterapkan pada sistem tenaga dengan topologi jaringan radial.

Menurut Situmeang et al., (2019) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa kegunaan studi aliran daya adalah sebagai berikut.

- a. Merencanakan serta mengembangkan jaringan listrik. Studi aliran daya dapat memberikan banyak informasi mengenai akibat terjadinya pembebanan beban baru, penambahan pembangkitan baru, penambahan saluran transmisi, serta interkoneksi dengan sistem lain, dan sebagainya.
- b. Menentukan pembebanan terhadap peralatan sistem listrik seperti saluran transmisi dan transformator pada kondisi sekarang atau di masa depan.
- c. Menentukan kondisi operasi terbaik sistem tenaga listrik.

d. Memberikan data masukan bagi perhitungan gangguan dan studi stabilitas.

## **2.2 Analisis Aliran Daya**

Menurut Pangloli et al., (2020) analisis aliran daya terutama dalam sistem tenaga listrik adalah analisis yang memaparkan kinerja dari suatu sistem tenaga listrik dan aliran daya baik itu daya aktif maupun daya reaktif bagi suatu keadaan tertentu ketika sistem tengah bekerja. Hasil utama dari analisis aliran daya yaitu besar tegangan dan sudut fasa tegangan pada setiap saluran atau bus, daya nyata dan daya reaktif yang ada pada setiap saluran.

Selanjutnya menurut Situmeang et al., (2019) analisis aliran daya merupakan analisis yang paling penting dari perhitungan-perhitungan jaringan lainnya. Hal itu dikarenakan menyangkut kinerja dari suatu jaringan dalam kondisi operasi normal. Analisis aliran daya mempunyai tujuan untuk mengetahui seberapa besar daya aktif maupun daya reaktif dari satu atau beberapa sumber daya ke beban melalui jaringan listrik.

Indrajaya et al., (2018) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa perhitungan dalam analisis aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik dilakukan dengan cara mengasumsikan sistem tenaga listrik tersebut dalam kondisi seimbang pada ketiga fasanya.

## **2.3 Sistem Distribusi**

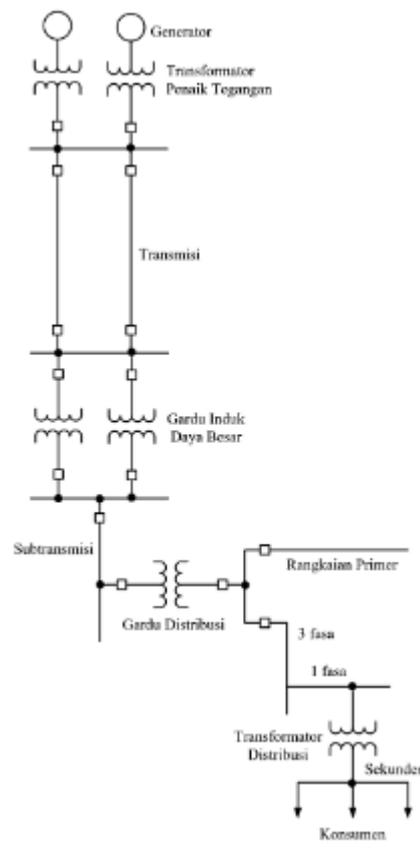
Suatu sistem jaringan distribusi adalah semua bagian peralatan sistem tenaga listrik antara sumber daya besar (*bulk power source*) dan jaringan pelayanan konsumen. Secara garis besar sistem distribusi terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

1. Jaringan subtransmisi
2. Gardu induk
3. Jaringan distribusi primer
4. Gardu transformator distribusi

## 5. Jaringan distribusi sekunder

Secara singkat fungsi bagian-bagian dari sistem distribusi diatas adalah :

1. Jaringan Subtransmisi, berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari sumber daya besar menuju gardu induk yang terletak didaerah beban.
2. Gardu Induk, berfungsi menerima tenaga listrik dari jaringan subtransmisi dan menurunkan tegangannya menjadi tegangan primer.
3. Jaringan Distribusi Primer, berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke gardu distribusi.
4. Gardu Distribusi, berfungsi menurunkan tegangan primer menjadi tegangan sekunder (tegangan yang dipakai konsumen).
5. Jaringan Distribusi Sekunder, berfungsi menyalurkan daya listrik dar gardu distribusi ke konsumen.



**Gambar 2.1.** Sistem Tenaga Listrik

### 2.3.1 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer dapat berupa hantaran udara terbuka, kabel udara, ataupun kabel yang ditanam dalam tanah (*underground cable*). Sedangkan bentuk dari jaringan distribusi primer dibedakan atas 4 bagian, yaitu:

1. Sistem jaringan distribusi primer bentuk radial
2. Sistem jaringan distribusi primer bentuk *loop/ring*
3. Sistem jaringan distribusi primer bentuk *grid/network*
4. Sistem jaringan distribusi primer bentuk *spindle* dan *cluster*

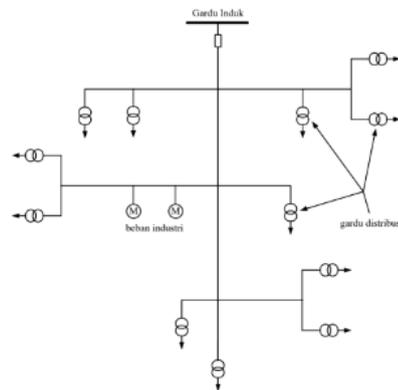
#### 2.3.1.1 Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk Radial

Jaringan distribusi ini paling banyak digunakan karena memiliki konstruksi yang sederhana dan murah. Penggunaannya terutama pada daerah-daerah dengan kerapatan beban yang rendah. Jaringan distribusi ini berpangkal dari sebuah gardu induk atau langsung dari pusat pembangkit, kemudian menyebar menuju gardu-gardu distribusi atau langsung ke konsumen yang memerlukan daya besar, seperti industri. Keandalan sistem ini rendah dan mempunyai jatuh tegangan yang besar, terutama untuk beban di ujung saluran.

Kerapatan arus yang terbesar pada jaringan ini terdapat antara sumber daya transformator distribusi yang pertama, arus akan semakin kecil untuk transformator berikutnya, dan yang terkecil pada ujung jaringan. Bentuk jaringan ini dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Sistem jaringan bentuk radial ini mempunyai kelemahan, yaitu hanya dihubungkan pada suatu sumber daya melalui satu jalan, maka kelangsungan pelayanannya kurang terjamin, karena bila terjadi gangguan pada *feeder* utama yang paling dekat dengan sumber daya akan terjadi pemutusan seluruh pelayanan sampai gangguan tersebut dapat diatasi. Untuk mempertinggi keandalan jaringan ini, maka dibuat beberapa modifikasi sistem, yaitu:

1. Sistem jaringan distribusi primer bentuk radial dengan jaringan penghubung

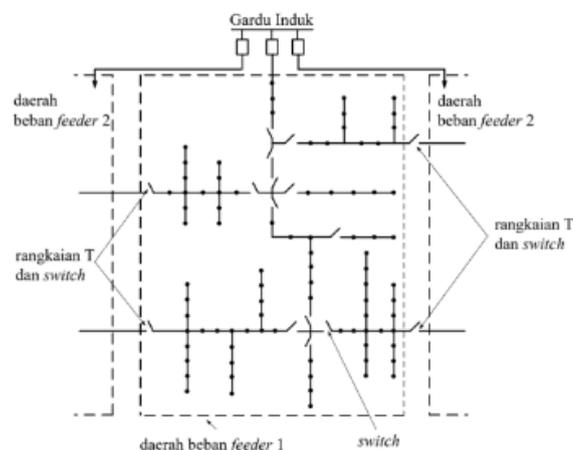
2. Sistem jaringan distribusi primer bentuk radial dengan *feeder* ekspres pusat beban
3. Sistem jaringan distribusi primer bentuk radial paralel
4. Sistem jaringan distribusi primer bentuk radial dengan susunan daerah fasa



**Gambar 2.2.** Jaringan Sistem Distribusi Primer Bentuk Radial

➤ Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk Radial Dengan Jaringan Penghubung

Untuk daerah beban yang berdampingan dapat saling berhubungan melalui suatu jaringan penghubung. Pada sistem distribusi yang menggunakan jaringan penghubung, kapasitasnya harus direncanakan sedemikian sehingga dapat menggantikan jaringan yang terganggu fungsi yang sebenarnya. Jaringan penghubung dipasang diantara dua buah *feeder* yang berdampingan pada tempat-tempat sepanjang dari *feeder* tersebut. Alat-alat pemutus dipasang pada beberapa tempat *feeder* untuk mengisolasi gangguan.

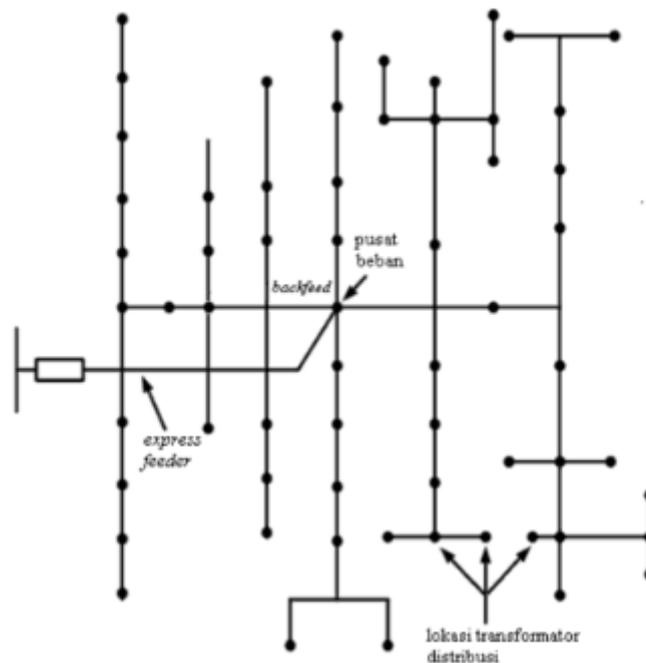


**Gambar 2.3.** Jaringan Distribusi Primer Bentuk Radial dengan Jaringan Penghubung

➤ Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk Radial Dengan *Feeder* Ekspres Beban

Jaringan distribusi primer bentuk ini memiliki pembagian yang tidak dimulai dari sumber daya atau gardu induk, tetapi dimulai dari sumber daya atau gardu induk, tetapi dimulai dari pusat beban. Sistem ini memiliki *feeder* ekspres dimana di sepanjang *feeder* ekspres ini tidak terdapat transformator atau beban lainnya. Dari pusat beban ini keluar cabang-cabang umumnya empat cabang atau empat arah, yang dipasang lateral atau subteral.

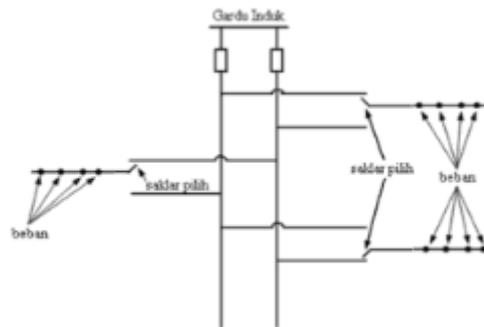
Keuntungan dari sistem ini adalah terjadinya pengurangan jatuh tegangan antara beban terdekat dan beban terjauh dibandingkan dengan jatuh tegangan pada sistem radial yang sederhana. Dengan regulasi yang sama dan pemakaian konduktor pada ratelar dan subteral yang sama, maka sistem ini dapat melayani beban-beban yang besar. Dengan demikian, sistem radial bentuk ini dapat dikatakan mempunyai biaya investasi tiap satu beban yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem jaringan distribusi radian yang sederhana.



**Gambar 2.4.** Distribusi Primer Bentuk Radial dengan Feeder Express Pusat Beban

➤ Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk Radial Paralel

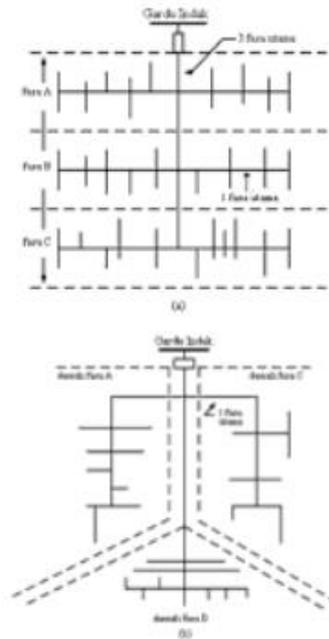
Sistem jaringan distribusi primer bentuk radial paralel mempunyai keandalan yang tinggi. Apabila terjadi gangguan, maka pelayanan beban dipindahkan ke *feeder* cadangan melalui sakelar pilih. Pemindahan ini dapat dilakukan secara manual atau otomatis.



**Gambar 2.5.** Distribusi Primer Bentuk Radial Paralel

➤ Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk Radial Dengan Susunan Daerah Fasa

Pada sistem ini tiap-tiap fasa dari *feeder* tiga fasa ditarik menuju daerah-daerah yang berlainan. Sistem pelayannya dapat berupa sistem radial dengan *feeder* pusat beban. Untuk merencanakan sistem jaringan distribusi primer bentuk ini harus diperhatikan agar beban-bebannya seimbang. Beban tiga fasa tidak diperbolehkan pada daerah yang masih berkembang, sistem ini kurang fleksibel, karena akan mengganggu keseimbangan beban antara ketiga fasa tersebut. Sistem jaringan sangat cocok digunakan pada daerah-daerah yang sudah stabil dan berbeban ringan, seperti daerah perumahan.



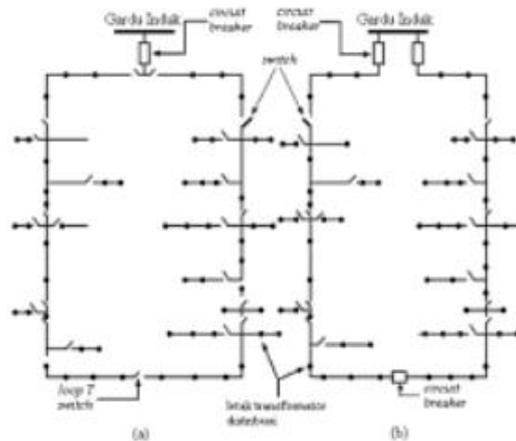
**Gambar 2.6.** Distribusi Primer Bentuk Radial dengan Susunan Daerah Fasa

### 2.3.1.2 Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk Loop/Ring

Sistem jaringan ini dimulai dari rel gardu induk/sumber daya, melalui daerah beban, kemudian kembali lagi ke rel gardu induk/sumber daya yang sama, yang dinamakan sistem jaringan distribusi primer bentuk loop. Jaringan ini ekuivalen dengan dua buah jaringan distribusi primer bentuk radial yang ujung-ujungnya dihubungkan. Sedangkan bila suatu jaringan distribusi primer dimulai dari gardu induk/sumber daya melalui daerah beban dan kembali ke rel gardu induk/sumber daya lain yang dihubungkan dengan rel gardu induk/sumber daya yang pertama, maka bentuk ini dinamakan sistem jaringan distribusi primer bentuk ring.

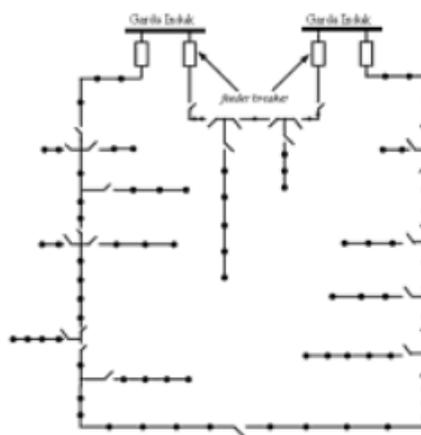
Sistem jaringan distribusi primer bentuk loop/ring merupakan pengembangan dari sistem distribusi radial, dimana pengoperasiannya bekerja sebagai bentuk jaringan distribusi radial biasa. Sistem bentuk ini diperoleh dari menghubungkan dua sistem radial dengan peralatan penghubung berupa *load break switch* yang membagi dua saluran utama. Keandalan bentuk ini lebih tinggi dari sistem radial, sedangkan

kelemahannya adalah semua penghantar besarnya harus sama, serta sanggup memikul beban seluruhnya.



**Gambar 2.7.** Distribusi Primer Bentuk *Loop*

- (a) Dengan menggunakan satu pemutus beban pada rel gardu induk dan dengan satu pemisah loop; (b) Dengan menggunakan dua pemutus beban pada rel gardu induk/sumber daya



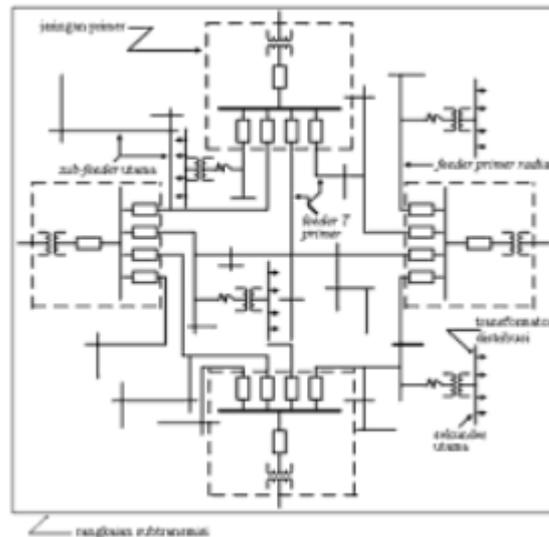
**Gambar 2.8.** Distribusi Primer Bentuk *Ring*

### 2.3.1.3 Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk Grid/Network

Sistem bentuk ini terjadi bila beberapa gardu induk yang saling berinteraksi, sehingga setiap beban memiliki beberapa kemungkinan untuk menerima daya dari segala arah. Kualitas pelayanan dengan bentuk ini jauh lebih baik dari bentuk radial atau bentuk loop/ring. Bentuk ini memerlukan biaya investasi yang sangat besar untuk

pembangunannya, namun sangat cocok bila digunakan pada daerah dengan kerapatan beban yang tinggi serta membutuhkan pelayanan yang kontinu. Pada sistem bentuk ini, jika salah satu *feeder* mendapat gangguan, maka konsumen masih dapat disuplai dari *feeder* yang lainnya. Sistem bentuk ini juga mempunyai unit network sebagai pengamanan sistem yang terdiri dari:

1. *Moin Ciriut Breaker*.
2. *Network Protector*.
3. *Break Feeder*.
4. Perlengkapan pemutus lainnya.

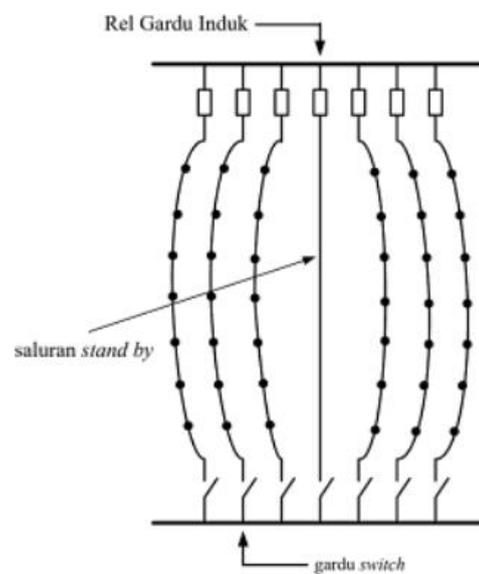


**Gambar 2.9.** Distribusi Primer Bentuk *Grid/Network*

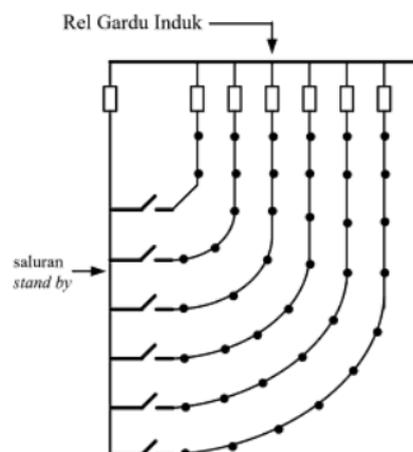
#### 2.3.1.4 Sistem Jaringan Distribusi Primer Bentuk *Spindle* dan *Cluster*

Sistem jaringan distribusi primer bentuk *spindle* dan *cluster* ini, merupakan perluasan dari bentuk radial. Pada sistem bentuk ini, daya listrik yang disalurkan dari gardu induk/sumber daya melalui gardu-gardu refleksi atau disebut juga sebagai gardu *switching*. Selain itu, ada juga saluran bebas yang disebut sebagai *stand by line* yang langsung menuju gardu *switching* melalui jalan yang terpendek. Beban-beban dihubungkan pada *feeder* utamat, sedangkan pada *stand by line* tidak dihubungkan beban.

Pada keadaan normal semua sekiadar beban di gardu *witching* dalam keadaan terbuka, sedangkan pada keadaan salah satu *feeder* mengalami gangguan dan setelah disolasi, maka sakelar beban *stand by line* dan *feeder* yang mengalami gangguan akan ditutup. Sistem ini akan memutuskan daerah gangguan untuk sementara sampai gangguan berhasil diatasi. Bila pada sistem jaringan spindle. Ini *feeder-feeder*-nya yang utama dihubungkan pada *stand by line* dan tidak pada gardu *switching*, maka dinamakan sebagai sistem jaringan distribusi primer bentuk cluster.



**Gambar 2.10.** Distribusi Primer Bentuk *Spindle*

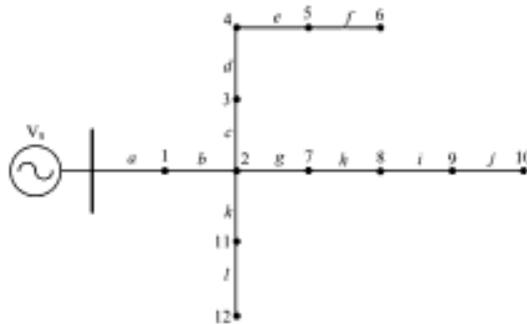


**Gambar 2.11.** Distribusi Primer Bentuk *Cluster*

### 2.3.2 Aplikasi Matriks Topologi Pada Sistem Distribusi Listrik Bentuk Radial

#### 2.3.2.1 Menentukan Arus Listrik pada Setiap Segmen dengan Matriks Topologi Sistem Distribusi Listrik Bentuk Radial

Setiap jaringan distribusi mempunyai topologi yang mengandung  $n$  buah *node*  $n$  buah segmen, seperti dapat dilihat pada contoh topologi struktur radial jaringan distribusi pada **Gambar 2.12**.



**Gambar 2.12.** Contoh Jaringan Distribusi Radial

Arus dengan segmen dihitung berdasarkan matriks topologi seperti pada **Gambar 2.13**.

dengan ketentuan:

$i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$ , adalah indeks dari *node* yang mempresentasikan titik pembebanan.

$j = a, b, c, d, \dots, n$ , adalah indeks dari segmen yang menghubungkan dua titik beban, masing-masing dengan tahanan  $R_a, R_b, R_c, R_d, \dots, R_n$  dan dapat ditulis;

$T_i = T_1, T_2, T_3, T_4, \dots, T_n$ , merupakan representasi arus yang diinjeksikan pada setiap *node*.

$I_j = I_a, I_b, I_c, I_d, \dots, I_n$ , merupakan representasi arus yang mengalir pada segmen.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \\ I_g \\ I_h \\ I_i \\ I_j \\ I_k \\ I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \\ K_7 \\ K_8 \\ K_9 \\ K_{10} \\ K_{11} \\ K_{12} \end{bmatrix}$$

Berdasarkan hukum Kirchhoff

$$T_i = \sum_{j=a_i}^n I_j \tag{2.1}$$

Dengan  $a_i$  adalah kumpulan titik-titik beban yang terhubung di *node* ke- $i$ , pada suatu jaringan distribusi. Dalam hubungan matriks, Persamaan (2.1) dapat ditulis sebagai berikut:

$$[T] = [A][I] \tag{2.2}$$

Dengan

$[T]$  adalah matriks kolom ( $n \times 1$ ) dari arus injeksi.

$[A]$  adalah matriks ( $n \times n$ ) yang menggambarkan topologi jaringan.

$[I]$  adalah matriks kolom ( $n \times 1$ ) dari arus cabang.

Pada jaringan bentuk radial, sebuah *node* merupakan titik pembebanan sehingga arus injeksi pada setiap *node* adalah negatif, maka

$$[T_1] = [-K_1] \tag{2.3}$$

Dengan  $K_1$  adalah arus beban pada *node* ke- $i$

Dengan demikian persamaan (2.2) dapat diubah menjadi

$$[-K] = [A][I] \tag{2.4}$$

Atau

$$[I] = [A][K] \tag{2.5}$$

Dengan

$$[A][K] = [I]$$

$[A]$  adalah matriks ( $n \times n$ ) yang merupakan matriks invers topologi jaringan.

$[K]$  adalah matriks kolom ( $n \times 1$ ) dari arus beban.

Keistimewaan dari matriks  $[A]$  adalah suatu matriks *upper triangular* dan seluruh elemennya yang tidak sama dengan nol dan bernilai satu.

Arus segmen dapat ditentukan dari hubungan matriks topologi jaringan. Agar  $I_j = I_a, I_b, I_c, I_d, \dots, I_p$  merupakan arus beban maksimum. Untuk menentukan besar  $K_i = K_1, K_2, K_3, K_4, \dots, K_{12}$  beban, maka dilakukan pendekatan-pendekatan sebagai berikut :

1. Tegangan Kualitas Minimal Ditetapkan.
  - a. Untuk Jaringan Tegangan Menengah adalah 10% dibawah tegangan nominal, maka  $V_1 = 0,95 V_n$
  - b. Untuk Jaringan Tegangan Rendah adalah 5% dibawah tegangan nominal, maka  $V_1 = 0,975 V_n$
2. Daya  $[KW]$  yang diserap oleh beban dapat dari masing-masing unit transformator distribusi.
3. Faktor kerja beban dianggap tetap selama beban beroperasi.

Berdasarkan ketiga hal tersebut, maka untuk jaringan tegangan menengah pada sistem distribusi primer, besar arus ( $K_1$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$K_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times 0,95 \times V_n \times \cos \theta} \quad (2.6)$$

Dengan :

$P_1$  adalah daya aktif ( $kW$ ) yang diserap oleh beban ke- $i$ , yang diambil beban puncaknya dari masing-masing unit transformator distribusi.

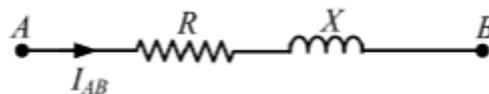
$V_n$  adalah tegangan nominal sistem.

$\cos \phi_i$  adalah faktor kerja beban ke- $i$

### 2.3.2.2 Perhitungan Rugi-Rugi Daya Maksimum di Jaringan

Rugi-rugi daya pada jaringan tergantung pada besar arus total yang mengalir melalui jaringan tersebut. Rugi-rugi daya akan maksimum bila arus yang mengalir melalui jaringan adalah arus maksimum. Rugi-rugi daya terdiri dari dua bagian, yaitu rugi-rugi daya aktif ( $\Delta P$ ) dan rugi-rugi daya reaktif ( $\Delta Q$ ) yang dapat dilihat pada

**Gambar 2.13.**



**Gambar 2.13.** Jaringan Distribusi dengan Panjang AB dan Impedansi  $Z = R + jX$

Dari **Gambar 2.13.**, rugi-rugi daya aktif disebabkan oleh arus ( $I_{AB}$ ) dan resistansi ( $R$ ), sedangkan rugi-rugi daya reaktif disebabkan oleh arus ( $I_{AB}$ ) dan reaktansi ( $X$ ) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta P_{maks} = (I_{AB})^2, R \quad (2.7)$$

$$\Delta Q_{maks} = (I_{AB})^2, X \quad (2.8)$$

Penjumlahan secara vektor antara kedua daya tersebut merupakan rugi-rugi daya total kompleks ( $\Delta S$ ), yang besarnya

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta P)^2 + (\Delta Q)^2} \quad (2.9)$$

Atau

$$\Delta S_{maks} = \sqrt{(\Delta P_{maks})^2 + (\Delta Q_{maks})^2} \quad (2.10)$$

Rugi-rugi daya di suatu jaringan distribusi merupakan jumlah seluruh rugi-rugi daya di setiap seluruh pada jaringan tersebut, di mana

$$\Delta P_t = \sum \Delta P_i \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_t = \sum \Delta Q_i \quad (2.12)$$

$$\Delta S_t = \sum \Delta S_i \quad (2.12)$$

### 2.3.3 Studi Aliran Daya pada Sistem Distribusi Primer dengan Tipe Jaringan Radial

Masalah yang dihadapi jaringan distribusi adalah bagaimana tentang menyalurkan daya (kuantitas maupun kualitasnya) dengan baik pada saat tertentu maupun masa yang akan datang. Karenanya perlu analisis yang tepat, yaitu analisis aliran Daya untuk mengetahui tegangan, arus, daya, dan rugi-rugi pada pengoperasian normal. Jaringan distribusi yang paling umum digunakan adalah jaringan distribusi dengan struktur Topologi Radial, sebab sistem ini sederhana sesuai dengan kriteria-kriteria yang dituntut oleh sistem Distribusi. Perhitungan Aliran Daya jaringan distribusi radial yang dibahas ini menggunakan metode Teknik Topologi. Objek dari perhitungannya adalah untuk mengetahui:

1. Tegangan tiap *node* dari sistem jaringan distribusi radial
2. Arus dan daya yang mengalir pada tiap cabang jaringan
3. Rugi-rugi tiap cabang dari jaringan distribusi

#### 2.3.3.1 Teknik Topologi

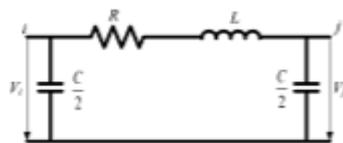
Teknik topologi merupakan teknik menganalisis jaringan listrik yang menggambarkan elemen jaringan sebagai segmen garis yang disebut cabang dan titik hubungan sebagai node yang keseluruhannya tergambar dalam satu *graph* dari jaringan. Pemakaian pada jaringan distribusi tegangan menengah dan rendah memungkinkan penyederhanaan yang bertujuan untuk penyederhanaan perhitungan, yaitu dengan masukan efek kapasitansi sebagai bagian dari arus injeksi tiap *node*.

- Beberapa Definisi dalam Teknik topologi
  - a) **Cabang**, segmen garis yang menggambarkan elemen jaringan yang terhubung antara dua buah node.

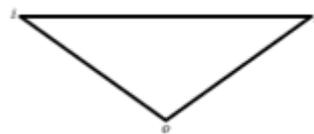
- b) **Node**, titik yang terletak pada tiap ujung dari cabang dari cabang dan menggambarkan suatu titik hubung.
- c) **Oriented graph**, merupakan *graph* yang *node* dan cabangnya telah diberi nomor serta memiliki arah aliran arus.
- d) **Subgraph**, bagian cabang-cabang dan *node-node* dari *graph*..
- e) **Loop**, kumpulan cabang-cabang dan *node-node* dalam *graph* yang membentuk lintasan tertutup.
- f) **Tree**, *graph* sederhana yang tidak ada cabang membentuk *loop*. Jaringan radial merupakan suatu *tree*.

➤ Representasi Jaringan

Representasi sebagai jaringan 4 kutub bila kapasitas saluran tidak diabaikan, seperti **Gambar 2.14.** (a), dan **Gambar 2.14.** (b) adalah topologi jaringan untuk **Gambar 2.14.** (a). Saluran seperti direpresentasikan sebagai rangkaian *phi* ( $\phi$ ) nominal.



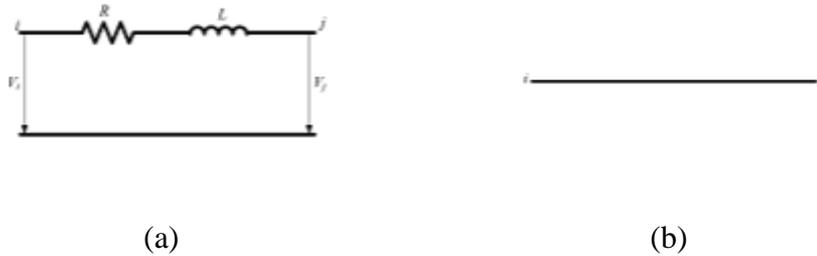
(a)



(b)

**Gambar 2.14.** (a) Representasi saluran ( $i - j$ ) 2 kutub (b) Topologi jaringan untuk gambar jaringan **Gambar 2.14.** (a)

Representasikan sebagai jaringan 2 kutub bila pengaruh kapasitansi saluran diabaikan, seperti **Gambar 2.15.** (a) dan **Gambar 2.15.** (b) adalah topologi jaringan untuk **Gambar 2.15.** (a).



**Gambar 2.15.** (a) Representasi saluran  $(i - j)$  2 kutub (b) Topologi jaringan untuk gambar jaringan **Gambar 2.15.** (a)

➤ Topologi Jaringan Radial

Dibandingkan dengan struktur jaringan lainnya, jaringan radial memiliki beberapa sifat khusus yang dapat dimanfaatkan untuk mempermudah pemecahan masalah, yaitu:

- Pada jaringan radial hanya terdapat satu *node* sumber daya, dan *node-node* lain merupakan *node* beban.
- Arus injeksi positif terdapat pada *node* sumber daya, sedangkan pada *node* lain arus injeksi berharga negatif.

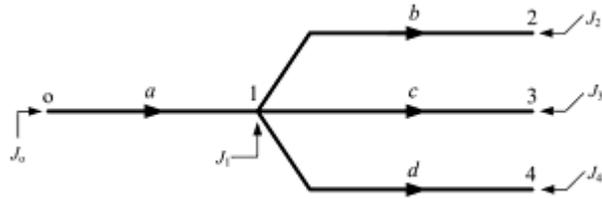
Pada suatu jaringan radial berlaku hubungan

$$b = n + 1 \quad (2.13)$$

Dengan  $b$  merupakan jumlah cabang, dan  $n$  merupakan jumlah *node*.

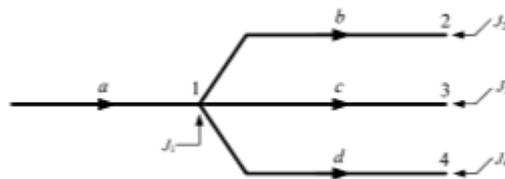
Sedangkan contoh, jaringan radial dengan 5 *node* dan 4 cabang topologinya pada **Gambar 3.3**. Ordo matriks topologinya, jumlah *node*  $n$  (baris) dan cabang  $b$  (kolom) pembentukannya berdasarkan:

- Elemen berharga 0 bila cabang  $j$  dan *node*  $i$  tidak berhubungan.
- Elemen berharga +1 bila cabang  $j$  berhubungan dengan *node*  $i$  dan arah alirannya meninggalkan *node*  $i$ .
- Elemen berharga -1 bila cabang  $j$  berhubungan dengan *node*  $i$  dan arah alirannya menuju *node*  $i$ .



**Gambar 2.16.** Topologi Jaringan Radial dengan  $n = 5$  dan  $b = 4$

Dari **Gambar 2.16.** diketahui  $J_0 = I_0$  jadi, jaringan digambarkan seperti **Gambar 2.17.**



**Gambar 2.17.** Penyederhanaan Jaringan Topologi Radial

Maka, matriks topologi jaringan radial dapat dituliskan seperti **Gambar 2.18** berikut.

$$[TR] = \begin{array}{c|cccc} & \begin{matrix} b \\ a \end{matrix} & \begin{matrix} b \\ c \\ d \end{matrix} & \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} n \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{matrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{matrix} \end{array}$$

**Gambar 2.18.** Matriks Topologi Jaringan Radial dari **Gambar 2.16.**

### 2.3.3.2 Persamaan Karakteristik Jaringan

Karakteristik internal merupakan karakteristik jaringan berdasarkan pada kondisi yang terjadi di cabang. Variabel-variabel  $V$  (jatuh tegangan di cabang) dan  $I$  (arus cabang). Hubungan keduanya adalah:

$$[V] = [z][I] \tag{2.14}$$

Dengan  $[z]$  adalah matriks impedansi cabang.

Karakteristik eksternal adalah karakteristik jaringan berdasarkan yang terjadi pada *node*. Variabel-variabelnya  $V$  (tegangan pada *node*) dan (arus injeksi). Hubungan keduanya dilakukan melalui karakteristik internalnya, yaitu:

$$[J] = [TR][I] \quad (2.15)$$

$$[V] = [TR]^2[V] \quad (2.16)$$

Dengan  $[TR]^2$  adalah transpose matriks topologi.

Sehingga hubungan antara arus injeksi dengan tegangan tiap *node* adalah:

$$[J] = [TR][y][V] = [TR][y][TR]^2[V]$$

$$[J] = [Y][V] \quad (2.17)$$

Dengan  $[Y]$  adalah matriks  $Y_{bus}$

### 2.3.3.3 Persamaan Karakteristik Jaringan Radial

Pada jaringan radial, arus injeksi pada *node* beban berharga negatif, dengan demikian diperoleh:

$$K_i = -J_i \quad (2.18)$$

Dengan  $K_i$  adalah arus injeksi negatif pada *node*  $i$ .

Arus injeksi untuk *node* beban dapat dituliskan:

$$J_i = \frac{-Pb_i + jQb_i}{V_i^*}$$

Atau

$$K_i = \frac{Pb_i + jQb_i}{V_i^*} \quad (2.19)$$

Dengan demikian besarnya arus injeksi negatif pada *node*  $i$  dapat dihitung sebagai harga absolut dari Persamaan (2.19), yaitu:

$$|K_i| = -[TR][I]$$

$$[I] = [TR]^{-1}[K] = [A][K] \quad (2.20)$$

dengan  $[A] = [TR]^{-1}$  adalah matriks topologi invers jaringan radial.

Matriks  $A$  dapat diturunkan langsung dari *oriented graph* jaringan berdasarkan ketentuan-ketentuan sebagai berikut:

1. Baris menunjukkan cabang dan kolom menunjukkan *node*.
2. Elemen bernilai +1 bila arus yang sampai ke *node n* melewati cabang ke  $b$ .
3. Elemen bernilai 0 bila ketentuan kedua di atas tidak dipenuhi.

Maka penurunan langsung matriks  $A$  berdasarkan *Gambar 2.16*. seperti *Gambar 2.18*. berikut.

$$[A] = \begin{array}{c|cccc} & \begin{array}{c} n \\ b \end{array} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline a & & 1 & 1 & 1 & 1 \\ b & & 0 & 1 & 0 & 0 \\ c & & 0 & 0 & 1 & 0 \\ d & & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

**Gambar 2.19.** Penurunan Langsung Matriks  $A$  Berdasarkan *Gambar 2.17*.

### 2.3.3.4 Jatuh Tegangan pada Jaringan Radial

Pada jaringan radial, jatuh tegangan dihitung untuk tiap cabang dan tiap *node* (jatuh tegangan total).

Persamaan (2.20) distribusikan ke persamaan (2.14) didapat

$$[V] = [z][A][K] \quad (2.21)$$

Sedangkan jatuh tegangan tiap *node* terhadap *node* 0 adalah:

$$[U] = [A]^t[V] \quad (2.22)$$

Persamaan (2.21) disubstitusikan ke persamaan (2.22), didapat

$$[U] = [Z][K] \quad (2.23)$$

$$[Z] = [A]^t[z][A] \quad (2.24)$$

Dengan  $[Z]$  adalah matriks  $Z_{bus}$  jaringan radial.

Tegangan tiap *node* dapat dihitung dengan persamaan seperti berikut:

$$V_i = V_0 - U_i \quad (2.25)$$

Dengan  $V_0$  adalah tegangan pada *node* 0 (sumber daya).

### 2.3.3.5 Persamaan Daya

Persamaan daya suatu jaringan secara umum dituliskan:

$$S_{i,j} = P_{i,j} + jQ_{i,j} = V_i I \quad (2.26)$$

$$S_{j,i} = P_{j,i} + jQ_{j,i} = -(V_j) I \quad (2.27)$$

Dengan  $S_{i,j}$  adalah daya yang mengalir dari *node*  $i$  ke *node*  $j$ ,  $V_i$  adalah tegangan pada *node*  $i$ ,  $I = I_{i,j}$  adalah arus yang mengalir dari *node*  $i$  ke *node*  $j$ ,  $S_{j,i}$  adalah daya yang mengalir dari *node*  $j$  ke *node*  $i$ ,  $V_j$  adalah tegangan pada *node*  $j$ , dan  $(I) = I_{j,i}$  adalah arus yang mengalir dari *node*  $j$  ke *node*  $i$ .

Jumlah aljabar dari Persamaan (2.26) dan Persamaan (2.27) adalah rugi-rugi daya saluran, yaitu :

$$\begin{aligned} S_{i,j} + S_{j,i} &= V_i I - V_j I \\ &= V_{i,j} I = z_{i,j} I \cdot I \\ &= (R_{i,j} + jX_{i,j}) I^2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Atau

$$p + jq = R_{i,j} I^2 + j(X_{i,j} I^2) \quad (2.29)$$

Dengan  $R_{i,j}$  adalah resistansi saluran  $ij$  dan  $X_{i,j}$  reaktansi saluran  $ij$ .

Secara matriks persamaanya dituliskan sebagai berikut :

$$[p] = [R][I^2] \text{ dan } [q] = [X][I^2] \quad (2.30)$$

Terlihat bahwa :

$$Pb_i - jQb_i$$

$$U_i = Z_i \cdot K_i \text{ dan } K_i = V_i$$

berarti

$$\Delta U_i = Z_i \cdot \frac{Pb_i - jQb_i}{V_i^*} \quad (2.31)$$

Maka

$$V_i = V_0 - Z_0 \cdot \frac{Pb_i - jQb_i}{V_i^*} \quad (2.32)$$

Dari persamaan (2.32) terlihat bahwa terdapat dua variable  $V_i$ , yaitu  $V_i$  diruas kiri dan *konyugate* di ruas kanan. Sehingga untuk mendapatkan nilai  $V_i$  harus dilakukan asumsi tegangan. Perhitungan dilakukan untuk nilai *magnitude*-nya. Nilai-nilai kapasitas saluran yang diperhitungkan pada beban reaktif dan impedansi cabang dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$z = |z|(\cos \vartheta + j \sin \vartheta) \quad (2.33)$$

$$= r + jx$$

$$K_i = \frac{\sqrt{(Pb_i)^2 + [Qb_i - \sum_{j \in \alpha i} \left(\frac{y'_{ij}}{2}\right)(V_i)^2]^2}}{V_i} \quad (2.34)$$

### 2.3.3.6 Algoritma Perhitungan Aliran Daya Jaringan Radial Secara Iterasi

Tahap-tahap proses perhitungan :

- Tegangan awal *node i* diasumsikan bernilai 1 per unit (1 *pu*), atau  $V_i = 1 \text{ pu}$ .
- Membentuk matriks  $A$
- Membentuk matriks  $Z_{bus}$  yaitu  $[Z] = [A]^t [z] [A]$ .
- Menghitung arus injeksi pada *node i* dengan persamaan

$$K_i = \frac{\sqrt{(Pb_i)^2 + [Qb_i - \sum_{j \in \alpha i} \left(\frac{y'_{ij}}{2}\right)(V_i)^2]^2}}{V_i}$$

- Menghitung jatuh tegangan total yaitu  $[U] = [Z] \cdot [K]$ .
- Menghitung tegangan pada *node i* yaitu  $V_i = V_0 - U_i$ .
- Memeriksa apakah  $V_i$  sudah konvergen dengan menggunakan indeks presisi yaitu  $V_{ik} - V_{ik-1}$  dengan  $k$  indeks iterasi dan indeks presisi.

Bila pada tahap g. tidak terpenuhi, maka proses perhitungan diulang mulai tahap d., dan sebelumnya menetapkan bahwa  $V_{ik} - V_{ik-1}$ . Demikian seterusnya sampai tahap g. terpenuhi. Setelah iterasi selesai, maka proses dilanjutkan dengan :

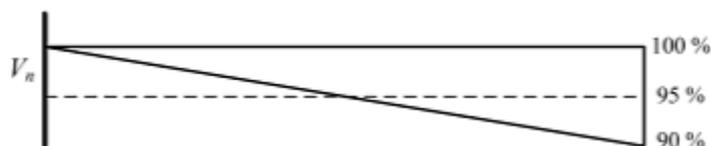
- Menghitung arus  $[I] = [A][K]$ .
- Menghitung jatuh tegangan tiap cabang  $[V] = [z][I]$ .
- Menghitung daya yang mengalir pada tiap cabang dengan :

$$S_{i,j} = V_i I_a \quad S_{j,i} = V_j I_a$$

- Menghitung rugi-rugi daya tiap cabang dengan  $\Delta S = S_{i,j} + S_{j,i}$ .

### 2.3.3.7 Algoritma Perhitungan Aliran Daya Jaringan Radial Tanpa Iterasi

Tahap-tahap perhitungan tanpa iterasi hampir sama dengan tahap perhitungan dengan menggunakan iterasi. Bedanya ada pada asumsi tegangan. Perhitungan tanpa menggunakan iterasi tegangan nominal pada sisi beban kualitas tegangannya diasumsikan untuk jaringan tegangan menengah sekitar 90% dengan mengambil nilai rata-ratanya yaitu 95% atau 0,95, sedangkan bagi jaringan tegangan rendah di tetapkan sebesar 95% dengan mengambil nilai rata-ratanya yaitu 97,5% atau 0,975. Pengambilan nilai rata-rata tegangan nominal pada sisi beban ini untuk jaringan tegangan menengah dapat dilihat pada **Gambar 2.20**.



**Gambar 2.20.** Diagram Asumsi Tegangan pada Sisi Beban untuk Jaringan Tegangan Menengah

Dari **Gambar 2.20**, didapatkan tegangan pada sisi beban sebagai berikut :

$$V_b = 95\%V_n = 0,95V_n$$

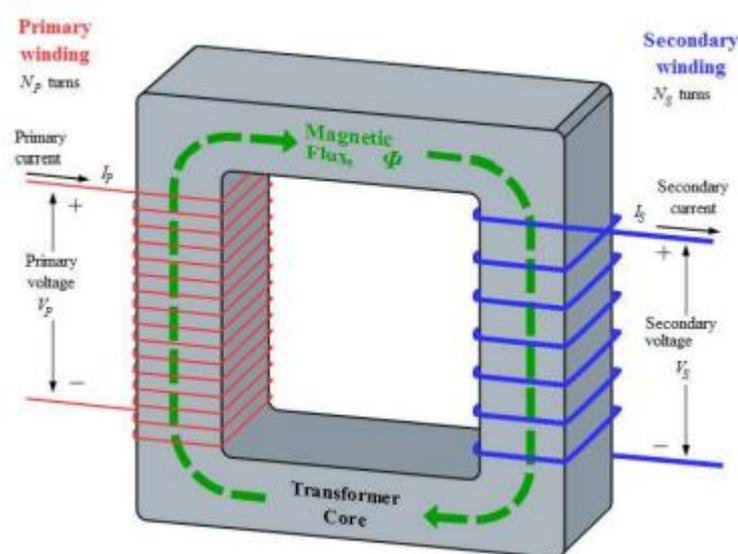
Tegangan pada jaringan radial diasumsikan terdistribusi merata sepanjang jaringan.

## 2.4 Trafo Tenaga

Dalam buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga yang disusun oleh PT PLN (Persero) trafo merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari dua atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik,

mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076-1 Tahun 2011). Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet/fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.

Arus AC yang mengalir pada belitan primer membangkitkan flux magnet yang mengalir melalui inti besi yang terdapat diantara dua belitan, flux magnet tersebut menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder akan terdapat beda potensial. Trafo memiliki beberapa jenis, berdasarkan fungsinya trafo tenaga dibedakan menjadi trafo pembangkit, trafo gardu induk/penyaluran, dan trafo distribusi.



**Gambar 2.21.** Elektromagnetik pada Trafo

## 2.5 Rugi-Rugi Daya oleh Undervoltage

Rugi-rugi daya dapat disebabkan oleh adanya *undervoltage* yang umumnya terjadi pada jaringan yang terlalu panjang dan saluran distribusi memiliki level tegangan menengah serta rendah sehingga Untuk memperbaiki sistem tenaga listrik dapat dilakukan dari dua sisi, yaitu sisi pembangkit dan sisi beban, untuk perbaikan

tegangan suatu bus dapat dilakukan dengan metode *tap changer* trafo atau pemasangan *capasitor bank*. *Tap changer* merupakan metode yang merubah jumlah lilitan primer atau sekunder, jika jumlah lilitan diubah maka rasio perbandingan trafo akan ikut berubah (Wirandi et al., 2020).

Menurut Roza (2018), guna mengatasi jatuh tegangan yang diterima oleh pihak pengguna (konsumen) maka pihak PT. PLN (Persero) melakukan evaluasi untuk mengatasi jatuh tegangan yang berdasarkan Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) No.72 Tahun 1987 akan batas-batas toleransi turun tegangan adalah 5% dari tegangan kerja bagi sistem distribsusi jenis radial. Adapun tegangan distribusi tersebut terjadi pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) ke Jaringan Tegangan Rendah (JTR) dimana sebelumnya tegangan tersebut ditransformasikan oleh transformator distribusi dari 20 kV menjadi 380/220 Volt, jaringan ini dikenal pula dengan jaringan distribusi sekunder.

*Tap changer* pada transformator ada dua jenis yaitu *Off Load Tap Changer* yang pengaplikasiannya tanpa beban dan *On Load Tap Changer* (OLTC) yang pengaplikasiannya menggunakan beban. Pada penelitian ini peneliti akan menggunakan OLTC.

*On Load Tap Changer* (OLTC) merupakan peralatan bagian dari suatu trafo tenaga. Dengan adanya OLTC, fungsi dari suatu trafo tenaga mampu menjaga kestabilan tegangan output pada suatu trafo tenaga ke pusat beban. Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan output/sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan input/primernya. Penyesuaian ratio belitan disebut Tap Changer. Proses perubahan

ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban (On Load Tap Changer) atau saat trafo tidak berbeban (Off Load Tap Changer). Sehingga dapat disimpulkan, proses perubahan ratio antara belitan primer dengan sekunder dilakukan saat trafo tenaga tersebut dalam posisi berbeban atau menyuplai daya listrik ke pusat beban. Suatu Tap Changer terdiri dari beberapa rangkaian/ komponen, yaitu :

- Selector Switch
- Diverter Switch
- Tahanan Transisi

(Tiyon Tanto, 2015)

Dalam buku Dasar Teknik Tenaga Listrik karya Drs. Yon Rijono perhitungan OLTC berdasar pada perbandingan antara sisi primer dan sisi sekunder dengan diasumsikan bahwa beban seimbang. Perhitungannya menggunakan persamaan :

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} = \alpha$$

Dimana:

$V_p$  = Tegangan Primer

$V_s$  = Tegangan Sekunder

$N_p$  = Belitan Primer

$N_s$  = Belitan Sekunder

$I_p$  = Arus Primer

$I_s$  = Arus Sekunder

$\alpha$  = Rasio Transformasi

Menurut Kartoni & Ervianto (2016) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa besarnya rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada sistem jaringan tenaga listrik tergantung pada jenis dan panjang penghantar, tipe jaringan tenaga listrik, kapasitas trafo, tipe beban, faktor daya, dan besarnya jumlah daya terpasang serta banyaknya

pemakaian beban-beban yang bersifat induktif yang menyebabkan meningkatnya kebutuhan daya reaktif. Untuk mengurangi rugi-rugi daya dan drop tegangan bisa diminimalkan dengan berbagai cara seperti penambahan pembangkit, penambahan kapasitor bank, melakukan perubahan kembali sistem dengan cara rekonfigurasi sistem (*tap changer*).

Proses terjadinya kehilangan tegangan dan daya listrik yang diterima oleh pusat beban, yang biasa dikenal dengan istilah jatuh tegangan dan rugi-rugi daya. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya yaitu panjang, jenis dan luas penampang saluran yang digunakan untuk proses penyaluran energi listrik dalam sistem jaringan tenaga listrik. Selain itu jarak juga merupakan faktor yang dapat mempengaruhi rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya menggambarkan adanya daya yang terbuang sehingga berakibat pada daya yang diterima oleh konsumen lebih kecil dibandingkan pada saat dikirim dari sumber. Pembuangan daya biasanya dikonversikan dalam bentuk panas pada sistem jaringan tenaga listrik dalam kurun waktu tertentu. Hal itu mengakibatkan energi listrik yang diterima besarnya lebih kecil dari pada energi listrik yang dikirim. Secara umum rugi-rugi daya disebabkan oleh tahanan penghantar peristiwa korona (Rifal et al., 2019).

Sedangkan menurut Mardhatillah & Ervianto (2017) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa rugi-rugi daya dapat menyebabkan hilangnya sebagian energi pada jaringan, sehingga dapat mengurangi total energi yang disalurkan ke konsumen. Hilangnya sebagian energi ini mengakibatkan peralatan listrik yang digunakan konsumen tidak bekerja dengan maksimal dan dapat terjadi kerusakan. Untuk itu perlu dilakukan perhitungan rugi-rugi daya untuk meningkatkan pelayanan dan efisiensi pada penyulang. Pengendalian rugi-rugi daya penting agar kerugian besar tidak ditanggung oleh penyedia maupun konsumen listrik. Penyebab terjadinya rugi-rugi daya saluran distribusi antara lain kandungan tahanan dalam penghantar ataupun

keadaan ilmiah jaringan itu sendiri seperti panjang jaringan yang sering bertambah.

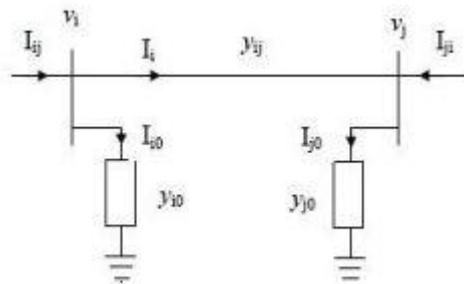
Aliran daya sangat erat hubungannya dengan rugi-rugi daya. Sependapat dengan hal itu Rizki Tirta Nurgraha (2014) mengungkapkan bahwa jaringan listrik seperti pada **Gambar 2.21**, salurannya dapat digambarkan dengan model yang mana impedansi-impedansinya telah diubah mejadi admintansi-admintansi per-unit pada *base*/dasar MVA. Daya reaktif dan aktif pada bus  $i$  adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.35)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.36)$$

Saluran yang tersambung antara bus  $i$  dan  $j$  pada **Gambar 2.21**. Arus saluran  $I_{ij}$  diukur pada bus  $i$  dan dianggap positif untuk arah  $i$  ke  $j$ . sehingga dapat ditulis pada persamaan (2.37) :

$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.37)$$



**Gambar 2.22.** Jaringan Aliran Daya Untuk Perhitungan Rugi-Rugi Daya

Dengan,

$I_i$ : Arus pada saluran antara bus  $i$  dan bus  $j$

$I_{i0}$ : Arus pada saluran *half line charging*

$y_{ij}$ : Admitansi saluran antara bus  $i$  dan bus  $j$

$y_{i0}$ : *Half line charging*

$V_i$ : Tegangan bus  $i$

$V_j$ : Tegangan bus  $j$

Arus saluran  $I_{ji}$  diukur pada bus  $j$  dan dianggap positif untuk arah  $j$  ke  $i$ , dapat ditulis pada persamaan (2.38) :

$$I_{ji} = -I_i + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.38)$$

Daya kompleks  $S_{ij}$  dari bus  $i$  ke  $j$  dan  $S_{ji}$  dari bus  $j$  ke  $i$  dinyatakan pada Persamaan (2.39) dan (2.40).

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.39)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.40)$$

Rugi daya dalam saluran  $i$ - $j$  adalah penjumlahan aljabar dari daya yang ditentukan dari persamaan (2.37) dan (2.38), sehingga dapat dinyatakan pada persamaan (2.41).

$$S_{L\ ij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.41)$$

Sehingga persamaan untuk memperoleh total rugi saluran untuk sistem dengan jumlah  $n$  bus adalah pada Persamaan (2.42).

$$S_{LT} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{L\ ij} \quad (2.42)$$

Dengan,

$S_{L\ ij}$ : Rugi daya pada saluran antara bus  $i$  dan  $j$

$S_{LT}$  : Total rugi daya

## 2.5 Aplikasi ETAP 12.6.0 dan Matlab

Penggunaan program digital komputer atau aplikasi untuk memecahkan masalah atau analisis aliran daya pada zaman sekarang ini berkembang sangat pesat. Banyak

*developer* yang mengembangkan aplikasi mengenai masalah pada aliran daya. Salah satu aplikasi yang digunakan untuk mensimulasi atau memecahkan permasalahan tentang aliran daya yang sangat populer adalah aplikasi ETAP.

Untuk mengkalkulasi sebuah sistem aliran daya yang cukup besar dan rumit, penggunaan aplikasi perlu dibutuhkan untuk mendapatkan dan mempercepat perhitungan untuk mendapatkan hasil yang baik serta lebih akurat. Aplikasi ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*) merupakan salah satu aplikasi yang berguna untuk melakukan perhitungan sistem aliran daya dimana aplikasi ini dapat menganalisis sistem tenaga listrik yang cukup besar (Wirandi, 2020).

Sedangkan menurut Samsinar & Wiyono (2019) ETAP adalah sarana untuk melakukan kajian terhadap studi aliran daya dan jatuh tegangan pada sistem jaringan listrik. Selain itu ETAP juga dapat digunakan untuk menganalisis dan mensimulasikan analisis harmonik dan transien serta dapat menentukan arus pendek maksimum.

Menurut *user guide* ETAP 12.6.0, ETAP merupakan aplikasi yang didesain dan dikembangkan oleh orang-orang teknik untuk orang teknik lain yang membutuhkan kemudahan dalam menganalisis atau memecahkan suatu permasalahan tentang jaringan sistem tenaga listrik. ETAP diciptakan untuk menangani ketidakstabilan atau kerusakan sistem tenaga listrik pada spektrum industri yang luas dan sudah dikemas dalam satu paket yang terintegrasi dengan beberapa tampilan antarmuka seperti jaringan AC dan DC, jalur kabel, jaringan ground, GIS (*Geographic Information System*), panel, *arc flash*, WTG, koordinasi atau selektivitas perangkat pelindung, dan diagram sistem kendali AC dan DC. ETAP memungkinkan penggunaanya dengan mudah untuk membuat dan mengedit serta merancang *single line diagram* (SLD) atau *one line diagram* (OLD), sistem jalur kabel bawah tanah, sistem pengkabelan tiga fasa, koordinasi atau selektivitas plot pada *on time* dan waktu akan datang, skematik informasi sistem geografis, demikian juga dengan sistem pentanahan.

Menurut Tjolleng (2017) Matlab merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk pemrograman, analisis, serta komputansi teknis dan matematis berbasis matriks. Matlab adalah singkatan dari *Matrix Laboratory* karena mampu menyelesaikan masalah perhitungan dalam bentuk matriks. Matlab memiliki keunggulan umum seperti analisis, eksplorasi data, pengembangan algoritma, pemodelan dan simulasi, visualisasi plot dalam bentuk 2D dan 3D, hingga pengembangan aplikasi antar muka grafis.