

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Terdahulu**

Penelitian yang dilakukan oleh Rizki Awaludin Siregar dari Universitas Muhammadiyah Malang “*Analisis Perbaikan Profil Tegangan Pada Jaringan Distribusi 20 kV Menggunakan Kapasitor Bank dan Tap Transformator (Studi Kasus Di GI Sengkaling)*” didalamnya menyatakan setelah penambahan kapasitor bank, tegangan pada sistem mengalami peningkatan yang signifikan dan tidak melebihi batas toleransi tegangan dan penurunan tegangan menjadi 4,6% serta faktor daya meningkat. Untuk pengaturan rasio tap *transformator*, peningkatan jatuh tegangan terlihat pada sisi sekunder *transformator stasiun relai* yang disusun sesuai dengan beda tegangan pada sisi primer. Hasil yang didapat setelah penerapan kapasitor bank dan tap transformator adalah nilai jatuh tegangan menjadi berkurang menjadi 3,5% [1].

Penelitian yang dilakukan oleh Ibnu Syahri dari Universitas Tanjungpura Pontianak yang berjudul “*Perhitungan Dan Upaya Perbaikan Untuk Meminimalkan Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Tegangan Menengah*” didalamnya menyatakan efisiensi yang baik akan dicapai bila rugi-rugi daya dapat ditekan sekecil mungkin. Perhitungan pada penelitian ini menggunakan solusi aliran daya metode pendekatan langsung pada sistem distribusi dan solusi aliran daya metode *newton-raphson*. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode pendekatan langsung, rugi-rugi daya aktif yang terjadi pada kondisi eksisting sebesar 3,3494% dan berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode *newton-raphson* sebesar 3,3504%. Besar persentase rugi-rugi daya aktif tersebut sudah sesuai dengan capaian target rugirugi daya dari pemerintah berdasarkan Rencana Strategis (Renstra) 2015-2019 sebesar 8,39% di tahun 2019 [2].

Penelitian yang dilakukan oleh Abdul Rahman dari Universitas Tanjungpura Pontianak yang berjudul “*Evaluasi Dan Usulan Perbaikan Jatuh Tegangan Dan Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi (20 kV) PT PLN (Persero) Rayon Sekura*” yang didalamnya menyatakan bahwa jika dibandingkan dengan standar

dari SPLN Nomor 72 tahun 1987, presentase jatuh tegangan pada penyulang sekura setelah pemasangan kapasitor bank sudah mencapai nilai standar dimana presentase jatuh tegangannya tidak melebihi 5% dari tegangan kerja [3].

Penelitian yang dilakukan oleh Andi Suprianto dari Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang berjudul “*Studi Analisis Profil Tegangan Dan Rugi-Rugi Daya Serta Energi Tidak Tersalurkan Pada Penyulang OGF Bangau Sakti Di PT PLN (Persero) Rayon Panam*” didalamnya menyatakan metode perbaikan profil tegangan dan rugi-rugi daya terdapat tiga metode yang digunakan yaitu: metode perbaikan dengan pengaturan *tap changer*, metode perbaikan dengan pemasangan kapasitor bank, dan metode perbaikan dengan penggantian luas penampang penghantar. Selanjutnya menghitung energi yang tidak tersalurkan pada penyulang OGF 15 bangau sakti pada bulan November 2016 saat terjadi pemadaman akibat gangguan. Berdasarkan hasil analisis, skenario perbaikan pengaturan *tap changer*. Profil tegangan pada setiap bus mengalami kenaikan, pada bus 29 menjadi 19,465 kV dan bus 48 menjadi 19,449 kV. Rugi-rugi daya berkurang sebesar 9,8 kW dan 24,3 kVAR. Skenario perbaikan pemasangan kapasitor bank. Profil tegangan pada setiap bus mengalami kenaikan, pada bus 29 menjadi 19,283 kV dan bus 48 menjadi 19,267 kV. Rugi-rugi daya berkurang sebesar 49,9 kW dan 153 kVAR. Skenario perbaikan penggantian luas penampang. Profil tegangan pada setiap bus mengalami kenaikan, pada bus 29 menjadi 19,013 kV dan bus 48 menjadi 18,996 kV. Rugi-rugi daya berkurang sebesar 15 kW dan 4,6 kVAR. Skenario perbaikan pemasangan Kapasitor Bank mampu memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi daya yang besar. Dimana memiliki profil tegangan pada bus 26 sampai bus 29 pada jaringan utama dan bus 46 sampai bus 49 pada jaringan percabangan tegangan pada setiap bus sudah di atas tegangan 19 kV. Selanjutnya Energi yang tidak tersalurkan pada saat pemadaman dibulan November sebesar 105.458,495 kWh atau kerugian dalam bentuk rupiah adalah Rp.141.103.164,6/bulan [4].

Penelitian yang dilakukan oleh Ardhi Surya Nopianto dari Universitas Tanjungpura Pontianak yang berjudul “*Perhitungan Jatuh Tegangan Dan Susut Daya Serta Upaya Perbaikan Penyaluran Daya Listrik Pada PT PLN (Persero) Rayon Sambas*” yang didalamnya menyatakan bahwa salah satu upaya perbaikan

penyaluran daya yaitu dengan mengganti luas penampang penghantar pada seksi saluran yang mengalami persentase jatuh tegangan yang melebihi standar yang diizinkan [5].

Dari beberapa kajian terdahulu yang telah dipaparkan di atas, adapun perbedaan dengan penelitian ini dilakukan adalah menggunakan metode *Newton Raphson* dengan aplikasi ETAP 19.0.1 untuk melakukan simulasi aliran daya dan perhitungan, pada penelitian ini juga dilakukan penambahan pembebanan 50%, variasi pembebanan 50% dan 80% dan perluasan jaringan.

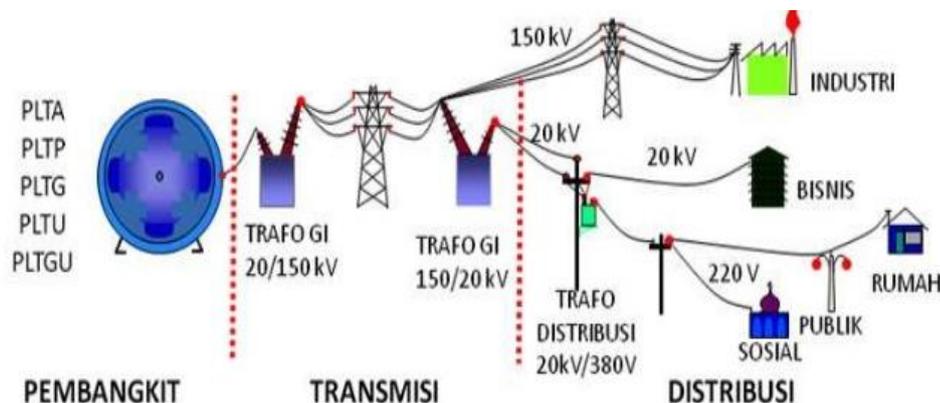
## 2.2 Sistem Tenaga Listrik

Struktur tenaga listrik atau sistem tenaga listrik sangat besar dan kompleks karena terdiri dari atas komponen peralatan listrik atau mesin listrik seperti generator, transformator, beban, alat-alat pengaman dan pengaturan yang saling dihubungkan membentuk suatu sistem yang di gunakan untuk membangkitkan, menyalurkan, dan menggunakan energi listrik. Oleh karena itu penyaluran tenaga listrik dari pusat tenaga listrik sampai ke pelanggan memerlukan berbagai penanganan teknis [1].

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik skala besar memiliki tegangan yakni antara 11 kV sampai 24 kV, setelah itu tegangan dinaikan di gardu induk (GI) dengan transformator *step up* menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV, atau 500 kV kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi. Tujuan dari menaikkan tegangan ini adalah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada jaringan transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir pada penghantar secara matematis disimbolkan dengan  $P = I^2 \cdot R$ . Apabila daya listrik sama dengan tegangan yang diperbesar maka arus yang mengalir akan semakin kecil [1].

Dari saluran transmisi tegangan akan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan menggunakan transformator *step down* di GI distribusi, kemudian penyaluran pada tahap ini disebut dengan jaringan distribusi primer. Pada jaringan distribusi primer gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan kembali dengan trafo distribusi menjadi tegangan rendah yakni 220/380 Volt. Pada jaringan distribusi sekunder ini disalurkan ke konsumen. Hal ini tergambar jelas bahwa sistem

distribusi merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan [1].



**Gambar 2.1** Sistem Penyaluran Tenaga Listrik

Secara mendasar sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian utama yaitu [1]:

1. Sistem pembangkit merupakan struktur tenaga listrik atau sistem tenaga listrik yang sangat besar dan kompleks karena terdiri atas komponen peralatan mesin listrik seperti generator, transformator, beban dan alat-alat pengaman dan pengaturan yang saling dihubungkan membentuk suatu sistem yang digunakan untuk membangkitkan, menyalurkan dan menggunakan energi listrik.
2. Sistem transmisi merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik hingga ke saluran distribusi atau GI dan biasanya tegangan pada sistem ini relatif tinggi.
3. Sistem distribusi merupakan subsistem yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari GI sampai ke konsumen, dan biasanya tegangan pada sistem ini tegangan menengah hingga tegangan rendah.

### 2.3 Konfigurasi Jaringan Distribusi Primer

Konfigurasi jaringan distribusi primer pada suatu sistem jaringan distribusi sangat menentukan mutu pelayanan yang akan di peroleh khususnya mengenai kontinuitas pelayanannya. Adapun jenis jaringan primer yang biasa digunakan yaitu [9]:

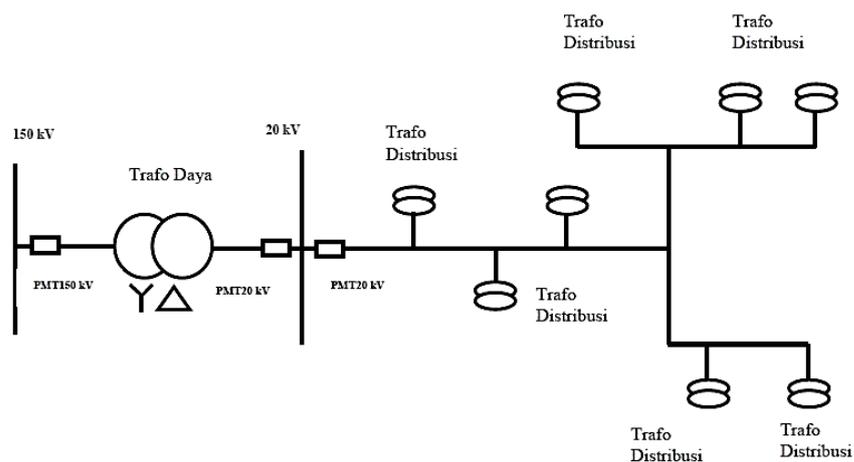
1. Jaringan Distribusi Tipe Radial;
2. Jaringan Distribusi Tipe Loop;
3. Jaringan Distribusi Tipe Spindel.

Pemilihan struktur JTM tergantung pada kualitas pelayanan yang diinginkan, dimana kualitas yang dimaksud memiliki beberapa unsur yaitu kontinuitas pelayanan, pengaturan tegangan dan tegangan kedip yang diizinkan.

### 2.3.1 Jaringan Distribusi Tipe Radial

Sistem distribusi dengan tipe radial seperti gambar yang ada di bawah ini adalah sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial. Jaringan radial adalah jaringan yang saat ini banyak digunakan karena jaringan sangatlah sederhana dalam segi konstruksi dan biaya yang relatif murah, selain itu jaringan ini mungkin yang paling banyak digunakan di Indonesia [9].

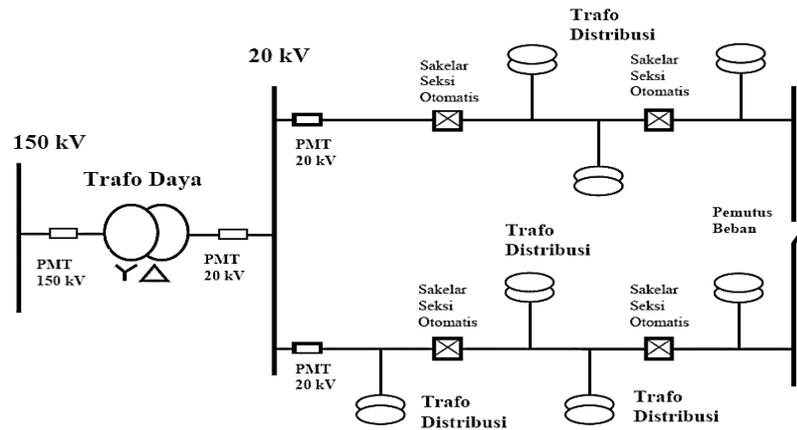
Kerugian jaringan tipe radial yaitu apabila jalur utama pasokan terputus maka seluruh penyulang akan padam. Kerugian lain mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling akhir kurang baik, hal ini dikarenakan besarnya rugi-rugi pada saluran.



**Gambar 2.2** Konfigurasi Jaringan Distribusi Tipe Radial

### 2.3.2 Jaringan Distribusi Tipe Loop

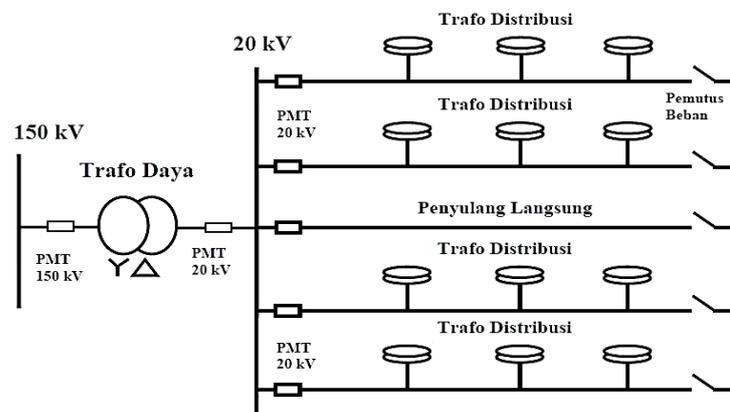
Pada sistem jaringan distribusi tipe ini terdapat penyulang yang terkoneksi membentuk loop atau rangkaian tertutup untuk menyuplai gardu distribusi. Gabungan dari dua struktur radial menjadi keuntungan pada pola loop karena pasokan daya lebih terjamin dan memiliki keandalan yang cukup [9].



**Gambar 2.3** Konfigurasi Jaringan Distribusi Tipe Loop

### 2.3.3 Jaringan Distribusi Tipe Spindel

Pada sebuah spindel biasanya terdiri dari beberapa penyulang aktif dan sebuah penyulang cadangan (*express*) yang di hubungkan melalui gardu hubung (GH), pola spindel biasanya digunakan pada JTM yang menggunakan kabel tanah/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) [9].



**Gambar 2.4** Konfigurasi Jaringan Distribusi Tipe Spindel

## 2.4 Gardu Distribusi (GD)

GD merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan distribusi ke pelanggan (konsumen) atau untuk membagikan/mendistribusikan pada beban/konsumen baik konsumen tegangan menengah atau konsumen tegangan rendah. Transformator distribusibusu

digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusitegangan tinggi menjadi tegangan menengah atau tegangan terpakai pada jaringan distribusi tegangan rendah (*step down transformer*), misalkan tegangan 20 kV menjadi 380/220 Volt. Transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik (*step up transformer*), hanya digunakan pada pusat pembangkit tenaga listrik agar tegangan yang didistribusikan pada suatu jaringan yang panjang tidak mengalami penurunan tegangan yang berarti tidak boleh melebihi ketentuan jatuh tegangan yang diperbolehkan 5% dari tegangan semula [11].

Jenis transformator yang digunakan adalah transformator satu fasa dan transformator tiga fasa. Adakalanya untuk melayani beban tiga fasa digunakan tiga buah transformator satu fasa dengan hubungan bintang atau hubungan delta. Sebagian besar pada JTM sekarang ini dipergunakan transformator tiga fasa untuk jenis pemasangan luar yang diletakan di atas tiang dengan ukuran lebih kecil dibandingkan dengan jenis pemasangan dalam atau gardu beton, yaitu jenis yang diletakan di dalam rumah gardu [11].

## 2.5 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan dalam persen atau besaran volt atau kV. Jatuh tegangan di atur oleh SPLN Nomor 72 tahun 1987 dimana jatuh tegangan yang diizinkan adalah 5%. Perhitungan jatuh tegangan pada JTM 20 kV 3 fasa menggunakan persamaan [18].

$$\Delta V \sqrt{3} \times I \times L \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (2.1)$$

Atau selisih tegangan kirim dikurangi tegangan terima [18]

$$\Delta V = V_S - V_R \text{ (kV)} \quad (2.2)$$

Jatuh tegangan dalam persentase menggunakan persamaan [18]

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V}{V_S} \times 100\% \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk menghitung regulasi tegangan atau % VR pada saluran penghantar menggunakan persamaan [19].

$$\% \text{ VR} = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100 \quad (2.4)$$

Dimana

$\Delta V$  = jatuh tegangan (kV atau %)

$I$  = arus yang mengalir pada penghantar (A)

$L$  = panjang penghantar (kms)

$R$  = resistansi saluran (Ohm)

$X$  = reaktansi saluran (Ohm)

$V_S$  = tegangan sumber / kirim (kV)

$V_R$  = tegangan ujung penerima (kV)

$\cos \theta$  = faktor daya

$\sin \theta$  = faktor daya

$\%VR$  = regulasi tegangan pada saluran (%)

$|V_S|$  = nilai mutlak tegangan ujung kirim (kV)

$|V_R|$  = nilai mutlak tegangan terima (kV)

## 2.6 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Dalam sistem tenaga listrik arus bolak balik (AC) terdapat tiga jenis daya yang dikenal yaitu [11]:

### 2.6.1 Daya Aktif

Daya aktif (daya nyata) adalah daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin listrik atau keperluan lainnya. Daya aktif diperoleh dari besar tegangan di kali dengan besaran arus dan faktor dayanya [11].

$$P = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \cos \theta \quad (2.5)$$

Dimana:

$P$  = daya aktif (W)

$V_{L-L}$  = tegangan line-line (V)

$I$  = arus yang mengalir pada penghantar (A)

$\cos \theta$  = faktor daya

### 2.6.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai

untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini merupakan hasil kali antara besarnya tegangan dan arus yang dipengaruhi oleh faktor daya [11].

$$Q = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \times \sin \theta \quad (2.6)$$

Dimana:

Q = daya reaktif (VAR)

$V_{L-L}$  = tegangan line-line (V)

I = arus yang mengalir pada penghantar (A)

$\sin \theta$  = faktor daya

### 2.6.3 Daya Semu

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi, daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang mengalir melalui penghantar [11].

$$S = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \quad (2.7)$$

Dimana:

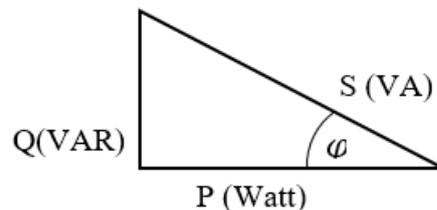
S= daya semu (VA)

$V_{L-L}$  = Tegangan line-line (V)

I= Arus yang mengalir pada penghantar (A)

### 2.6.4 Segitiga Daya

Dari ketiga daya di atas maka daya listrik digambarkan sebagai segitiga siku, yang secara vektoris adalah penjumlahan daya aktif dan reaktif sebagai resultannya adalah daya semu seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini [11]



**Gambar 2.5** Segitiga Daya

Berlaku hubungan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \times \sqrt{3} \text{ (VA)} \quad (2.8)$$

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta \text{ (Watt)} \quad (2.9)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \theta \text{ (VAR)} \quad (2.10)$$

## 2.7 Faktor Daya

Faktor daya ( $\cos \theta$ ) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S) yang digunakan dalam listrik bolak balik (AC) atau beda sudut fasa V dan I yang biasanya dinyatakan dalam  $\cos \varphi$ . Untuk arus dan tegangan sinusoidal dapat di hitung menggunakan rumus [11]:

$$\text{Faktor daya} = \frac{P}{S} = \frac{V.I.\cos \theta}{V.I} = \cos \theta \quad (2.11)$$

Dimana:

$\cos \theta$  = faktor daya

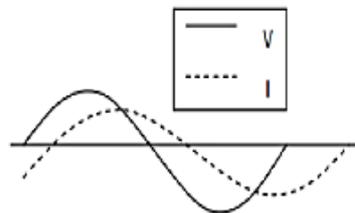
P = daya aktif (Watt)

S = daya semu (VA)

V = tegangan (V)

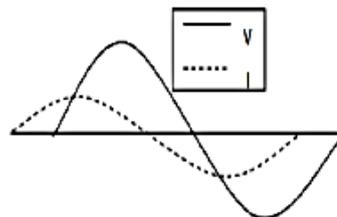
I = arus (A)

Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi beban listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif dan arus terbelakang dari tegangan, V mendahului I dengan sudut  $\varphi$ .



**Gambar 2.6** Tegangan Mendahului Arus Sebesar Sudut  $\varphi$

Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi beban listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif dan arus mendahului tegangan V terbelakang dari I dengan sudut  $\varphi$ .



**Gambar 2.7** Arus Mendahului Tegangan Sebesar Sudut  $\varphi$

Faktor daya unity saat  $\cos \varphi$  adalah satu, dimana tegangan sefasa dengan arus, faktor daya unity dapat terjadi apabila jenis beban adalah resistif murni.



**Gambar 2.8** Arus Dan Tegangan Sefasa ( $\cos \varphi = 1$ )

## 2.8 Rugi-Rugi Daya Listrik

Rugi-rugi daya adalah suatu bentuk kehilangan energi listrik yang berasal dari sejumlah energi listrik yang disediakan oleh PLN dengan sejumlah energi yang terjual ke konsumen dan mengganggu efisiensi sistem distribusi listrik [11].

Apabila suatu penghantar dialiri arus listrik secara terus menerus akan menimbulkan panas yang timbul akibat adanya energi listrik yang mengalir pada penghantar tersebut dan menyebabkan kerugian pada daya listrik tersebut. Semakin lama arus mengalir maka semakin panas juga penghantar dan semakin banyak juga energi listrik yang hilang. Hal inilah yang merugikan, karena jika energi hilang, maka tegangan pada ujung penghantar tersebut akan berkurang [11].

$$P_l = 3 I^2 R l \quad (2.12)$$

Dimana:

$P_l$  = Rugi-rugi daya Aktif (kW)

$I$  = Arus yang mengalir melalui penghantar (A)

$R$  = Resistansi penghantar (Ohm)

$l$  = Panjang penghantar (kms)

## 2.9 Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik

Aliran daya dari jaringan listrik memberikan solusi dalam keadaan mantap (*steady state*) melalui beberapa parameter listrik seperti arus, tegangan dan rugi-rugi dapat dihitung. Aliran daya sangat penting untuk analisa sistem distribusi, masalah yang berhubungan dengan perencanaan, desain, operasi dan pengendalian [6]. Tujuan utama dari studi aliran daya adalah [6]:

1. Untuk mengetahui daya aktif dan reaktif tiap pembangkit.
2. Untuk mengetahui besar tegangan dan sudut fasa pada setiap bus.
3. Untuk mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada setiap komponen tenaga listrik (penghantar dan *transformator*).

Oleh karena itu, dalam studi aliran daya diperlukan suatu proses perhitungan yang sistematis melalui model jaringan dan persamaan aliran daya. Dalam studi aliran daya, ada tiga penggolongan bus, yaitu [8]:

1. *Load Bus* (P-Q Bus)

Pada bus ini besarnya daya aktif dan daya reaktif telah diketahui, misalnya data dari realisasi pengukuran daya pada waktu lampau. Sedangkan besarnya tegangan dan sudut daya adalah besaran yang dihitung.

2. *Voltage controlled bus* (P-V Bus)

Bus pengendali atau sering disebut bus pembangkit. Pada bus ini terdapat generator yang besaran tegangan dan daya aktifnya telah diketahui, sedangkan besaran daya reaktif dan sudut daya tidak diketahui. Apabila pada bus tidak diketahui daya reaktif Q, maka sebelum iterasi dilakukan terlebih dahulu dihitung daya reaktif  $Q = Q_{hitung}$  bila  $Q_{hitung} > Q_{maks}$ , aka ditetapkan  $Q = Q_{maks}$  dan tipe bus berubah menjadi tipe bus beban demikian V harus di hitung. Bila  $Q_{hitung} < Q_{min}$ , maka  $Q = Q_{min}$ . Dan tipe bus berubah menjadi bus beban juga dengan demikian V harus di hitung. Bila  $Q_{min} \leq Q_{hitung} \leq Q_{maks}$  maka status bus tidak berubah.

3. *Slack bus* (bus referensi)

Bus ini merupakan bus anyun (*swing bus*), pada bus ini nilai tegangan dan sudut tegangan diberikan, sedangkan tegangan dijadikan referensi untuk sudut tegangan yang lain. Jadi pada bus ayun, nilai tegangan dan sudut daya tetap, sedangkan besaran daya aktif dan daya reaktif yang dihitung.

## 2.10 Perhitungan Aliran Daya Dengan Metode Newton Raphson

Dasar dari metode Newton Raphson dalam penyelesaian aliran daya adalah deret Taylor untuk suatu fungsi dengan dua variabel lebih, metode Newton Raphson menyelesaikan masalah aliran daya dengan menggunakan suatu set persamaan non linear untuk menghitung besarnya tegangan dan sudut fasa tegangan tiap bus.

Daya Injeksi pada bus i adalah [12]:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.13)$$

Dalam hal ini dilakukan pemisahan daya aktif dan daya reaktif pada bus i. Pemisahan ini akan menghasilkan satu set persamaan simultan non linear. Dalam koordinat polar diketahui [12]:

$$|V_i| \angle \delta_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (2.14)$$

$$|V_j| \angle \delta_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad (2.15)$$

$$|Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\theta_{ij}} \quad (2.16)$$

Karena:

$$e = \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) + j \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.17)$$

Maka pemisahan daya pada bus  $i$  menjadi komponen real dan imajiner:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.18)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.19)$$

Nilai  $P_i$  dan  $Q_i$  telah diketahui, tetapi nilai  $V_i$  dan  $\delta_i$  tidak diketahui kecuali pada slack bus. Kedua persamaan linier tersebut dapat diuraikan menjadi suatu set persamaan simultan linier dengan cara menyatakan hubungan antara perubahan daya aktif  $\Delta P_i$  dan daya reaktif  $\Delta Q_i$  terhadap perubahan magnitude tegangan  $\Delta V_i$  dan sudut fasa tegangan  $\delta_i$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Elemen-elemen matriks Jacobi dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan daya aktif dan daya reaktif pada bus  $i$  dari persamaan (2.18) dan persamaan (2.19) yang diturunkan sebagai berikut [12]:

Elemen-elemen off diagonal dari  $J_1$  adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.21)$$

Elemen diagonal dari  $J_1$  adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.22)$$

Elemen diagonal off diagonal adalah  $J_2$  adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_i Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.23)$$

Elemen diagonal dari  $J_2$  adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i}^n |V_i Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.24)$$

Elemen luar diagonal  $J_3$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.25)$$

Elemen diagonal  $J_3$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.26)$$

Elemen luar diagonal  $J_4$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), \quad j \neq i \quad (2.27)$$

Elemen diagonal  $J_4$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -2|V_i Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i}^n |V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.28)$$

Elemen-elemen matriks Jacobi dihitung setiap akan melakukan iterasi.

Perhitungan iterasi dimulai dengan memberikan perkiraan magnitudo tegangan dan sudut fasa tegangan mula-mula. Perubahan dalam daya aktif dan daya reaktif yang telah dijadwalkan dikurangi dengan daya aktif dan daya reaktif yang di hitung dari persamaan (2.21) sampai dengan persamaan (2.28) sebagai berikut [12]:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_{i(sch)} - P_{i(calc)}^{(k)} \quad (2.29)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_{i(sch)} - Q_{i(calc)}^{(k)} \quad (2.30)$$

Elemen-elemen matriks Jacobi dihitung menggunakan magnitudo tegangan dan sudut fasa tegangan estimasi mula-mula. Dengan menggunakan metode invers langsung, maka persamaan linear (2.20) dapat dipecahkan untuk mendapatkan nilai-nilai magnitudo tegangan dan sudut fasa tegangan estimasi yang baru pada tiap bus (kecuali *slack bus*) sebagai berikut [12]:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.32)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta |V_i|^{(k)} \quad (2.33)$$

Proses iterasi kembali lagi ke proses awal dan hal ini terus diulangi sampai  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  untuk semua bus selain *slack bus* memenuhi harga toleransi yang di berikan (biasanya diambil  $\leq 0,0001$ ). Jadi iterasi selesai apabila  $\Delta \delta_i^{(k)} \leq 0,0001$  dan  $\Delta |V_i|^{(k)} \leq 0,0001$ .

Keterangan simbol pada rumus di atas adalah sebagai berikut:

- $P_i$  = daya aktif pada bus ke-i
- $Q_i$  = daya reaktif pada bus ke-i
- $V_i^*$  = *conjugate* tegangan pada bus ke-i

$V_i$  dan  $\delta_i$  = magnitudo dan sudut fasa tegangan pada bus ke-i

$V_j$  dan  $\delta_j$  = magnitudo dan sudut fasa tegangan pada bus ke-j

$Y_{ij}$  dan  $\theta_{ij}$  = magnitudo dan sudut fasa tegangan elemen matriks admitansi Y

$P_{i(calc)}^{(k)}$  = daya aktif hasil perhitungan pada bus ke-i

$P_{i(sch)}$  = daya aktif yang terjadwal pada bus ke-i

$\Delta P_i$  = koreksi daya aktif perhitungan pada bus ke-i

$Q_{i(calc)}^{(k)}$  = daya reaktif hasil perhitungan pada bus ke-i

$Q_{i(sch)}$  = daya reaktif yang terjadwal pada bus ke-i

$\Delta Q_i$  = koreksi daya reaktif pada perhitungan bus ke-i

$\Delta \delta_i$  = koreksi sudut fasa tegangan pada bus ke-i

$\Delta |V_i|$  = koreksi magnitudo tegangan pada bus ke-i

### 2.11 Perhitungan Rugi-Rugi Energi Listrik

Perusahaan pemasok listrik mengetahui kerugian yang cukup besar setiap bulannya karena hilangnya energi akibat rugi-rugi daya. Besaran daya yang hilang saat proses transmisi harus dihitung dan diantisipasi, sehingga daya yang hilang masih dalam batas yang ditolelir. Setelah diketahui rugi-rugi daya maka rugi-rugi energi listrik dapat dihitung menggunakan persamaan [11]:

$$E_l = P_l \times t \quad (2.34)$$

Dimana:

$t = 5$  jam (waktu beban

$E_l$  = Rugi-rugi energi (kWh)                      puncak dari jam 17.00 –

$P_l$  = Rugi-rugi daya (kW)                              jam 22.00)

$t =$  Waktu (jam)     $t = 30$  hari (selama satu bulan)

### 2.12 Jenis Kawat Penghantar

Jenis kawat penghantar yang bisa digunakan pada jaringan distribusi yaitu [4]:

#### 2.12.1 Tembaga

Tembaga murni merupakan logam liat yang berwarna kemerah-merahan dan mempunyai tahanan jenis  $0,0175 \Omega\text{m}$ . Tembaga mempunyai daya hantar listrik yang tinggi yaitu  $57 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  pada suhu  $20^\circ\text{C}$ . Tembaga mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi. Massa jenis tembaga murni pada  $20^\circ\text{C}$  adalah  $0.89 \text{ g/cm}^3$ , titik beku  $1083^\circ\text{C}$ . Kekuatan tarik tembaga berkisar antara 20 hingga 40

$\text{kg}/\Omega\text{mm}^2$ , kekuatan tarik batang tembaga akan naik setelah batang tembaga diperkecil penampangnya untuk di jadikan kawat berisolasi atau kabel [4].

Koeffisien suhu( $\alpha$ ) tembaga 0,004 /°C. Terdapat dua macam konduktivitas pada tembaga yaitu tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%) dan tembaga dengan konduktivitas 97,5% (Cu 97,5%).

Kelebihan kawat tembaga antea lain: tembaga merupakan penghantar yang baik dibandingkan dengan penghantar alumunium dengan diameter dan luas penampang yang sama besar, tembaga mempunyai konduktivitas dan kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan alumunium, tembaga memiliki ketahanan terhadap korosi dan oksidasi.

Kekurangan kawat tembaga antara lain: harga kawat tembaga lebih mahal dibandingkan dengan alumunium, dengan besar hambatan yang sama, tembaga lebih berat dari alumunium.

### **2.12.2 Alumunium**

Alumunium merupakan suatu logam yang ringan beratnya kira-kira sepertiga dari tembaga dan mempunyai tahanan jenis 0,0285  $\Omega\text{m}$ . Alumunium mempunyai warna keperak-perakan, alumunium mempunya massa jenis 2,7  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $\alpha$  koefisiennya  $1,4 \times 10^5$ , titik leleh 658°C dan tidak korosif. Daya hantar alumunium sebesar 35  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$  atau kira-kira 61,4% daya hantar tembaga kekuatan tariknya 9  $\text{kg}/\text{mm}^2$ . Alumunium mempunyai konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar alumunium terdiri dari beberapa jenis yaitu:

1. *All Alluminium Conductor* (AAC) yaitu kabel yang mempunyai inti konduktor yang terbuat dari alumunium tanpa isolasi.
2. *All Alluminium Alloy Conductor* (AAAC) yaitu kabel yang mempunyai inti konduktor yang terbuat dari campuran logam alluminium tanpa isolasi.
3. *Alluminium Conductor Stell Reimforced* (ACSR) yaitu kabel yang berinti alluminium dengan selubung pita baja.
4. *Alluminium Conductor Alloy Reinforced* (ACAR) yaitu kabel yang berinti alluminium dengan selubung campuran logam.

Kelebihan kawat alumunium antara lain: lebih murah dibandingkan kawat tembaga, berat kawat alumunium lebih ringan dari kawat tembaga dengan diameter

yang sama, kemampuan hantar listrik tidak jauh dengan tembaga apabila di kompensasi dengan ukuran kawat yang lebih besar.

Kekurangan kawat alumunium antara lain: daya hantar listrik dari alluminium lebih rendah dibandingkan dengan tembaga, mempunyai konduktivitas dan daya tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan tembaga dan untuk memperbesar kuat tarik kawat alluminium digunakan campuran alumunium (*alluminium alloy*), alumunium tidak mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi.

### **2.13 Electric Transient And Analysis Program (ETAP)**

*Electric Transient And Analysis Program* (ETAP) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk melakukan simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time*. Fitur yang terdapat didalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi, dan sistem distribusi tenaga listrik. ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*single line diagram*) dan jalur sistem pertahanan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain sebagai berikut: aliran daya, hubung singkat, starting motor, transient stability, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

Dalam tiap perencanaan harus menyediakan *data base* peralatan yang berhubungan dengan analisa yang akan dilakukan. Di antara *data base* peralatan tersebut adalah data generator, data trafo, dan data penghantar.

ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, yaitu *American National Standards Institute* (ANSI) dan *International Electrotechnical Commission* (IEC). Pada dasarnya perbedaan yang terdapat di dalam kedua standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan. ANSI menggunakan frekuensi 60 Hz dan IEC menggunakan frekuensi 50 Hz. Frekuensi yang berbeda mengakibatkan perbedaan pada spesifikasi peralatan dan simbol elemen listrik yang digunakan. Fitur yang terdapat untuk simulasi analisis/studi antara lain aliran daya, hubung singkat, koordinasi proteksi, stabilitas transient, *starting* motor dan lain sebagainya.

ETAP mengintegrasikan data-data rangkaian tenaga listrik seperti kapasitas pembangkit, panjang jaringan, resistansi jaringan per kms, kapasitas busbar, rating trafo, impedansi urutan nol, positif dan negatif suatu peralatan listrik seperti trafo, generator dan penghantar. ETAP memungkinkan kita untuk bekerja secara langsung dengan diagram satu garis grafis dan sistem kabel bawah tanah *raceway* [3]. Program ini telah dirancang berdasarkan tiga konsep kunci [3]:

#### 1. *Virtual Reality Operasi*

Program operasi menyerupai sistem operasi listrik nyata sedekat mungkin. Sebagai contoh, ketika membuka atau menutup sebuah pemutus sirkuit, tempat elemen dari layanan, atau mengubah status operasi dari motor, unsur *de-energized* dan sub-sistem yang ditunjukkan pada diagram satu garis berwarna abu-abu. ETAP menggabungkan konsep-konsep baru untuk menentukan perangkat pelindung koordinasi langsung dari diagram satu garis.

#### 2. Integrasi Total Data

ETAP menggabungkan listrik, atribut logis, mekanik, dan fisik dari elemen sistem dan *database* yang sama. Misalnya kabel, tidak hanya berisi data yang hanya mewakili sifat listrik dan dimensi fisik, tetapi juga informasi yang menunjukkan *raceway* melalui yang disalurkan. Dengan demikian, data untuk kabel tunggal dapat digunakan untuk analisis aliran daya atau sirkuit pendek (yang membutuhkan listrik dan parameter koneksi) serta kabel *ampacity derating* perhitungan (yang memerlukan rute fisik data). Integrasi ini menyediakan konsistensi data di seluruh sistem dan menghilangkan *multiple entry* data untuk unsur yang sama.

#### 3. Kesederhanaan Di Data Entri

ETAP melacak data rinci untuk setiap alat listrik. Editor data dapat mempercepat proses entri data rinci untuk setiap alat listrik. Editor data dapat mempercepat proses entri data dengan meminta data minimum untuk studi tertentu. Untuk mencapai hal ini, kita telah terstruktur editor properti dengan cara yang paling logis untuk memasukan data untuk analisis atau desain. ETAP diagram satu garis mendukung sejumlah fitur untuk membantu dalam membangun jaringan dari berbagai kompleksitas. Misalnya setiap elemen secara individu dapat memiliki berbagai orientasi, ukuran, dan simbol-simbol *display* (IEC atau ANSI). Diagram

satu garis juga memungkinkan untuk menempatkan beberapa alat pelindung antara sirkuit cabang dan bus.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP adalah [3]:

1. *One Line Diagram*, menunjukkan antara komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
2. *Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektris maupun mekanis dari peralatan yang detail dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
3. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode-metode yang digunakan.
4. *Study Case*, berisikan parameter-parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.