

# ANALISA ALIRAN DAYA SISTEM 20kV PADA PROYEK TUJUH BUKIT POWER SYSTEM MENGGUNAKAN *SOFTWARE ETAP 12.6*

Iriandi Ilyas , Bagas Arief Apriansyah, Edy Supriyadi, Abdul Multi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri,  
Institut Sains dan Teknologi Nasional  
Jalan Moh Kahfi II, Srengseng Sawah, Jagakarsa, Kota Jakarta Selatan, Jakarta 12630  
[iriandi@istn.ac.id](mailto:iriandi@istn.ac.id) , [ariefbagas9380@gmail.com](mailto:ariefbagas9380@gmail.com), [edy\\_syadi@istn.ac.id](mailto:edy_syadi@istn.ac.id), [amulti@istn.ac.id](mailto:amulti@istn.ac.id)

## ABSTRACT

*Power flow analysis is important in planning in order to get a good electric power system. In planning the electrical system for the Tujuh Bukit Power System project with a 20kV system network located in Banyuwangi, East Java, a power flow simulation for a single line diagram will be carried out using the ETAP 12.6 software with the Newton Raphson method. The simulation results which consist of 22 buses show a voltage drop on the 0.4kV\_ADR MCC Busbar2 bus and 0.4kV\_50-MCC-01 Busbar2 bus. As a system improvement, the 0.4kV\_ADR MCC Busbar2 bus will be installed with a 500 kVar capacitor bank to raise the voltage profile from 376.3 V to 385.56 V. While on the 0.4kV\_50-MCC-01 Busbar2 bus, a 100 kVar capacitor bank is required to increase the voltage from 382.2 V to 384.16 V. After the repair, the power supplied to the system is 3589.6 kVA with a power factor of 90.5% lagging. As well as the reduction in the total value of system power losses from 58.1 kW + 242.2 kVar to 49.3 kW + 200.8 kVar.*

**Keywords:** Power flow, Netwon Rapshon, Simulation, Software ETAP 12.6

## ABSTRAK

Analisa aliran daya merupakan hal penting dalam membuat perencanaan agar mendapatkan sistem tenaga listrik yang baik. Pada perencanaan sistem kelistrikan proyek Tujuh Bukit Power System dengan jaringan sistem 20kV yang berlokasi di Banyuwangi, Jawa Timur akan dilakukan simulasi aliran daya terhadap *single line diagram* menggunakan *software* ETAP 12.6 dengan metode Newton Raphson. Hasil simulasi yang terdiri dari 22 bus menunjukkan terjadinya jatuh tegangan pada bus 0,4kV\_ADR MCC Busbar2 dan bus 0,4kV\_50-MCC-01 Busbar2. Sebagai perbaikan sistem, pada bus 0,4kV\_ADR MCC Busbar2 akan dipasang 500 kVar kapasitor bank untuk menaikkan profil tegangan dari 376,3 V menjadi 385,56 V. Sedangkan pada bus 0,4kV\_50-MCC-01 Busbar2 dibutuhkan pemasangan 100 kVar kapasitor bank untuk menaikkan tegangan dari 382,2 V menjadi 384,16 V. Setelah adanya perbaikan, besar daya yang disalurkan pada sistem adalah 3589,6 kVA dengan faktor daya 90,5% *lagging*. Serta berkurangnya nilai *total power losses* sistem dari 58,1 kW + 242,2 kVar menjadi 49,3 kW + 200,8 kVar.

**Kata kunci:** Aliran daya, Netwon Rapshon, Simulasi, *Software* ETAP 12.6

## 1. Pendahuluan

Kehandalan sistem tenaga listrik merupakan hal yang sangat dibutuhkan dalam proses pendistribusian energi listrik agar tidak banyak mengalami kendala seperti kerusakan peralatan listrik akibat *overload* secara terus menerus. Hal terpenting dalam perencanaan dan

pengembangan sistem tenaga listrik di masa depan serta dapat menentukan operasi sistem yang baik dari sistem tenaga listrik yang sudah ada, dibutuhkan suatu studi yaitu studi aliran daya (Sumardi, 2019). Pada proyek Tujuh Bukit Power System yang merupakan proyek pertambangan emas berlokasi di

Banyuwangi, Jawa Timur, akan menggunakan jaringan tegangan menengah 20kV dari PLN yang kemudian diturunkan menjadi 0,4kV untuk penggunaan beban-beban listrik. Perencanaan sistem kelistrikan yang dibuat akan direpresentasikan dalam *single line diagram* dan dilakukan studi aliran daya untuk mengetahui kondisi awal sistem tersebut, sebelum dilakukan instalasi. Proses studi aliran daya akan dilakukan menggunakan bantuan *software* ETAP 12.6 dengan metode Newton Raphson yang terintegrasi dalam *software* tersebut. Tujuan dari penggunaan *software* ETAP adalah untuk mempermudah dan mendapatkan hasil yang cepat dalam menganalisa sistem tenaga listrik. Selain itu, ETAP dapat mempermudah dalam mengganti parameter-parameter peralatan-peralatan listrik yang bermasalah (Suswanto, 2019).

## 2. Tinjauan pustaka

### A. Umum

Studi aliran daya merupakan suatu hal yang sangat penting dalam mengevaluasi pengoperasian serta perencanaan dan pengembangan sistem tenaga listrik di masa depan agar dapat menentukan operasi sistem yang baik dari sistem tenaga listrik yang sudah ada. Studi aliran daya bertujuan untuk mengetahui *magnitude* dan sudut fasa dari tegangan pada setiap bus serta daya nyata dan daya reaktif yang mengalir dalam saluran suatu jaringan tenaga listrik.

ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik dengan kemampuan bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data dan mengendalikan sistem secara *real time*. *Software* ETAP memiliki 3 metode untuk penyelesaian aliran daya yaitu Newton Raphson, Fast Decoupled, Accelerated Gauss Seidel. Metode Newton Raphson merupakan metode penyelesaian aliran daya yang lebih efisien dan praktis untuk suatu sistem tenaga listrik besar dengan

iterasi lebih sedikit untuk dapat mencapai konvergensi dalam studi aliran daya.

### B. Klasifikasi Bus

Dalam penyelesaian aliran daya, terdapat 3 jenis bus yang teridentifikasi pada sistem jaringan. Penentuan klasifikasi bus akan dapat membantu dalam proses perhitungan. Pada setiap bus terdapat empat parameter utama yaitu daya aktif, daya reaktif, *magnitude* dan sudut fasa tegangan. Dua diantara empat parameter tersebut telah diketahui dan dua lainnya perlu dihitung.

**Tabel 1.** Klasifikasi Bus dalam Studi Aliran Daya

Bus	Parameter Diketahui	Parameter Dihitung
<b>Load Buses</b>	Daya aktif dan daya reaktif	<i>Magnitude</i> dan sudut fasa tegangan
<b>Voltage Controlled Buses</b>	<i>Magnitude</i> tegangan dan daya aktif	Sudut fasa tegangan dan daya reaktif
<b>Slack Buses</b>	<i>Magnitude</i> dan sudut fasa tegangan	Daya aktif dan daya reaktif

#### 1) Load Bus (Bus Beban)

Bus yang hanya terhubung beban dengan daya aktif dan reaktif yang diketahui. Sehingga, *magnitude* dan sudut fasa tegangan harus diperhitungkan. Bus ini juga disebut dengan PQ bus.

#### 2) Voltage Controlled Bus

Bus yang memiliki *magnitude* tegangan yang dijaga agar tetap konstan dan terdapat daya aktif yang besar dayanya dapat dikontrol oleh pengaturan pada *prime mover*. Karena hanya *magnitude* tegangan dan daya aktif yang diketahui, sehingga sudut fasa dan besarnya daya reaktif perlu diperhitungkan. Bus ini mempunyai sebutan lain yaitu bus generator atau PV bus.

#### 3) Slack Bus

Bus yang memiliki pengaruh terhadap bus beban dan bus generator. Bus ini hanya memiliki *magnitude* dan sudut fasa tegangan. Sudut fasa tegangan dari *slack bus* berfungsi sebagai referensi untuk semua sudut fasa tegangan pada bus lainnya. Perbedaan sudut fasa tegangan pada bus lainnya dipengaruhi dari hasil daya aktif dan daya reaktif yang diberikan dari pembangkit pada *slack buses*. Pemilihan *slack buses* berdasarkan dari pembangkit atau generator dengan kapasitas daya besar. Perbedaan antara total daya aktif yang masuk ke semua bus lainnya dalam sistem jaringan dan total daya aktif yang keluar ditambah rugi daya saluran ditentukan dari *slack buses*.

### C. Daya dan Jatuh Tegangan

Daya adalah rata-rata dari kerja yang dilakukan atau hasil dari perkalian tegangan pada suatu beban bersamaan dengan arus yang mengalir pada suatu beban tersebut. Pada rangkaian DC dan rangkaian AC tanpa reaktansi, satuan daya adalah watt. Dalam sistem tenaga listrik, terdapat 3 jenis daya listrik yaitu daya semu, daya aktif dan daya reaktif. Daya aktif adalah daya rata-rata yang dikonsumsi oleh beban. Daya reaktif adalah daya yang dihasilkan karena adanya reaktansi induktif dalam suatu rangkaian. Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan rms dan arus rms.

Daya 1 fasa:

$$S_{1\phi} = V_F I_F \quad (1)$$

$$P_{1\phi} = V_F I_F \cos \theta \quad (2)$$

$$Q_{1\phi} = V_F I_F \sin \theta \quad (3)$$

Daya 3 fasa:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \quad (4)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad (5)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \sin \theta \quad (6)$$

Dimana:

S : Daya semu (VA)

P : Daya aktif (W)

Q : Daya reaktif (VAr)

$V_L$  : Tegangan *line* (V)

$V_F$  : Tegangan fasa (V)

$I_L$  : Arus *line* (A)

$I_F$  : Arus fasa (A)

Daya kompleks merupakan kuantitas dari hasil perkalian tegangan dan "conjugate" arus yang berasal dari persamaan fasor tegangan dan arus, sehingga membuat perhitungan daya aktif dan daya reaktif dapat dilakukan dengan mudah dalam bentuk kompleks. Jika tegangan pada suatu beban dan arus mengalir ke beban tersebut dinyatakan  $V=|V| \angle \alpha$  dan  $I=|I| \angle \beta$ , maka

$$VI^* = |V| \angle \alpha \cdot (|I| \angle \beta)^*$$

$$= |V| \angle \alpha \cdot |I| \angle -\beta$$

$$= |V||I| \angle \alpha-\beta \quad (7)$$

Sehingga bentuk persamaan daya kompleks adalah

$$S=|V| |I| \cos(\alpha-\beta) + j|V| |I| \sin(\alpha-\beta) \quad (8)$$

Jika  $|V| |I| \cos(\alpha-\beta)$  adalah daya aktif "P" dan  $|V| |I| \sin(\alpha-\beta)$  adalah daya reaktif "Q", maka persamaan 8 menjadi:

$$S = P + jQ \quad (9)$$

Rugi daya dapat terjadi karena luasnya daerah penyaluran energi listrik jaringan distribusi. Sehingga jarak dari pusat distribusi membutuhkan penghantar yang lebih panjang. Terdapat rugi daya aktif dan rugi daya reaktif pada saluran distribusi.

Rugi daya 1 fasa:

$$P_{\text{loss } 1\phi} = I^2 R \quad (10)$$

$$Q_{\text{loss } 1\phi} = I^2 X \quad (11)$$

Rugi daya 3 fasa:

$$P_{\text{loss } 3\phi} = 3 P_{\text{loss } 1\phi} = 3 I^2 R \quad (12)$$

$$Q_{\text{loss } 3\phi} = 3 Q_{\text{loss } 1\phi} = 3 I^2 X \quad (13)$$

Dimana:

$P_{\text{loss}}$  : Rugi daya aktif (kW)

$Q_{\text{loss}}$  : Rugi daya reaktif (kVAr)

I : Arus beban (A)

R : Resistansi saluran (Ohm)

X : Reaktansi saluran (Ohm)

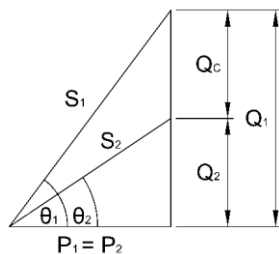
Faktor daya dapat diartikan sebagai rasio dari daya aktif terhadap daya semu, rasio dari resistansi terhadap impedansi atau *cosine* dari sudut *lead* dan *lag*.

$$pf = \frac{R}{Z} \text{ atau } \frac{P}{S} \quad (14)$$

Dimana:

**R** : Resistansi (ohm)  
**Z** : Impedansi (ohm)

Adanya faktor daya pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh peralatan-peralatan listrik yang mengandung beban induktif. Daya reaktif memiliki pengaruh besar terhadap besar kecilnya faktor daya. Nilai faktor daya pada suatu bus dapat diperbaiki dengan komponen tambahan berupa kapasitor bank. Kapasitor bank merupakan peralatan listrik yang digunakan untuk menambahkan daya reaktif pada suatu bus. Turunnya daya reaktif pada suatu bus akan berpengaruh terhadap meningkatnya nilai faktor daya.



**Gambar 1.** Perbaikan Faktor Daya Berdasarkan Segitiga Daya

Dari Gambar 1 didapatkan bahwa

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_1 = P_1 \tan \theta_1 \text{ dan } Q_2 = P_2 \tan \theta_2$$

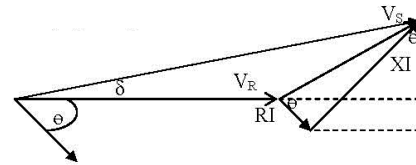
karena  $P_1 = P_2$  maka

$$Q_c = P_1 \tan \theta_1 - P_2 \tan \theta_2$$

$$= P_1 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (15)$$

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar atau bisa dikatakan bahwa adanya perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima. Penurunan tegangan terdiri dari dua

komponen yaitu rugi tegangan akibat resistansi saluran dan rugi tegangan akibat reaktansi induktif saluran. Persamaan jatuh tegangan didapatkan dari diagram vektor arus dan tegangan pada saluran distribusi seperti yang terlihat pada Gambar 2.



**Gambar 2** Diagram Vektor Arus dan Tegangan

Dari Gambar 2 didapatkan bahwa

$$V_s = V_R + I R \cos \theta + I X \sin \theta$$

$$V_s = V_R + I (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

$$V_s - V_R = I (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

$$\Delta V = I (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

Dimana:

$\Delta V$  : Jatuh tegangan (V)

$V_s$  : Tegangan pada sisi kirim (V)

$V_R$  : Tegangan pada sisi terima (V)

$I$  : Arus beban (A)

$R$  : Resistansi saluran (Ohm)

$X$  : Reaktansi saluran (Ohm)

Persamaan jatuh tegangan pada saluran distribusi sistem 1 phasa dan 3 phasa adalah

$$\Delta V_{1\phi} = I (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (16)$$

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V_{1\phi}}{V_{s-F}} \times 100\% \quad (17)$$

$$\Delta V_{3\phi} = \sqrt{3} I (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (18)$$

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V_{3\phi}}{V_{s-L}} \times 100\% \quad (19)$$

D. Besaran Per Satuan

Dalam analisa sistem tenaga listrik, jika parameter-parameter seperti arus, tegangan, impedansi serta daya masih menggunakan nilai-nilai sesungguhnya, kemungkinan akan mengalami kesulitan dalam mengolah data saat proses perhitungan. Sehingga, untuk memudahkan dan menyederhanakan nilai-nilai dari parameter tersebut, perlu mengubah nilai-nilai sesungguhnya ke dalam satuan per unit (pu). Sistem per unit dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{sistem per unit} = \frac{\text{Nilai sesungguhnya}}{\text{Nilai dasar}}$$

Sehingga,

$$S_{pu} = \frac{S}{S_B}, V_{pu} = \frac{V}{V_B} \quad (20)$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_B} \text{ dan } Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B}$$

Jika diharapkan untuk mendapatkan nilai  $Z_{pu}$  baru, maka dapat menggunakan persamaan

$$Z_{pu (new)} = \frac{Z_{pu (old)}}{Z_B} = \frac{Z_{pu (old)}}{(V_B^2/S_B)} \quad (21)$$

$$= Z_{pu (old)} \left( \frac{V_B (old)}{V_B (new)} \right)^2 \left( \frac{S_B (new)}{S_B (old)} \right)$$

Biasanya, dua nilai dasar yang dipilih pada sistem tenaga listrik adalah nilai dasar daya 3 fasa,  $S_B$  atau  $(MVA)_B$  dan tegangan fasa ke fasa,  $V_B$  atau  $(kV)_B$ . Sehingga, dalam menentukan nilai dasar parameter lainnya dapat ditentukan dengan menggunakan nilai dasar parameter yang telah diketahui.

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} V_B} \quad (22)$$

$$Z_B = \frac{V_B/\sqrt{3}}{I_B} \quad (23)$$

Jika persamaan 22 disubstitusikan ke persamaan 23 maka

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \quad (24)$$

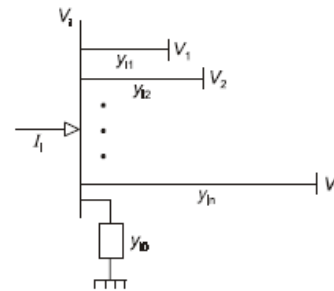
Satuan per unit berlaku juga untuk bilangan kompleks. Namun, nilai dasarnya tetap bilangan nyata.

$$S_{pu} = V_{pu} \cdot I_{pu}^* \quad (25)$$

$$S_{pu} = P_{pu} + jQ_{pu}$$

$$V_{pu} = Z_{pu} \cdot I_{pu} \quad (26)$$

#### E. Persamaan Aliran Daya



**Gambar 3.** Pemodelan Bus Sistem Tenaga Listrik

Gambar 3 merupakan pemodelan sederhana dari bus dalam sistem tenaga listrik dengan saluran transmisi yang direpresentasikan ke dalam model ekuivalen  $\pi$ . Daya masuk menuju bus sama dengan daya keluar dari bus. Hal tersebut berkaitan dengan hukum Kirchoff arus yang menyatakan arus masuk dalam percabangan sama dengan arus keluar dari percabangan. Dengan memperhatikan Gambar3 diperoleh persamaan.

$$I_i = y_{i0} V_i + y_{i1} (V_i - V_1) + y_{i2} (V_i - V_2) + \dots + y_{in} (V_i - V_n)$$

$$Y_{ii} = y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}$$

$$Y_{i1} = -y_{i1}$$

$$Y_{i2} = -y_{i2}$$

$$\vdots$$

$$Y_{in} = -y_{in}$$

Sehingga

$$I_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (27)$$

Sedangkan daya menuju bus adalah

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^*$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (28)$$

Jika persamaan 27 disubstitusikan ke persamaan 28 maka dapat diperoleh persamaan daya pada bus-i dalam bentuk polar.

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

Sehingga persamaan aliran daya aktif dan daya reaktif bus-i adalah

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (29)$$

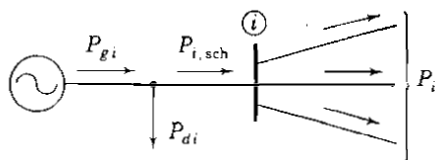
$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (30)$$

Dimana:

- Y : Admitansi saluran (Siemens)
- V : Tegangan bus (V)
- θ : Sudut admitansi saluran (°)
- δ : Sudut tegangan bus (°)
- i : Bus yang diperhitungkan
- n : Jumlah bus

$P_i$  dan  $Q_i$  merupakan daya yang dikirimkan ke bus (*calculated*). Jika  $P_{gi}$  dinotasikan sebagai *schedule power* yang dihasilkan oleh bus-i dan  $P_{di}$  merupakan notasi dari *schedule power* beban bus-i. Sehingga  $P_{i,sch}$  atau *schedule real power* bus-i adalah

$$P_{i,sch} = P_{gi} - P_{di} \quad (31)$$



Gambar 4 Notasi Daya Aktif pada Bus-i

Untuk notasi daya aktif pada bus-i yang dikirimkan adalah  $P_{i,cal}$ . Dalam hubungan  $P_{i,sch}$  dan  $P_{i,cal}$  terdapat *mismatch*. *Mismatch* merupakan selisih dari *schedule power* dengan *calculated power* yang persamaannya dapat ditulis

$$\Delta P_i = P_{i,sch} - P_{i,cal} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,cal} \quad (32)$$

*Mismatch* dapat terjadi jika dalam penyelesaian aliran daya, hasil daya yang dikirimkan (*calculated power*) tidak sama dengan daya yang direncanakan (*schedule power*). Jika *schedule power* memiliki hasil sama dengan *calculated power* yaitu menghasilkan *mismatch* nol, maka akan

didapatkan *power balance equation*. Notasi-notasi tersebut berlaku juga untuk daya reaktif.

$$Q_{i,sch} = Q_{gi} - Q_{di} \quad (33)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,sch} - Q_{i,cal} = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,cal} \quad (34)$$

### F. Penyelesaian Aliran Daya

Newton Rapshon merupakan metode penyelesaian aliran daya yang lebih efisien dan praktis untuk suatu sistem tenaga listrik besar. Metode Newton Rapshon memiliki penyelesaian dengan iterasi yang lebih sedikit. Sehingga sangat cepat dalam mencapai konvergensi. Persamaan 27 dan 28 merupakan bentuk persamaan aljabar nonlinear dengan variabel bebas dengan *magnitude* tegangan dalam pu dan sudut fasa tegangan dalam radian. Dari persamaan 29 dan 30 yang dikembangkan ke dalam deret Taylor dengan asumsi bus-1 sebagai *slack bus* diperoleh

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^{(p)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(p)} \\ \Delta Q_1^{(p)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta_n}\right)^{(p)} & \left(\frac{\partial P_1}{\partial V_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial P_1}{\partial V_n}\right)^{(p)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(p)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial V_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial V_n}\right)^{(p)} \\ \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n}\right)^{(p)} & \left(\frac{\partial Q_1}{\partial V_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_1}{\partial V_n}\right)^{(p)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(p)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial V_1}\right)^{(p)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial V_n}\right)^{(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(p)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(p)} \\ \Delta V_1^{(p)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(p)} \end{bmatrix}$$

Sehingga persamaan diatas dapat ditulis lebih sederhana

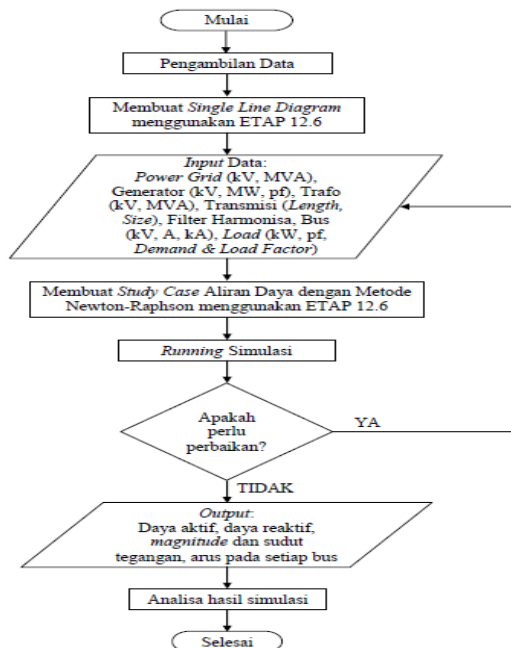
$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (35)$$

$J_{11}, J_{12}, J_{21}$  dan  $J_{22}$  merupakan elemen-elemen dari matrik jacobian.

### 3. Metode Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah untuk mendapatkan data-data pada setiap bus. Oleh karena itu, dalam suatu penelitian untuk mendapatkan hasil yang baik diperlukan tahapan-tahapan yang tersusun secara sistematis. Dimana setiap tahapan memiliki pengaruh penting untuk tahapan selanjutnya. Tahapan-tahapan

yang akan digunakan dalam penelitian ini seperti pada Gambar 5 berikut ini.



**Gambar 5** Diagram Aliran Penelitian

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh informasi berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Pentingnya pengambilan data yang sesuai akan membawa pada hasil yang baik. Data-data dalam penelitian ini merupakan data-data yang diambil dari proyek Tujuh Bukit Power System milik PT Bajra Mandalasakti. Data-data tersebut antara lain:

### 1) Power Grid

Sumber tegangan yang digunakan dalam proyek Tujuh Bukit Power System berasal dari PLN. Data dari power grid ini adalah sebagai berikut:

- Tegangan : 20 kV
- Daya Hubung Singkat : 25 MVA<sub>sc</sub>
- Mode : *Swing*

### 2) Generator

Generator merupakan mesin listrik yang dapat digunakan sebagai sumber tegangan cadangan ketika terjadi permasalahan pada sistem PLN. Pemasangan generator pada proyek Tujuh Bukit Power System hanya berada di area tertentu.

**Tabel 2.** Data Generator

Nama	Tegangan (kV)	Daya Aktif (kW)	Mode	PF	Eff
50MCC02_50-GN-01	0,4	1200	<i>Swing</i>	0,8	0,98
50MCC01_50-GN-14	0,4	750	<i>Swing</i>	0,8	0,98

Dalam analisa aliran daya generator dapat dijadikan sebagai salah satu sumber energi listrik dengan tegangan yang sesuai dengan kebutuhan sistem tegangan pada jaringan. Sehingga, jika suatu bus terdapat generator yang difungsikan, maka penyaluran energi listrik dari sumber lain ke bus dapat berkurang.

### 3) Trafo

Merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dengan frekuensi sama. Selain itu, dapat digunakan sebagai penaik dan penurun tegangan sistem dengan memanfaatkan perbandingan jumlah belitan primer dan sekunder.

**Tabel 3** Data Trafo

Nama	Tegangan (kV)		Kapasitas (kVA)	%Z	%R	%X
	Primer	Sekunder				
05-TRX-11 Trafo DAM 5	20	0,4	250	4	2,219	3,328
50-TRX-01 Trafo LEACH	20	0,4	2000	7	1,151	6,905
Trafo ADR	20	0,4	2000	7	1,151	6,905
Trafo DAM 4 SWP	20	0,4	250	4	2,219	3,328
Trafo Ext Office	20	0,4	100	4	2,219	3,328
Trafo MAIN OFFICE	20	0,4	400	4	2,219	3,328
Trafo QUERRY	20	0,4	500	4	2,219	3,328
Trafo SWD DAM.4	20	0,4	500	4	2,219	3,328
Trafo T.CENTER	20	0,4	400	4	2,219	3,328
Trx LAB	20	0,4	250	4	2,219	3,328

Trafo-trafo pada Tabel 3 merupakan trafo distribusi dengan kapasitas yang berbeda. Pemilihan kapasitas trafo tersebut didasarkan atas besarnya daya listrik yang dibutuhkan pada masing-masing area dengan pembebanan trafo yang diharapkan tidak lebih 80% dari besarnya kapasitas trafo. Pada trafo tersebut terdapat suatu sakelar untuk merubah rasio tegangan primer dan sekunder. Sakelar tersebut disebut *tap changer*. Apabila terdapat jatuh tegangan pada bus terima, *tap changer* tersebut dapat digunakan dengan mengubah besar tegangan pada sisi primer.

#### 4) Saluran Transmisi

Merupakan suatu media yang digunakan untuk menyalurkan daya listrik dari pembangkit sampai bus saluran distribusi.

**Tabel 4.** Data Saluran Transmisi

Nama	Tegangan (kV)	Size (mm <sup>2</sup> )	Length (m)	Conductor /Phase	Impedance/Phase	
					R (Ω/km)	X (Ω/km)
HVCbl_1_Gardu	20	240	50	1	0,093	0,116
HVCbl_Inc.HLP.Swgr	20	120	220	1	0,187	0,106
HVCbl_PLN-Gardu	20	240	20	2	0,093	0,116
HVCbl_Trafo ADR	20	120	10	1	0,187	0,106
HVCbl_Trafo DAM.1	20	120	10	1	0,187	0,128
HVCbl_Trafo DAM.5	20	50	300	1	0,471	0,123
HVCbl_Trafo HLP	20	120	20	1	0,187	0,128
HVCbl_Trafo SWP	20	50	50	1	0,471	0,123
HVCbl_Trx Block.13	20	50	10	1	0,471	0,129
HVCbl_U.G_S1P69-ADR Swgr	20	120	120	1	0,187	0,106
HVCbl_U.G_S2P55-S2P56	20	240	254	1	0,094	0,095

Nama	Tegangan (kV)	Size (mm <sup>2</sup> )	Length (m)	Conductor /Phase	Impedance/Phase	
					R (Ω/km)	X (Ω/km)
LVCbl_Trafo ADR	0,4	500	30	4	0,046	0,201
LVCbl_Trafo DAM 5	0,4	120	5	2	0,187	0,072
LVCbl_Trafo HLP	0,4	500	15	4	0,046	0,201
LVCbl_Trafo SWD DAM.4	0,4	240	30	2	0,093	0,224
LVCbl_Trx Block.13	0,4	150	20	2	0,152	0,073
LVCbl_Trx DAM 4 SWP	0,4	120	5	2	0,187	0,072
LVCbl_Trx Ext.Office	0,4	120	20	2	0,187	0,072
LVCbl_Trx Lab	0,4	240	50	1	0,094	0,072
LVCbl_Trx QUERRY	0,4	120	25	2	0,187	0,072
LVCbl_Trx T.CENTER	0,4	120	25	2	0,187	0,072
OHL-S1P1-S1P8	20	262	239	1	0,140	0,285
OHL-S1P8-S1P35	20	262	1000	1	0,140	0,285
OHL-S1P35-S1P57	20	262	1100	1	0,140	0,285
OHL-S1P57-S1P61	20	262	99	1	0,140	0,285
OHL-S1P61-S1P66	20	262	160	1	0,140	0,285
OHL-S1P61-S1P68	20	262	92	1	0,140	0,285
OHL-S1P68-S1P69	20	262	45	1	0,140	0,285
OHL-S1P68-S2P60	20	262	256	1	0,174	0,293
OHL-S1P69-S1P71	20	210	38	1	0,174	0,293
OHL-S2P49-S2P53	20	124	133	1	0,292	0,313
OHL-S2P55-S2P49	20	262	75	1	0,140	0,285
OHL-S2P57-S2P60	20	262	110	1	0,140	0,285

Saluran transmisi yang digunakan pada proyek Tujuh Bukit Power System menggunakan instalasi bawah tanah dan saluran udara dengan beberapa titik tiang beton yang dipasang. Pada saluran udara menggunakan kabel jenis AAAC sedangkan pada instalasi bawah tanah menggunakan kabel dengan isolator XLPE.

#### 5) Bus

Merupakan suatu konduktor yang digunakan untuk menghubungkan antar peralatan dalam sistem kelistrikan.

**Tabel 5.** Data Bus

Nama	Tegangan (kV)	Arus (A)
20kV_PLN.GarduSWG_Busbar	20	630
20kV_BSI.Gardu-SWG_Busbar	20	630
20kV_50-SWGR-01_HLP	20	630
20kV_Block.13-SWGR	20	630
20kV_05-SWGR-10_ADR	20	630
20kV-S1-P8	20	600
20kV-S1-P35	20	500

Terdapat 22 bus pada proyek Tujuh Bukit Power System dengan jenis bus berupa *slack bus* pada bus 20kV\_PLN.GarduSWG\_Busbar, sedangkan 21 bus lainnya dapat dikatakan sebagai *load bus*.

#### 6) Beban (*Load*)

Beban atau *load* yang terdapat pada *software ETAP* terdiri dari *lump load*, *static load* dan *motor load*.

Nama	Tegangan (kV)	Arus (A)
20kV-S1-P61	20	600
20kV-S1-P68	20	600
20kV-S1-P69	20	600
20kV-S2-P56	20	600
Bus02	20	600
Bus05	0,4	600
Bus07	0,4	600
Bus09	0,4	600
Bus011	0,4	600
Bus025	0,4	600
Bus030	0,4	600
Bus033	0,4	600
0,4kV_50-MCC-01 Busbar2	0,4	3500
0,4kV_ADR MCC Busbar2	0,4	3500
0,4kV_50-MCC-02 Busbar2	0,4	1000

a). *Lumped load*, merupakan peralatan gabungan antara *static load* dan *motor load*. Peralatan-peralatan



DOI: <https://doi.org/10.37277/stch.v32i3>

dengan jenis *lump load* memiliki motor, magnetik, dan komponen elektronika daya yang terdapat didalam peralatan listrik tersebut.

- b). *Static load*, merupakan peralatan yang memiliki kondisi saturasi dan terdapat komponen elektronika daya didalamnya. Peralatan dengan kondisi saturasi memiliki sifat magnetik.
- c). *Motor load*, merupakan beban-beban listrik yang sistem kerjanya menggunakan motor.

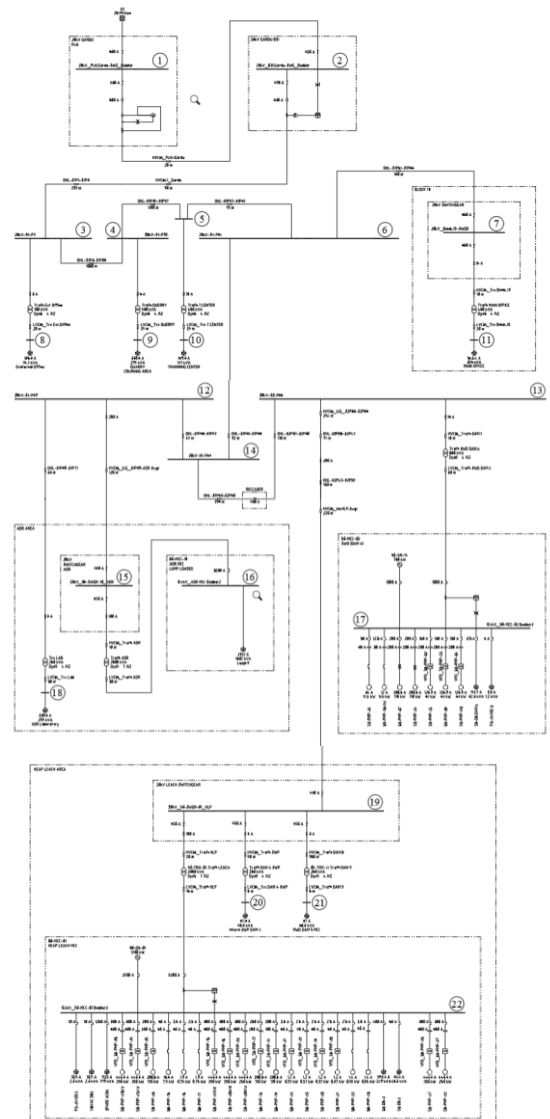
Dalam pembebanan terdapat *%loading*, yaitu besarnya daya yang digunakan dari besarnya kapasitas daya pada beban tersebut.

**Tabel 6. Data Beban (Load)**

Nama	Tegangan (kV)	Daya (kW)	PF	Load Factor (%)	Duty Cycle (%)	Type Load
External Office	0,4	80	0,85	60	50	Static
Quarry Crushing Area	0,4	200	0,85	75	50	Lumped
Training Center	0,4	100	0,85	70	50	Lumped
Block 13_Main Office	0,4	320	0,85	75	50	Static
ADR Area_ADR Laboratory	0,4	200	0,849	60	50	Lumped
Heap Leach Area_SWP DAM 4	0,4	49,8	0,82	100	100	Lumped
Heap Leach Area_RWD DAM 5 MCC	0,4	50	0,83	100	100	Lumped
50MCC01_PS-24VDC2	0,22	1,8	0,79	50	100	Static
50MCC01_110VAC DB2	0,22	1,8	0,79	50	100	Static
50MCC01_SPARE ACB2	0,4	693	0,89	75	0	Static
50MCC01_50-PMP-210.2	0,4	250	0,89	75	100	Motor
50MCC01_50-PMP-212.2	0,4	250	0,89	75	100	Motor
50MCC01_50-PMP-26	0,4	110	0,88	75	0	Motor
50MCC01_50-PMP-15	0,4	7,5	0,84	75	20	Motor
50MCC01_50-PMP-16	0,4	0,75	0,8	75	100	Motor
50MCC01_50-PMP-17	0,4	0,75	0,8	75	20	Motor
50MCC01_50-PMP-211.2	0,4	250	0,89	75	100	Motor
50MCC01_50-PMP-208.2	0,4	250	0,89	75	100	Motor
50MCC01_50-PMP-209.2	0,4	250	0,89	75	100	Motor
50MCC01_50-PMP-18	0,4	110	0,88	75	100	Motor
50MCC01_50-PMP-19	0,4	110	0,88	75	100	Motor
50MCC01_50-DB.2	0,4	36,2	0,8	75	50	Static
50MCC01_50-PMP-27	0,4	250	0,89	75	0	Motor
50MCC01_50-PMP-28	0,4	250	0,89	75	0	Motor
50MCC02_50-PMP-36	0,4	18,5	0,87	75	100	Motor
50MCC02_50-PMP-134.A2	0,4	5,5	0,77	75	5	Motor
50MCC02_50-PMP-37	0,4	110	0,88	77	80	Motor
50MCC02_50-PMP-38	0,4	110	0,88	77	0	Motor
50MCC02_50-PMP-35	0,4	68	0,83	75	80	Motor
50MCC02_50-PMP-39	0,4	68	0,83	75	80	Motor
50MCC02_50-PMP-40	0,4	68	0,83	75	0	Motor
50MCC02_50-DB.DAM.2	0,4	68,28	0,83	75	50	Static
50MCC02_PS-24VDC.3	0,22	0,96	0,77	50	100	Static
50MCC10_Lump3	0,4	1353	0,844	100	100	Lumped

Pada beban *lumped* nilai daya yang diberikan merupakan daya rata-rata dari beban pada area tersebut. Pembentukan *lumped* tersebut dimaksudkan untuk menyederhanakan dalam pembuatan *single line diagram* tanpa megurangi besarnya kebutuhan daya harian. Besarnya daya yang dikonsumsi beban

bergantung pada kebutuhan daya beban itu sendiri. Pada Tabel 6 kebutuhan beban harian dapat dilihat pada *duty cycle*. Dalam pengoperasiannya, biasanya untuk beban motor terdapat *load factor*. *Single line diagram* dari proyek Tujuh Bukit Power System dibuat sesuai data-data yang telah diperoleh dari pengumpulan data. Pembuatan *single line diagram* ini bertujuan untuk memudahkan dalam melihat sistem kelistrikan yang akan digunakan. *Single line diagram* ini merupakan suatu diagram yang mewakili peralatan-peralatan listrik yang telah diganti dengan menggunakan simbol-simbol tertentu berdasarkan standar internasional.



**Gambar 6. Single Line Diagram** Proyek Tujuh Bukit Power System

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Simulasi aliran daya tahap awal menggunakan software ETAP 12.6 dengan metode Newton Raphson yang terintegrasi pada software tersebut. Bus 1 yang diberi nama 20kV\_PLN.GarduSWG\_Busbar adalah bus yang terletak pada gardu PLN. Simulasi ini berakhir pada iterasi ke 3 setelah mencapai titik konvergensi dengan toleransi yang ditetapkan yaitu 0,0001.

**Tabel 7.** Data dan Jenis Bus PLN-BSI

Nama	V (pu)	$\delta$ (°)	P (kW)	Q (kVar)	Jenis Bus
20kV_PLN.GarduSWG_Busbar	1	0	-	-	Slack Bus
20kV_BSI.Gardu-SWG_Busbar	-	-	3249,89	2120,7	Load Bus

Tabel 7 memperlihatkan bahwa bus no 1 yaitu 20kV\_PLN.GarduSWG\_Busbar dan bus no 2 yaitu 20kV\_BSI.Gardu-SWG\_Busbar. Bus 1 dapat dikatakan sebagai *slack bus* yang merupakan bus milik PLN dan dapat dijadikan referensi besarnya tegangan untuk bus lain. Sehingga besar daya pada bus tersebut dapat ditentukan sesuai besarnya daya yang dibutuhkan pada sistem. Untuk mendapatkan kebutuhan daya harian pada bus 1 serta profil tegangan pada bus 2 akan dihitng menggunakan persamaan aliran daya. Agar lebih mudah dalam perhitungan semua parameter diubah ke dalam pu. Nilai daya aktif dan daya reaktif adalah

$$S_{pu} = \frac{S_{actual}}{S_{base}} = \frac{3249,89 \text{ kW} + j2120,7 \text{ kVar}}{100 \text{ MVA}} = 0,0324989 + j0,021207 \text{ pu}$$

Hasil perhitungan diatas besarnya daya aktif adalah 0,0324989 pu. Sedangkan daya reaktif besarnya adalah 0,021207 pu. Serta daya semu yang dapat dijadikan daya kompleks dengan komponen daya aktif (bilangan *real*) dan daya reaktif (bilangan *imaginer*). Untuk impedansi saluran transmisi HVCbl\_PLN-Gardu yang memiliki nilai  $0,093 + j0,116 \text{ Ohm/km}$  dengan panjang saluran 20 m terdiri dari 2 penghantar per fasa. Jika basis tegangan 20 kV dan basis daya 100 MVA, maka impedansi dalam satuan per unit adalah

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{100 \text{ MVA}} = 4 \text{ Ohm}$$

$$Z_L = \frac{0,093 + j0,116 \text{ Ohm/km}}{4 \text{ Ohm}} = 0,2325 + j0,029 \text{ pu/km}$$

$$Z_{L(pu)} = 0,02325 + j0,029 \text{ pu/km} \times \frac{0,02 \text{ km}}{2} = 0,0002325 + j0,00029 \text{ pu}$$

Sehingga besarnya admitansi saluran tranmisi HVCbl\_PLN-Gardu adalah

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{0,0002325 + j0,00029 \text{ pu}} = 1682,88 - j2099,07 \text{ pu}$$

Elemen-elemen matriks admitansi bus

$$Y_{11} = Y_{12} = 1682,88 - j2099,07 \text{ pu} = 2690,38 \angle -51,28^\circ \text{ pu}$$

$$Y_{22} = Y_{21} = 1682,88 - j2099,07 \text{ pu} = 2690,38 \angle -51,28^\circ \text{ pu}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_{12} = -1682,88 + j2099,07 \text{ pu} = 2690,38 \angle 128,72^\circ \text{ pu}$$

Matriks admitansi bus adalah

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2690,38 \angle -51,28^\circ & 2690,38 \angle 128,72^\circ \\ 2690,38 \angle 128,72^\circ & 2690,38 \angle -51,28^\circ \end{bmatrix}$$

Pada bus 20kV\_BSI.Gardu-SWG\_Busbar yang merupakan bus beban akan dihitung *magnitude* dan sudut tegangannya. Pada kondisi awal perhitungan *magnitude* dan sudut tegangan diasumsikan bernilai  $V_2 = 1$  dan  $\delta_2 = 0^\circ$ . Setelah membuat matriks admitansi bus, langkah-langkah selanjutnya untuk menghitung menggunakan persamaan aliran daya metode Newton Raphson adalah

- **Mismatch pada kondisi awal**

Dikarenakan tidak ada generator pada bus 20kV\_BSI.Gardu-SWG\_Busbar, maka nilai  $P_{gi}$  dan  $Q_{gi}$  adalah 0. Sehingga

$$P_{i, cal} = P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

$$P_2 = |Y_{21}| |V_1| |V_2| \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |Y_{22}| |V_2| |V_2| \cos(\theta_{22})$$

$$P_2 = (2690,38)(1)(1) \cos(128,72^\circ + 0^\circ - 0^\circ) + (2690,38)(1)(1) \cos(-51,28^\circ)$$

$$P_2 = -1682,873 + 1682,873 = 0$$

$$\Delta P_2^{(0)} = P_{2, sch} - P_{2, cal} = (0 - 0,032) - 0 = -0,032$$

$$Q_{i, cal} = Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in}| |V_i| |V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

$$Q_2 = -\{|Y_{21}| |V_1| |V_2| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |Y_{22}| |V_2| |V_2| \sin(\theta_{22})\}$$

$$Q_2 = -\{(2690,38)(1)(1) \sin(128,72^\circ + 0^\circ - 0^\circ)$$

$$+ (2690,38)(1)(1) \sin(-51,28^\circ)\}$$

$$Q_2 = -\{2099,067 - 2099,067\} = 0$$

$$\Delta Q_2^{(0)} = Q_{2, sch} - Q_{2, cal} = (0 - 0,021) - 0 = -0,021$$

- **Jacobian pada kondisi awal**

DOI: <https://doi.org/10.37277/stch.v32i3>

$$J_{11} = \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |Y_{21} V_2 V_1| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)$$

$$J_{11} = (2690,38)(1)(1) \sin(128,72^\circ + 0^\circ - 0^\circ)$$

$$J_{11} = 2099,067$$

$$J_{12} = \frac{\partial P_2}{\partial V_2} = |Y_{21} V_1| \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + 2|Y_{22} V_2| \cos(\theta_{22})$$

$$J_{12} = (2690,38)(1) \cos(128,72^\circ + 0^\circ - 0^\circ) + 2(2690,38)(1) \cos(-51,28^\circ)$$

$$J_{12} = -1682,873 + 3365,746$$

$$J_{12} = 1682,873$$

$$J_{21} = \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = -\{|Y_{21} V_2 V_1| \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2)\}$$

$$J_{21} = (2690,38)(1)(1) \cos(128,72^\circ + 0^\circ - 0^\circ)$$

$$J_{21} = -1682,873$$

$$J_{22} = \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = -\{|Y_{21} V_1| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + 2|Y_{22} V_2| \sin(\theta_{22})\}$$

$$J_{22} = -(2690,38)(1) \sin(128,72^\circ + 0^\circ - 0^\circ) - 2(2690,38)(1) \sin(-51,28^\circ)$$

$$J_{22} = -2099,067 + 4198,134$$

$$J_{22} = 2099,067$$

• **Correction pada kondisi awal**

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(k)} \\ \Delta V_1^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2099,067 & 1682,873 \\ -1682,873 & 2099,067 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0,032 \\ -0,021 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00029 & -0,00023 \\ 0,00023 & 0,00029 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,032 \\ -0,021 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0000445 \\ -0,00001345 \end{bmatrix}$$

• **Iterasi ke 1**

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ V_i^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i^{(k)} \\ V_i^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta_i^{(k)} \\ \Delta V_i^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ V_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^{(0)} \\ V_2^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,0000445 \\ -0,00001345 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \\ V_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0000445 \text{ rad} \\ 0,99998655 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000254^\circ \\ 0,99998655 \end{bmatrix}$$

**Tabel 8.** Perhitungan Aliran Daya pada Bus 20kV\_BSI.Gardu-SWG\_Busbar

Iterasi	V <sub>2</sub> (pu)	δ <sub>2</sub> (°)	P <sub>2</sub> (pu)	Q <sub>2</sub> (pu)
Kondisi Awal	1	0	0	0
Iterasi ke 1	0,99998655	-0,000254	-0,031	-0,020
Iterasi ke 2	0,99998603	-0,000258	-0,033	-0,022
Iterasi ke 3	0,99998655	-0,000255	-0,032	-0,021

Pada Tabel 8 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan tegangan di bus no 2 pada saat proses iterasi. Penurunan tegangan atau

*voltage drop* dapat terjadi karena besarnya impedansi saluran dan panjang saluran. Pada saat proses iterasi sudut tegangan juga mengalami perubahan sudut. Hal tersebut dipengaruhi adanya daya reaktif pada sistem. Pada daya aktif dan daya reaktif terdapat tanda negatif pada besarnya daya, tanda tersebut menjelaskan bahwa pada bus no 2 akan mengirim daya menuju bus-bus lainnya. Jika *magnitude* dan sudut tegangan pada bus 20kV\_BSI.Gardu-SWG\_Busbar diperoleh, maka besarnya daya aktif dan daya reaktif pada bus 20kV\_PLN.GarduSWG\_Busbar dapat dihitung menggunakan persamaan 29 dan 30.

$$P_1 = |Y_{11}| |V_1| |V_1| \cos(\theta_{11}) + |Y_{12}| |V_1| |V_2| \cos(\theta_{12} + \delta_2 - \delta_1)$$

$$P_1 = (2690,38)(1)(1) \cos(-51,28^\circ) + (2690,38)(1)(0,99998655) \cos(128,72^\circ + (-0,000255^\circ) - 0^\circ)$$

$$P_1 = 1682,873 - 1682,841 = 0,032 \text{ pu}$$

$$Q_1 = -\{|Y_{11}| |V_1| |V_1| \sin(\theta_{11}) + |Y_{12}| |V_1| |V_2| \sin(\theta_{12} + \delta_2 - \delta_1)\}$$

$$Q_1 = -(2690,38)(1)(1) \sin(-51,28^\circ) + (2690,38)(1)(0,99998655) \sin(128,72^\circ + (-0,000255^\circ) - 0^\circ)$$

$$Q_1 = -\{-2099,067 + 2099,046\} = 0,021 \text{ pu}$$

**Tabel 9.** Data Parameter Bus PLN-BSI Hasil Perhitungan

Nama	V (pu)	δ (°)	P (pu)	Q (pu)
20kV_PLN.GarduSWG_Busbar	1	0	0,032	0,021
20kV_BSI.Gardu-SWG_Busbar	0,99998655	-0,000255	0,032	0,021

Dari Tabel 9 memperlihatkan bahwa daya aktif dan daya reaktif pada kedua bus sama. Hal tersebut dapat terjadi jika jarak antara bus tidak terlalu jauh, serta kecilnya nilai impedansi. Jika sama, artinya dari bus 1 menuju bus 2 tidak terdapat rugi-rugi daya yang cukup besar. Dari hasil tersebut dapat ditentukan juga besarnya *power losses* antara bus 1 dan bus 2.

$$P_{\text{loss}} = P_1 - P_2 = 0,032 - 0,032 = 0 \text{ pu}$$

$$Q_{\text{loss}} = Q_1 - Q_2 = 0,021 - 0,021 = 0 \text{ pu}$$

Pada bus 16 akan dipasang kapasitor bank dengan harapan tegangan bus dapat mencapai 96% atau 384 V. Dengan kebutuhan daya beban *lumped* sebesar 1353 kW + 858,03 kVar dengan faktor daya awal 0,8445. Dengan menggunakan persamaan 2.25 akan diketahui besar

kebutuhan kapasitor bank yang akan dipasang agar mendapatkan tegangan di bus 16 sebesar 96% atau 384 V.

Pada hasil simulasi awal didapatkan data berupa tegangan kirim dari bus sisi sekunder trafo ADR, tegangan terima di bus 16 serta persentase jatuh tegangan antara bus tersebut. Data-data tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_S &: 380,96 \text{ V} \\ V_R &: 376,31 \text{ V} \\ \% \Delta V &: 1,2\% \end{aligned}$$

#### Asumsi 1

Dengan asumsi kenaikan tegangan kirim sebesar 0,4% dan penurunan persentase jatuh tegangan sebesar 0,1% dari data awal. Sehingga pada analisa 1 didapatkan data baru yaitu:

$$\begin{aligned} V_S &: 382,48 \text{ V} \\ V_R &: 378,28 \text{ V} \\ \Delta V &: 4,2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\Delta V V_R = \frac{P_2 R + Q_2 X}{4}$$

$$(4,2 \text{ V}) (378,28 \text{ V}) = \frac{(1353 \text{ kW} \times 0,00138 \text{ ohm}) + (Q_2 \times 0,00603 \text{ ohm})}{4}$$

$$1,5887 \text{ kV} = \frac{1,8671 \text{ kV} + (Q_2 \times 0,00603 \text{ ohm})}{4}$$

$$(4 \times 1,5887 \text{ kV}) - 1,8671 \text{ kV} = (Q_2 \times 0,00603 \text{ ohm})$$

$$4,4877 \text{ kV} = Q_2 \times 0,00603 \text{ ohm}$$

$$Q_2 = \frac{4,4877 \text{ kV}}{0,00603 \text{ ohm}} = 744,23 \text{ kVar}$$

Sehingga,

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = 858,03 \text{ kVar} - 744,6 \text{ kVar} = 113,43 \text{ kVar}$$

Dengan cara yang sama, hasil analisa-analisa selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 10.

**Tabel 10.** Kebutuhan Kapasitor Bank Pada Bus 16

No Asumsi	$V_S$	$V_R$	$V_d$	$\%V_d$	$Q_2$	$Q_C$
1	382,484	378,277	4,20	1,1	744,26	113,77
2	384,014	380,174	3,80	1	648,67	209,36
3	385,550	382,080	3,40	0,9	552,10	305,93
4	387,092	383,995	3,00	0,8	454,53	403,50
5	388,640	385,920	2,60	0,7	355,96	502,07

Dengan perhitungan 5 asumsi, dapat dilihat pada tabel 10 bahwa dengan syarat asumsi terjadinya penurunan persentase jatuh tegangan yaitu 0,1% dan menaikkan

persentase tegangan kirim 0,4%, diperoleh jika ingin mencapai tegangan 96% atau 384 V dapat dipasangkan 400-500 kVar kapasitor bank pada bus 16. Sehingga dalam simulasi aliran daya menggunakan *software ETAP 12.6*, kapasitor bank yang akan dipasang parallel pada bus 16 adalah 500 kVar.

Seerti halnya perbaikan di bus 16, maka pada bus 22 akan dipasang kapasitor bank dengan kebutuhan daya beban sebesar 1264,53 kW + 657,3 kVar agar mencapai tegangan di bus 22 sebesar 96% atau 384 V. Dengan perhitungan yang sama dengan perbaikan pada bus 16 maka besar kapasitor bank dapat diperoleh. Pada hasil simulasi awal didapatkan data berupa tegangan kirim dari bus sisi sekunder trafo LEACH, tegangan terima di bus 22 serta persentase jatuh tegangan antara bus tersebut. Data-data tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_S &: 384,016 \text{ V} \\ V_R &: 382,156 \text{ V} \\ \% \Delta V &: 0,5\% \end{aligned}$$

#### Asumsi 1

Dengan asumsi kenaikan tegangan kirim sebesar 0,4% dan penurunan persentase jatuh tegangan sebesar 0,1% dari data awal. Sehingga pada analisa 1 didapatkan data baru yaitu:

$$\begin{aligned} V_S &: 385,844 \text{ V} \\ V_R &: 384,172 \text{ V} \\ \Delta V &: 1,7 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\Delta V V_R = \frac{P_2 R + Q_2 X}{4}$$

$$(1,7 \text{ V}) (384,172 \text{ V}) = \frac{(1264,53 \text{ kW} \times 0,00069 \text{ ohm}) + (Q_2 \times 0,00301 \text{ ohm})}{4}$$

$$0,6531 \text{ kV} = \frac{0,8275 \text{ kV} + (Q_2 \times 0,00301 \text{ ohm})}{4}$$

$$(4 \times 0,6531 \text{ kV}) - 0,8275 \text{ kV} = (Q_2 \times 0,00301 \text{ ohm})$$

$$1,7849 \text{ kV} = Q_2 \times 0,00301 \text{ ohm}$$

$$Q_2 = \frac{1,7849 \text{ kV}}{0,00301 \text{ ohm}} = 592,99 \text{ kVar}$$

Sehingga,

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = 657,3 \text{ kVar} - 592,99 \text{ kVar} = 64,31 \text{ kVar}$$

Hasil perhitungan diatas menjelaskan bahwa untuk mendapatkan nilai tegangan di bus 22 sebesar 96% atau 384 V maka kapasitas kapasitor bank yang dibutuhkan sebesar 64,31 kVar. Dalam simulasi aliran daya menggunakan *software ETAP 12.6*,

kapasitor bank yang akan dipasang parallel pada bus 22 adalah 100 kVar.

## 5. Kesimpulan

Dari pembahasan diatas dapat disimpulkan bahwa

- 1). Simulasi aliran daya 22 bus pada kondisi awal didapat 2 bus dengan nilai tegangan cukup rendah yaitu bus 0,4kV\_ADR MCC Busbar2 sebesar 376,3 V dan 0,4kV\_50-MCC-01 Busbar2 sebesar 382,2 V.
- 2). Pemasangan kapasitor bank pada bus 0,4kV\_ADR MCC Busbar2 sebesar 500 kVar mempengaruhi perubahan tegangan bus menjadi 385,56 V dan bus 0,4kV\_50-MCC-01 Busbar2 dipasang kapasitor bank sebesar 100 kVar memperoleh perubahan tegangan menjadi 384,16 V.
- 3). Kebutuhan total daya untuk proyek Tujuh Bukit Power System adalah 3589,6 kVA dengan faktor daya 90,5% *lagging* dan total rugi-rugi daya pada sistem sebesar 49,3 kW + 200,8 kVar.

## Daftar Pustaka

- Cahyo, Nur. 2018.** *Analisa Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik PT. Indofood CBP Sukses Makmur Tbk Divisi Food Seasoning Semarang Menggunakan Etap 12.6.* Tugas Akhir. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Semarang
- Das, Debapriya. 2006.** *Electrical Power Systems.* New Age International (P) Limited. New Delhi
- Dorf, Richard C. 2000.** *The Electrical Engineering Handbook.* CLC Press LLC
- Gibilisco, Stan. 2003.** *Teach Yourself Electricity and Electronics: Third Edition.* McGraw-Hill. New York
- Handayani, Ika dan A. M. Fadly Fajar. 2012.** *Analisis Aliran Daya Dan Gangguan Hubung Singkat Sistem Kelistrikan Pabrik Tonasa V Di PT Semen Tonasa Menggunakan Etap.* Tugas Akhir. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Hasanuddin

- Nigara, Adib Gustian dan Yohanes Primadiyono. 2015.** *Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik pada Bagian Texturizing di PT Asia Pasific Fibers Tbk Kendal menggunakan Software ETAP Power Station 4.0.* Jurnal. 7(1), hal 7-10. Teknik Elektro. Universitas Negeri Semarang. Semarang

- O'malley, John R. 1992.** *Theory and Problems of Basic Circuit Analysis: Second Edition.* McGraw-Hill. New York

- SPLN 72:1987.** *Spesifikasi Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah.* PT. PLN

- Stevenson, William D and John J Grainger. 1994.** *Power System Analysis: International Edition.* McGraw-Hill. Singapore

- Sudirham, Sudaryatno. 2012.** *Analisa Sistem Tenaga.* Darpublic. Bandung

- Suhadi, dkk. 2008.** *Teknik Distribusi Tenaga Listrik: Jilid 1.* Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Departemen Pendidikan Nasional. Jakarta

- Sulistiyono, Dwi. 2011.** *Perbandingan Metode Gauss-Seidel, Metode Newton Raphson Dan Metode Fast Decoupled Dalam Solusi Aliran Daya.* Makalah Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro. Fakultas Teknik. Universitas Diponegoro. Semarang

- Sumadiyana, Achmad Bambang. 2009.** *Simulasi Aliran Daya Sistem 150 kV Region Jakarta-Banten dengan Perbandingan Sistem Grid dan IBT.* Tugas Akhir. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Indonesia. Depok

- Sumardi dan Patria Julianto. 2018.** *Analisa Aliran Daya Pada Jaringan Distribusi 20 kV PT. PLN (Persero) Sebatik Menggunakan Software Etap Powerstation 12.6.0.* Jurnal. 14(1), hal 19-23. Teknik Elektro. Universitas Borneo Tarakan. Kalimantan

- Suswanto, Daman. 2009.** *Sistem Distribusi Tenaga Listrik.* Bahan Ajar Teknik

Elektro, Universitas Negeri Padang.  
Padang

**Syufrijal dan Readysal Monantun. 2014.** *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Paket Keahlian Teknik Ketenagalistrikan.* Kementrian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan. Indonesia

**Wadhwa, C L. 2012.** *Electrical Power Systems.* New Academic Science Limited. New Delhi. India

**Weedy, Brian M. 2012.** *Electric Power Systems: Fifth Edition.* John Wiley & Sons, Inc. United Kingdom