

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab II berisi tinjauan pustaka yang digunakan untuk mendukung dasar teori yang digunakan pada penelitian tugas akhir. Bab ini akan memaparkan materi-materi dan metode yang digunakan selama penelitian.

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik mempunyai beragam ukuran dan komponen-komponen yang berbeda, tetapi pada dasarnya, sistem tenaga listrik mempunyai karakteristik yang sama, yakni:

1. Terdiri dari sistem AC tiga fasa yang berkerja pada tegangan yang tetap. Generator dan transmisi menggunakan peralatan tiga fasa. Pada beban industri menggunakan sistem tiga fasa, pada beban rumah dan beban komersial didistribusikan merata antar fasa sehingga dapat membentuk sistem tiga fasa yang seimbang.
2. Menggunakan mesin sinkron untuk pembangkitan tenaga listrik. Penggerak utama yang bersumber dari energi fosil, energi nuklir dan energi air akan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan mesin sinkron.
3. Mengirimkan daya listrik dari jarak jauh ke konsumen yang tersebar di wilayah yang luas. Ini membutuhkan sistem transmisi yang terdiri dari subsistem yang berkerja pada level tegangan yang berbeda (Kundur, 1994).

2.2 Sistem Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi dianggap sebagai akhir dari jaringan transmisi. Sistem jaringan distribusi menyediakan energi secara andal dan efisien bagi pengguna akhir (konsumen) yang terhubung ke jaringan tegangan menengah dan rendah. Jaringan distribusi dikonfigurasi dengan bentuk skema radial, aliran daya searah dan dengan peralatan perlindungan sederhana dapat memungkinkan kerja dari sistem distribusi dengan daya yang aman dan ekonomis (Celli,2005).

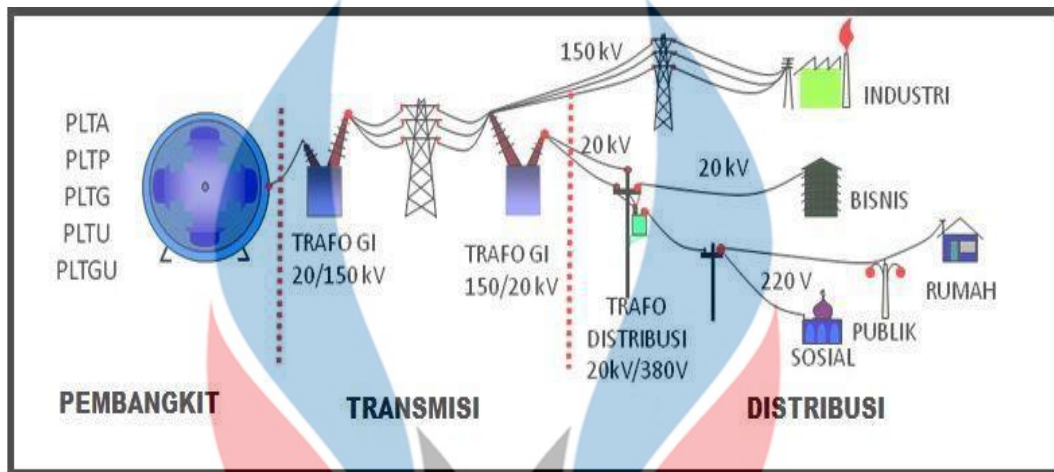
Distribusi tenaga listrik adalah bagian dari jalur pengiriman daya yang mengambil listrik sistem transmisi bertegangan tinggi dan menyalurkan listrik menuju pelanggan atau konsumen. Gambar 2.1 menunjukkan pembangkitan tenaga listrik dari sumber pembangkit besar hingga tersalurkan menuju ke pelanggan atau konsumen. Jalur jaringan distribusi dilihat dari fungsi fungsionalnya merupakan jaringan yang menyuplai tenaga listrik hingga sampai ke pelanggan atau konsumen listrik (Short, 2004).

Sistem pembangkit tenaga listrik yang terdiri dari berbagai jenis seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA), pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), dan pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU), serta jenis pembangkit lain yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Daya listrik yang dihasilkan akan dialirkan dari pembangkitan diberbagai lokasi, dengan jarak yang jauh melalui sistem transmisi ke sistem distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan pembangkit akan dinaikkan oleh transformator *step up* lewat gardu induk. Daya listrik dari gardu induk akan disalurkan ke sistem transmisi. Tujuan menaikkan tegangan adalah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir. Tegangan pada saluran transmisi diturunkan menjadi 20 kV oleh transformator *step down*. Penyaluran tenaga listrik tegangan 20 kV, disalurkan pada saluran distribusi *primer* yang tegangannya diturunkan menjadi 220/380 Volt oleh gardu-gardu distribusi dan disalurkan menuju konsumen atau pemakai energi listrik (Andi,2019).

Gambar 2.1 menggambarkan penyaluran tenaga listrik dari pembangkit. Listrik yang dihasilkan dari pembangkit disalurkan menuju saluran transmisi. Saluran transmisi, terdiri dari gardu induk (GI). GI akan menaikkan tegangan menggunakan trafo *step up* dari tegangan pembangkit sebesar 20 kV dinaikkan menjadi 150 kV. Tujuan dinaikkannya tegangan pada saluran transmisi ialah untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Penyaluran tenaga listrik dari transmisi yang tegangannya 150 kV dapat langsung disalurkan ke industri-industri besar yang membutuhkan tenaga listrik dengan tegangan tinggi. Daya listrik dari saluran transmisi, akan masuk ke saluran distribusi 20 kV. Tegangan di saluran distrisbusi akan diturunkan menggunakan trafo *step down* dari 150 kV menjadi 20

kV. Penyaluran distribusi 20kV dapat disalurkan langsung ke industri menengah. Tegangan dari distribusi 20 kV agar dapat disalurkan ke rumah-rumah harus diturunkan lagi tegangannya menjadi tegangan 220 V.



Gambar 2. 1 Penyaluran Tenaga Listrik (Andi, 2019)

2.3 *Distributed Generator (DG)*

Distributed Generator (DG), merupakan generator tenaga listrik dalam skala kecil yang menghasilkan daya listrik dekat kepada pelanggan dan terkoneksi dengan sistem distribusi. Manfaat dari penempatan DG diantaranya mampu menaikkan tegangan, mengurangi kehilangan energi, menanggung beban pada saat pelepasan kapasitas sistem, dan meningkatkan keandalan. Manfaat DG dari sisi ekonomi yang dapat dirasakan ialah menurunkan kerugian energi atau daya yang tidak digunakan (Chalapathi, 2012).

Istilah DG di setiap negara berbeda-beda, DG atau dikenal dengan *Disperged Generator* di Amerika Utara, sedangkan di Amerika Selatan disebut sebagai *Embedded Generator*. Negara di bedua Eropa dan benua Asia menyebut DG dengan istilah *Decentralized Generator*, namun secara umum DG dikenal dengan nama *Distributed Generator (DG)* (Ackerman, 2001). Fungsi utama dari penempatan DG adalah untuk mengurangi rugi – rugi daya pada sistem, memperbaiki profil tegangan, meningkatkan stabilitas tegangan, meningkatkan keamanan sistem, mengurangi biaya investasi untuk pembangunan pembangkit baru, menaikkan keandalan sistem.

Selain ramah lingkungan, *renewable* energi merupakan sumber tenaga yang dapat diperbaharui. Ketersediaan energi yang banyak untuk sumber pembangkit menjadi alasan digunakannya pembangkit dengan sumber energi yang terbarukan. Hal ini dapat membantu untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yang sudah semakin menipis. Contoh pembangkit tenaga listrik yang menggunakan sumber energi terbarukan ialah *photovoltaic* (PV), angin (*wind turbine*). Jenis pembangkit ini di beberapa tahun terakhir banyak dimanfaatkan sebagai DG pada sistem tenaga listrik (Paliwal, 2014).

DG terbagi menjadi beberapa jenis, ada yang menggunakan pembangkit dengan sumber energi terbarukan dan ada yang menggunakan mesin yang berbahan bakar fosil. Berikut adalah jenis-jenis berdasarkan karakteristik daya yang diinjeksi oleh DG:

1. Tipe 1: Jenis ini merupakan DG yang menginjeksi daya aktif saja. Contoh dari tipe 1 ialah *photovoltaic, micro turbine, fuel cell*. DG tipe 1 ini terhubung dengan sistem dengan bantuan *inverter/ converter* yang terhubung baik dari pembangkit ke sistem.
2. Tipe 2: Jenis ini merupakan DG yang menginjeksi daya reaktif saja. Contoh dari tipe 2 ialah kompensator sinkron, turbin gas.
3. Tipe 3: Jenis ini merupakan DG yang dasarnya ialah dari mesin sinkron. Contoh tipe 3 ialah generator sinkron.
4. Tipe 4: Jenis ini merupakan DG yang dasarnya ialah dari mesin induksi. Contoh tipe 4 ialah generator induksi (Hung,2010).

Beberapa definisi kapasitas DG yang dimiliki oleh lembaga-lembaga riset internasional adalah sebagai berikut:

1. *The Electric Power Research Institute* mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas beberapa kW sampai dengan 50 MW.
2. *Gas Research Institute* mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 25 kW hingga 25 MW.
3. *Preston dan Rastler* menentukan ukuran mulai dari beberapa kW hingga lebih dari 1000 MW.
4. *Cardell* mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 500 kW hingga 1 MW.

5. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE)* mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 50 hingga 100 MW (Arkermann,2001).

Bervariasinya pengertian DG disetiap negara dan benua, maka klasifikasi DG dibedakan berdasarkan tujuan, lokasi penempatan dan dari kapasitas DG. Pemasangan DG pada sistem tenaga akan mempengaruhi aliran daya dan keadaan tegangan di sisi konsumen dan peralatan (Short, 2004).

Berikut jenis – jenis DG berdasarkan kapasitasnya:

1. *Micro Distributed Generator* merupakan *Distributed Generator* dengan range 1 W – 5 kW.
2. *Small Distributed Generator* merupakan *Distributed Generator* dengan range 5 kW – 5 MW.
3. *Medium Distributed Generator* merupakan *Distributed Generator* dengan range 5 MW – 50 MW.
4. *Large Distributed Generator* merupakan *Distributed Generator* dengan range 50 MW – 300 MW (Paliwal, 2014).

Penempatan DG pada sistem menjadi hal penting, agar manfaat DG untuk mengurangi rugi-rugi pada sistem dan memperbaiki profil tegangan dapat dirasakan manfaatnya. DG di tempatkan untuk mengurangi rugi-rugi pada sistem, lokasi dan besar injeksi daya DG harus diperhatikan. Lokasi dan besar injeksi daya dari DG yang kurang tepat akan menyebabkan kenaikan rugi-rugi pada sistem (Hung, 2010).

Banyak jenis-jenis energi terbarukan yang dapat digunakan sebagai sumber energi pembangkit listrik yang ramah lingkungan. Energi terbarukan tersebut berupa energi angin, energi panas matahari, energi air, dan masih banyak lagi jenis- jenis energi lainnya. Dilihat dari jumlah energi yang teredia khususnya di Indonesia, banyak yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber pembangkit listrik. Sejak tahun 1970-an Indonesia telah menerapkan sistem *photovoltaic (PV)* sebagai sumber pembangkit listrik di pulau-pulau kecil. Perawatan PV tidak terlalu rumit dan tidak membutuhkan biaya yang mahal (Outhred, 2014).

2.3.1 Photovoltaic (PV)

Energi yang berasal dari matahari disebut dengan energi matahari. Energi cahaya yang diterima dari matahari dapat diserap, disimpan, dikonversi, dan digunakan untuk keperluan akan energi listrik. Sinar matahari, atau disebut dengan energi surya, dapat digunakan secara langsung dapat sumber penerang pada pagi hingga sore hari, untuk menghasilkan tenaga listrik. Salah satu pemanfaatan energi matahari yang dapat menghasilkan energi listrik ialah teknologi *photovoltaic* (PV).

Sel surya, atau yang biasa disebut dengan PV, dapat mengubah sinar matahari langsung menjadi listrik. Nama PV berasal dari proses mengubah cahaya (*photon*) menjadi listrik (tegangan), yang disebut efek PV. Panel surya atau PV yang digunakan untuk memberi daya listrik pada rumah dan bisnis biasanya terdiri dari *cell* yang digabungkan menjadi modul yang menampung sekitar 40 *cell*. Modul PV akan menggunakan sekitar 10–20 panel surya untuk memberi daya listrik pada rumah. Panel dipasang pada sudut yang tetap, atau dapat juga dipasang sebuah alat pelacak yang mengikuti matahari, yang akan memungkinkan PV menangkap sinar matahari dengan jumlah yang paling maksimum (Zhu,2015).

2.4 Studi Aliran Daya Metode Newton Raphson

Studi aliran daya dilakukan untuk mengetahui aliran daya pada sistem. Hasil dari aliran daya akan memperoleh data mengenai daya nyata, daya reaktif, tegangan pada *bus*, arus tiap saluran, rugi daya pada sistem dalam kondisi pada saat beroperasi, data ini dibutuhkan untuk menganalisa kerja sistem, dan dapat digunakan untuk perkiraan beban mendatang (Stevenson ,1994).

Tujuan dilakukannya studi analisis aliran daya antara lain:

- a. Mengetahui tegangan-tegangan pada setiap *bus* yang ada dalam sistem, baik *magnitude* maupun sudut fasa tegangan.
- b. Mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran yang ada dalam sistem.
- c. Mengetahui kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan.
- d. Memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.

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

Sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3 bagian yaitu *slack/swing bus*, *PV bus*, *PQ bus (load bus)*. Berikut penjelasan bagian – bagian dari sistem listik:

1. *Bus Tidak Aktif (Slack Bus)* menjadi *bus* referensi dari sistem yang terhubung ke pembangkit (generator). Tegangan dan sudut fasa generator diketahui dan tetap, serta daya aktif dan daya reaktif tidak diketahui sehingga harus dihitung.
2. *Bus Beban (Load Bus)* merupakan *bus* yang diketahui adalah daya aktif dan daya reaktifnya. Sudut fasa dan tegangan tidak diketahui sehingga harus dicari.
3. *Voltage-Controlled Bus (Regulated Bus)* *bus* ini diketahui daya aktif dan tegangan dengan nilai yang tetap. Sudut fasa dan daya reaktif harus dihitung agar dapat diketahui besar dari sudut fasa dan daya reaktif pada *bus* ini.

Setiap *bus* terdapat 4 besaran yaitu:

- Daya aktif (P)
- Daya reaktif (Q)
- Tegangan (V)
- Sudut fasa (θ)

Metode *Newton Raphson*, dalam penyelesaian aliran daya menggunakan konsep dasar deret *Taylor* untuk menentukan suatu fungsi dengan dua *variable* atau lebih. Metode ini menyelesaikan masalah aliran daya dengan menggunakan persamaan *non-linier* untuk menghitung besaran dari nilai tegangan dan sudut fasa pada tiap *bus*. Persamaan aliran daya dari metode *Newton Rhapsion* merupakan dirumuskan dalam bentuk polar (Saadat,1999).

Persamaan aliran daya dapat ditulis dalam bentuk polar pada persamaan (2.1).

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) merupakan persamaan untuk mendapatkan arus yang mengalir pada bus. Variabel untuk menghitung arus pada bus ialah admitansi bus i dan bus j yang pada persamaan diberi simbol Y_{ij} dengan satuan simens. Untuk

tegangan pada bus i juga dibutuhkan untuk melakukan perhitungan yang pada persamaan diberi simbol V_j dengan satuan kV. Sudut fasa antara bus i dan j yang pada persamaan diberi simbol θ_{ij} dan untuk sudut fasa bus j diberi simbol δ_j dengan satuan radian. Perhitungan satuan setiap variabel pada persamaan diubah ke dalam satuan pu agar mempermudah melakukan perhitungan. Persamaan (2.2) menunjukkan daya injeksi pada bus i .

$$P_i - jQ = V_i^* I_i \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) ialah persamaan untuk mendapatkan daya pada bus i . P_i merupakan daya aktif pada bus i dan jQ merupakan daya reaktif pada bus i . Satuan daya aktif ialah kW dan daya reaktif kVar. V_i merupakan tegangan pada bus i dengan satuan kV. I_i merupakan arus pada bus i dengan satuan A. Semua satuan pada perhitungan diubah dalam satuan pu agar memudahkan dalam melakukan analisis perhitungan.

Persamaan (2.1) untuk I_i , ke persamaan (2.2) menghasilkan persamaan (2.3).

$$P_i - jQ = |V_i| \angle \delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.3)$$

Bagian - bagian dari bilangan riil dan imajiner dijabarkan menjadi 2 persamaan, dalam hal ini daya nyata dan daya reaktif pada bus i ditulis dengan persamaan yang berbeda. Nilai P_i dan Q_i telah diketahui, tetapi nilai V_i dan δ_i tidak diketahui kecuali pada *slack bus*. Kedua persamaan non linier tersebut dapat diuraikan menjadi satu persamaan *linier* serentak dengan cara menyatakan hubungan antara perubahan daya nyata ΔP_i dan daya reaktif ΔQ_i terhadap perubahan nilai *magnitude* tegangan ΔV_i dan sudut fasa tegangan $\Delta \delta_i$. Persamaan daya nyata P_i dan daya reaktif Q_i dituliskan pada persamaan (2.4) dan (2.5).

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.4)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.5)$$

Tegangan pada bus i dan bus j yang disimbolkan dengan V_i dan V_j , sudut fasa bus i dan bus j dengan simbol θ_{ij} , dan untuk masing- masing sudut fasa bus i pada persamaan diberi simbol δ_i dan untuk bus j diberi simbol δ_j . Semua variabel yang digunakan untuk menghitung daya aktif dan reaktif menggunakan persamaan (2.4) dan (2.5) diubah dalam satuan pu. Diubah dalam satuan pu agar mempermudah perhitungan.

Persamaan (2.4) dan (2.5) akan menjadi persamaan aljabar nonlinear dengan nilai variabel masing-masing. Nilai variabel diubah dalam satuan pu, satuan pu digunakan untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan. Sedangkan, satuan dari sudut fase dinyatakan dalam radian (rad). Persamaan (2.4) dan (2.5) dikembangkan dari teori deret Taylor seperti pada persamaan (2.6)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^x \\ \vdots \\ \Delta P_z^x \\ \Delta |Q_i^x| \\ \vdots \\ \Delta |Q_z^x| \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_z}\right)^x \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_z}{\partial \delta_i}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial P_z}{\partial \delta_z}\right)^x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_z|}\right)^x \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_i|}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_z|}\right)^x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i^x \\ \vdots \\ \Delta \delta_z^x \\ \Delta |V_i^x| \\ \vdots \\ \Delta |V_z^x| \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_z}\right)^x \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_z}{\partial \delta_i}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial Q_z}{\partial \delta_z}\right)^x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_z|}\right)^x \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_z}{\partial |V_i|}\right)^x & \dots & \left(\frac{\partial Q_z}{\partial |V_z|}\right)^x \end{bmatrix}} \quad (2.6)$$

Variabel pada persamaan (2.6) merupakan variabel dari hasil penurunan dari daya aktif, daya reaktif pada bus terhadap sudut fasa pada bus. Dan juga penurunan daya aktif, daya reaktif pada bus terhadap tegangan pada bus.

Matriks dari persamaan (2.6) merupakan matriks *Jacobian*, bus i diasumsikan menjadi *slack bus*. Pada matriks *Jacobian* yang ditunjukkan pada persamaan (2.6) menampilkan perbandingan persamaan linear dari perubahan nilai sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(x)}$ dan nilai tegangan $\Delta |V_i^x|$ dengan perubahan nilai daya aktif $(\Delta P_i^{(x)})$ dan daya reaktif $(\Delta Q_i^{(x)})$. Matriks *Jacobian* tersebut dapat disederhanakan menjadi persamaan matriks pada (2.7)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad \text{www.itk.ac.id} \quad (2.7)$$

Bagian-bagian dari matriks *Jacobian* tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan daya nyata dan reaktif pada bus i dari persamaan (2.4) dan (2.5) yang diturunkan sebagai berikut : ($i = 1, 2, \dots, n-1$) bagian-bagian diagonal $J_1 - J_4$ ditunjukkan pada persamaan (2.8) hingga persamaan (2.15) berikut:

Bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_1 pada persamaan (2.8) dan persamaan (2.9).

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.9)$$

Hasil dari persamaan (2.8) dan (2.9) akan dimasukkan ke dalam matriks pada persamaan (2.6) dalam bentuk matriks sederhananya yang terdapat pada persamaan (2.7). Persamaan (2.8) dan (2.9) ini menjabarkan perhitungan penurunan daya aktif pada bus i terhadap sudut fasa bus i . Persamaan (2.8) dan (2.9) jika dimasukkan dalam matriks menjadi bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_1 . Bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_2 pada persamaan (2.10) dan persamaan (2.11).

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.11)$$

Persamaan (2.10) dan (2.11) dimasukkan ke dalam matriks pada persamaan (2.6) dalam bentuk matriks sederhana dibentuk dalam persamaan (2.7). Persamaan (2.8) dan (2.9) ini menjabarkan perhitungan penurunan daya aktif pada bus i terhadap sudut fasa bus i . Persamaan (2.10) dan (2.11) jika dimasukkan dalam matriks menjadi bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_2 .

Bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_3 pada persamaan (2.12) dan persamaan (2.13). www.itk.ac.id

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.13)$$

Persamaan (2.12) dan (2.13) akan dimasukkan ke dalam matriks yang ada pada persamaan (2.6) yang dalam bentuk matriks sederhananya dibentuk dalam persamaan (2.7). Persamaan (2.12) dan (2.13) ini menjabarkan perhitungan penurunan daya aktif pada bus i terhadap sudut fasa bus i . Persamaan (2.12) dan (2.13) jika dimasukkan dalam matriks menjadi bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_3 .

Bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_4 pada persamaan (2.14) dan persamaan (2.15).

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.15)$$

Dari persamaan (2.14) dan (2.15) akan dimasukkan ke dalam matriks yang ada pada persamaan (2.6) yang dalam bentuk matriks sederhananya dibentuk dalam persamaan (2.7). Persamaan (2.14) dan (2.15) ini menjabarkan perhitungan penurunan daya aktif pada bus i terhadap sudut fasa bus i . Persamaan (2.14) dan (2.15) jika dimasukkan dalam matriks menjadi bagian diagonal dan bagian bukan diagonal untuk J_4 . Dari hasil perhitungan untuk mendapatkan bagian-bagian dari matriks *jacobian* pada persamaan (2.8) hingga (2.15) akan dihitung setiap akan melakukan iterasi.

Perhitungan iterasi dimulai dengan memberikan perkiraan *magnitude* tegangan dan sudut fasa tegangan awal. Perubahan-perubahan dalam daya nyata dan daya reaktif yang telah dikurangi dengan daya nyata dan daya reaktif.

$$\Delta P_i^{(x)} = P_i^{sch} - P_i^{(x)} \quad (2.16)$$

$$\Delta Q_i^{(x)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(x)} \quad (2.17)$$

Perhitungan hasil iterasi sudut fase dan tegangan bus dijabarkan pada persamaan (2.19) dan persamaan (2.20)

$$\delta_i^{(x+1)} = \delta_i^{(x)} + \Delta \delta_i^{(x)} \quad (2.18)$$

$$|V_i^{(x+1)}| = |V_i^{(x)}| + \Delta |V_i^{(x)}| \quad (2.19)$$

Prosedur penyelesaian studi aliran daya dengan metode *Newthon Raphson* adalah sebagai berikut.

1. Bus beban P_i^{sch} dan Q_i^{sch} harganya ditentukan. Besarnya tegangan dan sudut fasa disamakan dengan nilai *slack bus* atau 1,0 dan 0,0 jadi $|V_i^{(0)}| = 1,0$ dan $\delta_i^{(0)} = 0,0$. Untuk *voltage-regulated bus* dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} diatur, sedangkan sudut fasa disamakan dengan sudut *slack bus*, jadi $\delta_i^{(0)} = 0$.
2. Hitung $P_i^{(x)}$ dan $Q_i^{(x)}$ pada bus berbeban dengan persamaan 2.4 dan persamaan 2.5, dan juga $\Delta P_i^{(x)}$ dan $\Delta Q_i^{(x)}$ dihitung dengan persamaan 2.17 dan persamaan 2.18.
3. Hitung $P_i^{(x)}$ dan $\Delta P_i^{(x)}$ pada *voltage-controlled bus* dengan persamaan 2.4 dan persamaan 2.5
4. Hitung bagian-bagian matrik *jacobian*; J_1, J_2, J_3 , dan J_4 dengan persamaan 2.8 sampai persamaan 2.15.
5. Hitung $\Delta \delta_i^{(x)}$ dan $\Delta |V_i^{(x)}|$ dengan persamaan 2.7
6. Hitung nilai baru dari sudut fase dan tegangan; $\delta_i^{(x+1)}$ dan $|V_i^{(x+1)}|$ dengan persamaan 2.18 dan persamaan 2.19
7. Proses perhitungan akan dilanjutkan sampai mencapai nilai $\Delta \delta_i^x$ kurang dari sama dengan 0.001 dan $\Delta |V_i|^x$ kurang dari sama dengan 0.001

Keterangan persamaan 2.1 sampai dengan persamaan 2.19

I_i : Arus bus i (pu)

Y_{ij} : Admitansi bus i dan bus j (pu)

Y_{ii} : Admitansi bus i (pu)

V_j : Tegangan bus j (pu)

θ_{ij} : sudut fasa bus i dan bus j (pu)

δ_i : sudut fasa pada bus i (pu)

δ_j : sudut fasa bus j (pu)

P_i : Daya Aktif bus i (pu)

Q_i : Daya Reaktif bus i (pu)

ΔP_i : Selisih dari daya aktif (pu)

$\Delta P_i^{(x)}$: Selisih dari daya aktif iterasi ke-x (pu)

ΔQ_i : Selisih dari daya reaktif (pu)

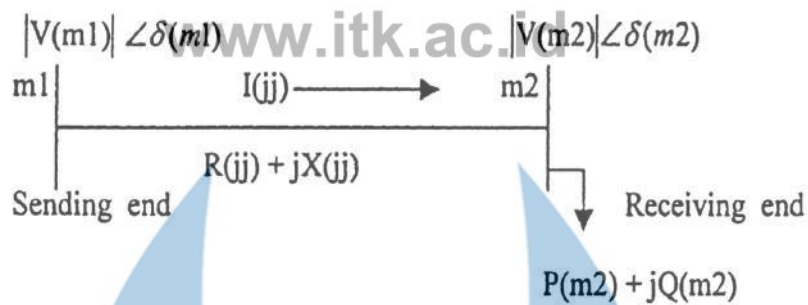
$\Delta Q_i^{(x)}$: Selisih dari daya reaktif iterasi ke-x (pu)

$\Delta \delta_i$: Selisih sudut fasa bus i (pu)

ΔV_i : Selisih Tegangan bus i (pu)

2.5 Metode Voltage Stability Index (VSI)

Tingkat kestabilan tegangan pada sistem dapat diketahui dengan beberapa metode. Metode *Voltage Stability Index* (VSI) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui kestabilan tegangan pada sistem. Metode ini akan memberikan indeks kepada tiap-tiap bus pada sistem. Indeks VSI berskala dari 0 hingga 1, semakin mendekati angka 0 nilai *index* tersebut menandakan tingkat kestabilan sistem tersebut semakin rendah, sehingga dari hasil metode ini penentuan lokasi DG akan didasarkan pada bus yang memiliki indeks terendah. Analisis perhitungan nilai VSI membutuhkan data dari hasil analisis aliran daya. Penjabaran analisis perhitungan dari nilai kestabilan bus menggunakan VSI dijelaskan menggunakan rangkaian ekuivalen dua buah bus seperti pada gambar 2.2 (Chakravorthy,2001).



Gambar 2. 2 Contoh Sistem Distribusi 2 Bus
(Chakravorthy, 2001)

Gambar 2.2 dapat dilihat sistem distribusi pada 2 bus. Aliran daya yang mengalir pada sistem distribusi 2 bus di atas mengalir dari m1 menuju bus m2. Bus m1 sebagai bus pengirim dan bus m2 sebagai bus penerima. Saluran 2 bus ini diketahui V_{m1} , V_{m2} sebagai tegangan dengan satuan kV bus m1 dan m2. I_{jj} diketahui sebagai arus pada saluran dengan satuan Ampere, R_{jj} merupakan resistansi saluran dan X_{jj} merupakan reaktansi pada saluran jj dengan satuan ohm. jj merupakan nomor saluran pada sistem distribusi 2 bus ini. Daya aktif pada bus m2 pada gambar disimbolkan dengan P_{m2} dengan satuan kW dan daya reaktif pada bus m2 disimbolkan dengan Q_{m2} dengan satuan kVar. Variabel pada perhitungan diubah dalam satuan pu untuk mempermudah melakukan analisis perhitungan.

Rangkaian ekuivalen diatas maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$I_{jj} = \frac{V_{m1} - V_{m2}}{r_{(jj)} + jx_{(jj)}} \quad (2.20)$$

$$P_{m2} - jQ_{m2} = V_{m2}^* I_{(jj)} \quad (2.21)$$

Arus yang mengalir pada saluran akan dihitung maka, variabel-variabel yang dibutuhkan ialah tegangan pada bus pengirim dan tegangan bus pada bus penerima yang pada persamaan (2.20) V_{m1} menunjukkan tegangan bus pengirim dan V_{m2} menunjukkan tegangan bus penerima dengan satuan kV. Tegangan akan dibagi dengan resistansi saluran yang diberi simbol $r_{(jj)}$ yang satuan ohm dan reaktansi saluran yang diberi simbol $jx_{(jj)}$ dengan satuan ohm. Satuan dari masing-masing variabel pada persamaan berbeda sehingga untuk mempermudah perhitungan maka satuan tersebut diubah dalam satuan pu.

Persamaan (2.20) dan (2.21) disubstitusikan. Persamaan (2.20) dimasukkan kedalam persamaan (2.21). Hasil dari substitusi persamaan ini akan didapat persamaan (2.22) sehingga membentuk persamaan seperti pada persamaan (2.22).

$$|V_{m2}|^4 - \{|V_{m1}|^2 - 2P_{m2}r_{(jj)} - 2Q_{m2}x_{(jj)}\}|V_{m2}|^2 + \{P_{m2}^2 + Q_{m2}^2\} \{r_{(jj)}^2 + x_{(jj)}^2\} = 0 \quad (2.22)$$

Persamaan (2.22) dapat dipisahkan persamaan tersebut dengan dipecah menjadi persamaan pada (2.23) dan persamaan (2.24).

$$b_{(jj)} = |V_{m1}|^2 - 2P_{m2}r_{(jj)} - 2Q_{m2}x_{(jj)} \quad (2.23)$$

$$c_{(jj)} = \{P_{m2}^2 + Q_{m2}^2\} \{r_{(jj)}^2 + x_{(jj)}^2\} \quad (2.24)$$

Persamaan (2.24) dan persamaan (2.25) maka dapat disubstitusikan persamaan kedalam persamaan (2.23) sehingga diperoleh kembali penyederhanaan persamaan menjadi persamaan (2.26).

$$|V_{m2}|^4 - b_{(jj)}|V_{m2}|^2 + c_{(jj)} = 0 \quad (2.25)$$

Persamaan 2.26 tegangan pada bus penerima mempunyai 4 solusi yaitu:

1. $0,707 \left[b_{(jj)} - (b_{(jj)}^2 - 4c_{(jj)})^{0,5} \right]^{0,5}$
2. $-0,707 \left[b_{(jj)} - (b_{(jj)}^2 - 4c_{(jj)})^{0,5} \right]^{0,5}$
3. $-0,707 \left[b_{(jj)} + (b_{(jj)}^2 - 4c_{(jj)})^{0,5} \right]^{0,5}$
4. $0,707 \left[b_{(jj)} + (b_{(jj)}^2 - 4c_{(jj)})^{0,5} \right]^{0,5}$

Penyelesaian dari persamaan kedua dan ketiga dari kemungkinan jawaban di atas tidak dapat digunakan sebagai penyelesaian karena memiliki nilai yang negatif. Kemungkinan pertama tidak dapat digunakan karena memiliki nilai yang mendekati nol. Penyelesaian untuk persamaan tersebut adalah persamaan yang keempat. Untuk data *real* dimana P, Q, r, x dan V dinyatakan dalam satuan pu (per unit).

Solusi dari penyelesaian persamaan keempat dapat ditulis kembali menjadi persamaan (2.26).

www.itk.ac.id

$$|V_{m2}| = 0,707 \left[b_{(jj)} + (b_{(jj)}^2 - 4c_{(jj)})^{0,5} \right]^{0,5} \quad (2.26)$$

Persamaan (2.27) dapat ditarik kesimpulan bahwa, solusi aliran daya dari sistem radial mempunyai solusi penyelesaian jika dan hanya jika,

$$b_{(jj)}^2 - 4c_{(jj)} \geq 0 \quad (2.27)$$

Persamaan (2.24) persamaan (2.25) dan persamaan (2.28) disubstitusikan dan didapatkan persamaan (2.29).

$$\{|V_{m1}|^2 - 2P_{m2}r_{(jj)} - 2Q_{m2}x_{(jj)}\}^2 - 4\{P_{m2}^2 + Q_{m2}^2\}\{r_{(jj)}^2 + x_{(jj)}^2\} \geq 0 \quad (2.28)$$

Persamaan (2.29) disederhanakan kembali maka, didapatkan persamaan (2.30).

$$|V_{m1}|^4 - 4\{P_{m2}x_{(jj)} - Q_{m2}r_{(jj)}\}^2 - 4\{P_{m2}r_{(jj)} + Q_{m2}x_{(jj)}\}|V_{m1}|^2 \geq 0 \quad (2.29)$$

Proses penyederhanaan persamaan (2.30) didapatkan persamaan untuk metode VSI yaitu pada persamaan (2.31).

$$VSI = |V_{m1}|^4 - 4\{P_{m2}x_{(jj)} - Q_{m2}r_{(jj)}\}^2 - 4\{P_{m2}r_{(jj)} + Q_{m2}x_{(jj)}\}|V_{m1}|^2 \quad (2.30)$$

Keterangan persamaan 2.20 dan persamaan 2.30

jj = nomor saluran

$m1$ = Bus Pengirim

$m2$ = Bus Penerima

$I_{(jj)}$ = Arus Saluran (pu)

V_{m1} = Tegangan Pada Bus Pengirim (pu)

V_{m2} = Tegangan Pada Bus Penerima (pu)

P_{m2} = Daya Aktif Pada Bus Penerima (pu)

Q_{m2} = Daya Reaktif Pada Bus Penerima (pu)

$r_{(jj)}$ = Resistansi Pada Saluran (pu)

$x_{(jj)}$ = Reaktansi Pada Saluran (pu)

www.itk.ac.id

Nilai dari VSI harus lebih besar sama dengan 0. Semakin rendah *index* VSI dari suatu bus dapat dinyatakan bahwa profil tegangan pada bus tersebut kurang baik. Nilai *index* VSI semakin tinggi maka, profil tegangan pada bus tersebut juga akan semakin naik.

2.6 Rugi-Rugi Daya

Rugi (*losses*) dalam sistem kelistrikan merupakan sesuatu yang sudah pasti terjadi. Rugi daya merupakan antara daya yang dibangkitkan atau dialirkan dari gardu induk dengan daya yang terjual ke pelanggan listrik. Rugi-rugi daya tidak dapat dihindari, tetapi hanya dapat diminimalkan. Nilai dari rugi daya pada jaringan merupakan nilai unjuk kerja jaringan listrik dalam menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit sampai ke pusat beban (Marsudi,2006).

2.7 Profil Tegangan

Profil tegangan merupakan salah satu indikator yang menunjukkan besarnya tegangan yang tersalurkan setiap beberapa periode dengan jarak waktu yang ditentukan. Umumnya, profil tegangan disertai dengan profil beban pada periode yang sama pula. Hal ini untuk mengetahui pengaruh perubahan beban terhadap kualitas tegangan yang terjadi dalam waktu yang sama. Kualitas tegangan pada bus dapat diketahui berdasarkan standar batas tegangan yang sudah ditetapkan, yaitu $\pm 5\% - 10\%$ dari tegangan kerjanya untuk jaringan tegangan rendah (PLN, 1995).

2.8 Posisi Penelitian

Penelitian mengenai penempatan DG untuk memperbaiki profil tegangan dan menurunkan rugi-rugi daya telah dilakukan beberapa penelitian sebelumnya. Tabel 2.1 menampilkan hasil penelitian sebelumnya dan posisi penelitian tugas akhir ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sebelumnya Dengan Penelitian Tugas Akhir

Nama	Judul	Hasil
Artawa,dkk (2017)	Analisa Pengaruh Pemasangan Distributed Generation Terhadap Profil Tegangan Pada	Dengan Pemasangan <i>Distributed Generator</i> pada penyulang Abang Karangasem dapat menurunkan drop

Nama	Judul	Hasil
	Penyulang Abang Karangasem	tegangan dan mengurangi rugi daya pada penyulang
Astriyani (2018)	Analisis Rugi – Rugi Daya Pada Penambahan Pembangkit <i>Distributed Generator</i> Di Sistem Kelistrikan Bau – Bau Dan Raha	Skenario yang digunakan untuk penempatan <i>Distributed Generator</i> yang digunakan lebih baik <i>Distributed Generator</i> ditempatkan di lokasi yang tegangannya masih dibawah batas standar yang telah ditentukan
Dwi Cahyo (2019)	Analisa Dampak <i>Distributed Generator</i> (DG) Dalam Perhitungan <i>Drop Tegangan</i> Pada Jaringan Distribusi	Pemasangan <i>Distributed Generator</i> pada lokasi (bus) yang tepat akan dapat menurunkan drop tegangan pada jaringan distribusi
Mike Yosia (2020)	Analisis Penempatan <i>Distributed Generator</i> Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Dan Mengurangi Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Penyulang H-8 Area Samarinda	

