

## BAB II

# TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang dasar teori dari penelitian yang dilakukan. Adapun yang menjadi landasan teori adalah sistem distribusi tenaga listrik, ketahanan sistem tenaga listrik, kestabilan tegangan, analisis aliran daya (*power flow analysis*), *distributed generation* (DG), *line voltage stability index* (LVSI).

### 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik memiliki fungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar sampai ke konsumen. Tenaga listrik disalurkan melalui beberapa tahap, yaitu dari pembangkit tenaga listrik dengan tegangan besar dari 11 kV sampai dengan 24 kV, kemudian melalui gardu induk (GI) tegangan dinaikkan oleh transformator *step up* menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV. Tenaga listrik tersebut disalurkan melalui saluran transmisi tenaga listrik. Tegangan dinaikkan bertujuan untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi. Setelah dari GI tenaga listrik disalurkan ke jaringan distribusi primer yang merupakan saluran distribusi sebelum trafo distribusi konsumen, dan melalui gardu distribusi level tegangan diturunkan menjadi tegangan rendah dari 20kV menjadi 400/380V. Kemudian tenaga listrik dialirkan ke konsumen (Stevenson, 1996).

Secara umum yang termasuk ke dalam sistem distribusi antara lain:

1. Gardu Induk

Gardu induk merupakan unit di dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menerima daya dari sistem transmisi untuk kemudian diteruskan menuju sistem distribusi. Pada gardu induk ini tegangan dari sistem transmisi (150 kV-500 kV) diturunkan menjadi tegangan untuk distribusi (20 kV).

1. Jaringan Subtransmisi

Jaringan subtransmisi merupakan jaringan yang berfungsi untuk mengalirkan daya dari GI menuju gardu distribusi. Namun jaringan subtransmisi belum tentu ada di seluruh sistem distribusi, karena jaringan subtransmisi merupakan jaringan

dengan tegangan peralihan. Seperti jaringan transmisi 500 kV, setelah masuk GI tegangan menjadi 150 kV. Sehingga jaringan ini dinamakan subtransmisi karena masih bertegangan tinggi.

## 2. Gardu Distribusi Utama

Gardu distribusi merupakan unit dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari GI atau dari jaringan subtransmisi untuk kemudian disalurkan kepada penyulang primer atau langsung kepada konsumen.

## 3. Saluran Penyulang Utama

Saluran penyulang utama merupakan rangkaian yang berfungsi untuk menghubungkan antara gardu distribusi utama dengan gardu transformator distribusi atau menghubungkan GI dengan gardu transformator distribusi.

## 4. Transformator Distribusi

Transformator distribusi berada di dalam gardu-gardu distribusi. Berfungsi untuk mengubah tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V). Kemudian daya dengan tegangan rendah tersebut disalurkan kepada konsumen (Oxford, 1950).

Sistem distribusi memiliki beberapa konfigurasi jaringan. Salah satu konfigurasi yang banyak digunakan pada sistem distribusi yaitu konfigurasi jaringan radial. Konfigurasi jaringan radial memiliki banyak keuntungan dimana jaringan ini memiliki bentuk sederhana, mudah dalam melindungi jaringan dari arus gangguan, kontrol tegangan yang lebih mudah, prediksi dan kontrol aliran daya yang lebih mudah serta biaya investasi yang murah. Penyaluran daya kurang terjamin sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran mengalami gangguan maka mengalami “black out” secara total. Salah satu cara mengurangi gangguan pada bentuk radial yaitu dengan menambahkan peralatan pengaman secara otomatis atau *recloser* (Short, 2004).

## 2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik dengan kondisi operasi awal tertentu, untuk mendapatkan kembali kondisi kesetimbangan operasi setelah mengalami gangguan fisik. Sistem tenaga listrik beroperasi berdasarkan perubahan beban, keluaran generator, topologi dan

parameter operasi lain yang berubah secara kontinyu. Gangguan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua, yakni gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil dalam bentuk perubahan beban yang terjadi secara kontinyu dan sistem menyesuaikan dengan perubahan kondisi. Sistem harus dapat beroperasi dibawah setiap kondisi secara maksimal dan sesuai dengan permintaan beban. Selain itu, sistem juga harus dapat bertahan terhadap beberapa gangguan besar dari dalam dan luar sistem, termasuk hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya sebuah pembangkit besar (Kundur, 1994).

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, seperti *reliability*, *quality* dan *stability*. *Reliability* adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus. *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi. *Stability* kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan (Kundur, 1994).

Sistem tenaga listrik yang baik harus memiliki ketiga syarat yang dipenuhi yaitu sistem mampu memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar besaran untuk tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku dan harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan (Kundur, 1994).

Bentuk jaringan yang kompleks, pembangkit saling terkoneksi maka keluaran daya listrik berupa besaran seperti tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban dan pembangkit yang lain bebannya kecil (Kundur, 1994).

Sistem tenaga listrik memiliki variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus dipasok dengan besaran daya yang sesuai, bila pada saat tertentu terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga maka perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik dengan kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan baik pada pembangkit maupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat. (Kundur, 1994).



Analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu:

1. Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)

Kestabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat kecil, yang terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap. Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: pembangkit, beban, jaringan transmisi dan kontrol sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)

Kestabilan dinamis adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisis kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya.

3. Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*)

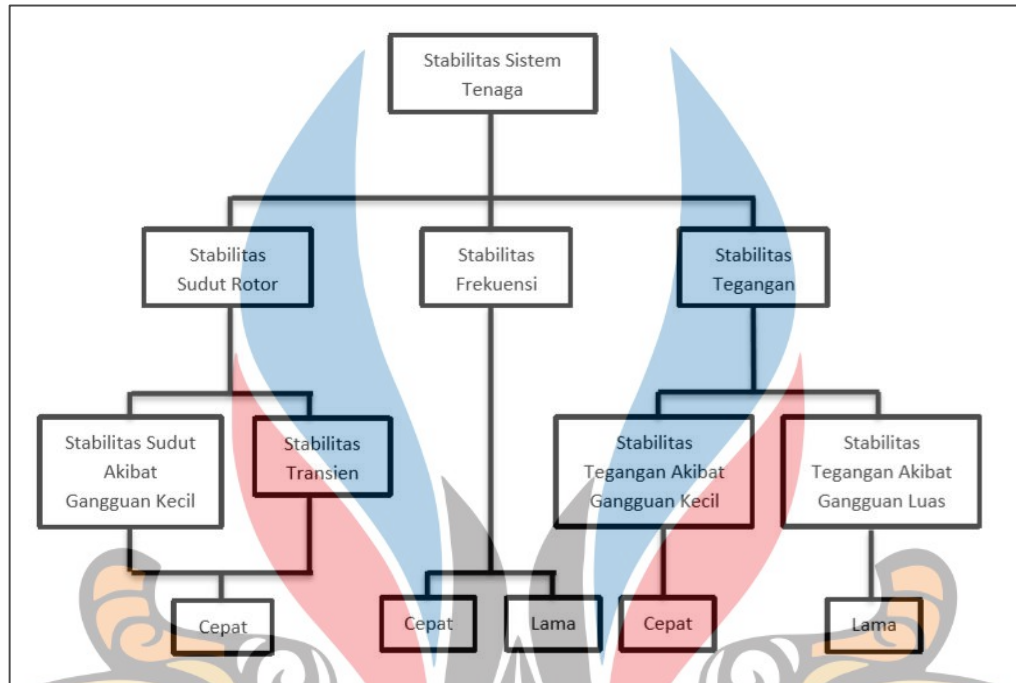
Kestabilan peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem. Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

- a. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit.
- b. Perubahan pada jaringan transmisi misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

Kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini:

- a. Sifat alami dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidakstabilan bisa diamati.
- b. Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.

c. *Device*, proses, dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan.



Gambar 2. 1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik (Kundur, 1994).

Gambar 2.1 menunjukkan klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik ke dalam tiga bagian, yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan (Kundur, 1994).

Stabilitas sudut rotor merupakan kemampuan mesin sinkron yang saling terhubung sistem daya untuk tetap sinkron dimana saat dua atau lebih mesin sinkron dihubungkan maka mesin sinkron harus memiliki nilai frekuensi dan kecepatan yang sama. Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi stabilitas sudut akibat gangguan kecil dan stabilitas transien.

- Stabilitas sudut akibat gangguan kecil adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik yang tidak teredam.
- Stabilitas transien terjadi akibat kurang sinkronnya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.

Stabilitas frekuensi adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan frekuensi saat terjadi gangguan misalnya pelepasan beban secara tiba-tiba, lepasnya generator dan *short circuit*. Sistem dapat dikatakan

stabil frekuensinya ketika sistem mampu kembali ke keadaan normal setelah terjadi gangguan dengan level frekuensi dan selang waktu yang sesuai standar. Faktor yang mempengaruhi kestabilan frekuensi adalah tidak sinkronnya jumlah pembangkitan dengan jumlah beban serta fungsi governor yang tidak bekerja. Stabilitas tegangan diklasifikasikan menjadi stabilitas akibat gangguan kecil dan stabilitas akibat gangguan luas.

- a. Stabilitas akibat gangguan kecil merupakan kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan setelah gangguan kecil seperti perubahan beban. Stabilitas tegangan gangguan kecil ditentukan oleh karakteristik beban guna mengetahui sistem dalam merespon perubahan sistem kecil. Waktu dari gangguan kecil adalah 3 detik sampai dengan 1 menit.
- b. Stabilitas tegangan akibat gangguan lama adalah kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan setelah gangguan besar seperti kesalahan sistem, hilangnya generasi, atau kontingensi jaringan. Stabilitas tegangan akibat gangguan lama ini ditentukan oleh sistem beban karakteristik dan interaksi secara terus-menerus. Durasi dari gangguan besar adalah lebih dari 1 menit.

### 2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan berkaitan dengan kemampuan suatu sistem daya untuk menjaga tegangan tetap stabil pada semua bus dalam sistem pada kondisi operasi normal dan setelah terjadi gangguan. Ketidakstabilan yang terjadi mengakibatkan tegangan turun atau tegangan naik pada beberapa bus. Akibat yang mungkin timbul dari ketidakstabilan tegangan adalah hilangnya beban di daerah dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima atau hilangnya integritas sistem daya. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan biasanya jatuh tegangan yang terjadi ketika aliran daya aktif dan reaktif melalui reaktansi induktif yang terkait dengan jaringan transmisi, dimana hal ini membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mentransfer daya.

Masalah kestabilan tegangan biasanya terjadi pada sistem dengan pembebanan yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat menginisiasi terjadinya runtuh tegangan. Gangguan yang menyebabkan runtuh tegangan dapat dipicu oleh beberapa hal, seperti naiknya beban atau gangguan besar yang muncul secara tiba-



tiba. Masalah yang paling mendasar adalah lemahnya sistem tenaga listrik. Di samping kekuatan jaringan transmisi dan kemampuan transfer daya, faktor-faktor yang berkontribusi dalam fenomena runtuh tegangan (*voltage collapse*), antara lain batas kendali tegangan / daya reaktif generator, karakteristik beban, karakteristik kompensator daya reaktif dan aksi dari *device* kendali tegangan seperti *transformator on-load tap changer*.

Istilah-istilah yang terkait dengan kestabilan tegangan dapat didefinisikan sebagai berikut:

- a. Kestabilan tegangan (*voltage stability*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh *bus* dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan, baik pada saat kondisi normal maupun setelah terkena gangguan.
- b. Runtuh tegangan (*voltage collapse*) adalah proses dimana ketidakstabilan tegangan berakhir pada nilai tegangan yang sangat rendah pada bagian penting dari sistem tenaga listrik.
- c. Keamanan tegangan (*voltage security*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik, tidak hanya untuk beroperasi stabil, tetapi juga tetap stabil (selama sistem proteksi tetap bekerja untuk mempertahankan tegangan) setelah terjadi gangguan atau perubahan keadaan sistem yang signifikan.

Ketidakstabilan tegangan dan proses runtuh tegangan dapat terjadi dalam selang waktu beberapa detik hingga beberapa menit. Sejumlah komponen dan kendali sistem tenaga listrik memainkan peran dalam kestabilan tegangan. Karakteristik sistem dan gangguan akan menentukan fenomena yang penting bagi suatu sistem tenaga listrik.

Berdasarkan rentang waktu terjadinya, kestabilan tegangan dibagi menjadi kestabilan tegangan transien (*transient voltage stability*) dan kestabilan tegangan jangka panjang (*longer-term stability*). Setiap komponen dalam sistem tenaga listrik memberikan pengaruh terhadap kestabilan tegangan sistem tersebut, termasuk sistem pembangkitan, sistem transmisi, karakteristik beban, dan kompensator daya reaktif (Kundur, 1994).

Analisis statis (pada keadaan konstan) biasanya digunakan pada masalah ketidakstabilan tegangan yang disebabkan oleh gangguan-gangguan kecil, seperti

kenaikan beban. Metode studi utama yang digunakan untuk analisis statis adalah simulasi aliran daya. Metode ini terbagi menjadi dua, yakni kurva P-V dan kurva Q-V. Kedua metode tersebut dapat menentukan batas pembebanan pada keadaan *steady state* yang terkait dengan kestabilan tegangan (Taylor, 1994).

## 2.4 Analisis Aliran Daya (*Power Flow Analysis*)

Pada sistem tenaga listrik, daya mengalir dari pusat pembangkitan menuju beban dengan melalui cabang-cabang yang berbeda pada jaringan. Aliran daya aktif dan daya reaktif diketahui sebagai aliran daya (*power flow*) atau aliran beban (*load flow*). Analisis aliran beban ini sangat penting dilakukan pada saat perancangan pengembangan sistem tenaga listrik dimasa yang akan datang. Analisis ini dilakukan untuk melihat efek-efek interkoneksi sistem yang ada dengan sistem baru, beban yang baru, pusat pembangkit listrik yang baru, jaringan transmisi yang baru sebelum semuanya beroperasi agar kualitas sistem tenaga listrik yang ada nanti akan sesuai dengan standar yang ada. Studi aliran beban ini menyediakan pendekatan matematika secara sistematis untuk mengetahui tegangan *bus*, sudut fase, daya aktif dan reaktif yang mengalir melalui jaringan, generator, *setting* transformator dan beban pada saat keadaan *steady state* (Saadat, 2010).

Di dalam studi tenaga listrik, termasuk studi aliran daya, *bus-bus* jaringan dibedakan menjadi 3 macam *bus*, yaitu

### a. *Slack Bus*

*Bus* ini digunakan sebagai *bus* referensi yang berguna dalam kondisi menyeimbangkan daya. *Slack bus* biasanya berupa unit pembangkitan yang dapat digunakan setiap saat dan dibutuhkan untuk memastikan daya seimbang. Variabel yang diketahui pada *bus* ini adalah  $|V|$  dan  $\delta$ , serta yang tidak diketahui adalah P dan Q.

### b. *Generator Bus (PV Bus)*

*Bus* ini merupakan *bus* kontrol tegangan. *Bus* ini dihubungkan dengan unit generator yang mana daya keluaran yang dibangkitkan melalui *bus* ini dapat dikontrol dengan mengatur *prime mover* dan tegangan dapat dikontrol dengan mengatur eksitasi dari generator. Variabel yang diketahui pada *bus* ini adalah P dan  $|V|$ , serta yang tidak diketahui adalah Q dan  $\delta$ .



c. Load Bus (PQ Bus)

Bus ini merupakan bus non-generator yang dapat diperoleh dari data maupun perhitungan. Suplai daya aktif dan reaktif pada sistem tenaga didefinisikan positif, sedangkan daya yang dikonsumsi oleh sistem tenaga didefinisikan negatif. Pada bus ini, beban daya aktif dan reaktif berkumpul. Variabel yang diketahui pada bus ini adalah P dan Q, serta yang tidak diketahui adalah  $|V|$  dan  $\delta$  (Sadaat, 2010).

Membentuk matriks admitansi bus sistem tenaga listrik untuk menghitung dan menganalisis aliran daya menggunakan persamaan sebagai berikut (Sadaat, 1999):

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} \quad (2.1)$$

Dimana  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus i ke bus j (Mho) dan  $Z_{ij}$  merupakan impedansi dari bus i ke bus j (Ohm).

Persamaan arus pada bus adalah

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.2)$$

Dimana  $I_{bus}$  merupakan arus bus (Ampere),  $Y_{bus}$  merupakan admitansi bus (Mho) dan  $V_{bus}$  merupakan tegangan bus (Volt).

Persamaan tersebut dapat dituliskan kedalam bentuk umum untuk sistem  $n$  bus

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad \text{untuk } i = 1, 2, 3, n \quad (2.3)$$

Dimana  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus i ke bus j (Mho) dan  $V_j$  merupakan tegangan pada bus j (Volt).

Persamaan (2.3) menjadi,

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad \text{untuk } j \neq i \quad (2.4)$$

Dimana  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho), dan  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt).

Daya kompleks yang dikirim ke bus  $i$  adalah

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.5)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.6)$$

Dimana  $S_i$  merupakan daya kompleks pada bus  $i$  (VA),  $P_i$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  (Watt),  $Q_i$  merupakan daya reaktif pada bus  $i$  (Var),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt) dan  $I_i$  merupakan arus pada bus  $i$  (Ampere).

Persamaan (2.6) disubstitusi, sehingga persamaan menjadi

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad \text{untuk } j \neq i \quad (2.7)$$

Dimana  $P_i$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  (Watt),  $Q_i$  merupakan daya reaktif pada bus  $i$  (Var),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt) dan  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho).

Persamaan aliran daya metode Newton Raphson dirumuskan dalam bentuk polar. Persamaan tersebut dapat ditulis ulang menjadi

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.8)$$

Dimana  $I_i$  merupakan arus pada bus  $i$  (Ampere),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho), dan  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt).

Persamaan (2.8) ditulis dalam bentuk polar adalah

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.9)$$

Dimana  $I_i$  merupakan arus pada bus I (Ampere),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus i ke bus j (Mho),  $V_j$  merupakan tegangan pada bus j (Volt),  $\theta_{ij}$  merupakan sudut fase pada bus i ke bus j dan  $\delta_j$  merupakan sudut fase pada bus j.

Daya kompleks pada bus  $i$  adalah

$$P_i - jQ = V_i^* I_i \quad (2.10)$$

Dimana  $P_i$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  (Watt),  $Q$  merupakan daya reaktif (Var),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt) dan  $I_i$  merupakan arus pada bus  $i$  (Ampere).

Substitusi dari persamaan (2.9) untuk  $I_i$ , ke persamaan (2.10) menghasilkan

$$P_i - jQ = |V_i| \angle \delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.11)$$

Dimana  $P_i$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  (Watt),  $Q$  merupakan daya reaktif (Var),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt) dan  $I_i$  merupakan arus pada bus  $i$  (Ampere),  $\delta_i$  merupakan sudut fase pada bus  $i$ ,  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho),  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt),  $\theta_{ij}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  ke bus  $j$  dan  $\delta_j$  merupakan sudut fase pada bus  $j$ .

Pisahkan bagian riil dan imajiner

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.12)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.13)$$

Dimana  $P_i$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  (Watt),  $Q_i$  merupakan daya reaktif pada bus  $i$  (Var),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt),  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho),  $\theta_{ij}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  ke bus  $j$ ,  $\delta_i$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  dan  $\delta_j$  merupakan sudut fase pada bus  $j$ .



Persamaan (2.12) dan (2.13) membentuk persamaan aljabar nonlinear dengan variabel sendiri. Besarnya setiap variabel dinyatakan dalam satuan per unit dan untuk sudut fase dinyatakan dalam satuan radian persamaan (2.11) dan (2.13) dikembangkan dari deret Taylor seperti persamaan berikut

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^k \\ \vdots \\ \Delta P_n^k \\ \Delta |Q_2^k| \\ \vdots \\ \Delta |Q_n^k| \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^k \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^k \\ \Delta |V_2^k| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^k| \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^k & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^k \end{bmatrix}} \quad (2.14)$$

Dalam hal ini, bus 1 diasumsikan sebagai *slack bus*. Matriks *Jacobian* memberikan perbandingan linear antara perubahan pada sudut tegangan  $\Delta \delta_1^{(k)}$  dan besarnya tegangan  $\Delta |V_1^k|$  dengan sedikit perubahan pada daya aktif ( $\Delta P_i^{(k)}$ ) dan daya reaktif ( $\Delta Q_i^{(k)}$ ). Dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Dimana  $\Delta P$  merupakan selisih daya reaktif (Watt),  $\Delta Q$  merupakan selisih daya reaktif (Var),  $\Delta \delta$  merupakan selisih sudut fase,  $\Delta |V|$  merupakan selisih tegangan (Volt), serta  $J_1, J_2, J_3, J_4$  merupakan elemen matriks *Jacobian*.

Banyaknya elemen matriks *Jacobian* dari persamaan (2.15) ditentukan dengan  $(2n - 2 - m) \times (2n - 2 - m)$  dengan  $n$  adalah banyaknya bus pada setiap sistem, sedangkan  $m$  adalah banyaknya *voltage controlled buses* pada sistem.  $J_1$  diperoleh dari  $(n - 1) \times (n - 1)$ ,  $J_2$  diperoleh dari  $(n - 1) \times (n - 1 - m)$ ,  $J_3$  diperoleh dari  $(n - 1 - m) \times (n - 1)$  dan  $J_4$  diperoleh dari  $(n - 1 - m) \times (n - 1 - m)$ .

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk  $J_1$  adalah

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.17)$$

Dimana  $P_i$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  (Watt),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt),  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho),  $\theta_{ij}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  ke bus  $j$ ,  $\delta_i$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  dan  $\delta_j$  merupakan sudut fase pada bus  $j$ .

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk  $J_2$  adalah

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2.19)$$

Dimana  $P_i$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  (Watt),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt),  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho),  $\theta_{ij}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  ke bus  $j$ ,  $\delta_i$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  dan  $\delta_j$  merupakan sudut fase pada bus  $j$ .

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk  $J_3$  adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.20)$$

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

Dimana,  $Q_i$  merupakan daya reaktif pada bus  $i$  (Var),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt),  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho),  $\theta_{ij}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  ke bus  $j$ ,  $\delta_i$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  dan  $\delta_j$  merupakan sudut fase pada bus  $j$ .

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk  $J_4$  adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.22)$$

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

Dimana,  $Q_i$  merupakan daya reaktif pada bus  $i$  (Var),  $V_i$  merupakan tegangan pada bus  $i$  (Volt),  $V_j$  merupakan tegangan pada bus  $j$  (Volt),  $Y_{ij}$  merupakan admitansi dari bus  $i$  ke bus  $j$  (Mho),  $\theta_{ij}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  ke bus  $j$ ,  $\delta_i$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  dan  $\delta_j$  merupakan sudut fase pada bus  $j$ .

Nilai dari  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  berbeda antara jadwal dengan nilai perhitungan, dan ini disebut sisa daya (*power residulasi*) yang diberikan dengan

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.24)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.25)$$

Dimana  $\Delta P_i^{(k)}$  merupakan selisih daya aktif dengan iterasi ke-  $k$  (Watt),  $P_i^{sch}$  merupakan daya aktif yang dihasilkan generator (Watt), dan  $P_i^{(k)}$  merupakan daya aktif pada bus  $i$  dengan iterasi ke-  $k$  (Watt). Sedangkan  $\Delta Q_i^{(k)}$  merupakan selisih daya reaktif dengan iterasi ke-  $k$  (Var),  $Q_i^{sch}$  merupakan daya reaktif yang dihasilkan generator (Var), dan  $Q_i^{(k)}$  merupakan daya reaktif pada bus  $i$  dengan iterasi ke-  $k$  (Var).

Perhitungan berupa sudut fase dan tegangan bus adalah

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.26)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.27)$$



Dimana  $\delta_i^{(k+1)}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  dengan iterasi  $k + 1$ ,  $\delta_i^{(k)}$  merupakan sudut fase pada bus  $i$  dengan iterasi  $k$ ,  $\Delta\delta_i^{(k)}$  merupakan selisih sudut fase pada bus  $i$  dengan iterasi  $k + 1$ . Sedangkan  $|V_i^{(k+1)}|$  merupakan tegangan pada bus  $i$  dengan iterasi  $k + 1$  (Volt),  $|V_i^{(k)}|$  merupakan tegangan pada bus  $i$  dengan iterasi  $k$  (Volt),  $\Delta|V_i^{(k)}|$  selisih tegangan pada bus  $i$  dengan iterasi  $k + 1$  (Volt).

## 2.5 Distributed Generation (DG)

DG merupakan pembangkit listrik skala kecil oleh unit yang dekat dengan beban yang dilayani dan langsung tersambung langsung ke jaringan listrik. Teknologi DG berkisar dari 5 kW hingga 30 MW. DG melibatkan penggunaan teknologi seperti mikroturbin, mesin *sterling*, sel bahan bakar dan energi terbarukan seperti *photovoltaic*, angin dan sistem *biomassa*. DG dapat memenuhi kebutuhan berbagai pengguna, mulai dari bagian perumahan hingga komersial dan industri (Momoh, 2007).

Pembangkitan terdistribusi (DG) dapat membantu mengurangi investasi dalam kapasitas transmisi dan distribusi. Dari sudut pandang perencanaan, DG dapat ditempatkan dekat dengan pusat beban, sehingga meminimalkan kehilangan jaringan dari sudut pandang operasi dan mengurangi biaya untuk operasi serta kontrol. DG dapat membantu mengurangi kerugian dalam jaringan distribusi dan dapat digunakan sebagai generasi pembangkit terbarukan yang dapat berdiri sendiri atau sebagai cadangan. DG dapat berkontribusi pada penyediaan layanan tambahan yang diperlukan untuk menjaga operasi sistem yang stabil. Kategori DG dibagi menjadi beberapa level yaitu DG mikro (antara 1 W dan 5 kW), DG kecil (antara 3 kW dan 5 MW), DG menengah (antara 5 dan 50 MW) serta DG besar (antara 50 dan 300 MW) (Momoh, 2007).

Daya yang didistribusikan DG memiliki potensi untuk menyerap hingga 20% dari total kapasitas pembangkit baru, atau sekitar 35 Gigawatt (GW). Teknologi DG termasuk generator turbin pembakaran kecil (termasuk mikroturbin), mesin dan generator bolak-balik pembakaran internal, panel *photovoltaic* dan sel bahan bakar. DG dapat menyediakan banyak layanan yang bermanfaat bagi konsumen.

Teknologi DG memiliki manfaat untuk mengurangi polusi yang sering dikaitkan dengan pembangkit listrik tenaga batubara (Borbely, 2001).

DG bagi sistem pembangkit memiliki banyak keuntungan, yaitu meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem serta dapat memperbaiki kualitas daya dan level tegangan. DG juga dapat memberikan berbagai layanan untuk berbagai manfaat dan konsumen, termasuk sebagai pembangkit siaga, pembangkit pendukung beban puncak, 6 pembangkit beban dasar, pendukung penyediaan daya aktif, pendukung penyediaan daya reaktif, pendukung tegangan, stabilitas jaringan, cadangan berputar dan dapat menurunkan rugi daya pada jaringan (Wang, 2004).

Disamping keuntungan, DG pun dapat menimbulkan beberapa kerugian, misal menambah jumlah arus hubung singkat apabila terjadi gangguan pada sistem. Oleh karena itu, terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam pemasangan DG yaitu besar arus hubung singkat, level tegangan serta kerugian pada sistem. Salah satu hal yang sangat penting dalam pembahasan DG adalah mengenai penentuan letak dan kapasitas optimal apabila menghasilkan penambahan arus hubung singkat dan kerugian daya yang minimal serta level tegangan yang terjaga, yaitu berada antara nilai minimal dan maksimal (Elnashar, 2009).

Sistem distribusi saat ini diasumsikan bahwa, semua pertumbuhan beban di masa depan dipenuhi dengan melakukan pemasangan DG di titik beban pertumbuhan penduduk. Dengan demikian, permintaan daya listrik dan aliran di saluran transmisi tidak berubah dan tetap stabil. Penambahan DG dan beban dalam sistem distribusi berpengaruh terhadap generator sinkron utama pada sistem dan ini menyebabkan karakteristik sistem berubah. Tingkat penetrasi DG dapat dihitung sebagai fungsi dari total pembangkit listrik DG terhadap beban total pada sistem distribusi (Khani et al, 2012).

$$\%DG = \frac{P_{DG}}{P_{load}} \times 100 \quad (2.28)$$

Keterangan persamaan (2.28) sebagai berikut

$P_{DG}$  adalah total daya aktif yang dihasilkan oleh unit DG

$P_{load}$  adalah total daya aktif yang dikonsumsi oleh beban sistem.

Sebagian besar pembangkit energi terbarukan telah terhubung pada jaringan distribusi tegangan menengah (*medium voltage*) dan tegangan rendah (*low voltage*).

Sumber pembangkit jenis ini umumnya dikenal sebagai DG. Jaringan distribusi konvensional dirancang untuk aliran daya dalam satu arah. Namun, dengan adanya DG, aliran daya berpotensi dua arah, menghasilkan variasi standar tegangan. Selama tingkat penetrasi DG ke sistem tinggi, batas tegangan atas (*high voltage*) dapat dilampaui. Tingkat penetrasi didefinisikan sebagai rasio daya yang dihasilkan oleh DG untuk total beban yang terhubung ke penyulang, dalam persentase pada waktu tertentu. Jika tingkat penetrasi di atas 50%, maka itu bisa dianggap sebagai penetrasi tinggi (Bansal, 2017).

### 2.5.1 Jenis - Jenis DG

#### a. Photovoltaic (PV)

PV merupakan jenis DG dengan sumber listrik yang langsung dikonversi melalui sinar matahari menjadi energi listrik. Umumnya PV dibuat menggunakan bahan semikonduktor. Saat ini, bahan yang paling umum digunakan PV adalah silikon. Sel surya didasarkan pada bahan *monocrystalline* berwarna biru kehitaman dengan efisiensi 24.2%, *polycrystalline* berwarna biru dengan efisiensi 13-15% dan *amorf* atau *microcrystalline* berwarna gelap dengan efisiensi 5-8%. Sel PV memiliki efisiensi dari 5 - 15%. Panel surya dibuat dari bahan panel kaca yang dirancang untuk memaksimalkan penyerapan energi matahari dan meminimalkan pantulan sinar matahari untuk meningkatkan efisiensi dari produksi energi listrik. Pengaruh refleksi dapat dikurangi dengan penggunaan panel yang terbuat dari bahan berwarna gelap yang menyerap cahaya dan dilapisi oleh bahan anti refleksi. Misalnya, dengan menggunakan *Brisbane Materials Technology* (BMT) dimana panel surya memantulkan kurang dari 1% sinar matahari (Hermawan, 2017).

Komponen PV yaitu Inverter yang berfungsi mengkonversi daya DC yang dihasilkan oleh PV ke daya AC untuk disalurkan ke sistem. Ada dua jenis utama inverter yaitu inverter baterai atau daya, yang menggunakan baterai sebagai sumber daya mereka, dan inverter kisi-interaktif, yang digunakan pada grid-terhubung sistem PV (Neil, 2012).

#### b. Turbin Minihydro

Minihydro merupakan jenis DG dengan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dengan air sebagai sumber energi primernya. Minihydro menggunakan



turbin hydro untuk mengubah energi potensial dan kinetik yang berasal dari air menjadi daya mekanik yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik pada generator. Shaft mekanik turbin hydro memanfaatkan tekanan dan debit air yang mengalir akibat adanya perbedaan ketinggian. Daya yang dihasilkan sebanding dengan perkalian tekanan dan debit air. Turbin yang baik memiliki efisiensi sebesar 80 % - 90 % (Sachim, 2012).

### c. Generator Diesel

Generator diesel merupakan jenis DG yang banyak digunakan dalam teknologi *microgrid* saat ini. Pembangkit jenis ini banyak digunakan karena memiliki efisiensi dan keandalan yang tinggi. Diesel menggunakan bahan bakar sebagai sumber primernya. Energi listrik dibangkitkan dari generator sinkron. Kriteria yang paling menonjol dari generator diesel adalah keberlangsungan bahan bakarnya. Generator diesel harus mampu mempertahankan nilai tegangan dan frekuensi ketika terjadi perubahan beban yang cepat (Ilhami, 2015).

## 2.6 Line Voltage Stability Index

Kondisi stabilitas tegangan pada sistem tenaga dapat ditunjukkan dengan indeks kestabilan tegangan. *Line Voltage Stability Index* (LVSI) merupakan salah satu indeks kestabilan tegangan berdasarkan saluran. Pada metode LVSI sistem dapat dikatakan stabil jika bernilai kurang dari 1 p.u. LVSI berasal dari hubungan antara daya reaktif pada ujung penerima dan tegangan di ujung pengirim. Sehingga persamaan LVSI sebagai berikut (Danish, 2015)

$$LVSI = \frac{4 \cdot R \cdot P_r}{V_s \cdot \cos(\theta - \delta)^2} \quad (2.29)$$

Keterangan persamaan (2.29):

$V_s$  : Tegangan sisi pengirim (Volt)

$R$  : Resistansi (Ohm)

$P_r$  : Daya aktif sisi penerima (Watt)

$\theta$  : Sudut impedansi

$\delta$  : Sudut fase

[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)



[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

## 2.7 Penelitian Terdahulu

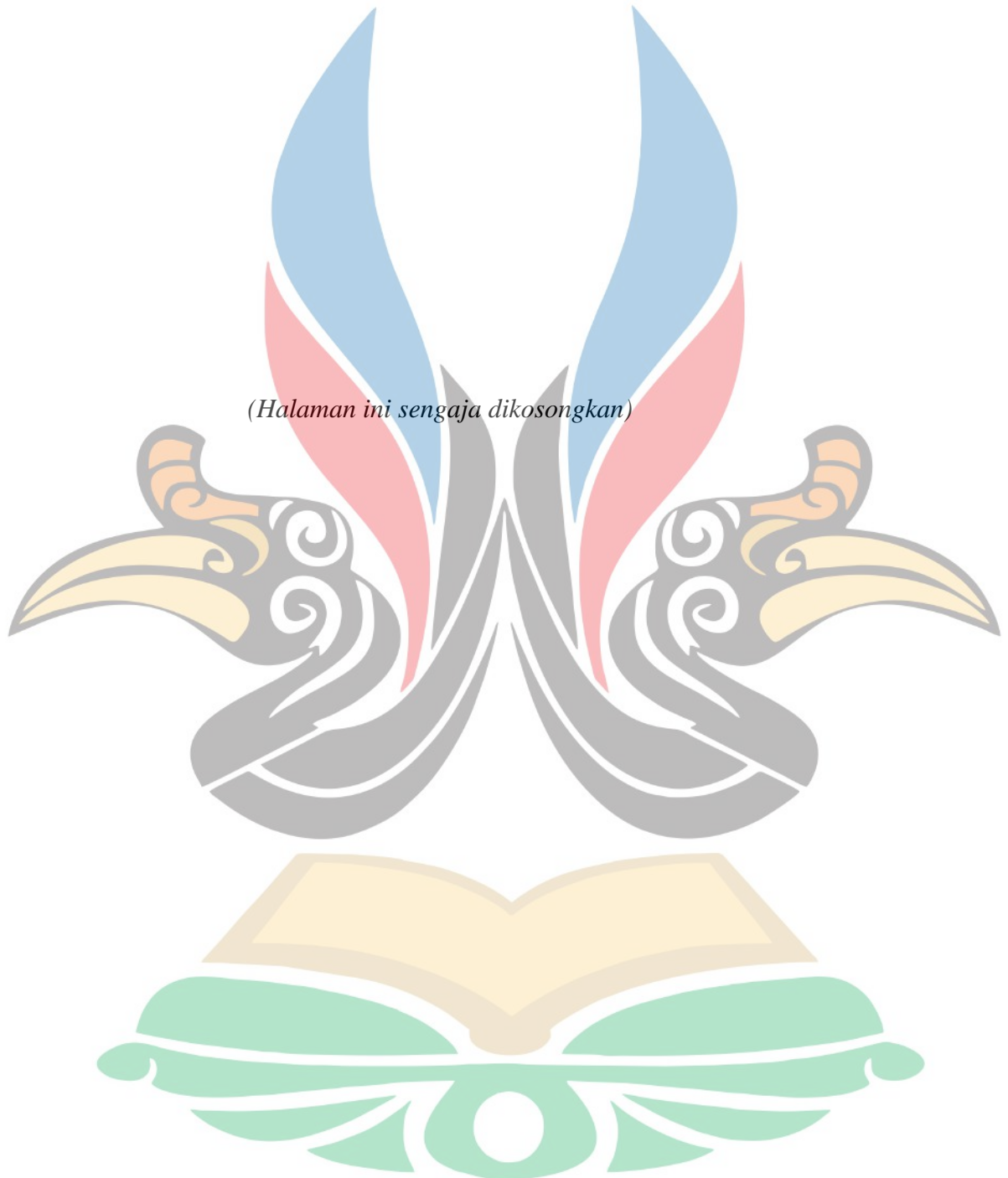
Berikut adalah rangkuman hasil penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Judul	Hasil
1	Prado dkk, 2016	<i>Analysis of Distributed Generation Impact on the Voltage Stability Margin</i>	Dengan mengintegrasikan DG ke sistem, nilai daya yang diberikan meningkat, semakin besar batas stabilitas tegangan. Batas yang lebih besar memastikan sistem lebih aman dan lebih rentan terhadap sistem ketidakstabilan. Penentuan penempatan DG juga berpengaruh terhadap nilai bus dan juga kestabilan tegangan, dimana bus yang nilainya lebih rendah memiliki nilai kestabilan tegangan yang besar dan bus yang memiliki nilai tinggi memiliki nilai kestabilan tegangan yang kecil.
2	Jing-jing, Tu dan Zhong-dong, Yin, 2017.	<i>An Evaluation Index of Voltage Stability of Distribution Network Considering DG</i>	Dengan adanya DG sangat bermanfaat untuk mengurangi rugi-rugi sistem dan dapat digunakan sebagai penstabil tegangan yang efektif.
3	Mostafa dkk, 2016.	<i>Power Flow Study &amp; Voltage Stability Analysis For Radial System with Distributed Generation</i>	Ukuran dan lokasi DG dapat menghasilkan pengaruh yang positif terhadap kestabilan tegangan. Metode optimasi dapat digunakan untuk mendisain lokasi dan ukuran DG agar tercapainya kestabilan tegangan yang sesuai dengan target kestabilan tegangan yang diinginkan. Turbin angin di tempatkan di bus yang memiliki nilai yang rendah dan Pv direkomendasikan ditempatkan pada bus yang memiliki nilai yang sensitif.



[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

No	Nama dan Tahun Publikasi	Judul	Hasil
4	Jahan dan Mannan, 2014	<i>Voltage Stability Analysis of a 16-bus Distribution Network Based on Voltage Sensitivity Factor</i>	Besarnya nilai bus ditentukan menggunakan hasil simulasi dan bus 7 memiliki nilai yang sensitiv atau terlemah sedangkan bus 8 memiliki nilai yang terbaik. Dengan meningkatnya daya aktif menyebabkan berkurangnya beban menggunakan DG dan menyatakan aliran daya yang tidak konvergen, sehingga, peletakkan DG tidak cocok karena daya reaktif yang berkurang.
5	Dianjar Septiani, 2020	Analisis Penempatan <i>Distributed Generation (DG)</i> Terhadap Kestabilan Tegangan Pada Sistem Distribusi 20 kV Penyulang B4 GI Bukuan Samarinda	

