



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**STUDI PENEMPATAN LOKASI OPTIMAL  
*DISTRIBUTED GENERATION* PADA *WEAKLY MASHED  
DISTRIBUTION NETWORK* UNTUK EFISIENSI  
OPERASI ENERGI**

Arizal Ariyanto  
NRP 2213100074

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**OPTIMAL PLACEMENT OF DISTRIBUTION  
GENERATION IN WEAKLY MESHED DISTRIBUTION  
NETWORK FOR ENERGY EFFICIENT OPERATION**

Arizal Ariyanto  
NRP 2213100074

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**STUDI PENEMPATAN LOKASI OPTIMAL *DISTRIBUTED GENERATION* PADA *WEAKLY MESHED DISTRIBUTION NETWORK* UNTUK EFISIENSI OPERASI ENERGI**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2017

Arizal Ariyanto  
NRP. 2213100074

**STUDI PENEMPATAN LOKASI OPTIMAL *DISTRIBUTED*  
GENERATION PADA *WEAKLY MESHED DISTRIBUTION*  
NETWORK UNTUK EFISIENSI OPERASI ENERGI**

**TUGAS AKHIR**

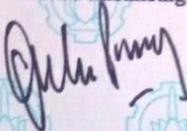
Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

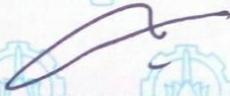
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

  
Prof. Ir. Ontoşeno Penangsang, M.Sc, Ph.D  
NIP. 194907151974121001

  
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT  
NIP. 19551207198031004



**STUDI PENEMPATAN LOKASI OPTIMAL  
DISTRIBUTED GENERATION PADA WEAKLY  
MESHED DISTRIBUTION NETWORK UNTUK  
EFISIENSI OPERASI ENERGI**

Nama Mahasiswa : Arizal Ariyanto  
NRP : 2213100074  
Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D  
NIP : 194907151974121001  
Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT  
NIP : 19551207198031004

**ABSTRAK**

Perkembangan sistem distribusi semakin besar dan kompleks saat ini menyebabkan rugi-rugi daya yang timbul lebih tinggi, hampir 10-13% dari total daya yang dihasilkan hilang sebagai kerugian saluran yang menyebabkan peningkatan biaya energi dan profil tegangan yang buruk sepanjang saluran distribusi. Salah satunya untuk menanggulangi hal tersebut adalah dengan pemasangan *Distributed Generation*. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai penempatan lokasi optimal DG pada jaringan distribusi IEEE 33-bus *weakly meshed* yang didapatkan melalui metode *Voltage Stability Index* (VSI). DG ditempatkan pada bus yang memiliki indeks tegangan terendah sehingga akan mengurangi nilai kerugian daya. Dengan demikian akan mengurangi biaya kerugian daya pada sistem. setelah dilakukan penempatan DG berdasarkan indeks tegangan terendah yaitu pada bus 32 dan 14 dengan kapasitas DG masing-masing 20% dari total beban maka didapatkan nilai kerugian daya sebesar 31.3 kW dengan biaya kerugian daya sebesar 1651.28. Dengan demikian penempatan DG pada bus 32 dan 14 pada jaringan distribusi *weakly meshed* mampu mengurangi biaya kerugian daya sebesar 90035.28 \$ dibandingkan ketika jaringan IEEE 33-bus dalam bentuk jaringan radial tanpa dipasangan DG.

**Kata Kunci :** Kerugian Daya, Jaringan Distribusi *Weakly Meshed*, *Distributed Generation* (DG), , *Voltage Stability Index*, Biaya Kerugian Daya

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **OPTIMAL PLACEMENT OF DISTRIBUTION GENERATION IN WEAKLY MESHE DITRIBUTION NETWORK FOR ENERGY EFFICIENT OPERATION**

Name : Arizal Ariyanto  
NRP : 2213100074  
Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D  
NIP : 194907151974121001  
Supervisor I : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT  
NIP : 19551207198031004

## **ABSTRACT**

The development of distribution systems larger and more complex causes higher power losses, today almost 10-13% of the total power generated is lost as a channel loss. It increase energy costs and decrease a voltage profile in the distribution channel. Distributed Generation is one of the solution to overcome this problem. This study will discuss the optimal placement of DG in the weakly meshed IEEE 33-bus weakly meshed distribution network based on the Voltage Stability Index (VSI) method. DG is placed on the lowest voltage index bus, it will reduce the value of power loss and reduce the cost of power loss system. After the placement of DG based on the lowest voltage index that is on the bus 32 and 14 with DG capacity of 20% of the total load, value of power loss of become 31.3 kW with the cost of power losses is 1651.28. The placement of DG on buses 32 and 14 on the weakly meshed distribution network was able to reduce the cost of power loss 90035.28 \$ compared the IEEE 33-bus radial network without DG placement.

Key word : Power Loss, Weakly Meshed Distribution Network, Distributed Generation (DG), Voltage Stability Index, Coss of Power Loss.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada ALLAH SWT, atas rahmat dan karunia-NYA yang tak pernah henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul, “**Studi Penempatan Lokasi Optimal Distributed Generation pada Weakly Mashed Distribution Network untuk Efisiensi Operasi Energi**” dengan baik dan tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan Strata 1 (S1) pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro-Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penyusunan tugas akhir ini tidak luput dari bantuan berbagai pihak. Oleh sebab itu penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala yang telah diberikan kepada penulis. Pihak-pihak tersebut antara lain adalah:

1. Allah SWT atas limpahan kasih sayang, ridho, petunjuk, rahmat karunia-Nya.
2. Bapak Imam Buchori, Ibu Umi Asih selaku orang tua dan Moch. Iqbal Maulana dan Salsabila Amalia Umami selaku adik-adik penulis, serta seluruh keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis dalam menyelesaikan studi.
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, PhD dan Dr. Ir. Soedibjo, M.MT sebagai dosen pembimbing yang telah membimbing penulis dengan sabar, serta memberikan masukan dalam penyelesaian tugas akhir penulis.
4. Farida Herning Tyastuti yang selalu memberi semangat kepada penulis ketika menemukan kesulitan dan tetap semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Ahmad Febri Firmansyah, yang membantu penulis dalam membantu memecahkan masalah dalam pengerjaan Tugas Akhir.
6. Sahabat Secercah, Rafi, Alde, Sandy, Oofy, William, Ikhwan yang selalu memberi semangat dalam menyelesaikan tugas akhir.

7. Sahabat PSKG II, Setyo, Arif, Rhama, Nafiar, Senko, Aldy, Aji, Palep, Rino, Radifan, Mirza, Andi, Dhimas, Ibu Aminah yang selalu memberi iklim belajar positif.
8. Sahabat Ngompek, Latif, Irfan, Jatu, Jember, Hazby, Gendut, Pendik, Datuk, Sotop, Reza, Gaza, Bintang, Kimbum, Dapuk, Feris yang siap membantu dalam kesulitan TA.
9. Sahabat Pemuda Rahasia, Rany, Laras, Lina, Ivan, Andi, Cindy, Pungky, Mery yang selalu menyemangati.
10. Sahabat Dewan dan Staff DPM ITS 2015-2016 yang mendukung penulis dalam penulisan Tugas Akhir.
11. Sahabat e53 dan anggota Lab PSSL B103 yang selalu membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir.

Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
TABLE OF CONTENTS.....	viix
DAFTAR TABEL .....	ixi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii

<b>BAB I.....</b>	<b>1</b>
<b>PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1.Latar Belakang.....	1
1.2.Perumusan Masalah.....	2
1.3.Batasan Masalah.....	2
1.4.Tujuan.....	2
1.5.Metodologi .....	3
1.6.Sistematika .....	4
1.7.Relevansi .....	5
<b>BAB II.....</b>	<b>7</b>
2.1. Sistem Distribusi .....	7
2.1.1. Sistem Distribusi Radial .....	8
2.1.2. Sistem Distribusi <i>Weakly Mashed</i> .....	9
2.2. Studi Aliran Daya .....	10
2.2.1. Daya Listrik .....	11
2.2.2. Metode Forward Backward Sweep .....	12
2.2.3. Modifikasi K-Matriks .....	13
2.3. Definisi Kestabilan Tegangan.....	16
2.3.1. Perumusan Voltage Stability Index (VSI) .....	18
2.4. Penentuan kapasitas DG .....	20
2.5. Rugi Saluran .....	21
2.6. Biaya Kerugian Energi .....	22
2.7. Distributed Generation (DG) .....	22

<b>BAB III .....</b>	<b>27</b>
<b>PERENCANAAN SISTEM DAN PERANCANGAN PROGRAM.</b>	<b>27</b>
3.1. Pengumpulan data .....	29
3.2. Analisis Aliran Daya .....	32
3.3. <i>Voltage Stability Index (VSI)</i> .....	32
3.4. DG sebagai Beban PQ <i>Negative</i> .....	33
3.5. Efisiensi Energi Operasi.....	34
<b>BAB IV .....</b>	<b>35</b>
<b>SIMULASI DAN ANALISIS DATA .....</b>	<b>35</b>
4.1 Hasil Simulasi .....	35
4.1.1 Sistem Distribusi IEEE 33 bus <i>Weakly Meshed</i> .....	36
4.1.2 Sistem Distribusi IEEE 33 bus <i>Weakly Meshed</i> Menggunakan <i>VSI</i> .....	37
4.1.3 Pemasangan 1 DG pada bus berdasarkan <i>VSI</i> .....	38
4.1.3.1 Dampak pemasangan DG terhadap kerugian energi .	39
4.1.4 Pemasangan 2 DG pada bus berdasarkan <i>VSI</i> .....	40
4.1.4.1 Dampak pemasangan DG terhadap kerugian energi .	41
4.1.5 Sistem Distribusi IEEE 33 bus Radial .....	42
4.1.6 Sistem Distribusi IEEE 33 bus Radial Menggunakan <i>VSI</i> 43	
4.1.7 Pemasangan 1 DG pada bus berdasarkan <i>VSI</i> .....	43
4.1.8 Pemasangan 2 DG pada bus berdasarkan <i>VSI</i> .....	45
4.1.10 Sistem Distribusi IEEE 33 bus <i>Weakly Meshed</i> 1 <i>tie</i> <i>swtich ON</i> .....	47
4.2. Analisa Penempatan DG berdasarkan VSI pada jaringan <i>Weakly Meshed</i> dan Radial.....	52
4.2.1. Jaringan IEEE 33-bus <i>Weakly Meshed</i> menggunakan <i>VSI</i> 52	
4.2.2 Jaringan IEEE 33-bus Radial menggunakan <i>VSI</i> .....	53
<b>BAB V .....</b>	<b>57</b>
5.1 Kesimpulan .....	57
5.2 Saran.....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>59</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>61</b>

## TABLE OF CONTENT

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
PREFACE.....	v
TABLE OF CONTENT .....	vii
TABLE OF CONTENT .....	vii
LIST OF TABLES .....	ix
LIST OF FIGURES .....	xiii

CHAPTER I .....	1
PRELIMINARY .....	1
1.1. Background.....	1
1.2. Problems .....	2
1.3. Scope of Problems .....	2
1.4. Objective .....	2
1.5. Methodology.....	3
1.6. Systematics .....	4
1.7. Relevances .....	5
CHAPTER II.....	7
2.1. Distribution System .....	7
2.1.1. Radial Distribution System .....	8
2.1.2. <i>Weakly Mashed</i> Distribution System .....	9
2.2. Power Flow.....	10
2.2.1. Power .....	11
2.2.2. Forward Backward Sweep Method.....	12
2.2.3. K-Matriks Modification .....	13
2.3. Definition of Voltage Stability .....	16
2.3.1. Voltage Stability Index (VSI) .....	18
2.4. DG Capacity .....	20
2.5. Losses .....	21
2.6. Cost of Losses.....	22

2.7. Distributed Generation (DG).....	22
<b>CHAPTER III .....</b>	<b>27</b>
<b>SYSTEM PLANNING AND PROGRAM DESIGNING .....</b>	<b>27</b>
3.1. Data Colection .....	29
3.2. Power Flow Analysis .....	32
3.3. Voltage Stability Index (VSI).....	32
3.4. DG as PQ Negative Load .....	33
3.5. Energy Efficient Operation.....	34
<b>CHAPTER IV .....</b>	<b>35</b>
<b>SIMULATION DAN DATA ANALYSIS .....</b>	<b>35</b>
4.1 Simulation Results .....	35
4.1.1 IEEE 33 bus Weakly Meshed Distribution System .....	36
4.1.2 IEEE 33 bus Weakly Meshed Distribution System with VSI .....	37
4.1.3 Instalation of 1 DG in bus based on VSI.....	38
4.1.3.1 Impact of DG instalation for energy losses.....	39
4.1.4 Instalation of 2 DG in bus based on VSI.....	40
4.1.4.1 Impact of DG instalation for energy losses.....	41
4.1.5 IEEE 33 bus Radial Distribution System .....	42
4.1.6 IEEE 33 bus Radial Distribution System with VSI.....	43
4.1.7 Instalation of 1 DG in bus based on VSI.....	43
4.1.8 Instalation of 2 DG in bus based on VSI.....	45
4.1.10 IEEE 33 bus Weakly Meshed Distribution System 1 tie swtich ON .....	47
4.2. Analysis of DG instalation based on VSI in Weakly Meshed and Radial Network.....	52
4.2.1. IEEE 33-bus Weakly Meshed Network with VSI.....	52
4.2.2 IEEE 33-bus Radial Network with VSI .....	53
<b>CHAPTER V.....</b>	<b>57</b>
5.1 Conclusion .....	57
5.2 Suggestion .....	57
<b>REFEREMCES .....</b>	<b>59</b>
<b>AUTHOR BIOGRAPHY .....</b>	<b>61</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkitan [9] ..	24
<b>Tabel 2. 2</b> Klasifikasi DG Berdasarkan Teknologi Pembangkitan[10]	25
<b>Table 3. 1</b> Data Saluran Distribusi IEEE 33 Bus .....	30
<b>Tabel 3. 2</b> Data Saluran loop Sistem Distribusi IEEE 33-bus .....	31
<b>Tabel 3. 3</b> <b>Pembebanan Sistem</b> .....	31
<b>Tabel 4. 1</b> Perbandingan Weakly Meshed 1 Tie Switch ON .....	47
<b>(lanjutan) Tabel 4. 2</b> Perbandingan Weakly Meshed 1 Tie Switch ON .....	48
<b>Tabel 4. 3</b> Perbandingan pemasangan DG terhadap nilai kerugian daya dan biaya kerugian energi pada jaringan IEEE 33-bus weakly meshed 5 tie switch ON dan radial.....	53
<b>Tabel 4. 4</b> Perbandingan pemasangan DG terhadap nilai kerugian daya dan biaya kerugian energi pada jaringan IEEE 33-bus weakly meshed 1 tie switch ON (18—33) dan radial .....	54

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Penyaluran Daya Listrik.....	7
Gambar 2. 2 Jaringan Distribusi Radial .....	8
Gambar 2. 3 Saluran Distribusi Weakly Meshed .....	9
<b>Gambar 2. 4</b> Segitiga Daya.....	12
<b>Gambar 2. 5</b> Contoh Single Line Diagram .....	13
<b>Gambar 2. 6</b> Representasi Saluran Distribusi .....	17
<b>Gambar 2. 7</b> Rangkaian Ekivalen Sistem Distribusi.....	18
<b>Gambar 2. 8</b> Contoh saluran sederhana .....	21
<b>Gambar 3. 1</b> Flowchart pengerjaan tugas akhir .....	28
<b>Gambar 3. 2</b> Sistem Distribusi IEEE 33-bus .....	29
<b>Gambar 3. 3</b> Distributed Generator dimodelkan sebagai Negatif PQ load.....	33
<b>Gambar 4. 1</b> Grafik Voltage Bus Weakly Meshed Base .....	36
<b>Gambar 4. 2</b> Grafik VSI bus Weakly Meshed Base .....	37
<b>Gambar 4. 3</b> Grafik Voltage Bus Weakly Meshed 1DG .....	38
<b>Gambar 4. 4</b> Grafik VSI bus Weakly Meshed 1DG .....	39
<b>Gambar 4. 5</b> Grafik Voltage Bus Weakly Meshed 2DG .....	40
<b>Gambar 4. 6</b> Grafik Volatge Bus Radial Base .....	42
<b>Gambar 4. 7</b> Grafik VSI Bus Radial Base .....	43

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Perkembangan sistem distribusi semakin besar dan kompleks saat ini menyebabkan rugi-rugi daya yang timbul lebih tinggi dan profil tegangan yang buruk. Studi menunjukkan bahwa hampir 10-13% dari total daya yang dihasilkan hilang sebagai kerugian saluran yang menyebabkan peningkatan biaya energi dan profil tegangan yang buruk sepanjang saluran distribusi [1]. Saat ini banyak solusi yang ditawarkan untuk menanggulangi hal tersebut, salah satunya adalah dengan pemasangan *Distributed Generation*.

*Distributed Generation* umumnya berupa generator dengan skala kecil yang memproduksi listrik di dekat pelanggan dan terhubung pada sistem distribusi [2]. *Distributed Generation* merupakan pembangkitan tenaga listrik yang peletaknya tersebar disekitar beban dan mempunyai daya keluaran yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional [3]. Dengan diintegrasikannya *Distributed Generation* pada jaringan distribusi dapat memberikan keuntungan ekonomi dengan memasok beban ketika terjadi beban puncak ketika biaya pembangkitan listrik tinggi [2].

Penentuan lokasi *Distributed Generation* yang tepat sangat penting agar dapat dimanfaatkan untuk mengurangi kerugian pada saluran dan memperbaiki profil tegangan. Dalam beberapa literatur didapatkan bahwa banyak penulis yang terkonsentrasi pada jaringan distribusi radial saja. Namun, saat ini dimanapun dibutuhkan suplai daya dengan realibilitas tinggi sehingga dapat mengadopsi jaringan distribusi yang terinterkoneksi.

Dalam Tugas Akhir ini, akan ditentukan penempatan *Distributed Generation* pada jaringan distribusi *weakly meshed* menggunakan *Voltage Stability Index* kemudian akan mengevaluasi efek penempatan *Distributed Generation* dengan kapasitas 40% dari total beban dalam sistem sehingga dapat mengetahui berapa nilai optimal energi yang dapat disimpan dari penurunan kerugian daya pada jaringan distribusi *weakly meshed*.

## 1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Penentuan lokasi penempatan optimal *distributed generation*
2. Pengaruh penempatan optimal *distributed generation* pada nilai kerugian daya.
3. Pengaruh penempatan optimal *distributed generation* pada operasi energi.

## 1.3. Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, beberapa permasalahan di asumsikan dengan batasan sebagai berikut:

1. Analisis Load Flow menggunakan ETAP 12.6
2. Metode yang digunakan menentukan penambahan *Distributed Generation* (DG) pada sistem berdasarkan hasil nilai indeks kestabilan tegangan terendah berdasarkan metode *Voltage Stability Index* (VSI).
3. Simulasi menggunakan sistem Distribusi IEEE 33 bus.
4. Kapasitas maksimal DG adalah 40% dari total beban sistem.
5. Simulasi *Voltage Stability Index* (VSI) menggunakan MATLAB R2008a.
6. Karakteristik DG yang digunakan tidak diperhatikan.
7. Output daya dari tiap-tiap DG konstan.
8. Efisiensi energi operasi didapatkan dengan metode matematis.

## 1.4. Tujuan

Tujuan dari pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besarnya nilai tegangan dan indeks tegangan tiap-tiap bus menggunakan metode *Voltage Stability Index* (VSI).
2. Mendapatkan lokasi penempatan penempatan DG berdasarkan nilai indeks tegangan terendah.
3. Menganalisa pengaruh penempatan optimal *distributed generation* pada kerugian daya dan pada operasi energi.

## 1.5. Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literature  
Pada tahap ini penulis melakukan pengumpulan referensi yang berhubungan dengan tugas akhir dari berbagai macam sumber seperti: buku literature, buku tugas akhir terdahulu, paper dan jurnal yang berkaitan dengan studi aliran daya dan *Voltage Stability Index* dan efisiensi energi operasi pada sistem distribusi *weakly meshed*.
2. Pengumpulan data  
Data yang digunakan meliputi data bus dan data saluran. Data bus terdiri atas data beban yang digunakan untuk mendapatkan nilai daya aktif dan daya reaktif pada setiap cabang. Data saluran terdiri atas resistansi dan reaktansi tiap kabel. Semua data tersebut digunakan untuk memperoleh data pengukuran sebenarnya menggunakan *software* ETAP 12.6.
3. Pemodelan program  
Pemodelan program dilakukan pada sistem radial IEEE 33-bus. Melakukan simulasi studi aliran daya (*load flow*) dengan menggunakan *software* ETAP 12.6. Luaran dari simulasi aliran daya ini akan didapatkan nilai tegangan dan arus pada tiap bus yang merupakan data yang diperlukan untuk melakukan analisis *Voltage Stability Index* (VSI). Simulasi untuk menentukan *Voltage Stability Index* (VSI) menggunakan *software* MATLAB 2008a. Setelah menemukan bus dengan indeks tegangan terendah, maka nilai indeks tersebut akan dijadikan dasar untuk penempatan DG untuk menapatkan *losees* yang minimal sehingga akan menurunkan nilai kerugian daya dan meningkatkan efisiensi energi operasi.
4. Penulisan Buku  
Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir. Laporan berisi metode dan kesimpulan dari penelitian.

## 1.6. Sistematika

Sistematika dalam penulisan Tugas Akhir ini dibagi menjadi 5 bagian sebagai berikut:

### BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai penjelasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

### BAB II: TEORI PENUNJANG

Bab ini secara garis besar membahas tentang sistem distribusi tenaga listrik, jaringan distribusi, analisis aliran daya, analisis stabilitas tegangan dengan *voltage stability index* untuk menentukan lokasi penempatan DG pada sistem distribusi IEEE 33-bus, analisa nilai kerugian daya, analisa efisiensi energi operasi.

### BAB III: PERENCANAAN SISTEM DAN PERANCANGAN PROGRAM

Bab ini berisikan tentang rancangan suatu sistem distribusi tiga fasa seimbang 33 bus dan rancangan program analisis aliran daya (*load flow*) yang menggunakan *software* ETAP 12.6 untuk mendapat data tegangan dan arus tiap bus, rancangan program *voltage stability index* pada *software* MATLAB 2008a untuk menentukan lokasi penempatan DG, pemasangan DG dengan kapasitas maksimal 40% dari total beban sistem, dan perhitungan efisiensi energi operasi dari perbedaan nilai kerugian daya.

### BAB IV: SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini berisi tentang hasil dari simulasi *load flow*, program *voltage stability index* untuk menentukan lokasi penempatan pemasangan DG, pemasangan DG pada sistem, dan perhitungan efisiensi energi operasi.

### BAB V: PENUTUP

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil analisis data dan simulasi program untuk penentuan lokasi optimal DG untuk efisiensi energi operasi.

## **1.7. Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari penulisan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi acuan pemasangan lokasi DG pada bus dalam sistem jaringan *weakly meshed* yang memiliki nilai indeks tegangan terendah berdasarkan metode *Voltage Stability Index (VSI)*.
2. Menjadi dasar untuk pengembangan metode *Voltage Stability Index (VSI)* yang lebih optimal.
3. Menjadi dasar untuk mendapatkan kerugian daya paling minimal pada jaringan distribusi *weakly meshed*.

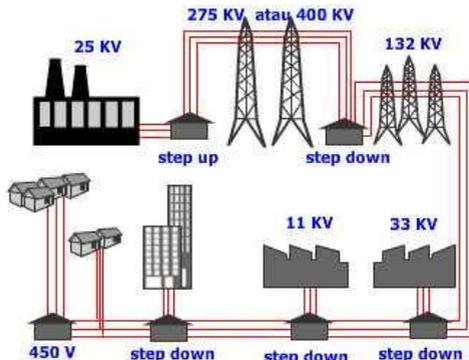
*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## BAB II

### 2.1. Sistem Distribusi

Sistem distribusi adalah sistem yang penyaluran daya listriknya langsung terhubung dengan beban atau langsung ke pelanggan. Sistem distribusi menyalurkan daya listrik dari gardu induk transmisi langsung menuju ke tiap-tiap titik beban. Proses penyaluran daya listrik ini dimulai dari pembangkit utama yaitu generator yang bertegangan 11KV-20KV. Kemudian tegangan dari keluaran generator ini dinaikan melalui trafo *step up* menjadi 70KV-500KV. Tujuan dari menaikkan tegangan ini adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya yang terjadi disaluran transmisi yang disebabkan oleh besarnya hambatan kabel dan juga besarnya arus yang mengalir pada saluran.

Setelah melalui sistem transmisi barulah tegangan kembali diturunkan menggunakan trafo *step down* melalui gardu distribusi menjadi 20 KV, gardu induk ini disebut dengan gardu induk distribusi primer. Setelah itu barulah tegangan diturunkan lagi menjadi 220/380 volt yang merupakan saluran distribusi sekunder yang berhubungan langsung dengan pelanggan (konsumen). Untuk proses lengkap penyaluran daya listrik dari pembangkit hingga konsumen dapat dilihat langsung pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Proses Penyaluran Daya Listrik

Adapun sistem distribusi memiliki beberapa karakteristik seperti dibawah ini[5]:

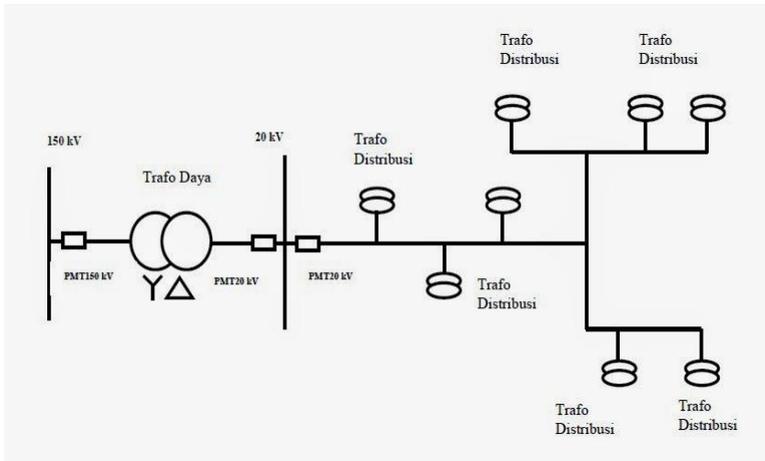
1. Strukturnya radial

2. Memeiliki nilai R/X tinggi.
3. Sistem yang kompleks.

Dapat dilihat pada karakteristik sistem jaringan distribusi diatas menunjukkan bahwa karakteristik saluran distribusi khusus dan berbeda dari saluran transmisi, maka diperlukan studi aliran daya yang tepat yang akan digunakan untuk menganalisa sistem ditribusi. Maka untuk menganalisa aliran daya pada saluran distribusi diperlukan metode yang tepat dan valid. Karena beberapa metode yang sudah ada kurang tepat untuk studi aliran daya pada sistem distribusi.

### 2.1.1. Sistem Distribusi Radial

Bentuk jaringan ini merupakan bentuk yang paling sederhana, banyak digunakan dan murah. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabangkan ke titik – titik beban yang dilayani, seperti terlihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Jaringan Distribusi Radial

pesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah:

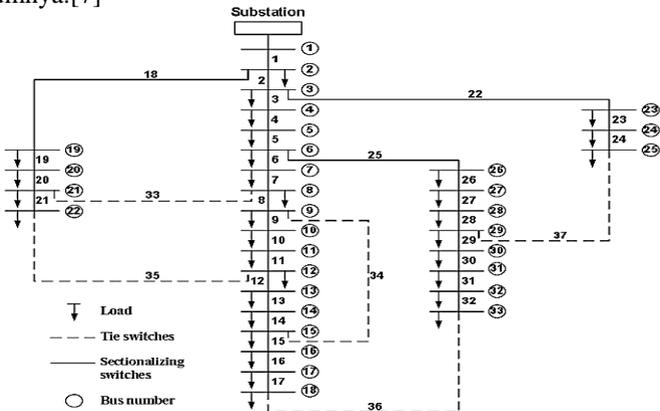
- a. Bentuknya sederhana.
- b. Biaya inverstasinya murah.

- c. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.
- d. Kontinuitas pelayanan daya kurang terjamin sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah atau dibelakang titik gangguan selama gangguan belum teratasi.

Kerugian lain dari sistem distribusi radial yang lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada pada ujung saluran sistem. Semakin besar beban pada tiap bus maka semakin besar pula tegangan jatuh yang dihasilkan[6].

### 2.1.2. Sistem Distribusi *Weakly Mashed*

Pada beberapa *feeder* distribusi yang melayani suatu area dengan beban yang besar biasanya berisi *loop*, *loop* terbentuk dengan menutup saklar pada saluran sebuah distribusi. Metode ini digunakan pada jaringan distribusi radial dimana dibentuk beberapa *loop* didalamnya. Pada jaringan distribusi radial dengan konfigurasi *weakly mashed*, adanya *loop* pada sistem tidak mempengaruhi perhitungan arus pada cabang saluran. *Loop* membuat jumlah percabangan bertambah, dan akan menambah jumlah cabang pada matriks impedansi sebelumnya.[7]



Gambar 2. 3 Saluran Distribusi *Weakly Meshed*

Pada sistem *weakly meshed* ini memanfaatkan 5 *tie switch* yang ada, dengan menghubungkan 5 *tie switch* tersebut secara langsung. Hal ini mengakibatkan akan terbentuk 5 *loop* dalam jaringan distribusi tersebut.

## 2.2. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya adalah studi untuk menganalisa suatu sistem tenaga listrik bertujuan untuk menentukan nilai dan besar sudut fasa tegangan pada masing-masing bus. Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif, faktor daya dan daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan sistem tenaga listrik pada keadaan pengoperasian normal.

Studi analisis aliran daya dapat dihitung secara manual maupun menggunakan *software computer*. Studi aliran daya ini dapat didefinisikan sebagai suatu studi yang dilaksanakan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya yang baik dalam bentuk tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif yang terdapat dalam suatu sistem kelistrikan guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga listrik maupun menganalisa kondisi pembangkitan maupun pembebanan. Dengan menggunakan studi aliran daya maka didapatkan parameter-parameter untuk melakukan proses pemrograman selanjutnya.

Secara umum tujuan analisa aliran daya adalah:

1. Untuk memeriksa tegangan dan sudut fasa masing-masing bus.
2. Untuk mengetahui besarnya tegangan pada tiap bus
3. Untuk menghitung aliran daya yang terdiri dari daya aktif, daya reaktif dan sudut fasa

Terdapat 3 macam bus yang terdiri dari bagian-bagian tertentu, meliputi :

1. *Bus referensi (slack bus* atau *swing bus)*  
*Slack bus* atau *swing bus* adalah bus yang digunakan sebagai referensi pada sistem dengan besar dan sudut fasa yang tetap. Bus ini menambah kekurangan daya antara beban total dengan daya yang dibangkitkan yang disebabkan oleh rugi-rugi pada jaringan.
2. *Load bus (bus beban) atau P-Q bus*  
Pada bus ini daya aktif dan daya reaktif besarnya tetap. Besar dan sudut fase tegangan nilainya tidak di ketahui.
3. *Generator bus (Q-V bus)*

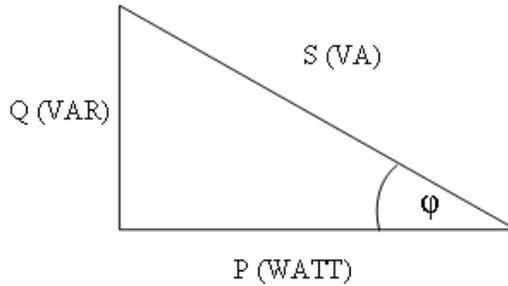
Pada bus ini daya aktif dan besar tegangannya tetap. Sedangkan sudut fase dan besar daya reaktif dihitung, besar batasan daya reaktif juga ditentukan sebelumnya.

### **2.2.1. Daya Listrik**

Daya listrik sendiri menjadi tiga bagian yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya total (S). Dimana tiap-tiap daya ini mempunyai pengertian:

- a. Daya Aktif (P)  
Daya aktif adalah daya yang dihasilkan dari energi yang nyata dan digunakan untuk melakukan energi yang nyata pula. Pada prinsipnya daya aktif dibangkitkan dari proses konversi energi primer seperti energi panas, energi mekanik, ataupun energi potensial. Daya aktif disimbolkan dengan “P” dan dinyatakan dalam satuan Watt.
- b. Daya Reaktif (Q)  
Daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet. Pada prinsipnya daya reaktif dihasilkan dari pembangkitan medan listrik pada generator sinkron melalui sistem eksitasinya. Daya reaktif disimbolkan dengan “Q” dan dinyatakan dalam satuan VAR
- c. Daya Total  
Daya total ialah total daya yang dihasilkan oleh proses pembangkitan itu sendiri. Nilai daya total merupakan hasil perkalian besaran arus dan besaran tegangan pada sistem. Daya total ini disimbolkan dengan “S” dan dinyatakan dalam satuan VA

Untuk mendefinisikan lebih jelas lagi konsep dari ketiga daya tersebut dapat dilihat pada gambar segitiga daya dibawah ini:



**Gambar 2. 4** Segitiga Daya

Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa besaran masing-masing daya adalah sebagai berikut:

$$S = V \times I$$

$$P = V \times I \times \cos \varphi$$

$$Q = V \times I \times \sin \varphi$$

Cos  $\varphi$  atau disebut juga dengan faktor daya adalah salah satu parameter penting dalam sistem tenaga listrik. Selain untuk menghubungkan antara ketiga daya diatas, Cos  $\varphi$  juga merupakan hubungan antar perbedaan sudut arus dan tegangan dalam fungsi waktu. Jika sudut arus mendahului tegangan maka beban dinyatakan bersifat *leading* atau Cos  $\varphi$  bernilai negatif, sedangkan jika gelombang arus tertinggal oleh tegangan maka beban tersebut dinyatakan bersifat *lagging* atau Cos  $\varphi$  bernilai positif.

### 2.2.2. Metode Forward Backward Sweep

Untuk menganalisis aliran daya dengan menggunakan metode *forward backward sweep* jaringan distribusi radial ini sendiri diibaratkan sebagai pohon dimana bus pertama adalah sebagai akar atau *slack* bus dan bus lainnya diibaratkan sebagai ranting atau bus beban[3]. Dengan menggunakan metode *Forward Backward Sweep* analisa aliran daya untuk sistem distribusi terselesaikan tanpa banyak perhitungan dan efisien pada setiap iterasi.

Metode *forward backward sweep* ini menggunakan prinsip kerja dari hukum kirchoff untuk melakukan perhitungan arus. Prinsip kerja dari metode *forward backward sweep* ini adalah pertama melakukan *backward sweep* dengan cara menghitung besarnya arus yang mengalir

pada saluran mulai dari bus yang paling awal hingga bus paling akhir. Setelah itu, melakukan *forward sweep* dengan mengalikan nilai arus yang telah didapat sebelumnya dengan impedansi tiap-tiap saluran sehingga didapat besarnya drop tegangan (*drop voltage*) pada tiap-tiap bus.

Untuk menghitung arus cabang didapatkan dari hubungan daya kompleks dan tegangan pada tiap-tiap bus, seperti persamaan dibawah ini:

$$I_i^k = \text{conj} \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)$$

Dimana :

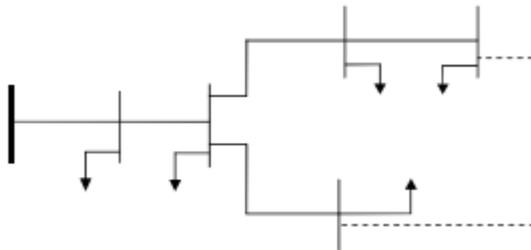
$I_i^k$  = arus pada bus i saat iterasi ke-k

$V_i^k$  = tegangan pada bus i saat iterasi ke-k

### 2.2.3. Modifikasi K-Matriks

Sebelum mengimplementasikan metode *forward backward sweep* maka kita memerlukan modifikasi untuk memudahkan kita dalam melakukan perhitungan, membentuk persamaan, dan juga melakukan iterasi. Salah satunya adalah dengan membentuk matriks BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) adalah matrik yang menyatakan hubungan antara arus dan saluran paa sistem distribusi.

Contoh *single line* diagram pada gambar 2.4 untuk pembentukan matrik persamaan aliran daya sebagai berikut [6]:



**Gambar 2. 5** Contoh Single Line Diagram

Dari gambar diatas ketika bus 5 dan bus 6 tidak dihubungkan (sistem radial) maka dapat dibentuk matriks BIBC sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Angka 1 menyatakan adanya hubungan antara arus dan saluran pada sistem distribusi, sedangkan angka 0 menyatakan tidak ada hubungan antara keduanya.

Matriks BIBC dapat disederhanakan menjadi berikut:

$$[B] = [BIBC][I]$$

Modifikasi K-Matriks

Pada Single Line Diagram diatas cabang B6 pada jaringan distribusi radial diubah menjadi konfigurasi *weakly mashed* sesuai pada gambar 2.4. Arus yang mengalir pada bus 5 dan bus 6 dapat dihitung sebagai berikut:

$$I'5 = I5 + I6$$

$$I'6 = I6 - B6$$

Sehingga matriks BIBC untuk 6 bus dengan 1 loop tersebut adalah:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 + B_6 \\ I_6 - B_6 \end{bmatrix}$$

Persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_6 \\ -B_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi:

$$[B] = [BIBC][I] + [LILC] + [B'] \quad (6)$$

Dimana arus pada  $B_6$  dapat dituliskan;

$$B_6 = (B_6 - B_6)/B_6$$

Untuk sistem distribusi 3 fasa persamaan (5) dapat dibentuk menjadi persamaan (8). Modifikasi K-Matriks dilakukan dengan menambahkan [LILC] dan [B'] pada persamaan 6. Matriks [LILC] dan [B'] adalah representasi dari *loop* pada konfigurasi *weakly meshed*. Maka persamaan dalam bentuk 3 fasa adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \\ I_{3a} \\ I_{3b} \\ I_{3c} \\ I_{4a} \\ I_{4b} \\ I_{4c} \\ I_{5a} \\ I_{5b} \\ I_{5c} \\ I_{6a} \\ I_{6b} \\ I_{6c} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{6a} \\ B_{6b} \\ B_{6c} \\ -B_{6a} \\ -B_{6b} \\ -B_{6c} \end{bmatrix}$$

Maka setelah itu dapat dibentuk matriks BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*) yang digunakan untuk mendapatkan besarnya nilai drop tegangan pada tiap-tiap bus:

$$BCBV = [BIBC]'. [ZF_{BR}]$$

$$BCBV = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \end{bmatrix}$$

$$BCBV = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix}$$

Sehingga dari matriks di atas dapat dinyatakan hubungan antar tegangan bus dan arus saluran menjadi bentuk matriks BCBV sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

Matriks BCBV dapat disederhanakan menjadi :

$$[\Delta V] = [BCBV][B]$$

Kemudian didapatkan persamaan untuk matriks  $\Delta V$ . Persamaan yang didapat adalah sebagai berikut:

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC] [I]$$

Dengan didaptkannya matrik BIBC, BCBV dan  $\Delta V$  maka kita dapat menghitung nilai tegangan tiap bus.

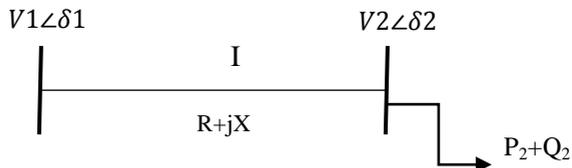
### 2.3. Definisi Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari suatu sistem untuk mempertahankan level tegangan pada setiap busnya baik dalam kondisi normal dan juga dalam kondisi saat terjadi gangguan[8]. Sebuah sistem dikatakan memasuki tahap tidak stabil ketika sebuah gangguan, penambahan beban, atau perubahan kondisi dari sistem menyebabkan

penurunan tegangan yang tidak bisa dikendalikan. Salah satu penyebab dari ketidakstabilan adalah ketidakmampuan sistem untuk memenuhi kebutuhan daya dari beban.

Penyebab utama drop tegangan muncul terjadi ketika daya aktif dan daya reaktif dari aliran daya melewati impedansi dari jaringan. Ketidakstabilan tegangan adalah fenomena lokal yang sangat penting, karena jika tidak diselesaikan secara cepat maka gangguan tersebut akan menyebar dan menyebabkan efek yang meluas. *Voltage collapse* lebih kompleks jika dibandingkan dengan ketidakstabilan tegangan dan biasanya merupakan hasil dari ketidakstabilan tegangan yang terjadi secara berkesinambungan dan menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan pada seluruh sistem.

Ketidakstabilan tegangan dapat terjadi dalam berbagai kondisi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.4 yang merupakan ilustrasi sederhana dari jaringan distribusi radial.



**Gambar 2. 6** Representasi Saluran Distribusi

Dimana  $V_1$  besar tegangan kirim pada sisi kirim,  $V_2$  adalah tegangan pada sisi terima,  $I$  adalah arus yang mengalir pada saluran,  $R+jX$  merupakan impedansi saluran,  $P_2+Q_2$  adalah daya yang diminta oleh beban.

Dengan banyaknya jenis gangguan yang menyebabkan ketidakstabilan dari tegangan, maka secara umum gangguan yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan dibagi menjadi dua yaitu:

a. Gangguan besar

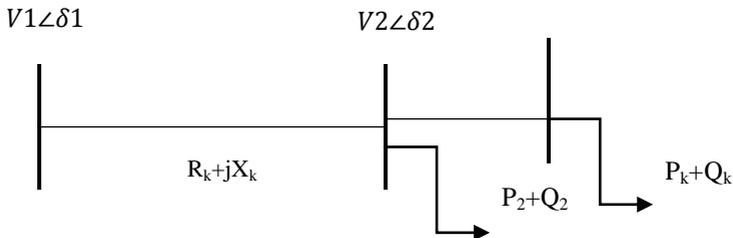
Gangguan ini berfokus kepada kemampuan dari sistem untuk mempertahankan nilai tegangannya jika terjadi gangguan yang besar seperti kegagalan sistem, hilangnya daya pembangkitan dari generator, dan *circuit contingencies*. Kemampuan ini didasarkan kepada karakteristik beban, maupun sistem proteksi dari sistem tersebut. Jika terjadi gangguan ini maka dibutuhkan langkah yang cepat untuk mengatasinya.

b. Gangguan kecil

Gangguan ini berfokus kepada kemampuan sistem untuk mempertahankan nilai teganganya jika terjadi gangguan seperti penambahan beban. Konsep ini sangat bermanfaat untuk menentukan bagaimana respon tegangan jika terjadi perubahan kecil pada sistem pada kondisi *steady state*. Analisa statis sangat efektif untuk melakukan analisa pada kondisi ini

### 2.3.1. Perumusan Voltage Stability Index (VSI)

Salah satu cara menentukan tingkat kestabilan tegangan sistem adalah dengan menggunakan metode *Voltage Stability Index (VSI)*. Metode ini memberikan indeks kepada tiap-tiap bus pada sistem. Indeks yang diberikan berskala 0-1, semakin mendekati 0 nilai indeks tersebut menandakan tingkat kestabilan sistem tersebut semakin rendah, sehingga dari hasil metode ini penentuan lokasi DG akan didasarkan pada bus yang memiliki indeks terendah. Untuk menghitung nilai *Voltage Stability Index (VSI)* maka diperlukan data hasil dari analisa aliran daya menggunakan metode *forward backward sweep*. Untuk menghitung nilai kestabilan dari sebuah bus menggunakan *Voltage Stability Index (VSI)* akan dijelaskan menggunakan rangkaian ekuivalen antara dua bus seperti pada gambar 2.6 berikut [9] :



**Gambar 2. 7** Rangkaian Ekuivalen Sistem Distribusi

Dari rangkaian ekuivalen diatas maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$I_k = \frac{V_1 - V_2}{R_k + jX_k} \quad (2.1)$$

$$P_2 - jQ_2 = V_2^* I_k \quad (2.2)$$

Jika persamaan (2.1) dan (2.2) digabungkan maka akan menjadi persamaan berikut :

$$|V_2|^4 + 2(P_2 R_k + Q_2 X_k - 0.5 |V_2|^2) |V_2|^2 + (P_2^2 + Q_2^2) Z_k^2 = 0 \quad (2.3)$$

Dengan melakukan beberapa penyederhanaan, maka persamaan (2.3) dapat disederhanakan menjadi:

$$b_k = 2(P_2 R_k + Q_2 X_k - 0.5 |V_2|^2) \quad (2.4)$$

$$c_k = (P_2^2 + Q_2^2) Z_k^2 \quad (2.5)$$

$$h_k = 0 \quad (2.6)$$

Dengan menyubsitusikan persamaan (2.4), (2.5), (2.6) kedalam persamaan (2.3), maka akan didapatkan persamaan (2.3) yang lebih sederhana sebagai berikut:

$$|V_2|^4 + b_k |V_2|^2 + c_k = 0 \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) memiliki empat kemungkinan jawaban untuk nilai  $V_2$  yaitu:

1.  $0.707 [b_k - (b_k^2 - 4c_k)^{0.5}]^{0.5}$
2.  $-0.707 [b_k - (b_k^2 - 4c_k)^{0.5}]^{0.5}$
3.  $-0.707 [b_k + (b_k^2 - 4c_k)^{0.5}]^{0.5}$
4.  $0.707 [b_k + (b_k^2 - 4c_k)^{0.5}]^{0.5}$

Penyelesaian kedua dan ketiga dari kemungkinan jawaban diatas tidak dapat digunakan sebagai penyelesaian karena memiliki nilai yang negatif. Sedangkan untuk kemungkinan pertama tidak dapat digunakan

karena memiliki nilai yang mendekati nol. Sehingga penyelesaian untuk persamaan tersebut adalah persamaan yang keempat.

$$0.707 [b_k + (b_k^2 - 4c_k)^{0.5}]^{0.5} \quad (2.8)$$

Dari persamaan (2.8) dapat digeneralisasi bahwa solusi aliran daya dari sistem radial mempunyai solusi penyelesaian jika dan hanya jika:

$$b_k - 4c_k \geq 0 \quad (2.9)$$

Dengan menyubsitusikan nilai  $b_k$  dan  $c_k$  dari persamaan (2.4) dan 2.5) kedalam persamaan (2.9) maka akan didapatkan persamaan:

$$(|V_1|^2 - 2P_2R_k - 2Q_2X_k)^2 - 4(P_2R_k + Q_2X_k) |V_1|^2 \geq 0 \quad (2.10)$$

Persamaan diatas akhirnya dapat disederhanakan kembali menjadi:

$$|V_1|^4 - 4(P_2R_k - Q_2X_k)^2 - 4(P_2R_k + Q_2X_k) |V_1|^2 \geq 0 \quad (2.11)$$

Maka akan didapatkan nilai *Voltage Stability Index* dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$VSI_8 = |V_1|^4 - 4(P_2R_k - Q_2X_k)^2 - 4(P_2R_k + Q_2X_k) |V_1|^2 \quad (2.12)$$

Dimana  $VSI_8$  adalah *Voltage Stability Index* pada bus 28 Untuk nilai dari *Voltage Stability Index* sendiri harus lebih besar sama dengan 0. Untuk operasi matematika dapat digantikan dengan nilai  $i$  yang di artikan bus.  $VSI(i) \geq 0$  dengan  $(i) = 2,3,4,5,6, \dots$ , dst (sebanyak jumlah bus pada sistem jaringan distribusi)

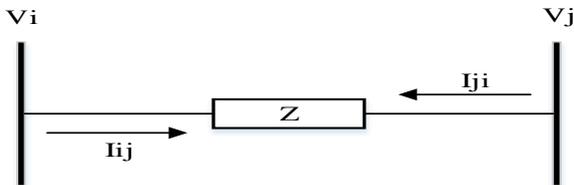
## 2.4. Penentuan kapastias DG

- DG dianggap sebagai beban negatif.
- DG digunakan sebagai sumber daya eksternal yang meninjeksikan daya aktif dan reaktif kedalam sistem.

- Ukuran  $DG$  maksimum adalah 40% dari total beban yang ditanggung sistem.
- $DG$  ditempatkan pada bus yang memiliki nilai VSI paling rendah.

## 2.5. Rugi Saluran

Setelah mengetahui nilai tegangan dan arus pada setiap bus dan saluran dengan solusi perhitungan iterasi, kemudian rugi saluran dapat diidentifikasi. Anggap sebuah saluran menghubungkan dua bus  $i$  dan bus  $j$  yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Arus saluran  $I_{ij}$  terukur pada bus  $i$  dan didefinisikan positif pada arah maju sedangkan  $I_{ji}$  didefinisikan negatif pada arah mundur. [10]



**Gambar 2. 8** Contoh saluran sederhana

$i \gg j$  didefinisikan dengan

$$I_{ij} = I_l = Z_{ij}(V_i - V_j) \quad (2.5)$$

$j \gg i$  didefinisikan dengan

$$I_{ij} = -I_l I_{ij} = I_l = Z_{ij}(V_j - V_i) \quad (2.6)$$

Daya kompleks yang didapatkan untuk bus  $i$  ke  $j$  dan bus  $j$  ke bus  $i$  adalah

$$S_{ij} = V_i * I_{ij}^* \quad (2.7)$$

$$S_{ji} = V_j * I_{ji}^* \quad (2.8)$$

Rugi saluran dalam saluran  $i - j$  dapat dijabarkan dengan penjumlahan persamaan 2.7 dan 2.8 sebagai berikut

$$S_{l\ ij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.9)$$

$$P_{lij} = \text{real}(S_{lij}) \quad (2.10)$$

## 2.6. Biaya Kerugian Energi

Proses penyaluran daya listrik ini dimulai dari pembangkit utama kemudian mengalir melalui saluran transmisi dan terhubung langsung ke pelanggan melalui jaringan distribusi sekunder. Sistem distribusi yang sangat berkembang pesat menyebabkan timbulnya nilai kerugian daya yang semakin tinggi. Studi menunjukkan bahwa 10-13% dari daya total yang dihasilkan hilang sebagai kerugian pada saluran [3].

Biaya kerugian energi dapat dihitung dengan perumusan[2]:  
 $CL = (\text{Total rugi daya real}) \cdot (E_c \cdot T)$  (\$)

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\$)  
 $E_c$  = Energi Rate (\$/kWh)  
 Nilai  $E_c = 0,06$  \$/kWh  
 T = durasi waktu (h)  
 Nilai T=8760h

Tingginya kerugian pada saluran berbanding lurus dengan biaya kerugian energi yang muncul dalam sebuah pembangkitan energi. Hal tersebut merupakan salah satu faktor semakin tingginya biaya pembangkitan energi.

## 2.7. Distributed Generation (DG)

Hingga saat ini pembangkit listrik konvensional masih memegang peran yang sangat penting dalam proses pembangkitan tenaga listrik. Sistem pembangkitan konvensional yang menggunakan batubara, gas dan minyak bumi sebagai bahan pembangkitan energi listriknya. Banyak negara yang mendesak pengurangan penggunaan bahan bakar fosil karena faktor lingkungan dan perubahan iklim, maka dari itu perhatian terhadap *Distributed Generation* (DG) semakin meningkat karena dengan adanya *Distributed Generation* dapat mengurangi ketidaksetimbangan kelistrikan pada lingkungan dengan tingkat ekonomis yang layak untuk utility [2]

Definisi DG menurut beberapa ahli dan lembaga riset internasional masih terdapat perbedaan. Menurut DPCA (*Distributed Power Coalition*

of America) DG adalah pembangkit listrik berskala kecil yang dengan lokasi yang lebih dekat pada sisi pelanggan daripada pembangkit utama, pembangkit ini dapat dihubungkan langsung pada sisi pelanggan atau terhubung pada jaringan transmisi atau distribusi terlebih dahulu. CIGRE (*International Conference on High Voltage Electric System*) mendefinisikan DG sebagai pembangkit yang tidak terpusat dan kebanyakan dihubungkan pada jaringan distribusi. IEA (*International Energy Agency*) mendefinisikan DG sebagai pembangkit yang melayani kebutuhan energi listrik pelanggan secara langsung atau berdekatan dengan lokasi pelanggan dan juga dapat berfungsi sebagai pendukung jaringan distribusi. Menurut Arthur D. Little DG dapat merupakan pembangkit yang terhubung pada jaringan atau pembangkit yang berdiri sendiri, pembangkit yang bersifat modular yang dapat memberikan keuntungan bagi pelanggan, sistem kelistrikan, atau keduanya [1]

*Distributed Generation* merupakan pembangkitan tenaga listrik yang peletaknya tersebar disekitar beban dan mempunyai daya keluaran yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional. Sehingga, penggunaan DG pada jaringan lebih diutamakan sebagai *supporting generation* untuk mendukung pembangkitan energi listrik dari pembangkit utama [1]

Dari sudut pandang teknis, integrasi DG dengan sistem pada lokasi yang tepat dapat mengurangi rugi-rugi saluran dan memperbaiki profil tegangan, meningkatkan kualitas daya serta meningkatkan keandalan dan kemandirian sistem. Sedangkan jika dilihat dari sudut pandang pengelola jaringan distribusi, *distributed generation* dapat menambah kapasitas jaringan transmisi dan distribusi yang telah terpasang. Selain itu *distributed generator* juga dapat melindungi jaringan dari pertumbuhan beban yang tidak pasti. Dan Dari sudut pandang ekonomi, integrasi DG dapat menghemat biaya karena teknologi DG seperti PV, dan turbin angin memiliki nilai operasi dan perawatan yang murah [3].

Selain perbedaan pengertian dari tiap-tiap lembaga, penentuan besaran DG juga masih memiliki perbedaan berdasarkan lembaga dan institusi tertentu. Penentuan besarnya daya luaran DG ini sangat penting karena sangat mempengaruhi besaran daya yang akan digunakan sebagai input untuk menjalankan analisa aliran daya. 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 kilowatt sampai dengan 50 MW.
2. Gas Research Institute mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas 25 kW hingga 25MW
3. Preston dan Rastler mendefinisikan ukuran mulai dari beberapa kilowatt hingga lebih dari 1000MW
4. Cardell mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 500kW hingga 1MW
5. International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE) mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan kapasitas antara 50 hingga 100 MW

Oleh karena sangat bervariasi definisi yang digunakan dalam beberapa literatur, maka klasifikasi DG dibedakan berdasarkan tujuan, lokasi penempatan, kapasitas DG, area pengiriman daya listrik, teknologi, dampak lingkungan mode operasi, kepemilikan dan penetrasi DG ke dalam sistem tenaga listrik.

Beberapa permasalahan teknis yang berhubungan dengan DG dapat memberikan beberapa variasi yang signifikan terhadap kapasitas pembangkitan dari DG tersebut. Oleh karena itu, perlu diperkenalkan pengkategorian yang tepat untuk mengklasifikasikan DG berdasarkan kapasitas pembangkitan yang dimilikinya, terdapat empat jenis DG berdasarkan klasifikasi yaitu:

**Tabel 2. 1** Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkitan [9]

Jenis DG	Kapasitas Pembangkitan
Micro DG (DG Mikro)	1 Watt - 5 KW
Small DG (DG Kecil)	5kW – 5MW
Medium DG (DG Sedang)	5MW- 50 MW
Large DG (DG Besar)	50MW – 300MW

Teknologi DG yang sering digunakan adalah *micro-hydro*, panel surya, turbin angin, mesin diesel, sel bahan bakar, dan baterai yang terdiri dari sejumlah modul-modul kecil dan dirakit secara tersendiri oleh pabrik. Hal ini dilakukan untuk mempermudah konstruksi dan implementasi pada lokasi DG. Modul-modul kecil tersebut dapat dipasang dengan sangat cepat pada lokasi akhir dimana pembangkit membutuhkan penghematan waktu yang sangat

signifikan bila dibandingkan dengan pembangunan pembangkit tenaga listrik besar yang letaknya terpusat pada suatu lokasi tertentu.

Modul-modul DG tersebut dapat cepat beroperasi segera setelah dipasang pada lokasi. Masing-masing modul juga bersifat independen, jadi ketika satu modul mengalami kerusakan, maka modul yang lain dapat tetap bekerja secara normal. Hal inilah yang menyebabkan nilai keadaan unit DG yang lebih baik dibandingkan dengan pembangkit sentral pada umumnya. Berdasarkan teknologi pembangkitan yang digunakan, DG dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

**Tabel 2. 2** Klasifikasi DG Berdasarkan Teknologi Pembangkitan[10]

<b>Teknologi DG</b>	<b>Kapasitas per Modul</b>
<b><i>Fossil Fuel</i></b>	
<i>Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)</i>	35-400 MW
<i>Internal combustion engines</i>	kW-10 MW
<i>Combustion turbine</i>	1-250 MW
<i>Micro-Turbines</i>	35 kW-1 MW
<b><i>Renewable Resources</i></b>	
<i>Small hydro</i>	1-100 MW
<i>Micro hydro</i>	25 kW-1 MW
<i>Wind turbine</i>	200 Watt-3 MW
<i>Photovoltaic arrays</i>	20 Watt-1000 kW
<i>Solar terminal, central receiver</i>	1-10 MW
<i>Solar terminal, Lutz system</i>	10-80 MW
<i>Biomass, e.g. based on gasification</i>	100 kW-20 MW
<i>100 kW-20 MW</i>	X 200 kW-2 MW
<i>Fuel cells, solid oxide</i>	50 kW-2 MW
<i>Geothermal</i>	5-100 MW
<i>Ocean energy</i>	100 kW – 1 MW
<i>Stirling engine</i>	2 – 10 kW
<i>Battery storage</i>	500kW – 5 MW

Banyak keuntungan yang didapatkan dengan pemasangan distributed generator. Jika dibandingkan dengan pembangkit konvensional, efisiensi pada *distributed generator* lebih besar. Karena pada *distributed generator* menggunakan teknologi yang baru dan masih

banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan effisiensinya, seperti turbin angin, *fuell cell*, dsb [3]. Beberapa keuntungan lain dari *Distributed Generation* antara lain [11] ;

1. Dari sudut pandang pengguna (*end-user*) dapat diuntungkan dengan mempunyai pembangkit cadangan untuk meningkatkan keandalan. Selain itu, pengguna juga bisa mendapatkan kompensasi karena dapat memberikan energi yang mereka bangkitkan ke sistem tenaga listrik.
2. Jika dilihat dari sudut pandang pengelola jaringan distribusi, *distributed generation* dapat menambah kapasitas jaringan transmisi dan distribusi yang telah terpasang. Selain itu *distributed generator* juga dapat melindungi jaringan dari pertumbuhan beban yang tidak pasti.
3. Dari sudut pandang produsen energi komersial, produsen energi dapat membeli kapasitas dari beberapa unit *distributed generator*.
4. Dari sudut pandang teknis, integrasi DG dengan sistem pada lokasi yang tepat dapat mengurangi rugi-rugi saluran dan memperbaiki profil tegangan, meningkatkan kualitas daya serta meningkatkan keandalan dan kemandirian sistem
5. Dari sudut pandang ekonomi, integrasi DG dapat menghemat biaya karena teknologi DG seperti PV, dan turbin angin memiliki nilai operasi dan perawatan yang murah.
6. Dari sudut pandang lingkungan, teknologi DG tidak menimbulkan banyak emisi dan polusi seperti pembangkit konvensional yang menggunakan fosil sebagai bahan bakarnya.

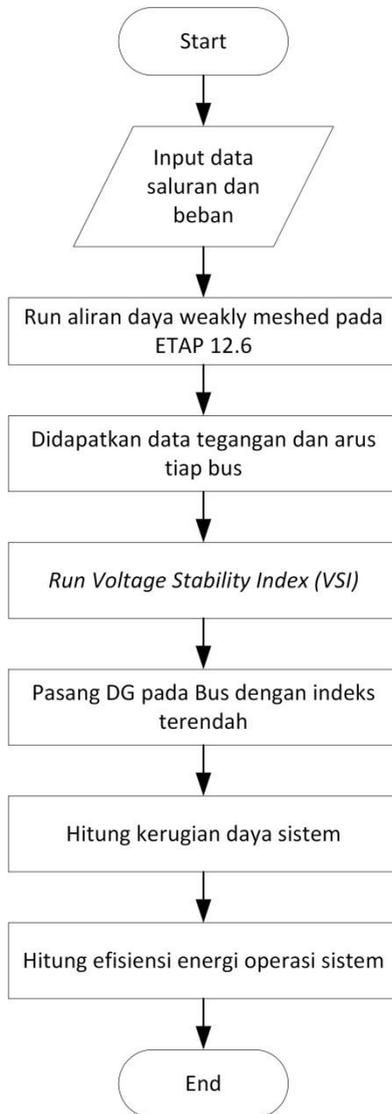
## **BAB III**

### **PERENCANAAN SISTEM DAN PERANCANGAN PROGRAM**

Pada bab ini akan menjelaskan bagaimana pengaplikasian analisa studi aliran daya menggunakan *software* etap 12.6 pada jaringan IEEE 33-bus untuk mendapatkan besaran yang diperlukan. Setelah mendapatkan besaran yang diperlukan barulah hasil *output* dari analisa aliran daya ini dijadikan masukan untuk menjalankan analisa kestabilan tegangan menggunakan metode *Voltage Stability Index (VSI)*. Tujuan dari metode ini ialah menemukan bus-bus yang memiliki nilai ketidakstabilan tegangan yang rendah. Bus-bus inilah yang menjadi lokasi penempatan DG. Penambahan DG pada jaringan tersebut bertujuan untuk mengurangi *losses* pada jaringan. Dengan adanya penurunan *losses* tersebut diharapkan akan menurunkan biaya operasi sehingga akan terjadi efisiensi pada energi operasi sistem tersebut. Langkah-langkah pengerjaan perencanaan sistem dan juga pembuatan program pada tugas akhir ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu:

1. Pengumpulan data sistem
2. Menjalankan simulasi aliran daya pada sistem untuk menentukan besaran-besaran yang diperlukan untuk mendapatkan kestabilan tegangan pada masing-masing bus.
3. Menjalankan analisa kestabilan tegangan menggunakan metode *Voltage Stability Index (VSI)*, untuk menentukan bus paling sensitif sebagai lokasi penempatan *Distributed Generation (DG)* .
4. Penempatan *Distributed Generation (DG)* pada bus yang memiliki indeks kestabilan terendah sehingga diharapkan terjadi penurunan pada nilai *losses* jaringan.
5. Melakukan perhitungan penurunan biaya operasi energi setelah penempatan DG sehingga dapat diketui efisiensi energi yang didapatkan.

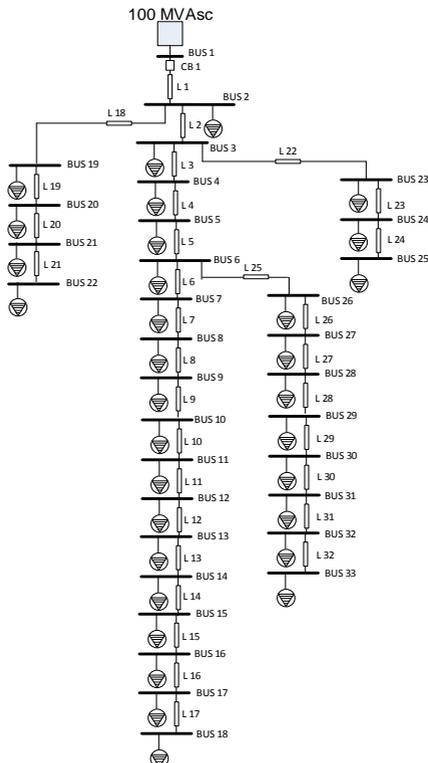
Untuk lebih jelasnya maka tahap-tahap pengerjaan tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.1



**Gambar 3. 1** Flowchart pengerjaan tugas akhir

### 3.1. Pengumpulan data

Tahapan awal dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah melakukan analisa dari sistem yang akan menjadi objek tugas akhir. Diawali dengan membaca referensi yang berkaitan dengan tugas akhir yang akan dikerjakan dan mengumpulkan seluruh data yang dibutuhkan untuk melakukan analisa dalam tugas akhir ini. Pada tugas akhir ini sistem yang digunakan adalah sistem distribusi IEEE 33-bus *weakly meshed*. Sistem ini adalah sistem radial yang terdiri atas 33 bus yang akan dimodifikasi menjadi sistem *weakly meshed*. (Gambar 3.2) sebagai sistem yang akan dianalisa.



Gambar 3. 2 Sistem Distribusi IEEE 33-bus

Setelah mendapatkan topologi dari sistem yang akan di analisa selanjutnya ada mengumpulkan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk melakukan analisa aliran daya pada sistem ini. Dalam tugas akhir ini analisa aliran daya akan menggunakan *software* ETAP 12.6. Parameter yang dibutuhkan untuk melakukan analisa aliran daya tersebut adalah data impedansi tiap-tiap saluran, data beban (baik itu daya aktif maupun daya reaktif dari beban). Untuk lebih jelasnya mengenai parameter yang dibuthkan untuk mengnalisa sistem pada gambar 3.2 maka dapat dilihat pada tabel 3.1 dan 3.2 berikut:

**Table 3. 1** Data Saluran Distribusi IEEE 33 Bus

No	Saluran		Impedansi	
	Bus	Bus	R (ohm)	X (ohm)
1	1	2	0.0922	0.0477
2	2	3	0.4930	0.2511
3	3	4	0.3660	0.1840
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.8190	0.7000
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	0.7114	0.2351
8	8	9	1.0300	0.7400
9	9	10	1.0400	0.7400
10	10	11	0.1966	0.0650
11	11	12	0.3744	0.1238
12	12	13	1.4680	1.1550
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.5910	0.5260
15	15	16	0.7463	0.5450
16	16	17	1.2890	1.7210
17	17	18	0.7320	0.5740
18	2	19	0.1640	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3554
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3083
23	23	24	0.8980	0.7091
24	24	25	0.8960	0.7011
25	6	26	0.2030	0.1034

**Lanjutan Tabel 3.1** Data Sistem IEEE 33 bus

No	Saluran		Impedansi	
	Bus	Bus	R (ohm)	X (ohm)
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.0590	0.9337
28	28	29	0.8042	0.7006
29	39	30	0.5075	0.2585
30	30	31	0.9744	0.9630
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.3410	0.5302

**Table 3. 2** Data Saluran loop Sistem Distribusi IEEE 33-bus

No	Saluran		Impedansi	
	Bus	Bus	R (ohm)	X (ohm)
1	8	21	2.0	2.0
2	9	15	2.0	2.0
3	12	22	2.0	2.0
4	18	33	0.5	0.5
5	25	29	0.5	0.5

**Table 3. 3** Pembebanan Sistem

No Bus	Data Pembebanan	
	P(MW)	Q(MVar)
1	0,100	0,060
2	0,090	0,040
3	0,120	0,080
4	0,060	0,030
5	0,060	0,020
6	0,200	0,100
7	0,200	0,100
8	0,060	0,020
9	0,060	0,020
10	0,045	0,030
11	0,060	0,035
12	0,060	0,035
13	0,120	0,080

**Tabel 3.2 (lanjutan) Pembebanan Sistem**

No Bus	Data Pembebanan	
	P(MW)	Q(MVar)
14	0,080	0,010
15	0,060	0,020
16	0,060	0,020
17	0,090	0,040
18	0,090	0,040
19	0,090	0,040
20	0,090	0,040
21	0,090	0,040
22	0,090	0,050
23	0,420	0,200
24	0,420	0,200
25	0,060	0,025
26	0,060	0,025
27	0,060	0,020
28	0,120	0,070
29	0,200	0,600
30	0,150	0,070
31	0,210	0,100
32	0,060	0,040
33	0,100	0,060

### **3.2. Analisis Aliran Daya**

Studi aliran daya secara umum dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan dari masing-masing bus, besarnya nilai arus dan daya yang mengalir pada sistem. Untuk mempermudah dalam menganalisa dan pemantauan suatu sistem distribusi dan transmisi.

### **3.3. Voltage Stability Index (VSI)**

Metode Voltage Stability indeks merupakan metode yang digunakan untuk menentukan tingkat kestabilan dari tiap-tiap bus. Dari metode ini dapat dihasilkan indeks pada masing-masing bus dengan skala 0-1. Indeks dari tiap-tiap bus ini lah yang menjadi dasar dalam penempatan DG. DG akan dipasang pada bus yang memiliki indeks terendah. VSI sendiri memiliki perumusan seperti berikut :

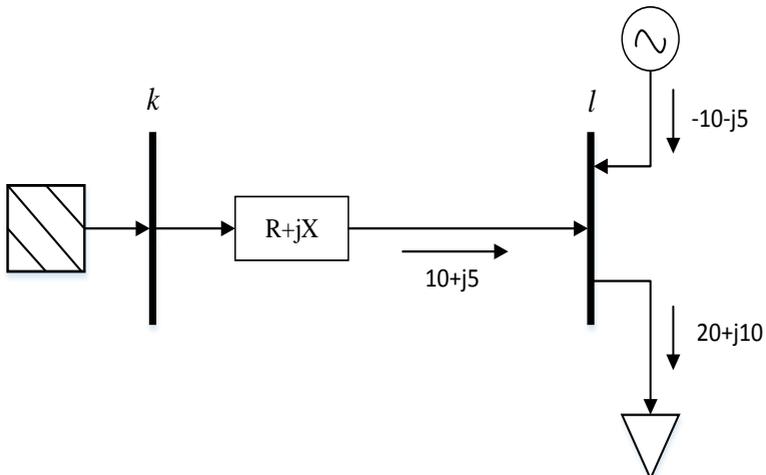
$$VSI_8 = |V_1|^4 - 4 (P_2R_k - Q_2X_k)^2 - 4 (P_2R_k + Q_2X_k) |V_1|^2$$

Dimana  $VSI_8$  adalah *Voltage Stability Index* pada bus 8. Untuk nilai dari *Voltage Stability Index* sendiri harus lebih besar sama dengan 0. Untuk operasi matematika dapat digantikan dengan nilai  $i$  yang di artikan bus.  $VSI(i) \geq 0$  dengan  $(i) = 2,3,4,5,6, \dots$ , dst (sebanyak jumlah bus pada sistem jaringan distribusi).

### 3.4. DG sebagai Beban PQ *Negative*

Pada sistem distribusi radial, daya mengalir menuju ke beban berasal dari *infinite bus*. *Infinite bus* menyediakan daya yang diserap langsung oleh beban dalam bentuk daya aktif dan daya reaktif. Arah aliran daya searah dengan aliran arus beban tersebut.

Dua macam bus memiliki karakteristik yang berbeda yakni sebagai beban (*load*) atau sebagai generator. Beban akan menyerap daya dari sistem sedangkan generator sebagai penyuplai daya. Arah aliran generator berlawanan dengan dengan arah aliran daya beban ketika dipasang di saluran distribusi. Sehingga generator dapat dimodelkan sebagai beban negatif dimana arah aliran dayanya berlawanan dengan beban.



**Gambar 3. 3** Distributed Generator dimodelkan sebagai Negatif PQ load

Berdasar gambar diatas dapat dipahami ketika dipasang beban dalam bentuk *distributed generation* dengan kapasitas  $10+j5$ , maka total beban yang terpasang pada bus 2 adalah  $20+j10-10-j5 = 10+105$ . Jika *distributed generator* pada bus 1 diganti dengan beban yang mempunyai nilai yang sama, total beban yang terpasang adalah  $20 + j10 + 10 + j5 = 30 + j15$ .

### 3.5. Efisiensi Energi Operasi

Penentuan energi operasi didasarkan pada nilai kerugian daya pada saluran. Dalam setiap proses penyaluran daya listrik memunculkan kerugian daya, utamanya pada jaringan distribusi. Maka besar kerugian daya mempengaruhi biaya operasi dalam pembangkitan energi.

Biaya kerugian daya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) \text{ (\$)}$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\\$)

$E_c$  = Energi Rate (\\$/kWh)

Nilai  $E_c = 0,06$  \\$/kWh

T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

Biaya kerugian daya dihitung berdasarkan total rugi daya aktif pada saluran dikalikan *energi rate* dalam rentang waktu 1 tahun (8760 jam), sehingga akan didapatkan biaya kerugian daya pada saluran distribusi awal (tanpa pemasangan DG). Nilai kerugian daya diasumsikan konstan selama 24 jam tanpa memperhatikan kurva beban dari konsumen.

Berdasarkan metode *VSI* telah didapatkan bus yang menjadi lokasi penempatan DG, kemudian dilakukan pemasangan DG dengan kapasitas maksimal 40% dari total beban sistem. Dengan pemasangan DG pada bus tersebut akan didapatkan nilai total rugi daya aktif yang berbeda ketika dilakukan *run* aliran daya.

Dengan rumus yang sama akan didapatkan biaya kerugian daya pasca pemasangan DG ( $CL_2$ ). Maka akan muncul perbedaan nilai biaya kerugian daya pada saat sistem belum terpasang DG dan saat sistem terpasang DG pada salah satu bus dalam saluran. Sehingga akan didapatkan nilai efisiensi pada energi operasi dalam pembangkitan daya listrik.

## **BAB IV**

### **SIMULASI DAN ANALISIS DATA**

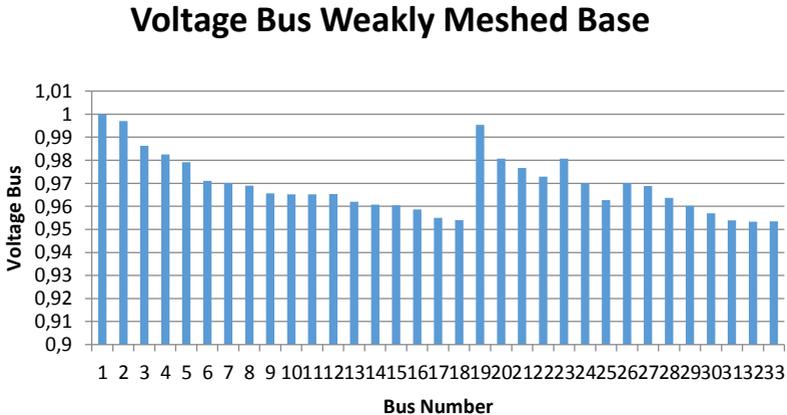
Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil penentuan lokasi optimal penempatan DG pada sistem IEEE 33 *weakly meshed*. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya yang meliputi keadaan sistem pada saat sebelum pemasangan DG dan setelah pemasangan DG yang mengacu pada hasil penentuan lokasi penempatan DG dengan metode *Voltage Stability Indeks*. Simulasi ini dilakukan dengan cara mencari indeks kestabilan dari tiap-tiap bus menggunakan metode *Voltage Stability Index (VSI)* sehingga di dapatkan ranking bus. Setelah didapatkan indeks dari tiap-tiap bus, maka akan dilakukan inject DG dengan kapasitas maksimal 40% dari total beban yang ada. Setelah itu proses ini akan dilakukan lagi untuk mendapatkan kandidat bus paling sensitif setelah penambahan DG pada proses pertama, pada proses ini kapasitas DG yang di inject di bagi menjadi 20% pada dua bus kandidat dengan nilai indeks terendah dari hasil dua kali proses yang dilakukan. Tujuan dari simulasi ini adalah lokasi penempatan DG yang tepat untuk mengurangi nilai *losses* saluran. Dengan berkurangnya nilai *losses* akan didapatkan pula nilai kerugian daya yang minimal sehingga akan berpengaruh pada penurunan energi operasi sistem Hasil aliran daya yang dilakukan menggunakan ETAP 12.6 sedangkan indeks dari masing-masing bus didapatkan dengan simulasi MATLAB 2008A.

#### **4.1 Hasil Simulasi**

Simulasi yang dilakukan adalah dengan melakukan analisis aliran daya pada ETAP 12.6 sehingga didapatkan tegangan dan arus pada masing-masing bus, kemudian data tersebut menjadi acuan dalam simulasi penentuan indeks masing-masing bus berdasarkan *Voltage Stability Indeks*, sehingga didapatkan nilai indeks dari masing-masing bus. Nilai indeks berada pada kisaran 0-1. Berdasarkan indeks tersebut akan dipilih kandidat bus yang dengan nilai kestabilan terendah, kemudian bus dengan nilai kestabilan terendah tersebut akan diranking dan menjadi kandidat pemasangan DG untuk mengurangi *losses* dari sistem distribusi IEEE 33 bus *weakly meshed*.

#### 4.1.1 Sistem Distribusi IEEE 33 bus *Weakly Meshed*

Sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus *weakly meshed* memiliki 33 jumlah objek data. Pada Gambar 4.1 didapatkan hasil simulasi aliran daya yakni tegangan pada masing-masing bus dalam sistem berdasarkan run ETAP 12.6.



**Gambar 4. 1** Grafik Voltage Bus *Weakly Meshed* Base

Nilai tegangan seluruh bus pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus *weakly meshed* 0.95-1.0 pu dengan nilai tegangan minimal 0,9535 pu.

Nilai *losses* pada saluran: 123.3 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) (\$)$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\$)

$E_c$  = Energi Rate (\$/kWh)

Nilai  $E_c$  = 0,06 \$/kWh

T = durasi waktu (h)

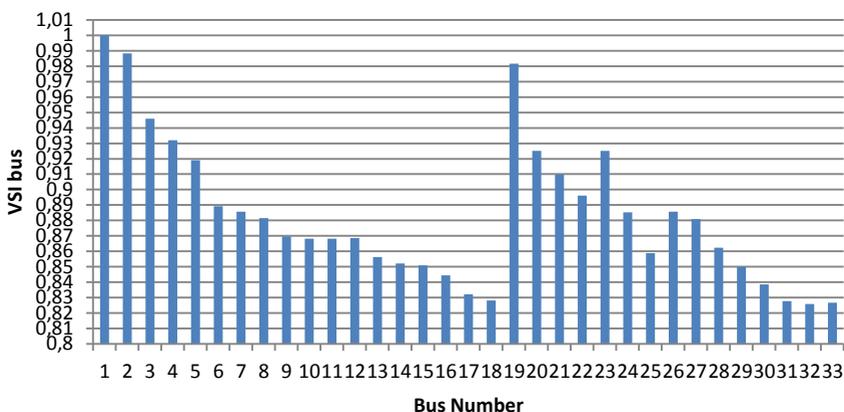
Nilai T=8760h

$$CL = (123.3) * (0,06 * 8760) = 64806.48\$$$

### 4.1.2 Sistem Distribusi IEEE 33 bus *Weakly Meshed* Menggunakan VSI

Dilakukan simulasi aliran daya pada kembali sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus *weakly meshed*. Pada tabel 4.2 dapat diketahui hasil simulasi aliran daya pada sistem dan nilai kestabilan tegangan pada setiap bus sesuai metode *Voltage Stability Indeks* untuk mendapatkan indeks tegangan dari setiap bus sebelum dilakukan penambahan dengan *Distributed Generation*.

#### VSI bus *Weakly Meshed* Base



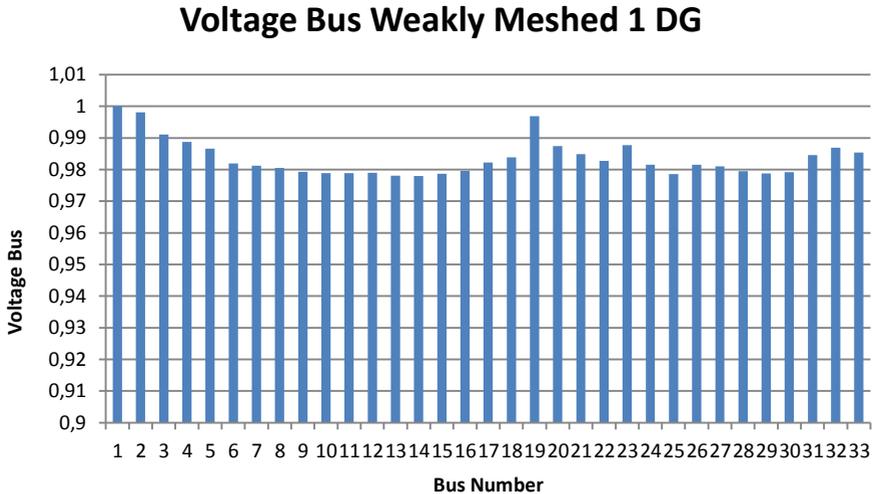
**Gambar 4. 2** Grafik VSI bus *Weakly Meshed* Base

Dari hasil simulasi pada simulasi Gambar 4.2 maka didapatkan nilai indeks kestabilan terendah berada pada bus 32 dengan nilai indeks 0.825848. Hal ini menunjukkan bahwa bus 32 adalah bus paling kritis pada sistem ini. Oleh karena itu untuk menurunkan nilai *losses* dapat ditambahkan *Distributed Generation* (DG) pada bus 32.

Setelah didapatkan nilai indeks tegangan yang paling rendah yakni pada bus 32 maka DG akan dipasang pada bus tersebut dengan kapasitas 40% dari sistem, yaitu 1486 kW.

### 4.1.3 Pemasangan 1 DG pada bus berdasarkan VSI

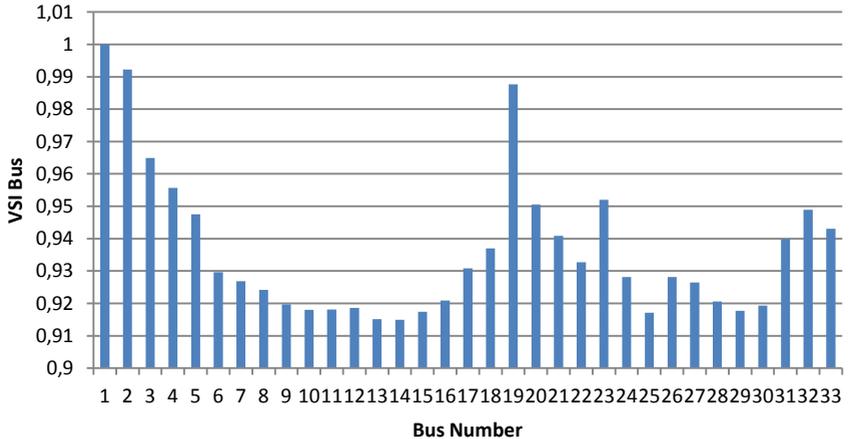
Setelah pemasangan 1 DG pada bus 32 akan diamati bagaimana pengaruhnya terhadap kondisi tegangan sistem dan kondisi VSI masing-masing bus untuk menentukan lokasi penempatan DG kedua serta penurunan nilai kerugian daya sistem.



**Gambar 4. 3** Grafik Voltage Bus *Weakly Meshed* 1DG

Setelah penambahan 1 DG dengan kapasitas 1486 kW pada bus 32 didapatkan nilai tegangan semua bus berada pada level antara 0.95-1.0 pu dengan nilai tegangan minimal 0,97801 pu.

## VSI Bus Weakly Meshed 1 DG



**Gambar 4. 4** Grafik VSI bus Weakly Meshed 1DG

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.4 setelah penambahan 1 DG dengan kapasitas 1486 kW pada bus 32 maka didapatkan nilai indeks kestabilan terendah berada pada bus 14 dengan nilai indeks 0,91489. Hal ini menunjukkan bahwa bus 14 adalah bus paling kritis pada sistem ini. Oleh karena itu untuk menurunkan nilai *losses* dapat ditambahkan *Distributed Generation* (DG) pada bus 14.

### 4.1.3.1 Dampak pemasangan DG terhadap kerugian energi

DG dipasangan pada bus 32 dengan kapasitas 40% dari total sistem, yakni 1486 kW. Dengan pemasangan DG pada bus tersebut maka didapatkan nilai *losses* sebesar 47.8 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) \text{ (\$)}$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\\$)

$E_c$  = Energi Rate (\\$/kWh)

Nilai  $E_c$  = 0,06 \\$/kWh

T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

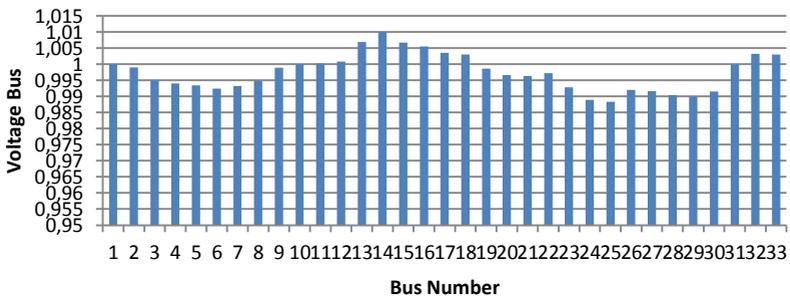
$$CL = (47.8) * (0,06 * 8760) = 25123 \$$$

Berdasarkan hasil pemasangan DG pada bus 32 mampu mengurangi nilai kerugian daya dari hasil aliran daya tanpa pemasangan DG. Nilai *losses* berkurang dari 123.3 kW menjadi 47.8 kW atau mengalami penurunan nilai *losses* sebesar 75.5 kW. Dengan terjadinya penurunan *losses* maka terjadi pula penurunan biaya kerugian energi dari 64806.48 \$ menjadi 25123.68 \$ atau terjadi penurunan biaya kerugian energi sebesar 39682.8 \$.

#### 4.1.4 Pemasangan 2 DG pada bus berdasarkan VSI

Berdasarkan analisa VSI sebelumnya didapatkan bahwa bus dengan indeks terendah adalah bus 14, maka akan dilakukan penambahan DG pada bus tersebut. Dua DG dipasang masing-masing 20% dari total beban yakni 743 kW pada bus 14 dan bus 32. Setelah pemasangan 2 DG pada bus 14 dan 32 akan diamati bagaimana pengaruhnya terhadap kondisi tegangan sistem dan penurunan nilai kerugian daya sistem.

### Voltage Bus Weakly Meshed 2 DG



Gambar 4. 5 Grafik Voltage Bus Weakly Meshed 2DG

Setelah penambahan 2 DG dengan kapasitas 743 kW pada bus 32 dan 14 didapatkan nilai tegangan semua bus berada pada level antara 0.95-1.0 pu dengan nilai tegangan minimal 0,988318 pu.

#### 4.1.4.1 Dampak pemasangan DG terhadap kerugian energi

DG dipasangan pada bus 32 dan 14 dengan kapasitas masing-masing 20% dari total beban, yakni 743 kW. Dengan pemasangan DG pada bus tersebut maka didapatkan nilai *losses* sebesar 31.3 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) (\$)$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\$)

$E_c$  = Energi Rate (\$/kWh)

Nilai  $E_c$  = 0,06 \$/kWh

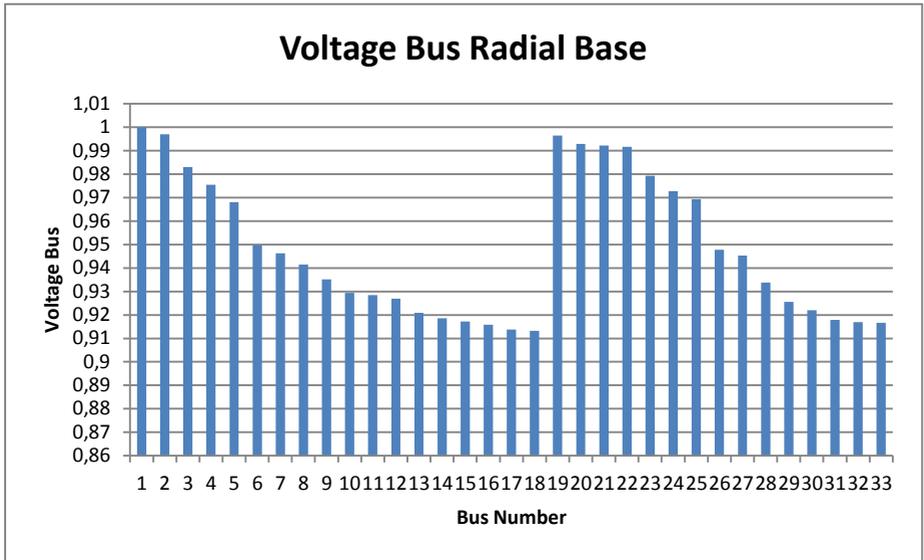
T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

$$CL = (31.3) * (0,06 * 8760) = 16451.28 \$$$

Berdasarkan hasil pemasangan DG pada bus 32 dan 14 mampu mengurangi nilai kerugian daya dari hasil aliran daya tanpa pemasangan DG. Nilai *losses* berkurang dari 123.3 kW menjadi 31.3 kW atau mengalami penurunan nilai *losses* sebesar 92 kW. Dengan terjadinya penurunan *losses* maka terjadi pula penurunan biaya kerugian energi dari 64806.48 \$ menjadi 16451.28 \$ atau terjadi penurunan biaya kerugian energi sebesar 48355.2\$.

### 4.1.5 Sistem Distribusi IEEE 33 bus Radial



**Gambar 4. 6** Grafik Volatge Bus Radial Base

Nilai tegangan seluruh bus pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus radial terdapat beberapa bus yang dengan tegangan dibawah 0.95 (*undervoltage*).

Nilai *losses* pada saluran: 202.6 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) (\$)$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\$)

$E_c$  = Energi Rate (\$/kWh)

Nilai  $E_c$  = 0,06 \$/kWh

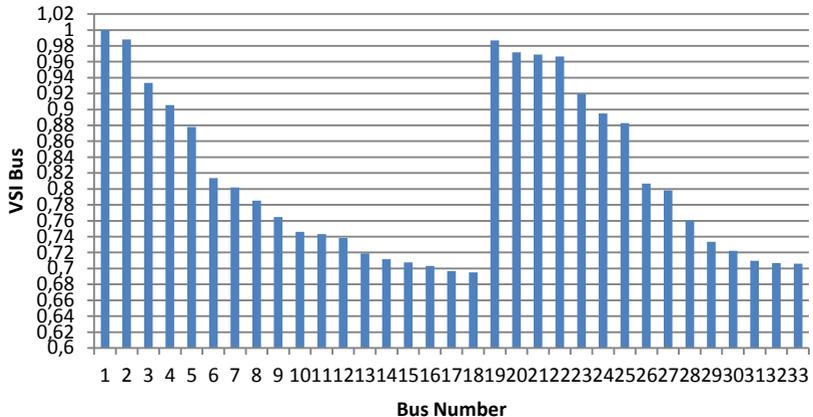
T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

$$CL = (202.6) * (0,06 * 8760) = 106486.6 \$$$

## 4.1.6 Sistem Distribusi IEEE 33 bus Radial Menggunakan VSI

### VSI Bus Radial Base



**Gambar 4. 7** Grafik VSI Bus Radial Base

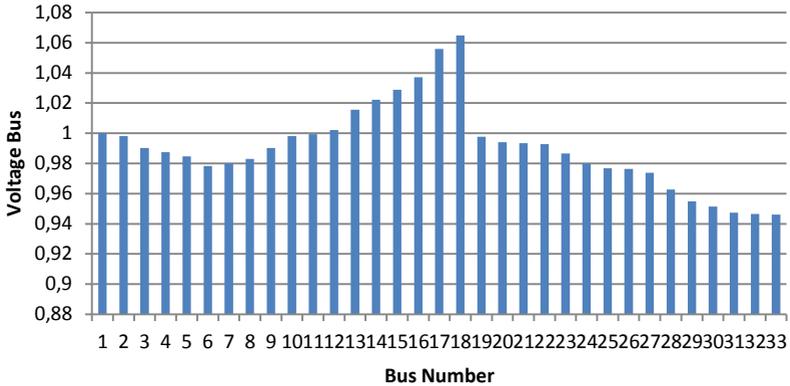
Dari hasil simulasi pada Gambar 4.7 maka didapatkan nilai indeks kestabilan terendah berada pada bus 18 dengan nilai indeks 0.6950. Hal ini menunjukkan bahwa bus 18 adalah bus paling kritis pada sistem ini. Oleh karena itu untuk menurunkan nilai *losses* dapat ditambahkan *Distributed Generation* (DG) pada bus 18.

Setelah didapatkan nilai indeks tegangan yang paling rendah yakni pada bus 18 maka DG akan dipasang pada bus tersebut dengan kapasitas 40% dari sistem, yaitu 1486 kW.

### 4.1.7 Pemasangan 1 DG pada bus berdasarkan VSI

Setelah pemasangan 1 DG pada bus 18 akan diamati bagaimana pengaruhnya terhadap kondisi tegangan sistem dan kondisi VSI masing-masing bus untuk menentukan lokasi penempatan DG kedua serta penurunan nilai kerugian daya sistem.

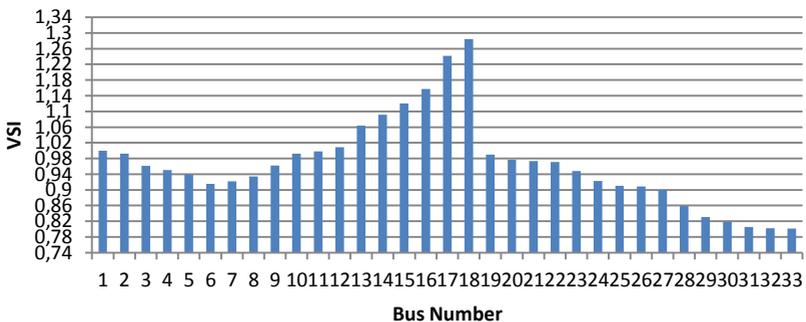
## Voltage Bus Radial 1 DG



Gambar 4. 8 Grafik Volatge Bus Radial Base 1 DG

Nilai tegangan seluruh bus pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus radial terdapat beberapa bus yang dengan tegangan dibawah 0.95 (*undervoltage*).

## VSI Radial 1 DG



Dari hasil simulasi pada Gambar 4.9 setelah penambahan 1 DG dengan kapasitas 1486 kW pada bus 18 maka didapatkan nilai indeks kestabilan terendah berada pada bus 33 dengan nilai indeks 0,8013. Hal ini menunjukkan bahwa bus 33 adalah bus paling kritis pada sistem ini. Oleh karena itu untuk menurunkan nilai *losses* dapat ditambahkan *Distributed Generation* (DG) pada bus 33.

#### 4.1.7.1 Dampak pemasangan DG terhadap kerugian energi

DG dipasang pada bus 18 dengan kapasitas 40% dari total sistem, yakni 1486 kW. Dengan pemasangan DG pada bus tersebut maka didapatkan nilai *losses* sebesar 134.5 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) \text{ (\$)}$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\\$)

$E_c$  = Energi Rate (\\$/kWh)

Nilai  $E_c$  = 0,06 \\$/kWh

T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

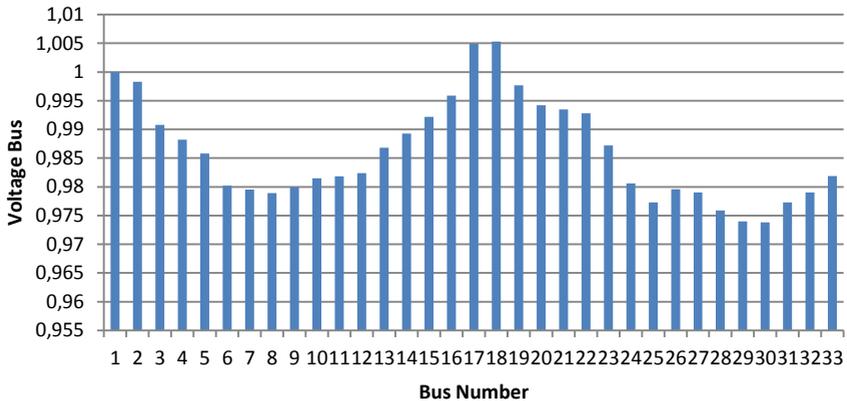
$$CL = (134.5) * (0,06 * 8760) = 70693.2 \text{ \$}$$

Berdasarkan hasil pemasangan DG pada bus 18 mampu mengurangi nilai kerugian daya dari hasil aliran daya tanpa pemasangan DG. Nilai *losses* berkurang dari 202.6 kW menjadi 134.5 kW atau mengalami penurunan nilai *losses* sebesar 68.1 kW. Dengan terjadinya penurunan *losses* maka terjadi pula penurunan biaya kerugian energi dari 106486.6 \\$ menjadi 70693.2 \\$ atau terjadi penurunan biaya kerugian energi sebesar 35793.4 \\$.

#### 4.1.8 Pemasangan 2 DG pada bus berdasarkan VSI

Setelah pemasangan 2 DG pada bus 18 dan bus 33 akan diamati bagaimana pengaruhnya terhadap kondisi tegangan sistem dan penurunan nilai kerugian daya sistem.

## Voltage Bus Radial 2 DG



Setelah penambahan 2 DG dengan kapasitas 743 kW pada bus 18 dan 33 didapatkan nilai tegangan semua bus berada pada level antara 0.95-1.0 pu dengan nilai tegangan minimal 0,9740 pu.

### 4.1.8.1 Dampak pemasangan DG terhadap kerugian energi

DG dipasang pada bus 18 dan 33 dengan kapasitas masing-masing 20% dari total beban, yakni 743 kW. Dengan pemasangan DG pada bus tersebut maka didapatkan nilai *losses* sebesar 80.9 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) \text{ (\$)}$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\\$)

$E_c$  = Energi Rate (\\$/kWh)

Nilai  $E_c$  = 0,06 \\$/kWh

T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

$$CL = (80.9) * (0,06 * 8760) = 42521.04 \$$$

Berdasarkan hasil pemasangan DG pada bus 18 dan 33 mampu mengurangi nilai kerugian daya dari hasil aliran daya tanpa pemasangan DG. Nilai *losses* berkurang dari 202.6 kW menjadi 80.9 kW atau mengalami penurunan nilai *losses* sebesar 121.7 kW. Dengan terjadinya penurunan *losses* maka terjadi pula penurunan biaya kerugian energi dari 106486.6 \$ menjadi 42521.04 \$ atau terjadi penurunan biaya kerugian energi sebesar 63965.56 \$.

#### 4.1.10 Sistem Distribusi IEEE 33 bus *Weakly Meshed 1 tie switch ON*

Pada kasus ini akan dilakukan simulasi dengan melakukan beberapa percobaan memanfaatkan *tie switch* yang ada pada jaringan. Pada kasus sebelumnya sistem *weakly meshed* dianalisa dengan mengaktifkan 5 *tie switch* secara bersamaan sehingga akan membentuk 5 *loop* pada jaringan, sedangkan pada kasus ini akan dilakukan percobaan dimana masing-masing *tie switch* dihubungkan secara parsial sehingga hanya membentuk 1 *loop* pada sistem distribusi tersebut. Akan didapatkan 5 hasil yang menunjukkan hubungan dari masing-masing *loop* yang terbentuk yakni pada *tie switch ON* bus 18—33, 9—15, 12—22, 8—21, dan 25—29.

Dimulai dengan melakukan analisa daya pada kondisi jaringan *weakly meshed 1 loop* untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus pada masing-masing bus, kemudian akan dilakukan *run* aliran daya kembali untuk mendapatkan nilai VSI pada masing-masing bus. Pada tabel xxx menunjukkan kondisi dari masing-masing pengaktifan *tie switch* secara parsial.

**Tabel 4. 1** Perbandingan *Weakly Meshed 1 Tie Switch ON*

Tie Switc On	WEAKLY MESHEd					
	18--33		9--15		12--22	
	NO DG	DG	NO DG	DG	NO DG	DG
Posisi DG		18		32		32
Kerugian Daya	201,2	62,2	196,2	79,2	153,8	66,8
Biaya Kerugian Daya	105267,8	32543,04	102651,8	41437,44	80468,16	34949,76

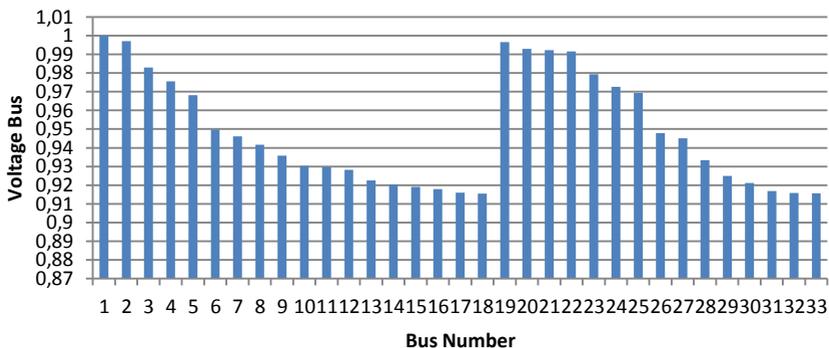
(lanjutan) Tabel 4. 2 Perbandingan *Weakly Meshed 1 Tie Switch ON*

Tie Switc On	WEAKLY MESHED			
	8--21		25--29	
	NO DG	DG	NO DG	DG
Posisi DG		32		17
Kerugian Daya	158,2	73,2	167,9	88,7
Biaya Kerugian Daya	82770,24	38298,24	87845,28	46407,84

Dari tabel diatas didapatkan nilai kerugian daya pada masing-masing konfigurasi pemasangan *tie switch*, pemasangan terbaik adalah pada *tie switch* yang menghubungkan bus 18—33 dengan nilai kerugian daya paling rendah ketika dipasang DG dengan kapasitas 40% dari kebutuhan sistem yakni 1486 KW. Maka dipilih konfigurasi *tie switch* 18—33 untuk dibandingkan dengan kondisi jaringan distribusi radial.

#### 4.1.11 Sistem Distribusi IEEE 33 bus *Weakly Meshed tie switch 18—33*

### Voltage Bus Weakly Meshed 1 loop Base



Gambar 4. 11 Grafik Volatge Bus *Weakly Meshed 1 Loop Base*

Nilai tegangan bus pada sistem jaringan distribusi IEEE 33 bus *weakly meshed* 1 loop menunjukkan ada beberapa bus yang memiliki tegangan dibawah 0,95 pu.

Nilai *losses* pada saluran: 201.2 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) (\$)$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\$)

$E_c$  = Energi Rate (\$/kWh)

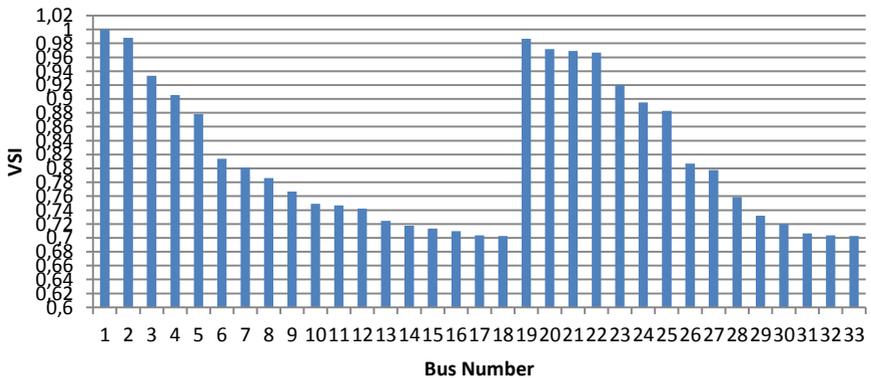
Nilai  $E_c$  = 0,06 \$/kWh

T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

$$CL = (201,2) * (0,06 * 8760) = 105267.84 \$$$

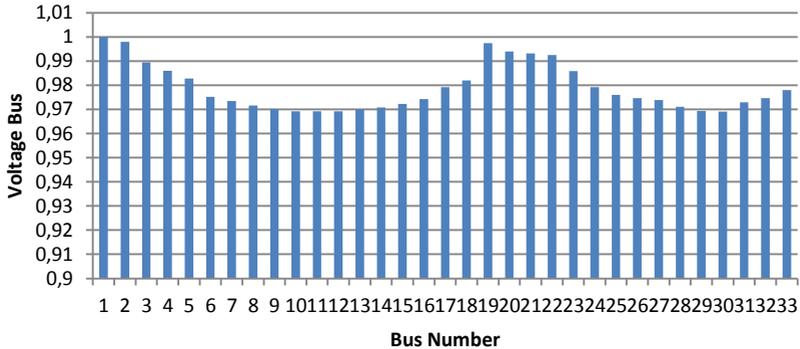
### VSI Weakly Meshed 1 loop Base



**Gambar 4. 11** Grafik VSI Bus Weakly Meshed 1 Loop Base

Dari hasil simulasi maka didapatkan nilai indeks kestabilan terendah berada pada bus 18 dengan nilai indeks 0.7173. Hal ini menunjukkan bahwa bus 18 adalah bus paling kritis pada sistem ini. Oleh karena itu untuk menurunkan nilai *losses* dapat ditambahkan *Distributed Generation* (DG) pada bus 18.

## Voltage Bus Weakly Meshed 1 loop 1 DG



**Gambar 4. 12** Grafik Volatge Bus *Weakly Meshed* 1 Loop 1 DG

Nilai tegangan seluruh bus pada sistem jaringan distribusi berada pada 0,95-1,05 pu.

Nilai *looses* pada saluran: 62,1 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) (\$)$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\$)

$E_c$  = Energi Rate (\$/kWh)

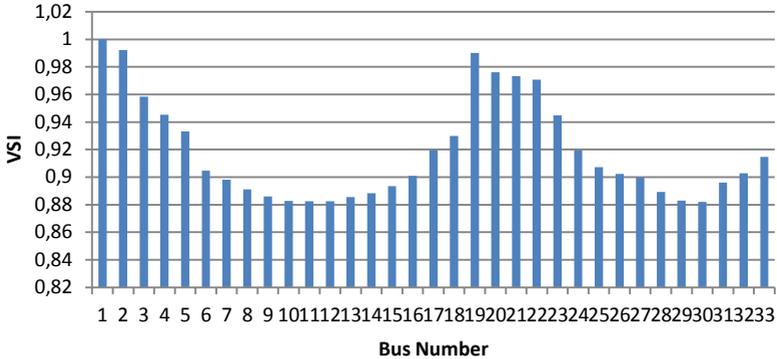
Nilai  $E_c$  = 0,06 \$/kWh

T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

$$CL = (62,1) * (0,06 * 8760) = 32543.04 \$$$

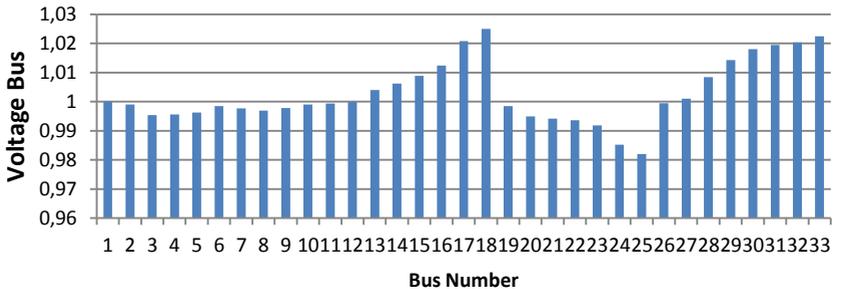
### VSI Weakly Meshed 1 loop 1 DG



**Gambar 4. 13** Grafik VSI *Weakly Meshed* 1 Loop 1 DG

Dari hasil simulasi maka didapatkan nilai indeks kestabilan terendah berada pada bus 30 dengan nilai indeks 0.8819. Hal ini menunjukkan bahwa bus 30 adalah bus paling kritis pada sistem ini. Oleh karena itu untuk menurunkan nilai *losses* dapat ditambahkan *Distributed Generation* (DG) pada bus 30.

### Voltage Bus Weakly Meshed 2 DG



**Gambar 4. 14** Grafik Volatge Bus *Weakly Meshed* 2 DG

Nilai tegangan seluruh bus pada sistem jaringan distribusi berada pada 0,95-1,05 pu.

Nilai *looses* pada saluran: 44,1 kW.

Biaya kerugian energi:

$$CL = (\text{Total rugi daya aktif}) * (E_c * T) \text{ (\$)}$$

Dimana: CL= Biaya kerugian energi (\$)

$E_c$  = Energi Rate (\$/kWh)

Nilai  $E_c$  = 0,06 \$/kWh

T = durasi waktu (h)

Nilai T=8760h

$$CL = (44,1) * (0,06 * 8760) = 23073,12 \$$$

## **4.2. Analisa Penempatan DG berdasarkan VSI pada jaringan *Weakly Meshed* dan Radial**

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, terdapat perbedaan nilai kerugian daya pada sistem berdasarkan lokasi penempatan *Distributed Generation* (DG) dan ukuran dari *Distributed Generation* (DG). Perbedaan nilai kerugian daya inilah yang akan mempengaruhi biaya kerugian daya sehingga didapatkan efisiensi nilai operasi energi terbesar.

### **4.2.1. Jaringan IEEE 33-bus *Weakly Meshed* menggunakan VSI**

Dari hasil simulasi masing-masing kondisi maka didapatkan pemasangan *Distributed Generation* (DG) yang paling efektif pada sistem ialah pada bus 32 dan 14 dengan kapasitas masing-masing 743 kW. Dikarenakan dengan pemasangan DG pada bus tersebut mampu menurunkan nilai kerugian daya paling besar pada jaringan *weakly meshed* dengan 5 *tie switch* ON. Dengan pemasangan DG pada dua bus tersebut dihasilkan nilai kerugian daya sebesar 31,3 kW dengan biaya kerugian daya 16451.28 \$

#### 4.2.2 Jaringan IEEE 33-bus Radial menggunakan VSI

Dari hasil simulasi masing-masing kondisi maka didapatkan pemasangan *Distributed Generation* (DG) yang paling efektif pada sistem ialah pada bus 18 dan 33 dengan kapasitas masing-masing 743 kW. Dikarenakan dengan pemasangan DG pada bus tersebut mampu menurunkan nilai kerugian daya paling besar pada jaringan weakly meshed. Dengan pemasangan DG pada dua bus tersebut dihasilkan nilai kerugian daya sebesar 80.9 kW dengan biaya kerugian daya 42521.04 \$

**Tabel 4. 3** Perbandingan pemasangan DG terhadap nilai kerugian daya dan biaya kerugian energi pada jaringan IEEE 33-bus *weakly meshed* 5 tie switch ON dan radial

	Radial			Weakly Meshed		
	Tanpa DG	1 DG	2 DG	Tanpa DG	1 DG	2 DG
Posisi DG (Kapasitas DG)		18 (1486Kw)	18,33 (@743 kW)		32 (1486Kw)	32,14 (@743 kW)
Kerugian daya (Kw)	202,6	134,5	80,9	123,3	47,8	31,3
Biaya kerugian daya (\$)	106486,56	70693,2	42521,04	64806,48	25123,68	16451,28
Efisiensi (\$)		35793,36	63965,52	41680,08	81362,88	90035,28

**Tabel 4. 4** Perbandingan pemasangan DG terhadap nilai kerugian daya dan biaya kerugian energi pada jaringan IEEE 33-bus *weakly meshed 1 tie switch* ON (18—33) dan radial

	Radial			Weakly Meshed		
	Tanpa DG	1 DG	2 DG	Tanpa DG	1 DG	2 DG
Posisi DG (Kapasitas DG)		18 (1486Kw)	18,33 (@743 kW)		18 (1486Kw)	32,30 (@743 kW)
Kerugian daya (Kw)	202,6	134,5	80,9	201,3	62,2	44,1
Biaya kerugian daya (\$)	106486,56	70693,2	42521,04	105267,84	32543,04	23073,12
Efisiensi (\$)		35793,36	63965,52	732,48	73457,28	82927,2

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penentuan lokasi *Distributed Generation* berdasarkan *Voltage Stability Indeks* untuk jaringan *weakly meshed* tepat untuk mendapatkan efisiensi energi operasi. Dengan pemasangan DG pada jaringan *weakly meshed 5 tie switch* ON terjadi penurunan kerugian daya dibandingkan ketika jaringan dalam kondisi radial. Jaringan distribusi radial memiliki nilai kerugian data sebesar 202.6 kW, dengan modifikasi jaringan menjadi *weakly meshed* maka nilai kerugian daya berkurang menjadi 123.3 kW.

Pada saat ditambahkan *Distributed Generation* pada jaringan dengan nilai DG yang sama didapatkan kerugian daya yang lebih kecil pada jaringan *weakly meshed* sehingga mampu memberikan biaya kerugian energi yang lebih kecil. Biaya kerugian energi juga berkurang

ketika jaringan dalam bentuk radial tanpa penambahan *Distributed Generation* mencapai 106486,56 sedangkan dengan modifikasi jaringan menjadi *weakly meshed* dan dipasang DG pada dua bus biaya kerugian energi menjadi 16451,28 \$. Efisiensi energi operasi dari penempatan *Distributed Generation* berdasarkan *Voltage Stability Indeks* untuk jaringan *weakly meshed* mencapai 90035.28 \$. Metode ini tepat untuk mendapatkan lokasi penempatan optimal *Distributed Generation* dan untuk mencapai efisiensi operasi energi yang tinggi.

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dari simulasi dan analisis yang diperoleh dari hasil tugas akhir ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

1. Pada sistem data jaringan distribusi IEEE 33-bus *Weakly Meshed* yang didapatkan melalui metode *Voltage Stability Index (VSI)* nilai indeks terendah pada bus 32 sebesar 0.825848.
2. Setelah dilakukan pemasangan DG pada bus 32 dan 14 sistem IEEE 33 bus *weakly meshed* dengan besar masing-masing 20% dari total beban didapatkan nilai kerugian daya paling kecil yakni 31.3 kW dengan biaya kerugian daya 16451.28 \$.
3. Penambahan DG yang terbaik pada sistem IEEE 33 bus *weakly meshed* adalah pada bus 32 dan 14 dengan masing-masing besar DG 20% dari total beban.
4. Metode *Voltage Stability Index (VSI)* yang diterapkan pada jaringan distribusi *weakly meshed* terbukti lebih baik untuk menentukan lokasi penempatan DG dibandingkan dengan diterapkan pada jaringan radial. Ini terbukti dengan besar dan jumlah DG yang sama pada jaringan distribusi radial memiliki nilai kerugian daya 80.9 dan biaya kerugian daya 42521.04.
5. Penerapan Metode *Voltage Stability Index (VSI)* untuk penentuan penempatan lokasi DG pada jaringan *weakly meshed* dapat digunakan untuk mengurangi nilai kerugian daya sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi operasi pada sistem.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Metode *Voltage Stability Index (VSI)* dapat digunakan untuk menentukan lokasi penempatan optimal pada jaringan mesh.
2. Kapasitas dari DG yang akan digunakan disalurkan kedalam sistem agar ditentukan secara optimal dapat dipelajari lebih lanjut dengan menggunakan metode lain agar hasil yang didapat juga akan lebih optimal.

3. Untuk selanjutnya analisa aliran daya pada sistem distribusi *weakly meshed* dapat disimulasikan dalam *software* MATLAB.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anugerah Putra, Yudha. “Analisi Kestabilan Tegangan Pada Sistem Microgrid Menggunakan Metode *Voltage Stability Index (VSI)*”, Sep. 2016
- [2] Chalapathi, B. Agrawal, Diwakar. “*Optimal Placement of Distribution Generation in Weakly Meshed Distribution Network for Energy Efficient Operation*” Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth, December 11-12, 2015
- [3] Alief Amanullah, Muhammad. “Studi Penentuan Lokasi *Distributed Generation (DG)* untuk Mengurangi Rugi-rugi Daya pada Sistem Jaringan Distribusi Radial Menggunakan Metode *K-MEANS CLUSTERING*”, Sep. 2016
- [4] Nurafiatullah. “Analisis Aliran Daya Harmonisa Dengan Metode ZBR Pada Sistem Distribusi Tiga Fasa *Weakly Meshed*”, 2014
- [5] Rizka Winda Novialifiah, Adi Soeprijanto, Rony Seto Wibowo, “Algoritma Aliran Daya untuk Sistem Distribusi Radial dengan Beban Sensitif Tegangan”, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya 2014.
- [6] Sukmawidjaja Maula, “Perhitungan Profil Tegangan pada Sistem Distribusi Menggunakan Matrix Admitansi dan Matrix Impedansi Bus”, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti, Jakarta 2008.
- [7] Suyanto, Indri Suryawati, Ontoseno Penangsang, Adi Soeprijanto, dkk. “Modified Direct-ZBR Method PSO Power Flow Development for *Weakly Meshed Active Unbalanced Distribution Systems*”. Asian Research Publishing Network, 2014
- [8] Kundur, P. “*Voltage Stability, Power System stability and control*”. 959-1019.1994.
- [9] Satya Dinesh, “Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Network”, Department of Electrical Engineering N.I.T Jamshedpur, January 2014.
- [10] Saadat, Hadi “*Power System Analysis*”, WCB McGraw-Hill, 1999
- [11] S.G Bharathi Dasan and S.Selvi Ramalakshmi, “Optimal Siting and Sizing of Hybrid Distributed Generation using EP”, Thrid

International Conference on Power System, Kharagpun, India,  
2009.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Arizal Ariyanto merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Dilahirkan pada 12 Februari 1995 di Kabupaten Malang oleh pasangan Ibu Umi Asih dan Bapak Imam Buchori. Mengawali pendidikan di SDN Kendalpayak, Malang sampai dengan 2007 kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengahnya di SMPN 4 Kepanjen sampai dengan 2010 dan melanjutkan pendidikan menengah atasnya di SMAN 1 Kepanjen hingga lulus pada tahun 2013. Sejak tahun 2013 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, bidang studi Teknik Sistem Tenaga lewat jalur SNMPTN dengan NRP 2213100074. Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa sebagai bagian dari SC Kaderisasi HIMATEKTRO ITS , Badan Eksekutif Mahasiswa ITS Kementerian Kaderisasi Kebangsaan, dan sebagai Ketua Dewan Perwakilan Mahasiswa ITS 2015-2016 .Untuk menghubungi penulis dapat melalui email [ariyantoarizal@gmail.com](mailto:ariyantoarizal@gmail.com)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*