



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI ALIRAN DAYA AKTIF 3 FASA PADA SISTEM
DISTRIBUSI RADIAL DENGAN PENENTUAN LOKASI DAN
KAPASITAS DG OPTIMAL MENGGUNAKAN METODE
*K-MEANS CLUSTERING***

Taufani Kurniawan
NRP 2213100024

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dimas Fajar Uman Putra. S.T., M.T.

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**STUDY OF 3 PHASE ACTIVE LOAD FLOW ON RADIAL
DISTRIBUTION SYSTEM WITH OPTIMAL DG PLACEMENT
AND SIZING USING K-MEANS CLUSTERING METHOD**

Taufani Kurniawan
NRP 2213100024

Supervisors

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dimas Fajar Uman Putra. S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Studi Aliran Daya Aktif 3 Fasa pada Sistem Distribusi Radial dengan Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG Optimal Menggunakan Metode *K-Means Clustering*”** 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

Taufani Kurniawan
2213100024

**STUDI ALIRAN DAYA AKTIF 3 FASA PADA SISTEM
DISTRIBUSI RADIAL DENGAN PENENTUAN LOKASI DAN
KAPASITAS DG OPTIMAL MENGGUNAKAN METODE K-
MEANS CLUSTERING**

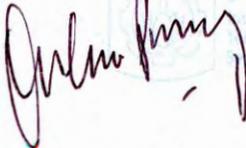
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna 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



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

Dosen Pembimbing II



Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.
NIP. 19881108 201212 1 001



Studi Aliran Daya Aktif 3 Fasa pada Sistem Distribusi Radial dengan Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG Optimal Menggunakan Metode *K-Means Clustering*

Nama Mahasiswa : Taufani Kurniawan

Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D

Dosen Pembimbing II : Dimas Fajar Uman Putra. ST., MT.

Abstrak:

Rugi-rugi daya yang besar dan profil tegangan yang buruk merupakan masalah-masalah utama pada sistem distribusi radial. Pemasangan *distributed generation* (DG) pada sistem distribusi radial merupakan solusi peningkatan kualitas sistem seperti mengurangi rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, maupun meningkatkan keandalan sistem. Namun pada implementasinya, penentuan lokasi dan kapasitas DG terpasang harus dipertimbangkan untuk menghasilkan solusi seoptimal mungkin. Studi menunjukkan bahwa pada banyak kasus, pemilihan lokasi dan kapasitas DG yang tidak tepat dapat membawa sistem pada rugi-rugi daya yang lebih besar dibandingkan dengan sistem tanpa DG. Oleh karena itu diperlukan sebuah studi dan perencanaan pemasangan DG pada sistem distribusi radial.

Dalam tugas akhir ini dilakukan analisis aliran daya dengan mempertimbangkan lokasi dan kapasitas optimal DG menggunakan metode *K-means clustering*. Teknik *clustering* berdasarkan *Loss Sensitivity Factor* (LSF) dan tegangan tiap bus digunakan untuk mendapat kandidat lokasi pemasangan DG untuk kemudian didapatkan kapasitas DG menggunakan persamaan matematis. Metode yang digunakan diuji dan dianalisa hasilnya menggunakan sistem uji IEEE 33 bus dan 69 bus. Hasil simulasi dan analisis data menunjukkan bahwa pada sistem IEEE 33 bus rugi-rugi daya mampu diturunkan sebesar 87,5% menjadi sebesar 25,3272 kW. Sedangkan pada sistem IEEE 69 bus rugi-rugi daya mampu diturunkan sebesar 69,84% menjadi sebesar 67,4816 kW. Selain itu metode ini juga mampu menentukan jumlah DG dengan level penetrasi lebih optimal untuk menurunkan rugi-rugi daya sistem.

Kata kunci: *Aliran daya, metode topology-network, sistem distribusi radial, distributed generation, Loss Sensitivity Factor, K-means clustering.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Study of 3 Phase Active Load Flow on Radial Distribution System with Optimal DG Placement and Sizing using *K-Means Clustering* Method

Student Name : Taufani Kurniawan
Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
Supervisor II : Dimas Fajar Uman Putra. ST., MT.

Abstract:

High amount of losses and poor voltage profile become the main problems in radial distribution system. Installation of DG is a solution of power quality improvement such as losses reduction, voltage profile correction, and reliability improvement. However on its implementation, to obtain optimal solution installation DG have to be planned properly. Some reseacrhes show that in may cases, inappropriate selection of location and size of DG could lead system to higher losses than system without DG. Hence, a research and planning of DG installation to radial distribution system is necessary.

In this final project a load flow analysis considering optimal location and size of DG is applied using *K-means* clustering method. Clustering technique based on Loss Sensitivity Factor (LSF) and bus voltage is used to obtain DG location candidate and then size of DG is obtained using mathematical equation. The method and its results are tested and analyzed on IEEE 33 bus and 69 bus test system. The simulation result shows that losses on IEEE 33 bus system is reduced by 87,5% into 25,3272 kW. While losses on IEEE 69 bus is reduced by 69,84% into 67,4816 kW. Furthermore, this method is capable to obtain more number of DG with more optimal penetration level to reduce system losses.

Kata kunci: *Load flow, topology-network method, radial distribution system, distirbuted generation, Loss Sensitivity Factor, K-means clustering.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Studi Aliran Daya Aktif 3 Fasa pada Sistem Distribusi Radial dengan Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG Optimal Menggunakan Metode *K-Means Clustering*”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surga-Nya.
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, PhD. dan Dimas Fajar Uman P. S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Muhammad Alief Amanullah yang telah memberikan bimbingan sejak awal penyusunan tugas akhir ini.
6. Keluarga besar Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik khususnya teman-teman asisten angkatan 2013 yang telah memberikan dukungan dan menciptakan suasana hangat dan kondusif selama mengerjakan tugas akhir.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang.....	1
1.2	Permasalahan.....	2
1.3	Tujuan	2
1.4	Batasan Masalah	2
1.5	Metodologi	3
1.6	Sistematika Penulisan.....	4
1.7	Relevansi	5

BAB 2 ANALISIS ALIRAN DAYA AKTIF PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL

2.1	Analisis Aliran Daya	7
2.1.3	Rugi-rugi Daya	8
2.1.4	Drop Tegangan	10
2.2	Sistem Distribusi Radial.....	10
2.3	Analisis Aliran Daya pada Sistem Distribusi Radial.....	12
2.3.1	Pendahuluan	12
2.3.2	Metode Topology-Network.....	12
2.4	Distributed Generation (DG)	15
2.5	Loss Sensitivity Factor (LSF)	19
2.6	K-means Clustering.....	20
2.7	Pendekatan Analitis untuk Penentuan Kapasitas DG	21

BAB 3 STUDI PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS DG PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL MENGGUNAKAN METODE *K-MEANS CLUSTERING*

3.1	Pemodelan Penyelesaian Tugas Akhir	25
3.2	Normalisasi LSF dan Tegangan Bus	27
3.3	Metode K-means Clustering	27

3.4	Penentuan Lokasi Pemasangan DG	29
3.5	Penentuan Kapasitas DG.....	30
3.6	Pemodelan DG sebagai PQ Load Negatif	31
3.7	Sistem Distribusi IEEE – 33 Bus Modifikasi	32
3.8	Sistem Distribusi IEEE – 69 Bus Modifikasi	35

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS DATA

4.1	Studi Kasus	41
4.1.1	Sistem IEEE 33 Bus (Kasus A).....	41
4.1.2	Sistem IEEE 69 Bus (Kasus B).....	59
4.2	Validasi Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG Metode K-means Clustering dengan Metode Urutan Prioritas LSF	77
4.2.1	Validasi Hasil Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG pada Sistem IEEE 33 Bus.....	78
4.2.1	Validasi Hasil Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG pada Sistem IEEE 69 Bus.....	80

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	83
5.2	Saran.....	84

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik Sederhana.....	8
Gambar 2. 2 Model Saluran untuk Perhitungan Rugi-rugi Daya	9
Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Line to Neutral	10
Gambar 2. 4 Sistem Distribusi Radial.....	11
Gambar 2. 5 Contoh Single Line Diagram.....	13
Gambar 2. 6 Sistem Distribusi Radial Sederhana	19
Gambar 2. 7 Sistem Distribusi Radial Sederhana dengan DG.....	21
Gambar 3. 1 Flowchart Penyelesaian Tugas Akhir Bagian 1	25
Gambar 3. 2 Flowchart Penyelesaian Tugas Akhir Bagian 2	26
Gambar 3. 3 Flowchart K-means Clustering	29
Gambar 3. 4 Sistem Tanpa DG.....	32
Gambar 3. 5 Sistem dengan DG yang Dimodelkan PQ load Negatif....	32
Gambar 3. 6 Single Line Diagram IEEE 33 Bus	35
Gambar 3. 7 Single Line Diagram IEEE 69 Bus	40
Gambar 4. 1 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A1-basecase	42
Gambar 4. 2 Tegangan Bus pada Kasus A1-basecase.....	43
Gambar 4. 3 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A2	44
Gambar 4. 4 Tegangan Bus pada Kasus A2	45
Gambar 4. 5 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A3	46
Gambar 4. 6 Tegangan Bus pada Kasus A3	47
Gambar 4. 7 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A4.....	48
Gambar 4. 8 Tegangan Bus pada Kasus A4	49
Gambar 4. 9 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A5	50
Gambar 4. 10 Tegangan Bus pada Kasus A5	51
Gambar 4. 11 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A6	52
Gambar 4. 12 Tegangan Bus pada Kasus A6	53
Gambar 4. 13 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A7	54
Gambar 4. 14 Tegangan Bus pada Kasus A7	55
Gambar 4. 15 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A8	56
Gambar 4. 16 Tegangan Bus pada Kasus A8	57
Gambar 4. 17 Perbandingan Rugi-rugi Daya Semua Kasus A	58
Gambar 4. 18 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B1-basecase.....	60
Gambar 4. 19 Tegangan Bus pada Kasus B1-basecase	60
Gambar 4. 20 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B2	62
Gambar 4. 21 Tegangan Bus pada Kasus B2.....	62
Gambar 4. 22 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B3	64

Gambar 4. 23 Tegangan Bus pada Kasus B3	64
Gambar 4. 24 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B4.....	66
Gambar 4. 25 Tegangan Bus pada Kasus B4.....	66
Gambar 4. 26 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B5.....	68
Gambar 4. 27 Tegangan Bus pada Kasus B5	68
Gambar 4. 28 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B6.....	70
Gambar 4. 29 Tegangan Bus pada Kasus B6	70
Gambar 4. 30 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B7.....	72
Gambar 4. 31 Tegangan Bus pada Kasus B7.....	73
Gambar 4. 32 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B8.....	75
Gambar 4. 33 Tegangan Bus pada Kasus B8.....	75
Gambar 4. 34 Perbandingan Rugi-rugi Daya Semua Kasus B.....	77
Gambar 4. 35 Perbandingan Rugi-rugi Daya oleh Metode <i>K-means</i> <i>Clustering</i> dan Urutan Prioritas LSF pada Sistem IEEE 33 Bus.....	79
Gambar 4. 36 Perbandingan Rugi-rugi Daya oleh Metode <i>K-means</i> <i>Clustering</i> dan Urutan Prioritas LSF pada Sistem IEEE 69 Bus.....	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkit	17
Tabel 2. 2 Klasifikasi DG Berdasarkan Teknologi Pembangkitan.....	17
Tabel 3. 1 Data Saluran Sistem IEEE 33 Bus	33
Tabel 3. 2 Data Beban Sistem IEEE 33 Bus.....	34
Tabel 3. 3 Data Saluran Sistem IEEE 69 Bus	36
Tabel 3. 4 Data Saluran Sistem IEEE 69 Bus (Lanjutan).....	37
Tabel 3. 5 Data Beban Sistem IEEE 69 Bus.....	38
Tabel 3. 6 Data Beban Sistem IEEE 69 Bus (Lanjutan).....	39
Tabel 4. 1 Studi Kasus Sistem IEEE 33 Bus	42
Tabel 4. 2 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Pertama Kasus A	43
Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A2	44
Tabel 4. 4 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kedua Kasus A.....	45
Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A3	46
Tabel 4. 6 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketiga Kasus A.....	47
Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A4	48
Tabel 4. 8 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keempat Kasus A	49
Tabel 4. 9 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A5	50
Tabel 4. 10 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kelima Kasus A.....	51
Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A6.....	52
Tabel 4. 12 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keenam Kasus A	53
Tabel 4. 13 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A7.....	54
Tabel 4. 14 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketujuh Kasus A.....	55
Tabel 4. 15 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A8.....	56
Tabel 4. 16 Hasil Pemasangan DG pada Kasus A	58
Tabel 4. 17 Studi Kasus Sistem IEEE 69 Bus	59
Tabel 4. 18 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Pertama Kasus B.....	61
Tabel 4. 19 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B2.....	61

Tabel 4. 20 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kedua Kasus B.....	63
Tabel 4. 21 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B3	63
Tabel 4. 22 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketiga Kasus B.....	65
Tabel 4. 23 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B4	65
Tabel 4. 24 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keempat Kasus B.....	67
Tabel 4. 25 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B5	67
Tabel 4. 26 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kelima Kasus B	69
Tabel 4. 27 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B6	69
Tabel 4. 28 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keenam Kasus B.....	71
Tabel 4. 29 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B7	71
Tabel 4. 30 Hasil <i>Clustering</i> untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketujuh Kasus B	73
Tabel 4. 31 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B8	74
Tabel 4. 32 Hasil Pemasangan DG pada Kasus B.....	76
Tabel 4. 33 Perbandingan Hasil Metode <i>K-means Clustering</i> dan Urutan Prioritas LSF pada sistem IEEE 33 bus.....	78
Tabel 4. 34 Perbandingan Hasil Metode <i>K-means Clustering</i> dan Urutan Prioritas LSF pada sistem IEEE 69 bus.....	80

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem berbentuk radial merupakan tipe jaringan yang paling sederhana sehingga umum digunakan pada sistem distribusi kelistrikan. Secara sederhana bentuk sistem ini berupa sumber yang menyuplai beban-beban di bawahnya secara mengakar dan bercabang tanpa membentuk hubungan loop sehingga arus mengalir searah dari sumber searah menuju beban. Seiring dengan perkembangan sistem distribusi radial yang semakin besar dan luas maka timbul beberapa masalah utama dalam sistem distribusi radial yaitu rugi-rugi daya yang semakin besar dan profil tegangan yang memburuk. Masalah-masalah tersebut telah coba diatasi dengan beberapa solusi diantaranya pemasangan *Distributed Generation* (DG).

Pada pembangkitan listrik konvensional, daya dibangkitkan oleh pembangkit terpusat skala besar memanfaatkan beberapa energi seperti bahan bakar fosil, nuklir, dan air. Namun dewasa ini konsep pembangkitan terpusat mulai digantikan oleh konsep DG [1]. DG atau pembangkitan tersebar adalah sistem pembangkitan yang terdiri atas pembangkit daya listrik skala kecil yang dipasang langsung pada sistem dekat dengan pusat beban dengan level tegangan rendah. Pemasangan DG pada sistem merupakan solusi peningkatan kualitas sistem seperti mengurangi rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, maupun meningkatkan keandalan sistem [2]. Selain itu penggunaan DG juga dapat memberikan keuntungan terhadap lingkungan diantaranya yaitu mengurangi polusi dan efek gas rumah kaca karena DG pada umumnya memanfaatkan energi terbarukan seperti angin dan sinar matahari untuk membangkitkan tenaga listrik.

Namun pada impletemtasinya, penentuan lokasi dan kapasitas DG terpasang harus dipertimbangkan untuk menghasilkan kondisi seoptimal mungkin. Studi menunjukkan bahwa pada banyak kasus, lokasi dan kapasitas DG merupakan parameter sangat penting dalam pemasangan DG untuk mengurangi rugi-rugi daya, meningkatkan profil tegangan, dan memaksimalkan keandalan sistem [1]. Untuk itu diperlukan sebuah studi dan perencanaan sebelum memasang DG pada sistem distribusi radial.

Dalam tugas akhir ini dilakukan analisis aliran daya aktif dengan mempertimbangkan lokasi dan kapasitas optimal untuk DG yang akan dipasang pada sistem distribusi radial menggunakan metode *K-Means Clustering*. Teknik *clustering* akan digunakan untuk mendapatkan lokasi pemasangan DG yang optimal untuk kemudian didapatkan kapasitas DG yang optimal menggunakan metode pendekatan analitis. Metode yang digunakan akan diuji dan dianalisa dengan sistem distribusi radial IEEE 33 bus dan 69 bus. Dengan penggunaan metode ini didapatkan solusi untuk perbaikan nilai rugi-rugi daya pada sistem distribusi radial dengan penentuan lokasi dan kapasitas DG.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan uraian latar belakang, hal yang menjadi permasalahan dan akan dibahas dalam penelitian ini adalah studi aliran daya aktif dengan penggunaan metode *K-Means Clustering* untuk mempertimbangkan lokasi dan kapasitas yang optimal untuk DG yang akan dipasang pada sistem distribusi radial guna mengurangi rugi-rugi daya. Selain itu dalam penelitian ini akan dibahas nilai penurunan nilai rugi-rugi daya akibat pemasangan DG dengan lokasi dan kapasitas yang optimal menggunakan metode *K-Means Clustering*.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Mengetahui dan mengimplementasikan metode *K-means Clustering* untuk penentuan lokasi dan kapasitas DG pada sistem distribusi radial.
2. Mengetahui hasil penurunan rugi-rugi daya dengan lokasi dan kapasitas DG optimal menggunakan metode *K-means Clustering* berdasarkan analisis aliran daya.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan simulasi menggunakan sistem distribusi IEEE 33 bus dan 69 bus tiga fasa
2. Sistem distribusi yang diterapkan adalah sistem distribusi seimbang ($R=S=T$) [3]
3. Karakteristik DG yang digunakan tidak diperhatikan

4. Keluaran DG dianggap ideal
5. DG dimodelkan dengan PQ *load* negatif
6. Perangkat lunak yang digunakan adalah Matlab R2014a dan ETAP 12.6.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi pustaka

Studi pustaka yang dilakukan yaitu mengenai sistem tenaga listrik, studi aliran daya, sistem distribusi, metode *Topology Network*, metode LSF, metode *K-means Clustering*, metode analitis penentuan kapasitas DG optimal, dan pemodelan menggunakan perangkat lunak Matlab dan ETAP.

2. Pengambilan data

Pada tahap ini akan ditentukan terlebih dahulu sistem yang akan digunakan untuk menguji untuk kemudian didapatkan data-data yang digunakan untuk analisa aliran daya seperti *single line diagram* (SLD), data beban, data pembangkitan, maupun data impedansi pada saluran. Data-data tersebut kemudian dimodelkan dalam sebuah simulasi untuk analisis aliran daya menggunakan perangkat lunak Matlab. SLD dan data sistem yang akan digunakan untuk penerapan penelitian ini adalah sistem distribusi radial IEEE 33 bus, dan 69 bus.

3. Simulasi dan Analisis Data

Tahap ini dimulai dengan simulasi analisis aliran daya sistem distribusi radial yang akan diuji. Hasil dari simulasi awal ini didapatkan beberapa data yang digunakan untuk simulasi dan analisis lebih lanjut seperti rugi-rugi saluran, tegangan tiap bus, arus, maupun daya pembangkit dan beban. Setelah simulasi analisis aliran daya maka akan dilakukan perancangan program *K-Means Clustering* pada Matlab. *K-Means Clustering* akan menggunakan beberapa karakteristik sistem seperti *Loss Sensitivity Factor* (LSF) dan tegangan bus guna mendapatkan kandidat lokasi optimal pemasangan DG. Hasil penentuan lokasi kemudian digunakan sebagai masukan untuk melakukan pendekatan analitis untuk mendapatkan kapasitas DG optimal untuk rugi-rugi daya yang minimum pada sistem. Analisis akan

dilakukan dengan melihat kinerja penempatan DG dengan kapasitas tertentu untuk mengurangi rugi-rugi daya pada sistem.

4. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil analisa data dan perbandingan kasus yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan mengenai performa metode yang diajukan untuk mengurangi rugi-rugi daya pada sistem dengan pemasangan DG dengan mempertimbangkan lokasi dan kapasitas optimal.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.
- Bab 2 : Tinjauan Pustaka
Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini. Seperti mengenai analisis aliran daya, sistem distribusi, dan *distributed generation* (DG).
- Bab 3 : Perancangan dan Pemodelan
Bab ini membahas mengenai metode aliran daya *Topology-Network*, metode penentuan lokasi DG dengan *K-means clustering*, metode penentuan kapasitas DG optimal menggunakan pendekatan analitis yang akan digunakan dalam tugas akhir ini, dan pemodelan PQ *load* negatif yang digunakan untuk memodelkan DG yang terpasang pada sistem distribusi.
- Bab 4 : Simulasi dan Analisis
Bab ini membahas hasil perhitungan analisis aliran daya dengan lokasi dan kapasitas DG optimal, hasil penurunan rugi-rugi daya, dan validasinya dengan membandingkan hasilnya dengan metode lain.
- Bab 5 : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

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

1. Menjadi bahan studi oleh pengembang sistem distribusi untuk mengimplementasikan metode yang diusulkan dalam melakukan perencanaan pengembangan sistem distribusi aktif menggunakan DG.
2. Menjadi bahan studi dan referensi untuk penelitian di bidang aliran daya aktif mempertimbangkan penentuan lokasi dan ukuran DG.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

ANALISIS ALIRAN DAYA AKTIF PADA SISTEM DISTRIBUSI

2.1 Analisis Aliran Daya

Sistem tenaga listrik adalah sebuah sistem yang mengatur, membangkitkan, menyalurkan, dan membagi sampai pada akhirnya memanfaatkan tenaga listrik tersebut. Kondisi sistem tenaga listrik yang ideal adalah jika daya yang dibangkitkan oleh pembangkit sesuai dengan daya yang dibutuhkan sistem. Suatu sistem kelistrikan pada kenyataannya terdiri dari banyak bus yang terhubung satu sama lain sehingga dibutuhkan perhitungan khusus untuk mendapatkan solusi analisis aliran daya.

Analisis aliran daya merupakan sebuah studi yang penting dan mendasari analisis lebih lanjut pada sistem tenaga. Analisis aliran daya akan mendapatkan parameter dasar dari sebuah sistem seperti tegangan bus, arus saluran, daya beban, faktor daya, hingga rugi-rugi daya. Parameter-parameter tersebut merupakan informasi yang penting untuk dapat mengevaluasi kondisi dan kualitas suatu sistem seperti peralatan, saluran, beban, maupun pembangkitan sehingga diperlukan sebagai dasar dalam melakukan perbaikan dan perkembangan sistem.

Langkah awal dalam melakukan analisis aliran daya adalah mengumpulkan data sistem berupa data beban, data pembangkit, maupun data impedansi saluran. Data beban merupakan data beban daya aktif dan reaktif tiap bus. Data saluran merupakan data nilai impedansi semua saluran yang menghubungkan setiap bus dalam sistem.

Arus, tegangan, daya beban dan impedansi adalah data sistem yang diolah oleh persamaan aliran daya. Gambar 2.1 menunjukkan sebuah bus dengan beberapa cabang saluran. Besarnya arus bus i tersebut dapat dihitung menggunakan pendekatan hukum Kirchoff untuk arus sebagai berikut:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.1)$$

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}V_i + y_{i2}V_i + \dots + y_{in}V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (2.2)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \quad (2.3)$$

Sedangkan nilai daya aktif dan daya reaktif pada bus i didapat dari persamaan berikut

$$P_i + jQ_i = V_i \times I_i^* \quad (2.4)$$

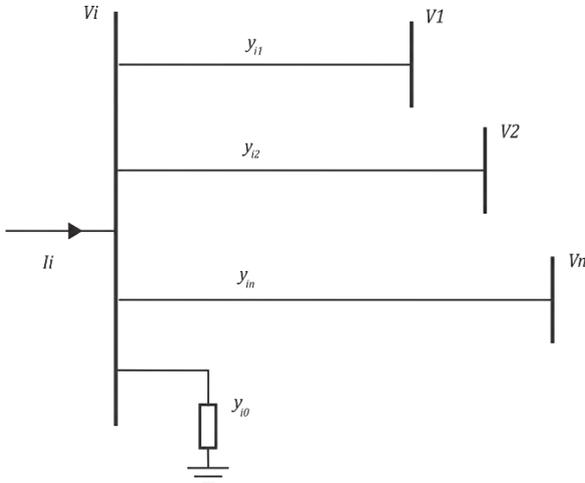
atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.4) dan (2.5) maka didapat persamaan dasar untuk aliran daya sebagai berikut:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.6)$$

dengan n adalah jumlah bus cabang yang terhubung dengan bus i . Dari persamaan 2.6 dapat dilihat bahwa persamaan aliran daya merupakan persamaan yang tidak linear sehingga dibutuhkan proses iterasi untuk mendapatkan solusi persamaan tersebut [4].

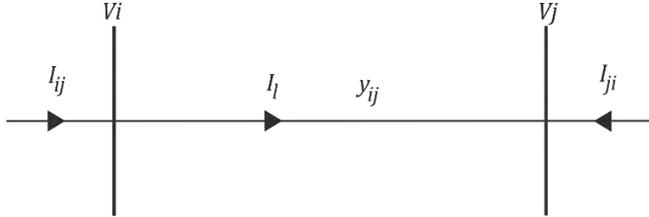


Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik Sederhana

2.1.3 Rugi-rugi Daya

Rugi-rugi daya adalah daya yang hilang akibat impedansi pada saluran yang saling menghubungkan bus. Gambar 2.2 menunjukkan

sebuah saluran yang menghubungkan dua bus. Secara sederhana rugi-rugi daya dapat diidentifikasi dari selisih daya yang dikirim oleh bus i menuju bus k dengan daya yang diterima oleh bus k . Arus saluran I_{ij} terukur pada bus i dan didefinisikan berarah positif dari bus i menuju bus k sedangkan I_{ji} didefinisikan negatif karena berarah sebaliknya [4].



Gambar 2. 2 Model Saluran untuk Perhitungan Rugi-rugi Daya

arus dari bus i menuju bus k didefinisikan sebagai

$$I_{ij} = I_l = y_{ij}(V_i - V_j) \quad (2.7)$$

sedangkan arus dari bus k menuju bus i didefinisikan sebagai

$$I_{ji} = -I_l = y_{ij}(V_j - V_i) \quad (2.8)$$

sehingga daya kompleks S_{ij} dari bus i menuju bus k dan daya kompleks S_{ji} dari bus k menuju bus i didefinisikan sebagai

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.9)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.10)$$

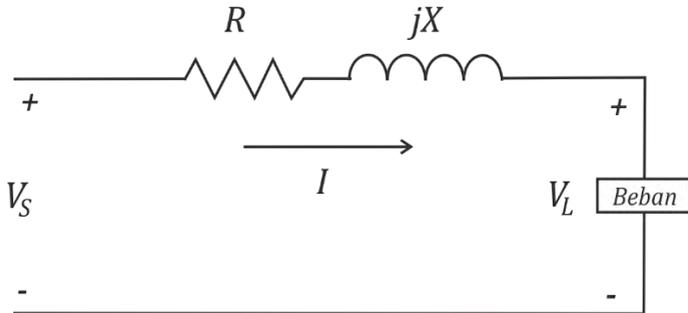
Rugi-rugi daya saluran antara bus i dan bus k didapat dari penjumlahan Persamaan 2.9 dan 2.10 sebagai berikut

$$S_{Loss\ ij} = S_{ij} + S_{ij} \quad (2.11)$$

$$P_{Loss\ ij} = \text{real}(S_{Loss\ ij}) \quad (2.12)$$

2.1.4 Drop Tegangan

Gambar 2.3 menunjukkan sebuah rangkaian ekuivalen *line to neutral* dari sebuah rangkaian tiga fasa yang menanggung beban tiga fasa seimbang.



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen *Line to Neutral*

Dengan menggunakan hukum Kirchoff untuk tegangan Gambar 2.3 dapat dianalisa persamaan berikut [5].

$$V_S = V_L + (R + jX)I = V_L + RI + jXI \quad (2.13)$$

Drop tegangan pada saluran dapat didefinisikan sebagai selisih antara magnitude tegangan sumber dengan tegangan pada sisi beban.

$$V_{drop} = |V_S| - |V_L| \quad (2.14)$$

2.2 Sistem Distribusi Radial

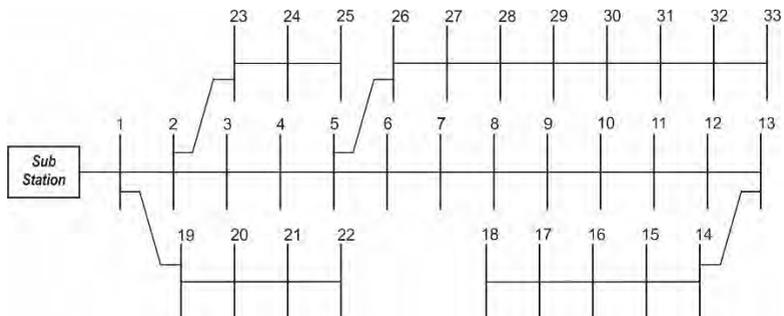
Sistem distribusi merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik selain pembangkitan dan transmisi yang merupakan tahap terakhir penyaluran tenaga listrik dari pembangkit ke beban. Sistem distribusi menghubungkan gardu induk dari transmisi menuju pelanggan atau beban. Pada sistem distribusi ini digunakan transformator (trafo) *step down* untuk menurunkan tegangan transmisi agar sesuai dengan tegangan peralatan pelanggan rumah tangga dan industri.

Sistem distribusi dibagi menjadi dua menurut level tegangannya yaitu jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR). JTM merupakan sistem distribusi dengan level tegangan 20 KV yang biasa digunakan oleh pelanggan industri. Sedangkan JTR

merupakan sistem distribusi dengan level tegangan 380/220 KV untuk pelanggan rumah tangga. Untuk menurunkan tegangan JTM menjadi tegangan JTR digunakan trafo *step down* yang terpasang pada tiang distribusi atau biasa disebut dengan trafo tiang.

Menurut bentuk rangkaiannya, suatu jaringan dapat dibedakan menjadi beberapa tipe seperti jaringan tipe *mesh*, *loop*, maupun radial. Perkembangan sistem kelistrikan terjadi pada sistem distribusi sehingga akan selalu terjadi perubahan bentuk dan kapasitas peralatan maupun beban seiring pertambahan beban. Oleh karena itu jaringan radial merupakan tipe jaringan yang umum digunakan pada sistem distribusi. Jaringan radial merupakan tipe jaringan yang berbentuk paling sederhana dan murah. Secara sederhana bentuk jaringan ini berupa sumber yang menyuplai beban-beban di bawahnya secara mengakar dan bercabang-cabang tanpa membentuk hubungan *loop*. Sehingga bentuk jaringan radial ini tampak seperti cabang pohon dengan jalur utama yang terhubung ke rangkaian yang lebih kecil dan menuju beban.

Jika ditinjau dari sisi keandalan, jaringan radial memiliki keandalan yang lebih rendah dibanding tipe jaringan lain. Apabila terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu penyulang pada jaringan radial ini maka akan menyebabkan kegagalan suplai pada jaringan di bawahnya akibat saluran tunggal yang terputus. Namun jika dilihat dari bentuknya, maka jaringan ini merupakan jaringan yang paling sederhana sehingga lebih mudah dalam menerapkan koordinasi sistem pengamanan.



Gambar 2. 4 Sistem Distribusi Radial

Pada sistem distribusi radial ini, pertambahan beban akan mengakibatkan rugi-rugi daya yang semakin besar pada sistem. Oleh karena saluran sistem distribusi radial bersifat memanjang lurus dari

sebuah sumber menuju beban maka arus yang mengalir pada saluran dekat dengan sumber akan bernilai besar sedangkan arus pada saluran yang dekat dengan beban akan bernilai lebih kecil.

2.3 Analisis Aliran Daya pada Sistem Distribusi Radial

2.3.1 Pendahuluan

Analisis aliran daya pada sistem distribusi radial memiliki tujuan yang sama penting dengan analisis aliran daya pada sistem transmisi. Tujuan analisis aliran daya ini adalah untuk mendapatkan kondisi suatu sistem seperti tegangan tiap bus, daya aktif dan reaktif, serta arus dan rugi-rugi daya pada setiap saluran. Hasil analisis aliran daya ini digunakan untuk melakukan monitoring, perencanaan, maupun pengembangan sistem.

Metode Gauss-Seidel, *Fast Decoupled* dan Newton Raphson merupakan metode yang umum digunakan untuk analisis aliran daya pada sistem transmisi. Sistem distribusi yang umumnya berbentuk radial memiliki karakteristik yang berbeda dengan sistem transmisi sehingga diperlukan teknik analisis aliran daya yang berbeda. Beberapa karakteristik sistem distribusi antara lain [6]:

1. Jaringan berbentuk radial
2. Jumlah bus dan cabang saluran banyak
3. Rasio R/X saluran tinggi

Beberapa karakteristik tersebut terutama rasio R/X saluran distribusi yang tinggi membuat metode analisis aliran daya yang umum digunakan pada sistem transmisi cenderung mengalami kesulitan untuk mencapai hasil yang konvergen [3]. Oleh karena itu dibutuhkan metode khusus untuk analisa aliran daya pada sistem distribusi radial seperti metode Topology-Network.

2.3.2 Metode Topology-Network

Sistem distribusi memiliki karakteristik yang berbeda dengan sistem transmisi sehingga diperlukan analisis yang berbeda untuk digunakan pada sistem distribusi radial. Salah satu metode yang dikembangkan untuk analisis aliran daya pada sistem distribusi radial yaitu Topology-Network. Metode ini merupakan metode perhitungan aliran daya yang memanfaatkan bentuk jaringan yang memanjang membentuk sebuah jalur yang dilalui arus tanpa membentuk jaringan loop.

Metode topology network merupakan metode analisis aliran daya yang berdasarkan prinsip hukum Kirchoff. Secara umum, metode ini terdiri dari dua langkah perhitungan untuk mendapatkan nilai tegangan dalam sistem distribusi radial yaitu pembentukan matriks *Bus Injection to Branch* (BIBC) dan matriks *Branch Current Branch Voltage* (BCBV).

Pembentukan matrik BIBC diawali dengan menghitung besar arus yang mengalir pada tiap saluran. Matriks BIBC adalah matrik hubungan antara arus dan saluran pada sistem distribusi. Besar arus dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I_k = \left(\frac{P_k + jQ_k}{V_k} \right)^* \quad (2.15)$$

dengan I_k , P_k , jQ_k , dan V_k adalah arus, daya aktif, daya reaktif, dan tegangan pada bus k .

Contoh sebuah *single line diagram* sistem distribusi radial sederhana untuk pembentukan persamaan aliran daya ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Dari *single line diagram* tersebut didapatkan persamaan untuk membentuk matriks BIBC dengan menggunakan hukum Kirchoff untuk arus yaitu sebagai berikut:

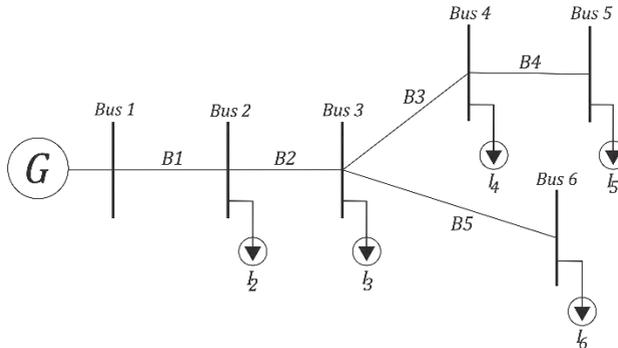
$$B_5 = I_6 \quad (2.16)$$

$$B_4 = I_5 \quad (2.17)$$

$$B_3 = I_4 + I_5 \quad (2.18)$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (2.19)$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (2.20)$$



Gambar 2. 5 Contoh *Single Line Diagram*

Setelah didapat persamaan arus pada saluran diatas maka selanjutnya dilakukan pembentukan matriks BIBC sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

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

Persamaan matriks di atas dapat dinyatakan menjadi model persamaan dengan komponen matrik BIBC.

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.22)$$

Langkah berikutnya setelah matriks BIBC didapat adalah pembentukan matriks BCBV. BCBV adalah matriks yang menyatakan hubungan antara tegangan bus dan arus saluran. Dengan mendapatkan matriks BCBV ini maka selanjutnya dapat dihitung nilai drop tegangan pada setiap bus. Pembentukan matriks BCBV dilakukan dengan mendapatkan persamaan tegangan tiap bus berdasarkan hukum Kirchoff tegangan sebagai berikut:

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \quad (2.23)$$

$$V_3 = V_2 - B_2 \cdot Z_{23} \quad (2.24)$$

$$V_4 = V_3 - B_3 \cdot Z_{34} \quad (2.25)$$

$$V_5 = V_4 - B_4 \cdot Z_{45} \quad (2.26)$$

$$V_6 = V_3 - B_5 \cdot Z_{36} \quad (2.27)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan di atas, maka diperoleh persamaan berikut:

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \quad (2.28)$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \quad (2.29)$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (2.30)$$

$$V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \quad (2.31)$$

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_5 \cdot Z_{36} \quad (2.32)$$

Persamaan di atas dapat dinyatakan kembali menjadi persamaan drop tegangan tiap bus sebagai berikut:

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12} \quad (2.28)$$

$$V_1 - V_3 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} \quad (2.29)$$

$$V_1 - V_4 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_3 \cdot Z_{34} \quad (2.30)$$

$$V_1 - V_5 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_3 \cdot Z_{34} + B_4 \cdot Z_{45} \quad (2.31)$$

$$V_1 - V_6 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_3 \cdot Z_{34} + B_4 \cdot Z_{45} + B_5 \cdot Z_{36} \quad (2.32)$$

Persamaan di atas dapat dibentuk menjadi sebuah matriks BCBV berikut:

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai ΔV didapatkan persamaan akhir sebagai berikut [6]:

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] \quad (2.34)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.35)$$

Nilai tegangan tiap bus dapat dihitung setelah dilakukan pembentukan matriks ΔV dengan komponen matriks BIBC dan BCBV menurut persamaan berikut:

$$[V_k] = [V_1] - [\Delta V_k] \quad (2.36)$$

2.4 Distributed Generation (DG)

Dalam sistem kelistrikan konvensional, daya listrik dibangkitkan oleh pembangkit skala besar yang terpusat dan terletak jauh dari beban. Pembangkit-pembangkit listrik tersebut pada umumnya memanfaatkan energi konvensional seperti bahan bakar minyak, gas, dan tenaga air. Namun dalam beberapa tahun terakhir konsep sistem kelistrikan konvensional tersebut mulai digantikan oleh konsep *Distributed Generation* (DG) [1]. DG adalah pembangkit listrik dengan kapasitas kecil yang terpasang langsung pada sistem distribusi dengan level

tegangan rendah. Umumnya DG merupakan pembangkit yang memanfaatkan energi terbarukan seperti sinar matahari, angin, dan mikrohidro. Beberapa alasan yang mendasari tren penggunaan DG adalah kebutuhan pasar listrik, keterbatasan perkembangan jaringan transmisi dan distribusi, serta kebutuhan akan teknologi ramah lingkungan [7].

Dengan meningkatnya tren penggunaan DG, maka sistem distribusi pasif telah perlahan digantikan oleh sistem distribusi aktif. Sistem distribusi aktif adalah sistem distribusi yang memungkinkan adanya aliran daya tidak hanya dari pembangkit terpusat saja, namun juga aliran daya dari arah sebaliknya yaitu dari DG yang dipasang pada sisi beban. Hal ini menyebabkan beberapa keuntungan terkait perbaikan kualitas daya pada sistem distribusi seperti pengurangan rugi-rugi daya, perbaikan profil tegangan, dan peningkatan keandalan sistem [8].

DG adalah pembangkit listrik yang terpasang langsung pada sistem distribusi atau sisi pelanggan. Secara sederhana DG dapat diartikan sebagai pembangkit skala kecil. Terdapat banyak definisi DG menurut beberapa negara maupun organisasi internasional. *International Energy Agency* (IEA) mendefinisikan DG sebagai pembangkit listrik yang melayani pelanggan langsung atau terhubung dengan sistem distribusi pada level tegangan rendah. *Electric Power Research Institute* mendefinisikan DG sebagai pembangkit kecil dengan kapasitas sampai 50 KW [9]. Menurut standar IEEE 1547, DG adalah pembangkit listrik yang terhubung langsung di sisi pelanggan dengan kapasitas maksimal 10 MVA [2]. Sementara *International Conference on Large High Voltage Electric System* (CIGRE) mendefinisikan DG sebagai pembangkit dengan ciri-ciri berikut ini [9]:

1. Tidak terpasang terpusat
2. Memiliki ukuran yang tetap
3. Umumnya terpasang pada sistem distribusi
4. Berkapasitas tidak lebih dari 50-100 KW

Menurut istilahnya, DG juga dapat disebut dengan beberapa istilah lain seperti *Embedded Generation*, *Dispersed Generation*, dan *Decentralized Generation* yang semuanya mengarah pada pengertian yang cenderung sama yaitu pembangkit skala kecil yang terpasang tersebar. Namun untuk memberikan pengertian yang jelas mengenai kapasitas DG skala kecil maka perlu diperkenalkan klasifikasi yang tepat untuk DG berdasarkan kapasitas daya pembangkitan yang

dimilikinya seperti pada Tabel 2.1 [10]. Sedangkan klasifikasi DG berdasarkan teknologi pembangkitan yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 2.2 [11].

Tabel 2. 1 Klasifikasi DG Berdasarkan Kapasitas Pembangkit

<i>Micro distributed generator</i>	1 watt – 5 kW
<i>Small distributed generator</i>	5 kW – 5 MW
<i>Medium distributed generator</i>	5 MW – 50 MW
<i>Large distributed generator</i>	50 MW – 300 MW

Tabel 2. 2 Klasifikasi DG Berdasarkan Teknologi Pembangkitan

Teknologi DG	Kapasitas per Modul
<i>Combined cycle gas T.</i>	35–400 MW
<i>Internal combustion engines</i>	5 kW–10 MW
<i>Combustion turbine</i>	1–250 MW
<i>Micro-Turbines</i>	35 kW–1 MW
<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–100 kW
<i>Solar thermal, central receiver</i>	1–10 MW
<i>Solar thermal, Lutz system</i>	10–80 MW
<i>Biomass, e.g. based on gasification</i>	100 kW–20 MW
<i>Fuel cells, phosacid</i>	200 kW–2 MW
<i>Fuel cells, molten carbonate</i>	250 kW–2 MW
<i>Fuel cells, proton exchange</i>	1 kW–250 kW
<i>Fuel cells, solid oxide</i>	250 kW–5 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>	500 kW–5 MW

Pemasangan DG pada sistem distribusi membawa dampak yang signifikan dalam perbaikan kualitas daya. Beberapa keuntungan lain dari pemasangan DG pada sistem distribusi yaitu [12]:

1. Dari sudut pandang *end-user*, pelanggan listrik diuntungkan karena mempunyai pembangkit cadangan yang dapat meningkatkan keandalan sistem. Selain itu adanya transaksi energi yaitu pembelian daya yang dibangkitkan DG oleh grid juga dapat memberikan kompensasi sehingga menguntungkan secara ekonomi.
2. Dari sudut pandang pengelola dan penyedia listrik, pemasangan DG dapat menambah kapasitas jaringan transmisi dan distribusi karena daya tidak hanya terbangkitkan oleh pembangkit pusat namun langsung dibangkitkan oleh DG pada sisi beban. Selain itu pemasangan DG juga dapat melindungi jaringan dari pertumbuhan beban yang tidak pasti.
3. Dari sudut pandang pembangkit, produsen energi komersial dapat membeli dan menyediakan daya listrik dari DG tanpa harus membangun pembangkit pusat baru dengan biaya investasi yang mahal.
4. Dari sudut pandang teknis, pemasangan DG pada lokasi dan kapasitas yang tepat dapat mengurangi rugi-rugi daya, memperbaiki profil tegangan, dan meningkatkan keandalan sistem.
5. Dari sudut pandang ekonomi, pemasangan DG dapat menghemat biaya karena teknologi DG seperti PV dan turbin angin memiliki biaya pembangunan, operasi, dan perawatan yang murah.
6. Dari sudut pandang lingkungan, pemasangan DG sesuai dengan tren penggunaan energi terbarukan dan efisien karena DG membangkitkan daya dari energi terbarukan yang tidak menghasilkan emisi atau polusi seperti pembangkit konvensional skala besar.

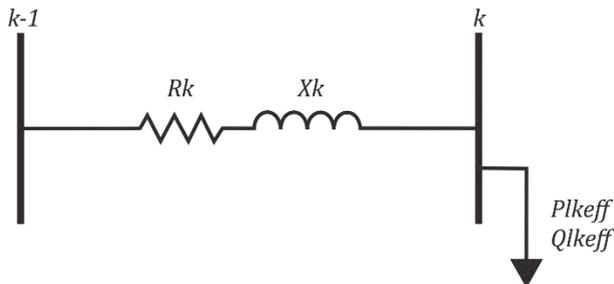
Sedangkan secara sederhana, tujuan utama pemasangan DG pada sistem distribusi adalah [8]:

1. Membangkitkan daya kontinu untuk beban.
2. Menyediakan daya untuk beban yang tidak terjangkau grid

3. Menyediakan daya untuk mengantisipasi pertumbuhan beban di tengah keterbatasan perkembangan pembangkit dan jaringan transmisi
4. Memaksimalkan penggunaan energi terbarukan
5. Meningkatkan efisiensi energi dengan mengurangi rugi-rugi daya
6. Mengurangi polusi dan efek rumah kaca
7. Menyediakan listrik dengan kualitas daya yang baik untuk beban sensitif

2.5 Loss Sensitivity Factor (LSF)

Loss Sensitivity Factor (LSF) merupakan nilai yang didapat dari penerapan prinsip linierisasi sebuah persamaan non-linier berdasarkan nilai operasi tertentu untuk mendapatkan pendekatan solusi dari suatu persamaan [13]. Dalam hal ini, LSF didapat dari penurunan persamaan rugi daya pada suatu saluran terhadap daya beban. Metode LSF ini telah berhasil digunakan sebagai dasar untuk memecahkan beberapa permasalahan pada sistem distribusi seperti penempatan *capacitor bank* dan penempatan DG [13]. Untuk mendapatkan nilai LSF setiap bus pada sistem dibutuhkan perhitungan aliran daya untuk mendapatkan beberapa data seperti total beban, impedansi saluran, arus saluran dan tegangan tiap bus.



Gambar 2. 6 Sistem Distribusi Radial Sederhana

Gambar 2.6 menunjukkan sebuah sistem distribusi radial yang sederhana. Sebuah saluran dengan impedansi R_k dan X_k menghubungkan bus $k-1$ dan bus k . Rugi-rugi daya aktif pada saluran tersebut dapat dihitung dengan persamaan berikut [13]:

$$P_{Loss} = (I_k)^2 \times R_k \quad (2.37)$$

dengan I_k merupakan arus yang mengalir pada saluran yang menghubungkan bus $k-1$ dan bus k sehingga Persamaan 2.37 dapat dinyatakan dengan

$$P_{Loss} = \frac{(P_{lkeff}^2 + Q_{lkeff}^2)}{|V_k|^2} \times R_k \quad (2.38)$$

Pada Persamaan 2.38, P_{lkeff} dan Q_{lkeff} merupakan total beban efektif yang ditanggung bus k , yaitu total beban aktif dan reaktif yang terpasang pada bus-bus yang terhubung di bawah bus k termasuk bus k itu sendiri ditambah dengan total rugi-rugi daya aktif dan reaktif semua saluran yang terhubung di bawah bus k [14]. Nilai LSF bus k didapat dari penurunan persamaan rugi-rugi daya (P_{loss}) terhadap P_{lkeff} sehingga didapatkan persamaan LSF sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{lkeff}} = \frac{(P_{lkeff}^2 + Q_{lkeff}^2)}{|V_k|^2} \times R_k \quad (2.39)$$

$$LSF = 2 \times \frac{P_{lkeff}}{|V_k|^2} \times R_k \quad (2.40)$$

2.6 K-means Clustering

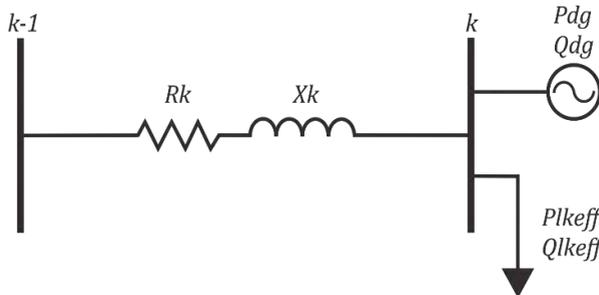
K-means *clustering* adalah sebuah metode pengelompokan sekelompok objek data dengan jumlah tertentu berdasarkan persamaan suatu karakteristik atau atribut tertentu [14]. Metode ini telah terbukti handal digunakan dalam menyelesaikan beberapa permasalahan sistem distribusi seperti penentuan lokasi optimal *Phasor Measuring Unit* (PMU) dan penentuan lokasi optimal DG. Metode ini akan mengelompokkan objek data ke *cluster* atau kelompok dengan jumlah tertentu.

Pengelompokan objek data oleh metode K-means *clustering* dilakukan dengan memperhitungkan jarak terdekat setiap objek data terhadap titik pusat *cluster* (*centroid*). Pada tahap awal metode ini, jumlah *cluster* ditentukan terlebih dahulu berdasarkan jumlah objek data. Selain itu pada tahap awal *centroid* masing-masing *cluster* dipilih secara acak dari objek data yang tersedia. Kemudian metode ini akan menguji masing-masing objek data dan mengelompokkannya ke salah

satu *cluster* berdasarkan jarak terdekat dengan masing-masing *centroid*. Nilai dari *centroid* akan diperbarui secara berulang dengan menghitung nilai rata-rata objek data yang ada pada masing-masing *cluster*. Kemudian pengujian dan pengelompokan objek data ke *cluster* dengan *centroid* baru dilakukan kembali. Iterasi akan terus dilakukan berulang sampai nilai *centroid* baru tidak berubah dari *centroid* yang sebelumnya (konvergen).

2.7 Pendekatan Analitis untuk Penentuan Kapasitas DG

Kapasitas DG merupakan parameter yang penting selain lokasi pemasangan DG untuk mendapatkan perbaikan rugi-rugi daya yang optimal pada sistem [9]. Pendekatan analitis merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan kapasitas optimal DG dengan menurunkan persamaan rugi-rugi daya pada suatu sistem dengan DG sehingga didapatkan sebuah persamaan matematis.



Gambar 2. 7 Sistem Distribusi Radial Sederhana dengan DG

Gambar 2.7 menunjukkan sebuah sistem distribusi radial yang sederhana. Sebuah saluran dengan impedansi R_k dan X_k menghubungkan bus $k-1$ dan bus k . Kemudian dianalisa persamaan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah pemasangan DG pada bus k . Adapun persamaan rugi-rugi daya pada sistem distribusi sebelum dipasang DG seperti yang telah dinyatakan pada Persamaan 2.42 berikut:

$$P_{Loss}^- = \frac{(P_{lkeff}^2 + Q_{lkeff}^2)}{|V_k^-|^2} \times R_k \quad (2.42)$$

sedangkan persamaan rugi-rugi daya pada sistem distribusi aktif setelah DG dipasang dapat dinyatakan sebagai:

$$P_{Loss}^+ = \left[\frac{(P_{DG} - P_{lkeff})^2}{|V_k^2|} + \frac{(Q_{DG} - Q_{lkeff})^2}{|V_k^2|} \right] \times R_k \quad (2.43)$$

$$P_{Loss}^+ = \left[\frac{P_{DG}^2 + Q_{DG}^2 - 2P_{DG}P_{lkeff} - 2Q_{DG}Q_{lkeff} + P_{lkeff}^2 + Q_{lkeff}^2}{|V_k^2|} \right] \times R_k \quad (2.44)$$

selisih rugi-rugi daya sebelum dan setelah DG dipasang pada bus k adalah

$$\Delta P_{Loss} = P_{Loss}^+ - P_{Loss}^- \quad (2.45)$$

$$\Delta P_{Loss} = \left[\frac{P_{DG}^2 + Q_{DG}^2 - 2P_{DG}P_{lkeff} - 2Q_{DG}Q_{lkeff}}{|V_k^2|} \right] \times R_k \quad (2.46)$$

untuk dapat menyederhanakan Persamaan 2.46 maka digunakan persamaan di bawah ini.

$$\alpha = \tan \theta = \frac{Q_{DG}}{P_{DG}} \quad (2.47)$$

$$\beta = \cot \theta = \frac{P_{DG}}{Q_{DG}} \quad (2.48)$$

Persamaan kapasitas optimal DG pada bus k untuk rugi-rugi daya minimal didapat dari penurunan pertama Persamaan 2.46 ke nol terhadap kapasitas daya DG sebagai berikut [3]:

$$\frac{\partial \Delta P_{Loss}}{\partial P_{DG}} = 0 \quad (2.49)$$

dengan menyederhanakan Persamaan 2.46 dan mensubstitusi dengan Persamaan 2.47 dan 2.48 maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$0 = \left[\frac{2P_{DG} + 2P_{DG}(\tan \theta)^2 - 2P_{lkeff} - 2\tan \theta Q_{lkeff}}{|V_k^2|} \right] \times R_k \quad (2.50)$$

$$0 = \left[\frac{2P_{DG} + 2P_{DG}(\alpha)^2 - 2P_{lkeff} - 2\alpha Q_{lkeff}}{|V_k^2|} \right] \times R_k \quad (2.51)$$

$$0 = P_{DG}(1 + \alpha^2) - P_{lkeff} - \alpha Q_{lkeff} \quad (2.52)$$

sehingga didapatkan persamaan matematis daya aktif dan reaktif optimal DG yaitu:

$$P_{DG} = \frac{P_{lkeff} + \alpha Q_{lkeff}}{1 + \alpha^2} \quad (2.53)$$

$$Q_{DG} = \frac{P_{lkeff} + \alpha Q_{lkeff}}{1 + \beta} \quad (2.54)$$

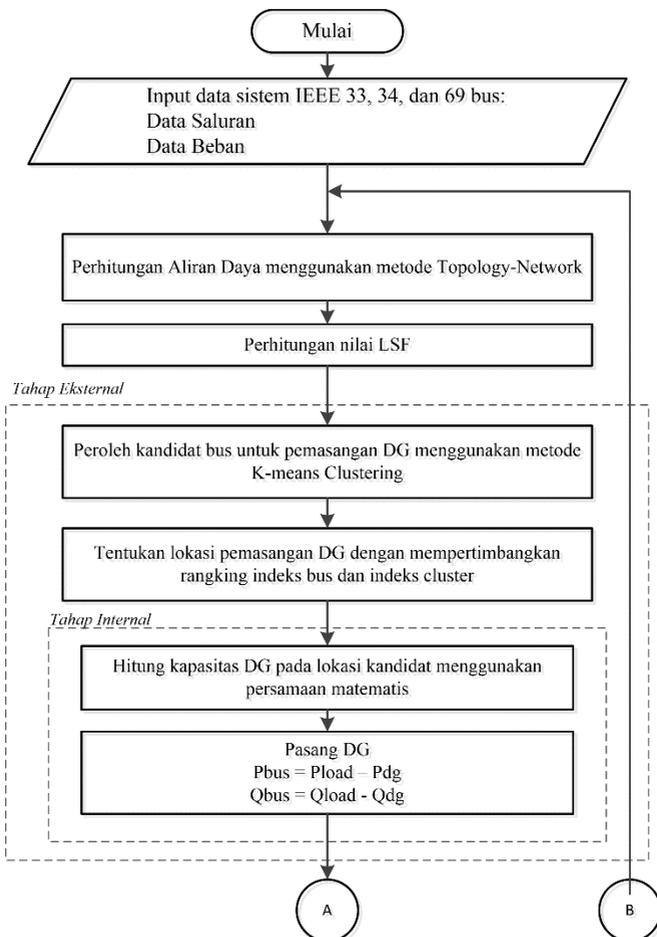
dengan P_{DG} dan Q_{DG} merupakan kapasitas daya aktif dan reaktif DG. Sedangkan P_{lkeff} dan Q_{lkeff} merupakan total beban efektif yang ditanggung bus k , yaitu total beban aktif dan reaktif yang terpasang pada bus-bus yang terhubung di bawah bus k termasuk bus k itu sendiri ditambah dengan total rugi-rugi daya aktif dan reaktif semua saluran yang terhubung di bawah bus k .

Halaman ini sengaja dikosongkan

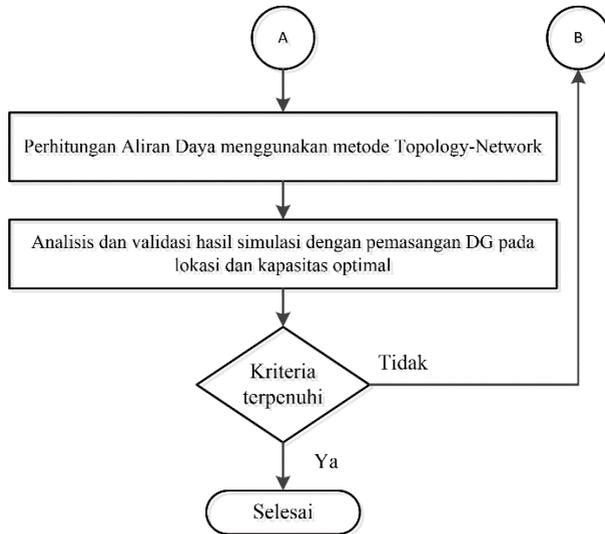
BAB 3

STUDI PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS DG PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL MENGUNAKAN METODE *K-MEANS CLUSTERING*

3.1 Pemodelan Penyelesaian Tugas Akhir



Gambar 3.1 Flowchart Penyelesaian Tugas Akhir Bagian 1



Gambar 3. 2 Flowchart Penyelesaian Tugas Akhir Bagian 2

Algoritma penyelesaian penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.1 dan 3.2. Langkah awal setelah didapatkan data sistem adalah melakukan perhitungan analisis aliran daya pasif pada sistem distribusi radial menggunakan metode *Topology-Network*. Selanjutnya adalah menghitung nilai LSF dan melakukan normalisasi terhadap LSF dan tegangan bus pada rentang (0,1). Nilai normalisasi LSF dan tegangan bus tersebut kemudian digunakan sebagai objek data pada perhitungan menggunakan metode *K-means clustering*. Tahap penentuan lokasi pemasangan DG menggunakan metode *K-means clustering* ini disebut sebagai tahap eksternal. Pada tahap ini metode *K-means clustering* akan mengelompokkan bus-bus sistem menurut persamaan karakteristik operasi yaitu normalisasi LSF dan tegangan bus hingga didapatkan kandidat lokasi pemasangan DG.

Tahap berikutnya yaitu perhitungan kapasitas DG menggunakan persamaan matematis. Tahap ini disebut tahap internal. Setelah didapatkan lokasi dan kapasitas DG, kemudian DG dipasang pada sistem menggunakan pemodelan PQ *load* negatif. Hasil penurunan rugi-rugi daya akibat pemasangan DG ini kemudian dianalisa dan dibandingkan dengan metode lain.

3.2 Normalisasi LSF dan Tegangan Bus

Nilai LSF dan deviasi tegangan bus pada sistem diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan Persamaan 2.40 dan 2.41 setelah melakukan perhitungan aliran daya. Nilai LSF dan tegangan bus ini kemudian akan dinormalisasi untuk digunakan sebagai objek data dalam metode *K-means clustering*.

Nilai LSF dinormalisasi dalam skala (0,1) dengan definisi bahwa nilai LSF terbesar bernilai 1 sedangkan nilai LSF terkecil bernilai 0. Proses normalisasi ini dilakukan setelah nilai LSF tiap bus didapat. Kemudian nilai LSF terbesar dan terkecil didapat untuk menghitung nilai LSF normalisasi menurut persamaan berikut [2]:

$$LSF_{norm} = \frac{LSF - LSF_{min}}{LSF_{max} - LSF_{min}} \quad (3.1)$$

Nilai tegangan bus juga dinormalisasi dalam skala (0,1) dengan definisi bahwa nilai tegangan bus terendah bernilai 1 sedangkan nilai tegangan bus terbesar bernilai 0. Proses normalisasi ini dilakukan setelah nilai tegangan tiap bus didapat. Kemudian nilai tegangan bus terbesar dan terkecil didapat untuk menghitung nilai tegangan normalisasi menurut persamaan berikut:

$$V_{norm} = \frac{V_{max} - V}{V_{max} - V_{min}} \quad (3.2)$$

Nilai normalisasi LSF (LSF_{norm}) dan tegangan bus (V_{norm}) digunakan sebagai objek data yang akan diolah oleh metode *K-means clustering*. Bus-bus akan diurutkan dan dikategorikan berdasarkan persamaan karakteristik operasi oleh metode *K-means clustering* untuk mendapatkan kandidat lokasi pemasangan DG pada sistem.

3.3 Metode *K-means Clustering*

K-means clustering adalah sebuah metode pengelompokan sekelompok objek data dengan jumlah tertentu berdasarkan persamaan suatu karakteristik atau atribut tertentu [14]. Metode ini akan mengelompokkan objek data ke *cluster* atau kelompok dengan jumlah tertentu. Dalam penelitian ini tahapan *K-means clustering* untuk mendapatkan lokasi optimal pemasangan DG didefinisikan sebagai tahap eksternal. Nilai normalisasi LSF dan tegangan bus digunakan

untuk mengelompokkan bus-bus dengan karakteristik objek data yang sama.

K-means clustering terdiri dari beberapa jenis seperti Partisi, *Hierarchical*, *Density based*, *Model based*, dan *Grid based*. Dalam tugas akhir ini digunakan *K-means clustering* jenis partisi. Pengelompokan objek data oleh *K-means clustering* ini dilakukan dengan memperhitungkan jarak terdekat setiap objek data terhadap titik pusat *cluster* (*centroid*). *Centroid* akan diperbarui tiap kali iterasi sampai keadaan konvergen.

Berikut adalah tahapan algoritma *K-means clustering* secara lebih detail:

1. Tentukan jumlah *cluster* sesuai dengan jumlah objek data menurut persamaan berikut [15]:

$$K_{grup} \approx \sqrt{\frac{n}{2}} \quad (3.3)$$

keterangan:

K_{grup} jumlah *cluster*
 n jumlah bus

2. Menginisiasi *centroid* dengan memilih secara acak di antara objek data yang tersedia [14].
3. Menghitung jarak tiap objek data terhadap *centroid* menggunakan persamaan jarak Euclian sebagai berikut [2]:

$$d(x_j, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_j - C_i)^2} \quad (3.4)$$

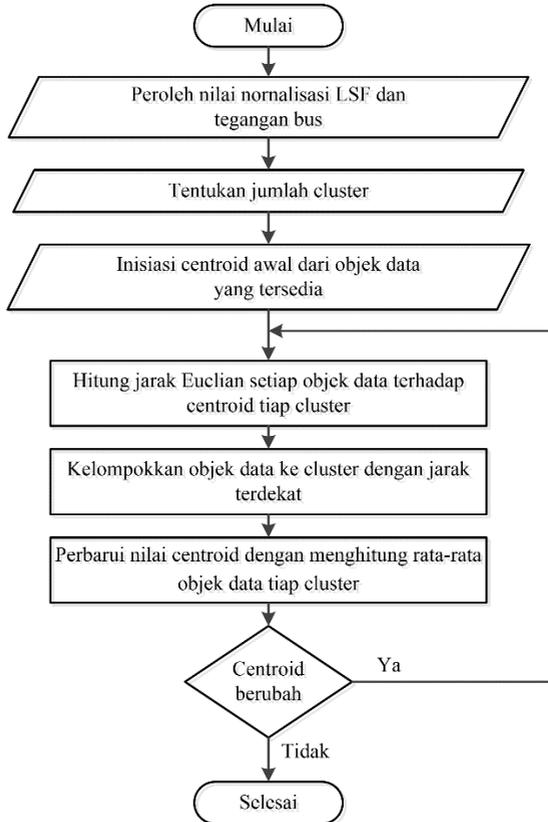
keterangan:

d jarak Euclian
 x_j objek data
 C_i *centroid*
 n jumlah objek data
 m jumlah *cluster*

4. Kelompokkan tiap objek data ke salah satu *cluster* dengan jarak terdekat.
5. Perbarui nilai *centroid* tiap *cluster* dengan menghitung rata-rata objek data pada tiap *cluster*.
6. Cek nilai *centroid*. Apabila *centroid* baru berubah dari *centroid* sebelumnya maka algoritma kembali pada langkah 3. Namun

apabila *centroid* baru tidak berubah dari *centroid* sebelumnya maka solusi dianggap konvergen sehingga algoritma *K-means clustering* selesai.

Berikut adalah *flowchart K-means clustering*:



Gambar 3. 3 Flowchart K-means Clustering

3.4 Penentuan Lokasi Pemasangan DG

Pengelompokkan objek data menggunakan teknik *clustering* pada langkah sebelumnya menghasilkan kandidat bus pemasangan DG pada setiap *cluster* [14]. Setelah mendapatkan hasil pengelompokan untuk setiap bus dalam sistem, setiap objek data akan diurutkan berdasarkan

rata-rata dari nilai normalisasi LSF dan tegangan tiap bus. Rata-rata nilai normalisasi LSF dan tegangan bus ini disebut dengan indeks bus. Nilai indeks bus tidak akan melebihi 1 dan kurang dari 0 karena objek data merupakan nilai normalisasi pada skala (0,1).

Setiap bus akan dikelompokkan sesuai dengan nilai objek datanya dan bus dengan nilai indeks bus tertinggi dari setiap *cluster* akan menjadi kandidat lokasi pemasangan DG pada sistem [14]. Selanjutnya setiap indeks bus tiap *cluster* akan dihitung rata-rata untuk mendapatkan indeks *cluster*. Kandidat lokasi pemasangan DG adalah pada bus yang tergolong pada *cluster* yang memiliki nilai LSF yang tinggi dan tegangan bus yang rendah [2]. Oleh karena itu, kandidat lokasi pemasangan DG adalah pada bus dengan nilai indeks bus tertinggi pada *cluster* dengan nilai indeks *cluster* tertinggi. Bila bus A adalah bus dengan nilai indeks bus tertinggi dari sebuah *cluster* X dan *cluster* X merupakan *cluster* dengan nilai indeks *cluster* terbesar, maka bus A ditentukan menjadi kandidat lokasi pemasangan DG.

3.5 Penentuan Kapasitas DG

Kapasitas daya aktif dan reaktif DG dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.53 dan 2.54. Pada persamaan tersebut diasumsikan bahwa θ adalah sudut faktor daya DG yang akan dipasang pada sistem. Menurut karakteristik operasionalnya, DG dapat dikategorikan menjadi beberapa tipe menurut kemampuan membangkitkan daya aktif dan reaktifnya, antara lain [16]:

1. DG tipe 1: DG hanya mampu menghasilkan daya aktif pada faktor daya *unity*.
2. DG tipe 2: DG mampu menghasilkan daya aktif dan reaktif untuk sistem.
3. DG tipe 3: DG hanya mampu menghasilkan daya reaktif untuk sistem.
4. DG tipe 4: DG mampu menghasilkan daya aktif namun mengkonsumsi atau membutuhkan daya reaktif.

Dalam penelitian ini, DG yang digunakan oleh sistem adalah DG tipe 2 karena mampu menghasilkan daya aktif dan reaktif. Oleh karena itu penentuan faktor daya akan berpengaruh terhadap pengurangan rugi-rugi daya akibat pemasangan DG. Penelitian lebih lanjut mengenai faktor daya DG menyatakan bahwa rugi-rugi daya minimal didapat jika faktor daya DG sesuai dengan total beban efektif yang ditanggung oleh

bus dimana DG tersebut dipasang [16]. Oleh karena itu dalam menghitung kapasitas DG mempertimbangkan faktor daya yang optimal, Persamaan 2.47 dan 2.48 dapat dinyatakan menjadi:

$$\alpha = \tan \theta = \frac{Q_{lkeff}}{P_{lkeff}} \quad (3.5)$$

$$\beta = \cot \theta = \frac{P_{lkeff}}{Q_{lkeff}} \quad (3.6)$$

dengan faktor daya daya didapat menggunakan persamaan berikut:

$$PF_{DG} = \frac{P_{lkeff}}{\sqrt{P_{lkeff}^2 + Q_{lkeff}^2}} \quad (3.7)$$

Adapun kapasitas DG yang dipasang dapat diukur dalam level penetrasi yang dinyatakan sebagai berikut:

$$DG \text{ penetration level} = \frac{S_{DG}}{S_{TD}} \times 100\% \quad (3.8)$$

dengan S_{DG} adalah total daya yang dihasilkan DG sedangkan S_{TD} adalah total daya sistem dalam satuan KVA.

3.6 Pemodelan DG sebagai PQ Load Negatif

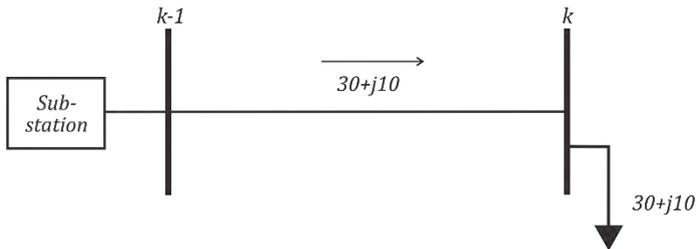
Pada sistem distribusi radial, beban-beban disuplai oleh sebuah sumber *infinite* bus yang berada paling atas. Sehingga aliran daya pada sistem distribusi radial adalah searah yaitu dari sumber menuju beban. Pada sistem distribusi aktif dengan DG, DG menyuplai daya pada sistem melalui bus-bus beban.

Karakteristik beban dan DG berbeda, beban menyerap daya sedangkan DG menyuplai daya dengan arah sebaliknya. Ketika DG dipasang pada bus beban, arah aliran daya DG berlawanan dengan arah aliran daya dari *infinite* bus. Karakteristik yang demikian membuat DG secara sederhana dapat dimodelkan sebagai PQ *load* negatif. Sehingga dalam perhitungan analisis aliran daya, DG dianggap sebagai beban bernilai negatif yang arah aliran dayanya dari bus beban menuju sistem.

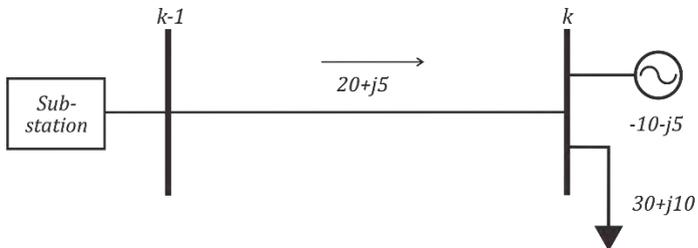
Pemodelan DG sebagai PQ *load* negatif ditunjukkan oleh Gambar 3.4 dan 3.5. Sebuah sistem tanpa DG dengan beban sebesar 30+j10 terpasang pada bus k sehingga daya yang mengalir pada saluran adalah sebesar 30+j10. Kemudian pada bus k dipasang sebuah DG

dengan pemodelan PQ *load* negatif sebesar $-10-j5$ sehingga total daya yang mengalir pada saluran adalah $30+j10-10-j5=20+j5$. Jika DG pada bus k diganti dengan beban yang bernilai sama, total beban yang terpasang adalah $30+j10+10+j5=40+j15$.

Pada bus k yang terpasang DG, terpasang sebuah beban tambahan namun bertanda negatif. Beban bertanda negatif tersebut akan berperan seolah sebagai generator karena arah aliran dayanya dari beban menuju sistem sehingga mengurangi aliran daya dari sumber menuju beban.



Gambar 3. 4 Sistem Tanpa DG



Gambar 3. 5 Sistem dengan DG yang Dimodelkan PQ load Negatif

3.7 Sistem Distribusi IEEE – 33 Bus

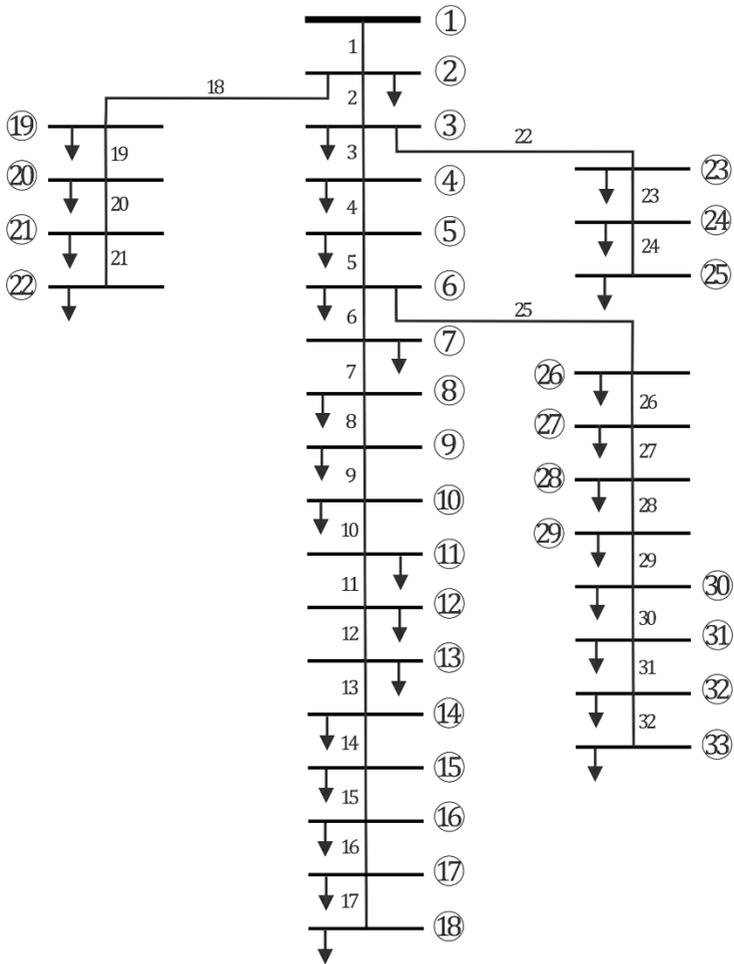
Dalam penelitian ini, metode diuji menggunakan sistem uji IEEE 33 bus dengan tegangan nominal 12.66 KV dan total beban 3,715 MW dan 2,300 MVAR. Data saluran dan beban sistem ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan 3.2. Gambar 3.6 berikut merupakan *single line diagram* dari sistem IEEE 33 bus yang berbentuk radial.

Tabel 3. 1 Data Saluran Sistem IEEE 33 Bus

Saluran		Impedansi	
Bus Kirim	Bus Terima	r	x
1	2	0.0922	0.0470
2	3	0.4930	0.2511
3	4	0.3660	0.1864
4	5	0.3811	0.1941
5	6	0.8190	0.7070
6	7	0.1872	0.6188
7	8	0.7144	0.2351
8	9	1.0300	0.7400
9	10	1.0440	0.7400
10	11	0.1966	0.0650
11	12	0.3744	0.1238
12	13	1.4680	1.1550
13	14	0.5416	0.7129
14	15	0.5910	0.5260
15	16	0.7463	0.5450
16	17	1.2890	1.7210
17	18	0.7320	0.5740
2	19	0.1640	0.1565
19	20	1.5042	1.3554
20	21	0.4095	0.4784
21	22	0.7089	0.9373
3	23	0.4512	0.3083
23	24	0.8980	0.7091
24	25	0.8960	0.7011
6	26	0.2030	0.1034
26	27	0.2842	0.1447
27	28	1.0590	0.9337
28	29	0.8042	0.7006
29	30	0.5075	0.2585
30	31	0.9744	0.9630
31	32	0.3105	0.3619
32	33	0.3410	0.5302

Tabel 3. 2 Data Beban Sistem IEEE 33 Bus

Bus	Beban	
	P (MW)	Q(MVAR)
1	0.0000	0.0000
2	0.1000	0.0600
3	0.0900	0.0400
4	0.1200	0.0800
5	0.0600	0.0300
6	0.0600	0.0200
7	0.2000	0.1000
8	0.2000	0.1000
9	0.0600	0.0200
10	0.0600	0.0200
11	0.0450	0.0300
12	0.0600	0.0350
13	0.0600	0.0350
14	0.1200	0.0800
15	0.0600	0.0100
16	0.0600	0.0200
17	0.0600	0.0200
18	0.0900	0.0400
19	0.0900	0.0400
20	0.0900	0.0400
21	0.0900	0.0400
22	0.0900	0.0400
23	0.0900	0.0500
24	0.4200	0.2000
25	0.4200	0.2000
26	0.0600	0.0250
27	0.0600	0.0250
28	0.0600	0.0200
29	0.1200	0.0700
30	0.2000	0.6000
31	0.1500	0.0700
32	0.2100	0.1000
33	0.0600	0.0400
Total	3.7150	2.3000



Gambar 3. 6 *Single Line Diagram IEEE 33 Bus*

3.8 Sistem Distribusi IEEE – 69 Bus

Dalam penelitian ini, metode diuji menggunakan sistem uji IEEE 69 bus dengan tegangan nominal 12.66 KV dan total beban 3,783 MW dan 2,6841 MVAR. Data saluran dan beban sistem ini dapat dilihat pada Tabel 3.3, 3.4, 3.5, dan 3.6. Gambar 3.7 berikut merupakan *single line diagram* dari sistem IEEE 69 bus yang berbentuk radial.

Tabel 3. 3 Data Saluran Sistem IEEE 69 Bus

Saluran		Impedansi	
Bus Kirim	Bus Terima	r	x
1	2	0.0005	0.0012
2	3	0.0005	0.0012
3	4	0.0015	0.0036
4	5	0.0251	0.0294
5	6	0.366	0.1864
6	7	0.3811	0.1941
7	8	0.0922	0.047
8	9	0.0493	0.0251
9	10	0.819	0.2707
10	11	0.1872	0.0619
11	12	0.7114	0.2351
12	13	1.03	0.34
13	14	1.044	0.345
14	15	1.058	0.3496
15	16	0.1966	0.065
16	17	0.3744	0.1238
17	18	0.0047	0.0016
18	19	0.3276	0.1083
19	20	0.2106	0.069
20	21	0.3416	0.1129
21	22	0.014	0.0046
22	23	0.1591	0.0526
23	24	0.3463	0.1145
24	25	0.7488	0.2475
25	26	0.3089	0.1021
26	27	0.1732	0.0572
3	28	0.0044	0.0108
28	29	0.064	0.1565
29	30	0.3978	0.1315
30	31	0.0702	0.0232
31	32	0.351	0.116
32	33	0.839	0.2816
33	34	1.708	0.5646
34	35	1.474	0.4873

Tabel 3. 4 Data Saluran Sistem IEEE 69 Bus (Lanjutan)

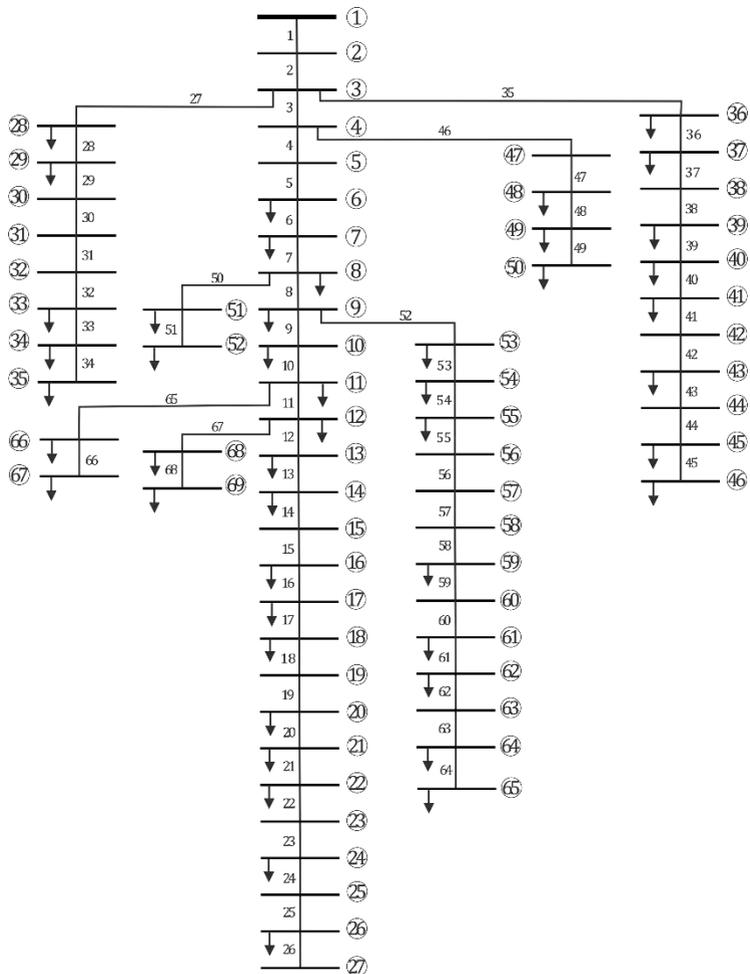
Saluran		Impedansi	
Bus Kirim	Bus Terima	r	x
3	36	1.474	0.4873
36	37	0.064	0.1565
37	38	0.1053	0.123
38	39	0.0304	0.0355
39	40	0.0018	0.0021
40	41	0.7283	0.8509
41	42	0.31	0.3623
42	43	0.041	0.0478
43	44	0.0092	0.0116
44	45	0.1089	0.1373
45	46	0.0009	0.0012
4	47	0.0034	0.0084
47	48	0.0851	0.2083
48	49	0.2898	0.7091
49	50	0.0822	0.2011
8	51	0.0928	0.0473
51	52	0.3319	0.1114
9	53	0.174	0.0886
53	54	0.203	0.1034
54	55	0.2842	0.1447
55	56	0.2813	0.1433
56	57	1.59	0.5337
57	58	0.7837	0.263
58	59	0.3042	0.1006
59	60	0.3861	0.1172
60	61	0.5075	0.2585
61	62	0.0974	0.0496
62	63	0.145	0.0738
63	64	0.7105	0.3619
64	65	1.041	0.5302
11	66	0.2012	0.0611
66	67	0.0047	0.0014
12	68	0.7394	0.2444
68	69	0.0047	0.0016

Tabel 3. 5 Data Beban Sistem IEEE 69 Bus

Bus	Beban	
	P (MW)	Q(MVAR)
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0.0026	0.0022
7	0.0404	0.03
8	0.075	0.054
9	0.03	0.022
10	0.028	0.019
11	0.145	0.104
12	0.145	0.104
13	0.008	0.005
14	0.008	0.0055
15	0	0
16	0.045	0.03
17	0.06	0.035
18	0.06	0.035
19	0	0
20	0.001	0.0006
21	0.114	0.081
22	0.005	0.0035
23	0	0
24	0.028	0.02
25	0	0
26	0.014	0.01
27	0	0
28	0.026	0.0186
29	0.026	0.0186
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	0.014	0.01
34	0.019	0.014
35	0.006	0.004

Tabel 3. 6 Data Beban Sistem IEEE 69 Bus (Lanjutan)

Bus	Beban	
	P (MW)	Q(MVAR)
36	0.026	0.01855
37	0.026	0.01855
38	0	0
39	0.024	0.017
40	0.024	0.017
41	0.001	0.001
42	0	0
43	0.006	0.0043
44	0	0
45	0.039	0.0263
46	0.039	0.0263
47	0	0
48	0.079	0.0564
49	0.384	0.2745
50	0.384	0.2745
51	0.04	0.0283
52	0.003	0.0027
53	0.004	0.0035
54	0.026	0.019
55	0.024	0.0172
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	0.1	0.072
60	0	0
61	1.244	0.888
62	0.032	0.023
63	0	0
64	0.227	0.162
65	0.059	0.042
66	0.018	0.013
67	0.018	0.013
68	0.028	0.02
69	0.028	0.02



Gambar 3. 7 Single Line Diagram IEEE 69 Bus

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini dibahas mengenai hasil penentuan lokasi dan kapasitas DG dengan menggunakan metode *K-means clustering* pada sistem distribusi radial, yaitu sistem IEEE 33 bus dan 69 bus. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya pada saat sebelum pemasangan DG dan setelah pemasangan DG untuk tiap kasus yang mengacu pada hasil penentuan lokasi dan kapasitas DG. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mendapatkan jumlah, lokasi, dan kapasitas DG yang optimal untuk mengurangi rugi-rugi daya sistem menggunakan metode *K-means clustering*. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab R2014a.

4.1 Studi Kasus

Studi kasus yang diimplementasikan dalam penelitian ini adalah pengujian setiap sistem uji dengan pemasangan DG mulai dari kasus tanpa DG (pasif) hingga pemasangan DG mulai dari *single* DG hingga *multi* DG. DG dipasang satu persatu pada sistem hingga berjumlah 7 unit untuk mengetahui perubahan rugi-rugi daya sistem dan total penetrasi DG sehingga dapat dianalisis jumlah pemasangan DG yang optimal. Lokasi pemasangan DG ditentukan menggunakan metode *K-means clustering* dan kemudian kapasitas DG ditentukan menurut persamaan matematis. Pemasangan DG pada lokasi dan kapasitas tertentu dilakukan satu persatu untuk kemudian dianalisis perubahan rugi-rugi daya dan profil tegangan sistem. Standar tegangan yang digunakan adalah 0,95-1,05 p.u.

4.1.1 Sistem IEEE 33 Bus (Kasus A)

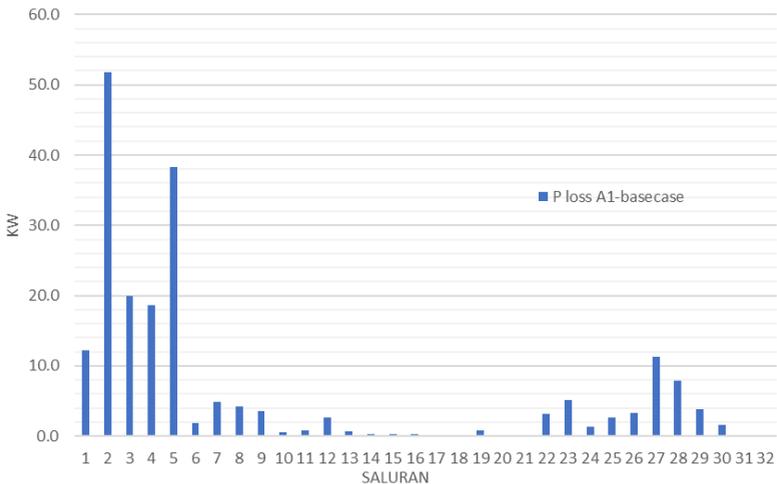
Pada Kasus A, 8 kasus yang akan dibahas untuk sistem IEEE 33 bus ditunjukkan pada Tabel 4.1. Sistem diuji dengan pemasangan DG mulai dari kasus tanpa DG (pasif) hingga pemasangan DG mulai dari *single* DG hingga *multi* DG. Pada tiap kasus akan dilakukan pemasangan DG sebanyak 1 unit untuk kemudian dianalisis perubahan rugi-rugi daya pada sistem IEEE 33 bus berdasarkan jumlah DG yang dipasang. Total beban sistem IEEE 33 bus adalah 3,715 MW dan 2,3 MVAR.

Tabel 4. 1 Studi Kasus Sistem IEEE 33 Bus

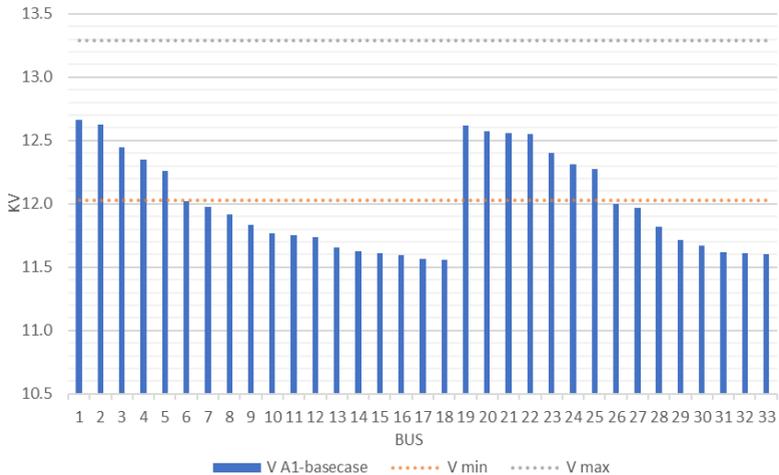
Kasus	Lokasi DG
Kasus A1 – <i>Base Case</i>	Pasif (tanpa DG)
Kasus A2	Bus 6
Kasus A3	Bus 6, 13
Kasus A4	Bus 6, 13, 31
Kasus A5	Bus 6, 13, 31, 24
Kasus A6	Bus 6, 13, 31, 24, 20
Kasus A7	Bus 6, 13, 31, 24, 20, 25
Kasus A8	Bus 6, 13, 31, 24, 20, 25, 22

4.1.1.1 Kasus A1-base case

Kasus A1-base case adalah kasus saat sistem belum dilakukan pemasangan DG (pasif). Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan nilai rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 202,6935 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,0074 kV.



Gambar 4. 1 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A1-basecase



Gambar 4. 2 Tegangan Bus pada Kasus A1-*basecase*

4.1.1.2 Kasus A2

Kasus A2 adalah kasus sistem dengan pemasangan 1 unit DG. *K-means clustering* untuk sistem IEEE 33 bus menghasilkan 4 bus kandidat yang masing-masing mewakili sebuah *cluster*. Keempat bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus A2, penentuan lokasi menghasilkan 4 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Pertama Kasus A

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	6	1,0000	0,5791	2	0,7896	0,6701
2	13	0,4089	0,9116	3	0,6603	0,5236
3	5	0,4687	0,3674	4	0,4181	0,3351
4	20	0,2155	0,0814	1	0,1484	0,0709

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.2 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks

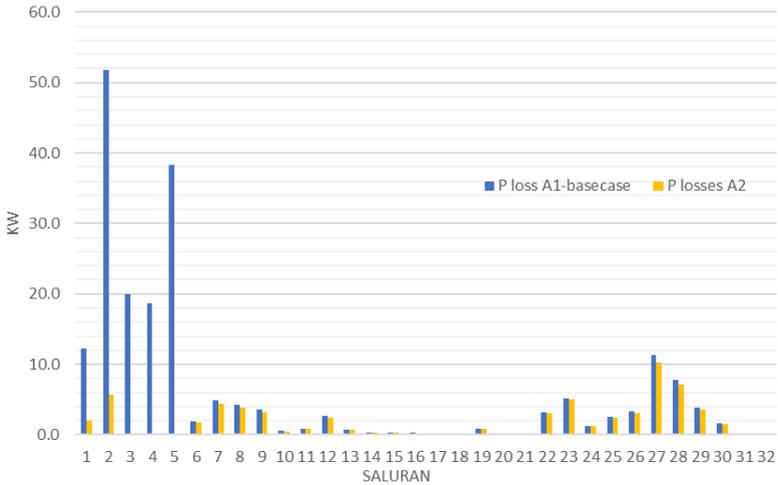
cluster. Sehingga dapat ditentukan bus 6 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 6 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

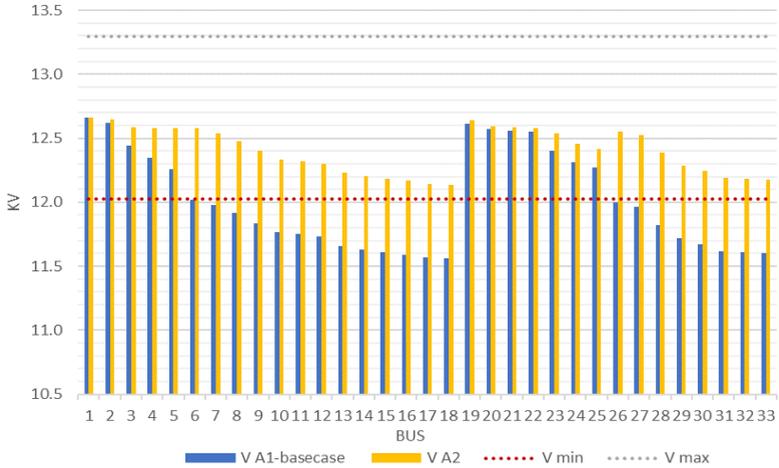
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A2

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	6	2,1060	1,5215

Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (P losses) adalah sebesar 64,6890 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,4060 kV.



Gambar 4.3 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A2



Gambar 4. 4 Tegangan Bus pada Kasus A2

4.1.1.3 Kasus A3

Kasus A3 adalah kasus sistem dengan pemasangan 2 unit DG. *K-means clustering* untuk sistem IEEE 33 bus menghasilkan 4 bus kandidat yang masing-masing mewakili sebuah *cluster*. Keempat bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus A3, penentuan lokasi menghasilkan 4 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kedua Kasus A

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	13	0,7913	0,8233	4	0,8073	0,6854
2	31	0,4933	0,8915	3	0,6824	0,5405
3	25	0,4377	0,4664	1	0,4521	0,3184
4	22	0,0759	0,1605	2	0,1182	0,0853

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.4 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks

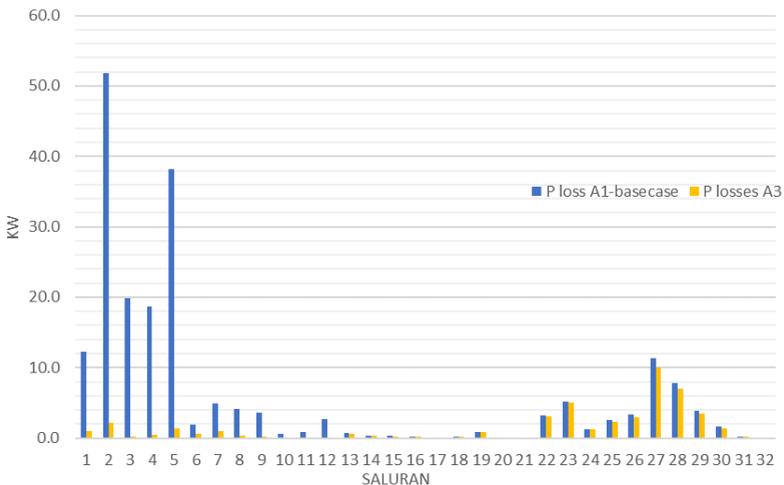
cluster. Sehingga dapat ditentukan bus 13 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 13 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.5.

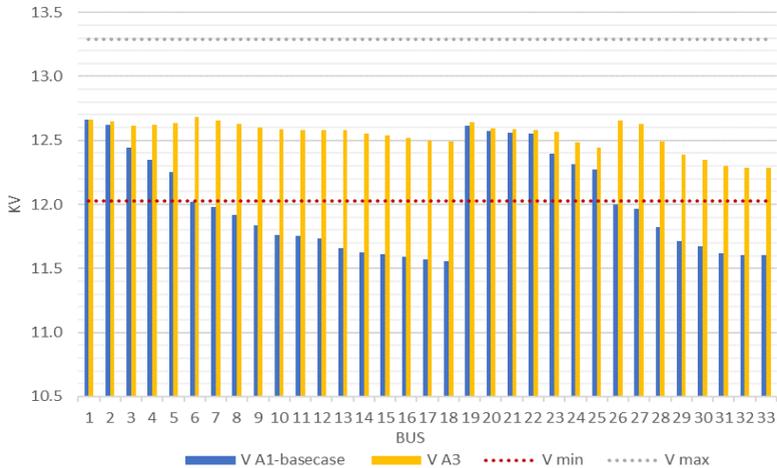
Tabel 4. 5 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A3

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	6	2,1060	1,5215
2	13	0,4515	0,2067

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 46,9297 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,5447 kV.



Gambar 4. 5 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A3



Gambar 4. 6 Tegangan Bus pada Kasus A3

4.1.1.4 Kasus A4

Kasus A4 adalah kasus sistem dengan pemasangan 3 unit DG. *K-means clustering* untuk sistem IEEE 33 bus menghasilkan 4 bus kandidat yang masing-masing mewakili sebuah *cluster*. Keempat bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus A4, penentuan lokasi menghasilkan 4 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketiga Kasus A

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	31	0,6454	0,9638	4	0,8046	0,7081
2	17	0,4599	0,4610	3	0,4604	0,3523
3	23	0,6414	0,2857	1	0,4635	0,3207
4	4	0,2194	0,1471	2	0,1832	0,1263

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.6 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks

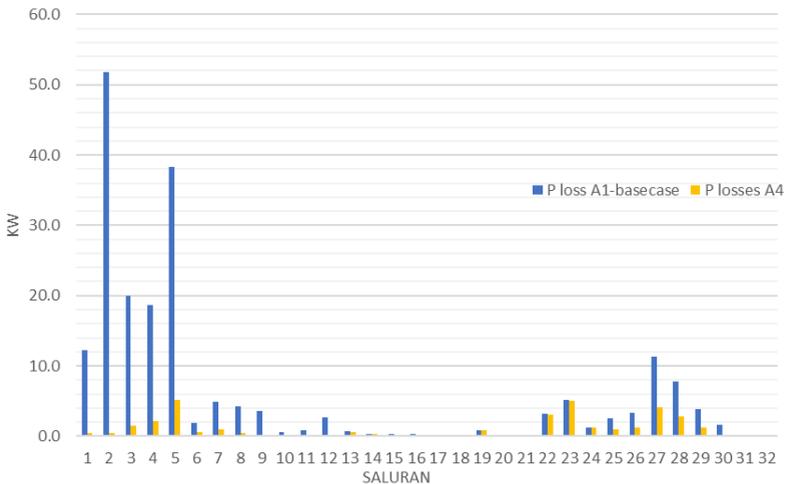
cluster. Sehingga dapat ditentukan bus 31 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 31 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.7.

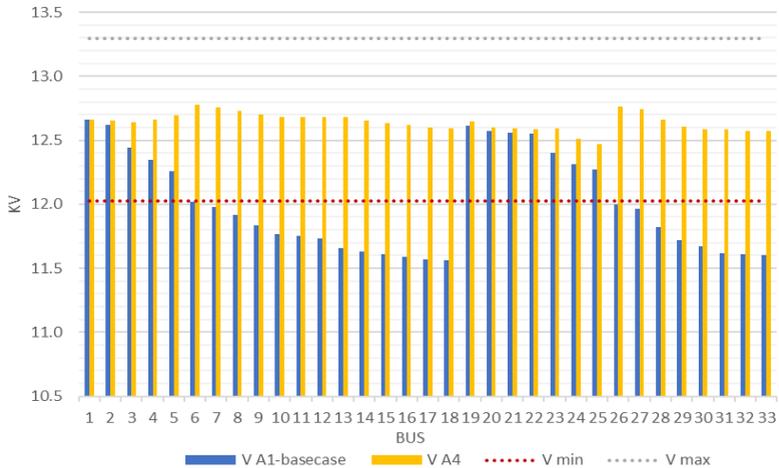
Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A4

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	6	2,1060	1,5215
2	13	0,4515	0,2067
3	31	0,4202	0,2102

Gambar 4.7 dan 4.8 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 34,22 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,6414 kV.



Gambar 4. 7 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A4



Gambar 4. 8 Tegangan Bus pada Kasus A4

4.1.1.5 Kasus A5

Kasus A5 adalah kasus sistem dengan pemasangan 4 unit DG. *K-means clustering* untuk sistem IEEE 33 bus menghasilkan 4 bus kandidat yang masing-masing mewakili sebuah *cluster*. Keempat bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus A5, penentuan lokasi menghasilkan 4 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keempat Kasus A

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	24	1,0000	0,8661	4	0,9331	0,9024
2	23	0,7695	0,5975	1	0,6835	0,5679
3	10	0,5997	0,3058	3	0,4527	0,3783
4	6	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.8 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks

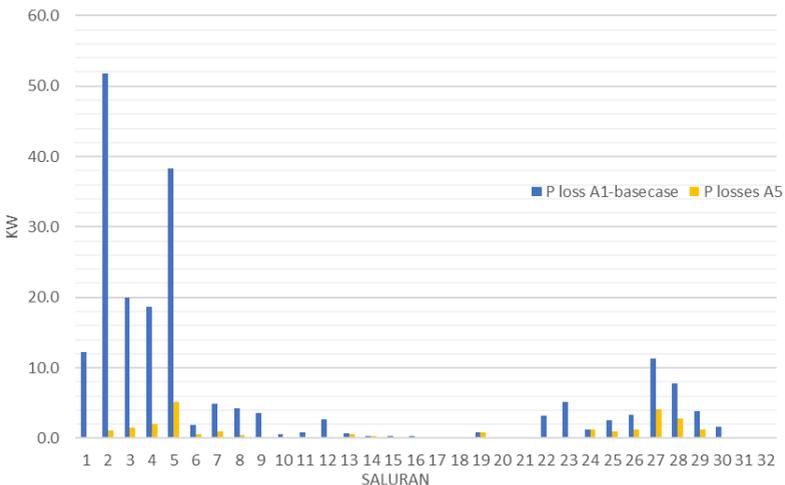
cluster. Sehingga dapat ditentukan bus 24 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 24 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.9.

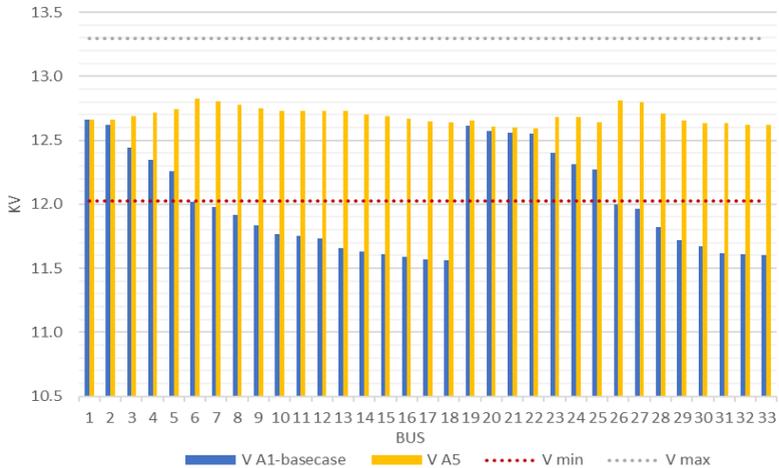
Tabel 4. 9 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A5

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	6	2,1060	1,5215
2	13	0,4515	0,2067
3	31	0,4202	0,2102
4	24	0,8412	0,4009

Gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 26,2374 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,6912 kV.



Gambar 4. 9 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A5



Gambar 4. 10 Tegangan Bus pada Kasus A5

4.1.1.6 Kasus A6

Kasus A6 adalah kasus sistem dengan pemasangan 5 unit DG. *K-means clustering* untuk sistem IEEE 33 bus menghasilkan 4 bus kandidat yang masing-masing mewakili sebuah *cluster*. Keempat bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus A6, penentuan lokasi menghasilkan 4 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kelima Kasus A

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	20	1,0000	0,9277	4	0,9638	0,8823
2	22	0,6958	1,0000	1	0,8479	0,7209
3	28	0,9945	0,4917	3	0,7431	0,5250
4	6	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.10 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan

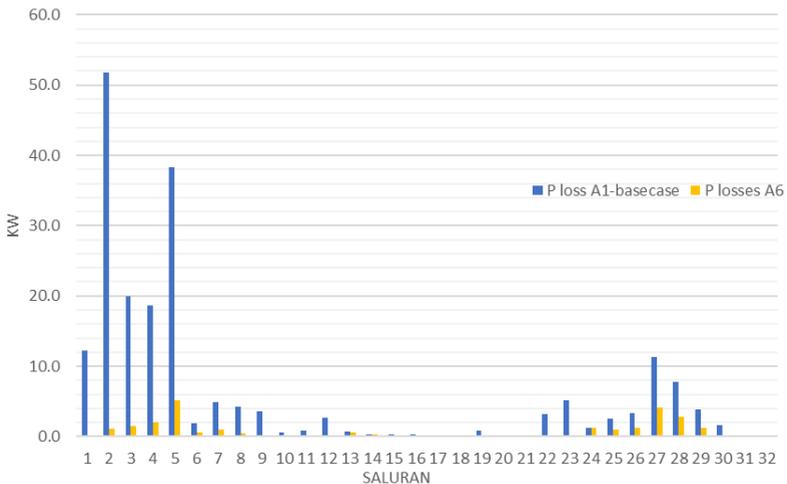
indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 20 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 20 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.11.

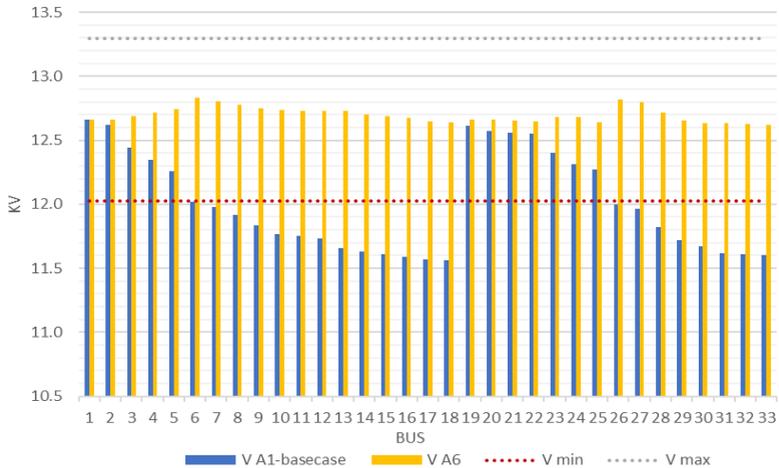
Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A6

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	6	2,1060	1,5215
2	13	0,4515	0,2067
3	31	0,4202	0,2102
4	24	0,8412	0,4009
5	20	0,2701	0,1201

Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 25,3272 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,6983 kV.



Gambar 4. 11 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A6



Gambar 4. 12 Tegangan Bus pada Kasus A6

4.1.1.7 Kasus A7

Kasus A7 adalah kasus sistem dengan pemasangan 6 unit DG. *K-means clustering* untuk sistem IEEE 33 bus menghasilkan 4 bus kandidat yang masing-masing mewakili sebuah *cluster*. Keempat bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus A7, penentuan lokasi menghasilkan 4 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keenam Kasus A

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	25	0,9770	0,8936	4	0,9353	0,7809
2	28	1,0000	0,5563	3	0,7781	0,5705
3	3	0,4075	0,6749	1	0,5412	0,4674
4	6	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.12 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan

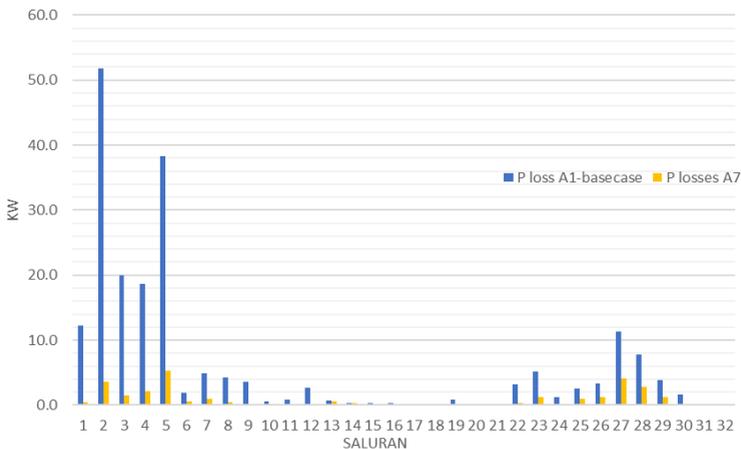
indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 25 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 25 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.13.

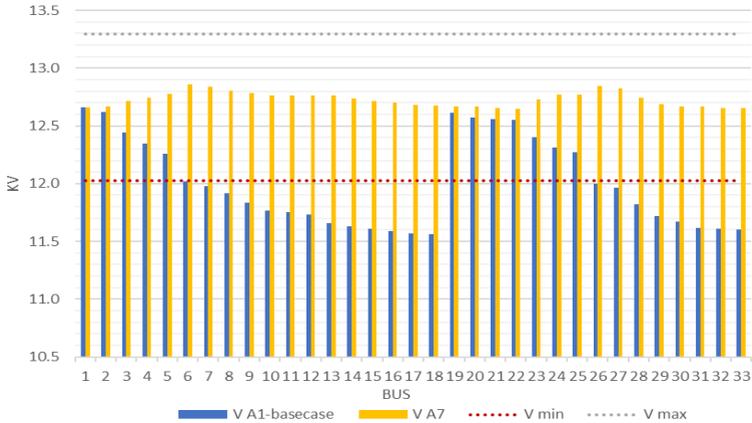
Tabel 4. 13 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A7

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	6	2,1060	1,5215
2	13	0,4515	0,2067
3	31	0,4202	0,2102
4	24	0,8412	0,4009
5	20	0,2701	0,1201
6	25	0,4200	0,2000

Gambar 4.13 dan 4.14 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 28,7728 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,7289 kV.



Gambar 4. 13 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A7



Gambar 4.14 Tegangan Bus pada Kasus A7

4.1.1.8 Kasus A8

Kasus A8 adalah kasus sistem dengan pemasangan 7 unit DG. *K-means clustering* untuk sistem IEEE 33 bus menghasilkan 4 bus kandidat yang masing-masing mewakili sebuah *cluster*. Keempat bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus A8, penentuan lokasi menghasilkan 4 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketujuh Kasus A

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	22	0,6994	1,0000	4	0,8497	0,8009
2	28	1,0000	0,5445	3	0,7723	0,5643
3	23	0,5113	0,6132	1	0,5622	0,4503
4	6	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.14 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 22 sebagai lokasi

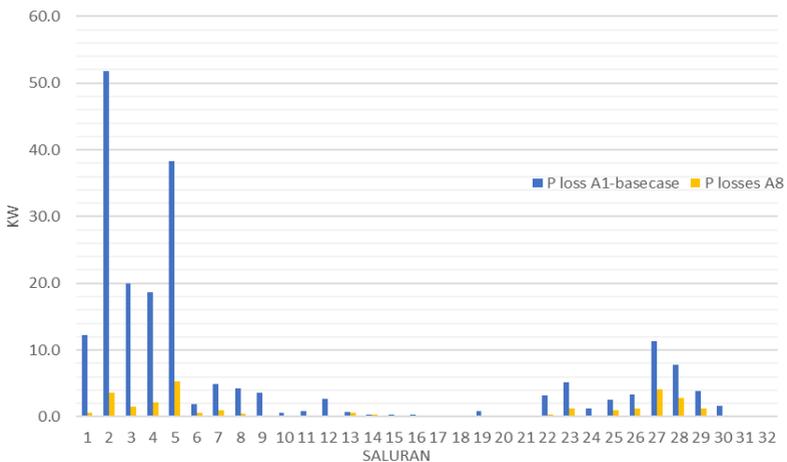
pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 22 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.15.

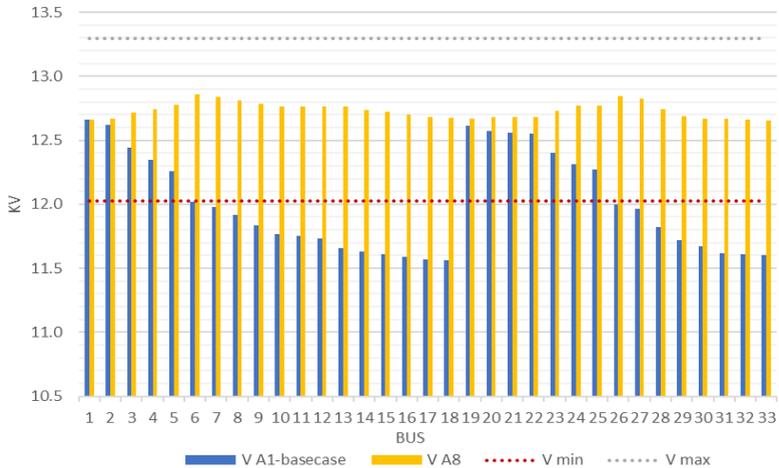
Tabel 4. 15 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus A8

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	6	2,1060	1,5215
2	13	0,4515	0,2067
3	31	0,4202	0,2102
4	24	0,8412	0,4009
5	20	0,2701	0,1201
6	25	0,4200	0,2000
7	22	0,0900	0,0400

Gambar 4.15 dan 4.16 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 28,8377 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,7318 kV.



Gambar 4. 15 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus A8



Gambar 4.16 Tegangan Bus pada Kasus A8

4.1.1.9 Analisis Kasus A

Hasil simulasi kasus A1-*basecase* menunjukkan bahwa total rugi-rugi daya sistem IEEE 33 bus tanpa DG adalah sebesar 202,6935 kW dan kondisi tegangan pada bus 6-18 dan bus 26-33 mengalami keadaan *undervoltage* karena tegangannya berada di bawah 0,95 p.u. Pada kasus ini nilai deviasi tegangan terbesar adalah 8,69% pada bus 18. Selanjutnya sistem tersebut diuji dengan pemasangan *single* maupun *multi* DG sebagai solusi perbaikan rugi-rugi daya dan dampaknya terhadap profil tegangan.

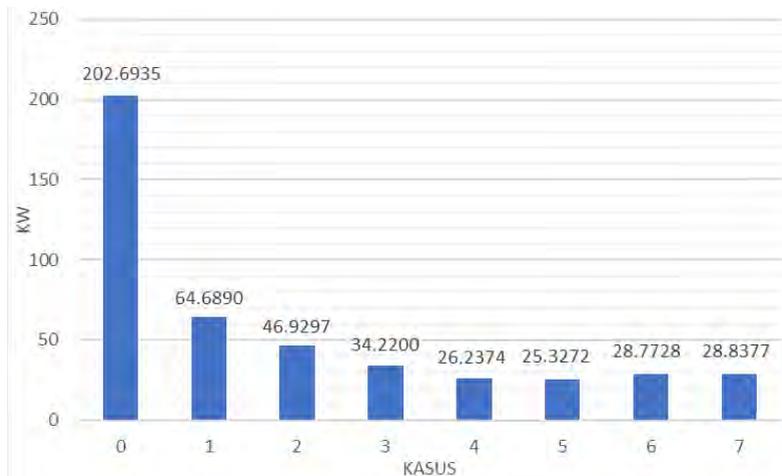
Kasus A2 adalah kasus sistem dengan pemasangan 1 unit DG. Pada kasus A2, Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan bahwa pemasangan 1 unit DG dengan kapasitas sebesar 2.106 MW dan 1.5215 MVAR mampu menurunkan rugi-rugi daya menjadi 64,689 KW atau berkurang sebesar 68,08% dari rugi-rugi daya semula. Selain itu kondisi tegangan yang semula mengalami *undervoltage* mampu diperbaiki sehingga tidak ada bus yang mengalami *undervoltage*. Pada kasus ini nilai deviasi tegangan terbesar pada sistem adalah sebesar 4,14% pada bus 18.

Selanjutnya dilakukan pemasangan DG satu persatu hingga 7 unit DG pada kasus A8. Gambar 4.16 menunjukkan bahwa penambahan DG hingga 7 unit mampu membuat profil tegangan sistem terjaga pada standar tegangan yang diperbolehkan. Adapun total keluaran daya DG,

besar penurunan rugi-rugi daya dan level penetrasi DG setiap kasus ditunjukkan oleh Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Hasil Pemasangan DG pada Kasus A

Kasus	Jumlah DG	Total Keluaran DG (MVA)	Penetrasi DG (%)	Rugi-rugi Daya setelah pemasangan DG (KW)	Penurunan Rugi-rugi Daya (%)
A1	0	0,0000	0,00	202,6935	0,00
A2	1	2,5982	56,32	64,6890	68,08
A3	2	3,0947	67,09	46,9297	76,84
A4	3	3,5646	77,27	34,2200	83,11
A5	4	4,4965	97,48	26,2374	87,05
A6	5	4,7922	103,89	25,3272	87,50
A7	6	5,2573	113,97	28,7728	85,80
A8	7	5,3558	116,10	28,8377	85,77



Gambar 4. 17 Perbandingan Rugi-rugi Daya Semua Kasus A

Tabel 4.16 menunjukkan kasus A6 dengan pemasangan DG sebanyak 5 unit menghasilkan rugi-rugi daya paling minimum dengan penurunan rugi-rugi daya sebesar 87,5%. Sedangkan penambahan 1 hingga 2 unit DG setelahnya pada kasus A7 dan A8 justru menyebabkan

rugi-rugi naik dibanding kasus A6. Tabel 4.16 menunjukkan bahwa pemasangan DG berjumlah lebih dari 5 unit pada kasus A7 dan A8 dengan level penetrasi DG sebesar 113,97% dan 116,10 % membuat rugi-rugi daya mengalami tren kenaikan. Dengan menganalisa kasus A6, A7 dan A8 dapat diidentifikasi bahwa jumlah DG yang optimal untuk mengurangi rugi-rugi daya pada sistem IEEE 33 bus adalah sebanyak 5 unit dengan level penetrasi DG mencapai 103,89%.

4.1.2 Sistem IEEE 69 Bus (Kasus B)

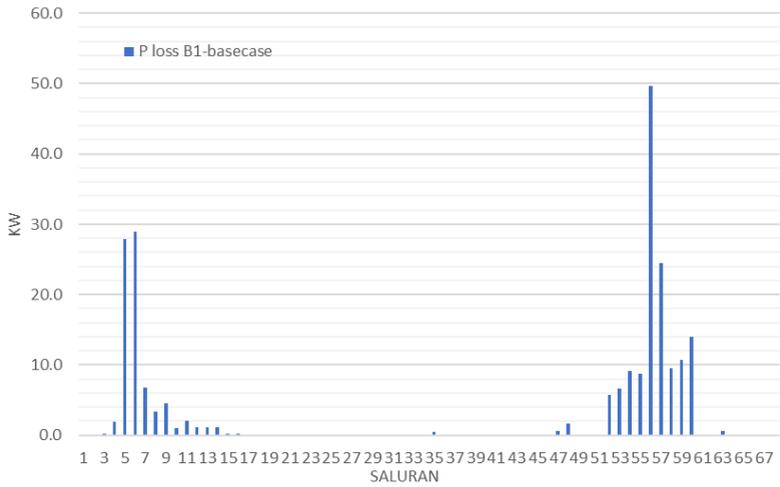
Pada Kasus B, 8 kasus yang akan dibahas untuk sistem IEEE 69 bus yang ditunjukkan pada Tabel 4.17. Sistem diuji dengan pemasangan DG mulai dari kasus tanpa DG (pasif) hingga pemasangan DG mulai dari *single* DG hingga *multi* DG. Pada tiap kasus akan dilakukan pemasangan DG sebanyak 1 unit untuk kemudian dianalisis perubahan rugi-rugi daya pada sistem IEEE 69 bus berdasarkan jumlah DG yang dipasang. Total beban sistem IEEE 69 bus adalah 3,783 MW dan 2,6841 MVAR.

Tabel 4. 17 Studi Kasus Sistem IEEE 69 Bus

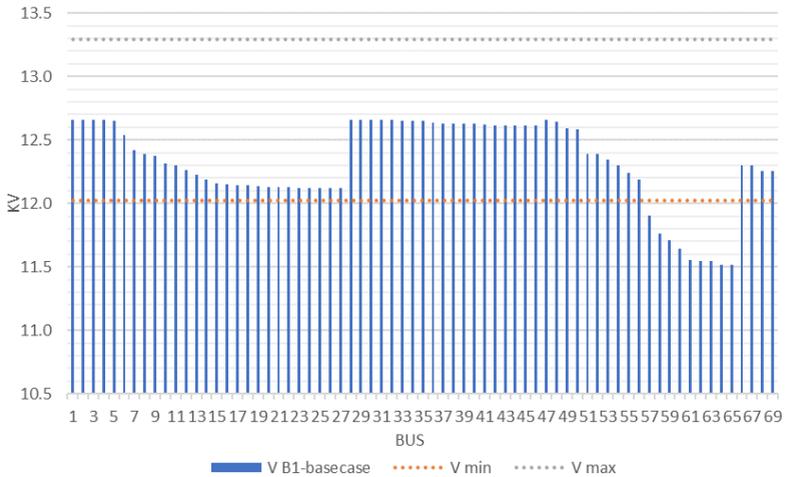
Kasus	Lokasi DG
Kasus B1 – <i>Base Case</i>	Pasif (tanpa DG)
Kasus B2	Bus 57
Kasus B3	Bus 57, 61
Kasus B4	Bus 57, 61, 15
Kasus B5	Bus 57, 61, 15, 49
Kasus B6	Bus 57, 61, 15, 49, 36
Kasus B7	Bus 57, 61, 15, 49, 36, 41
Kasus B8	Bus 57, 61, 15, 49, 36, 41, 34

4.1.2.1 Kasus B1-*base case*

Kasus B1-*base case* adalah kasus saat sistem belum dilakukan pemasangan DG (pasif). Gambar 4.18 dan 4.19 menunjukkan nilai rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 223,7626 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,322 kV.



Gambar 4.18 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B1-basecase



Gambar 4.19 Tegangan Bus pada Kasus B1-basecase

4.1.2.2 Kasus B2

Kasus B2 adalah kasus sistem dengan pemasangan 1 unit DG. *K-means clustering* mengelompokkan sistem IEEE 69 bus menjadi 6 *cluster* sehingga dihasilkan 6 kandidat bus. Keenam bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus B2, penentuan lokasi menghasilkan 6 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.18.

Tabel 4. 18 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Pertama Kasus B

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	57	1,0000	0,6591	2	0,8296	0,7344
2	61	0,3076	0,9652	4	0,6365	0,5341
3	7	0,3606	0,2105	6	0,2856	0,2559
4	56	0,1736	0,4112	3	0,2925	0,2168
5	49	0,0726	0,0584	5	0,0655	0,0266
6	5	0,0233	0,0107	1	0,0171	0,0045

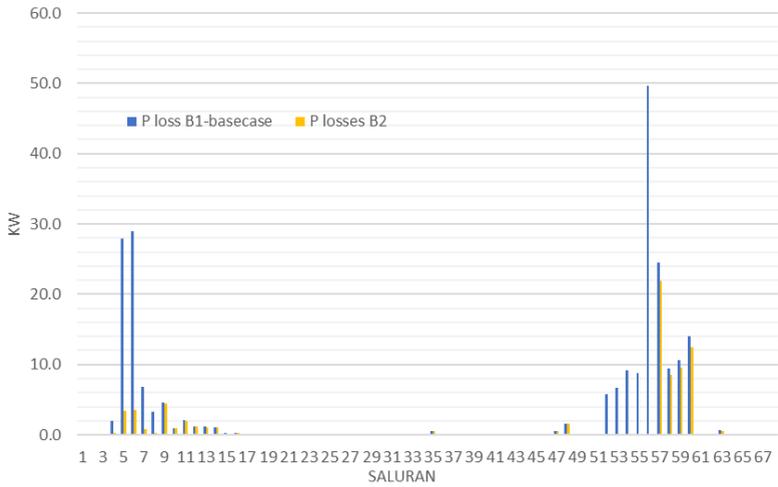
Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.18 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 57 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 57 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.19.

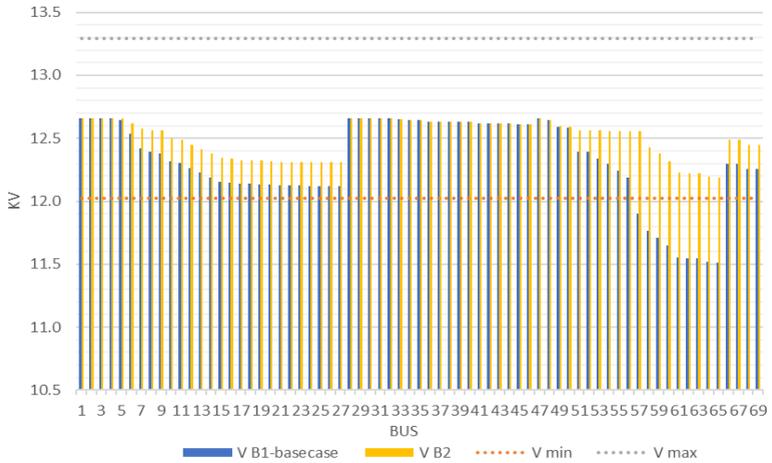
Tabel 4. 19 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B2

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	57	1,7216	1,2092

Gambar 4.20 dan 4.21 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 76,1808 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,5 kV.



Gambar 4. 20 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B2



Gambar 4. 21 Tegangan Bus pada Kasus B2

4.1.2.3 Kasus B3

Kasus B3 adalah kasus sistem dengan pemasangan 2 unit DG. *K-means clustering* mengelompokkan sistem IEEE 69 bus menjadi 6 *cluster* sehingga dihasilkan 6 kandidat bus. Keenam bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus B3, penentuan lokasi menghasilkan 6 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kedua Kasus B

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	61	0,6201	0,9199	3	0,7700	0,5227
2	64	0,1652	0,9854	4	0,5753	0,4136
3	7	0,2863	0,1815	2	0,2339	0,1762
4	68	0,0383	0,4600	6	0,2492	0,1527
5	50	0,0304	0,1551	5	0,0928	0,0539
6	48	0,0596	0,0370	1	0,0484	0,0142

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.20 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 61 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

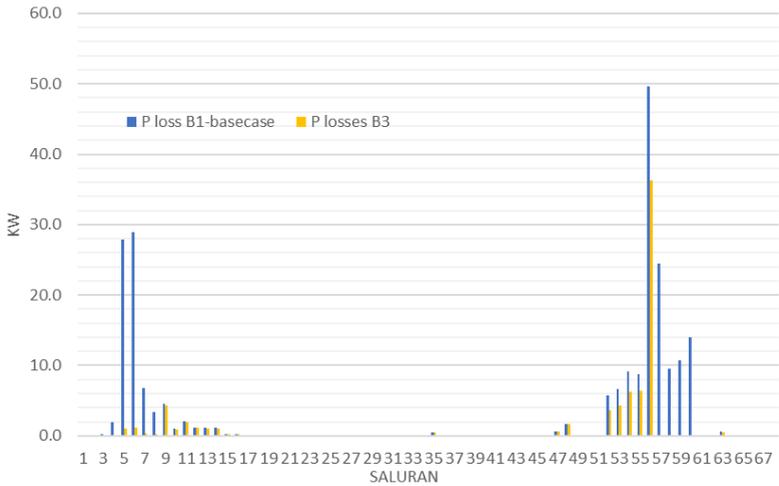
Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 61 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B3

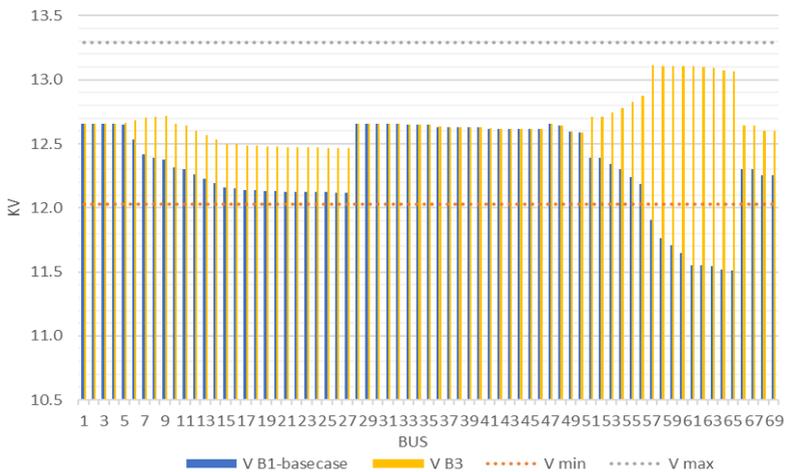
DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	57	1,7216	1,2092
2	61	1,5628	1,1154

Gambar 4.22 dan 4.23 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (P

losses) adalah sebesar 74,8594 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,68 kV.



Gambar 4. 22 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B3



Gambar 4. 23 Tegangan Bus pada Kasus B3

4.1.2.4 Kasus B4

Kasus B4 adalah kasus sistem dengan pemasangan 3 unit DG. *K-means clustering* mengelompokkan sistem IEEE 69 bus menjadi 6 *cluster* sehingga dihasilkan 6 kandidat bus. Keenam bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus B4, penentuan lokasi menghasilkan 6 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.22.

Tabel 4. 22 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketiga Kasus B

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	15	0,9117	0,9468	4	0,9292	0,8984
2	14	0,9127	0,8945	3	0,9036	0,8573
3	50	0,8047	0,8153	6	0,8101	0,7804
4	33	0,8050	0,7152	5	0,7601	0,7334
5	53	0,7082	0,5723	1	0,6403	0,5779
6	64	0,8571	0,0604	2	0,4588	0,3739

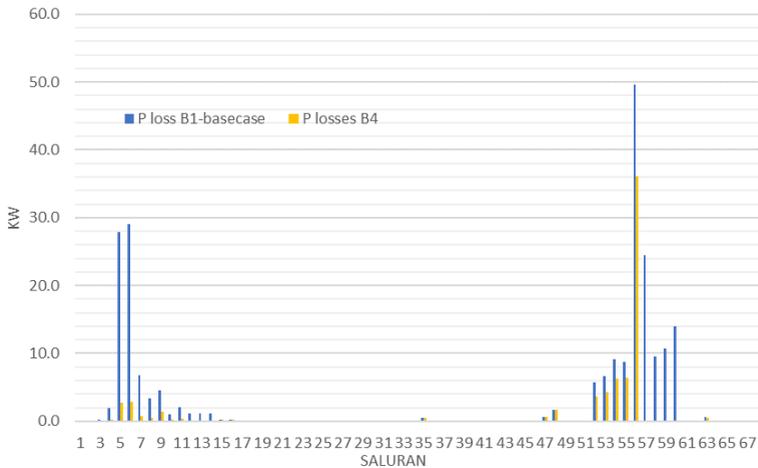
Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.22 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 15 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 15 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.23.

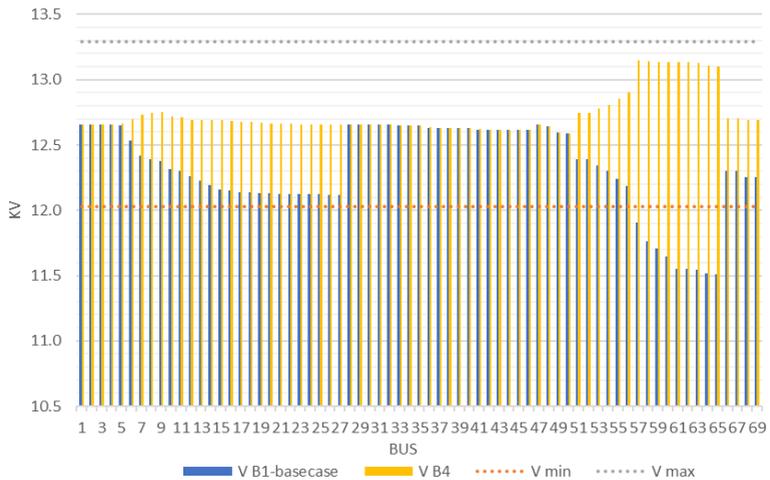
Tabel 4. 23 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B4

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	57	1,7216	1,2092
2	61	1,5628	1,1154
3	15	0,3277	0,2153

Gambar 4.24 dan 4.25 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 70.1733 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,7355 kV.



Gambar 4. 24 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B4



Gambar 4. 25 Tegangan Bus pada Kasus B4

4.1.2.5 Kasus B5

Kasus B5 adalah kasus sistem dengan pemasangan 4 unit DG. *K-means clustering* mengelompokkan sistem IEEE 69 bus menjadi 6 *cluster* sehingga dihasilkan 6 kandidat bus. Keenam bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus B5, penentuan lokasi menghasilkan 6 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keempat Kasus B

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	49	0,9556	0,9876	6	0,9716	0,9195
2	48	0,8999	0,9005	5	0,9002	0,8901
3	21	0,8935	0,8706	1	0,8821	0,8733
4	10	1,0000	0,7721	4	0,8861	0,8240
5	53	0,7789	0,6609	3	0,7200	0,6489
6	64	0,9427	0,0697	2	0,5062	0,4119

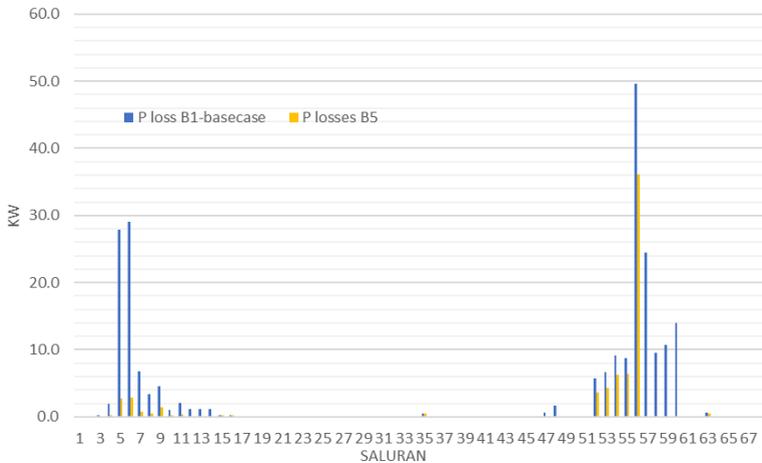
Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.24 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 49 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 49 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.25.

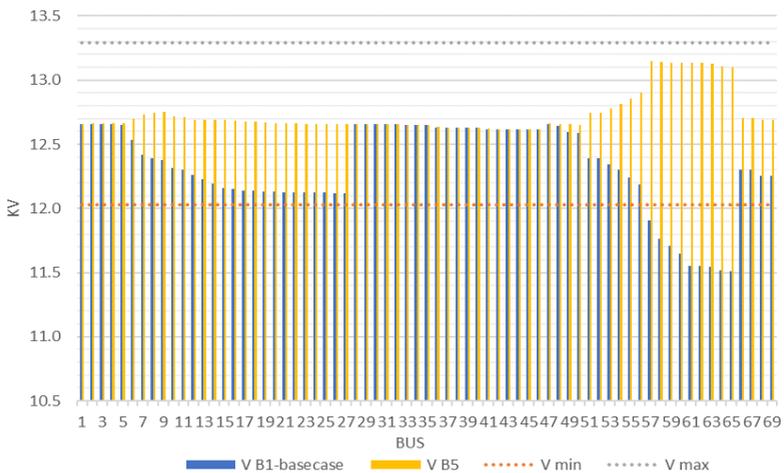
Tabel 4. 25 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B5

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	57	1,7216	1,2092
2	61	1,5628	1,1154
3	15	0,3277	0,2153
4	49	0,7681	0,5492

Gambar 4.26 dan 4.27 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 67,9508 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,7379 kV.



Gambar 4. 26 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B5



Gambar 4. 27 Tegangan Bus pada Kasus B5

4.1.2.6 Kasus B6

Kasus B6 adalah kasus sistem dengan pemasangan 5 unit DG. *K-means clustering* mengelompokkan sistem IEEE 69 bus menjadi 6 *cluster* sehingga dihasilkan 6 kandidat bus. Keenam bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus B6, penentuan lokasi menghasilkan 6 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.26.

Tabel 4. 26 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Kelima Kasus B

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	36	0,9736	0,9640	6	0,9688	0,9358
2	34	0,8891	0,9357	5	0,9124	0,9067
3	21	0,8936	0,9130	1	0,9033	0,8944
4	10	1,0000	0,8097	4	0,9049	0,8430
5	53	0,7789	0,6932	3	0,7361	0,6623
6	64	0,9427	0,0731	2	0,5079	0,4127

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.26 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 36 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

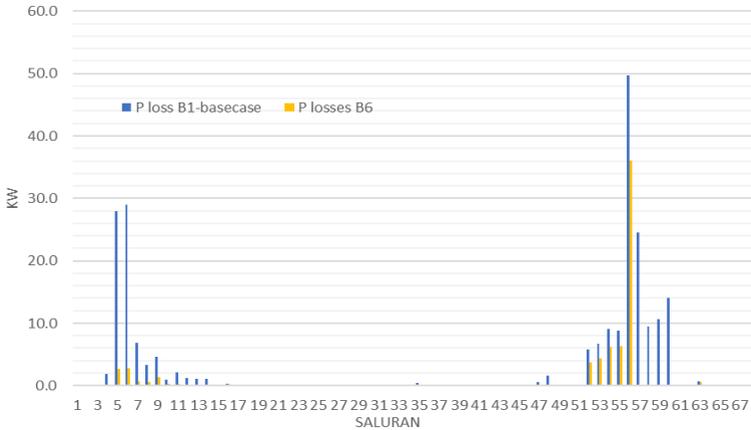
Tabel 4. 27 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B6

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	57	1,7216	1,2092
2	61	1,5628	1,1154
3	15	0,3277	0,2153
4	49	0,7681	0,5492
5	36	0,1851	0,1291

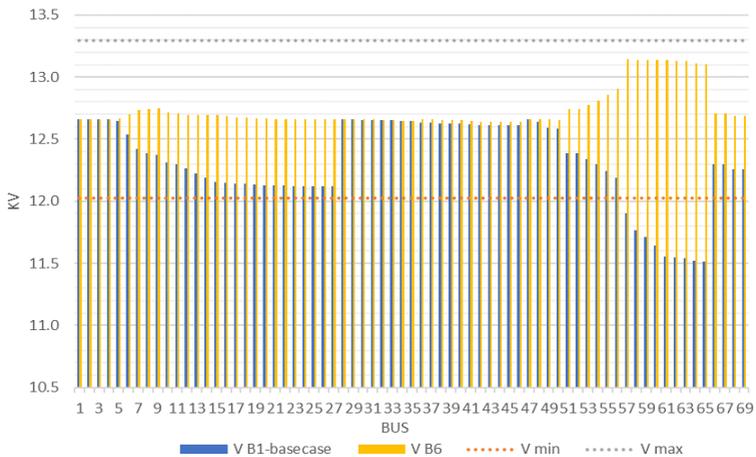
Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 36 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan

persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.27.

Gambar 4.28 dan 4.29 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 67,4816 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,7422 kV.



Gambar 4. 28 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B6



Gambar 4. 29 Tegangan Bus pada Kasus B6

4.1.2.7 Kasus B7

Kasus B7 adalah kasus sistem dengan pemasangan 6 unit DG. *K-means clustering* mengelompokkan sistem IEEE 69 bus menjadi 6 *cluster* sehingga dihasilkan 6 kandidat bus. Keenam bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus B7, penentuan lokasi menghasilkan 6 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.28.

Tabel 4. 28 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Keenam Kasus B

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	41	0,8962	0,9891	6	0,9426	0,9360
2	21	0,8936	0,9611	5	0,9274	0,9195
3	10	1,0000	0,8524	1	0,9262	0,8954
4	51	0,8749	0,7971	4	0,8360	0,8098
5	54	0,7632	0,6647	3	0,7139	0,6521
6	64	0,9427	0,0770	2	0,5099	0,4135

Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.28 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 41 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

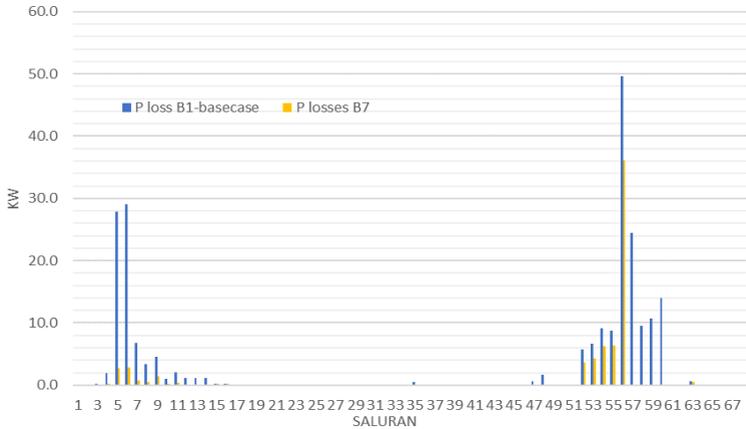
Tabel 4. 29 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B7

DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	57	1,7216	1,2092
2	61	1,5628	1,1154
3	15	0,3277	0,2153
4	49	0,7681	0,5492
5	36	0,1851	0,1291
6	41	0,0850	0,0579

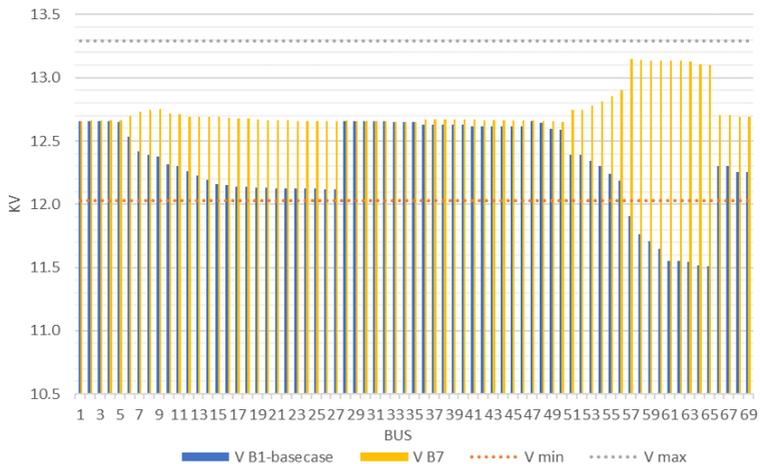
Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 41 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan

persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.29.

Gambar 4.30 dan 4.31 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (*P losses*) adalah sebesar 67,5006 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,7453 kV.



Gambar 4.30 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B7



Gambar 4. 31 Tegangan Bus pada Kasus B7

4.1.2.8 Kasus B8

Kasus B8 adalah kasus sistem dengan pemasangan 7 unit DG. *K-means clustering* mengelompokkan sistem IEEE 69 bus menjadi 6 *cluster* sehingga dihasilkan 6 kandidat bus. Keenam bus kandidat tersebut akan dibandingkan satu sama lain berdasarkan indeks bus dan indeks cluster untuk ditentukan lokasi pemasangan DG. Pada kasus B8, penentuan lokasi menghasilkan 6 bus kandidat dengan masing-masing indeks bus dan indeks cluster yang ditunjukkan oleh Tabel 4.30.

Tabel 4. 30 Hasil *Clustering* untuk Penentuan Kandidat Lokasi DG Ketujuh Kasus B

No	Bus	LSF normalisasi	Tegangan normlisasi	Cluster	Indeks Bus	Indeks Cluster
1	10	1,0000	0,8639	4	0,9320	0,9255
2	34	0,8891	0,9983	5	0,9437	0,9240
3	16	0,8969	0,9258	1	0,9113	0,8930
4	51	0,8749	0,8079	6	0,8414	0,8152
5	54	0,7632	0,6737	3	0,7184	0,6559
6	64	0,9427	0,0781	2	0,5104	0,4138

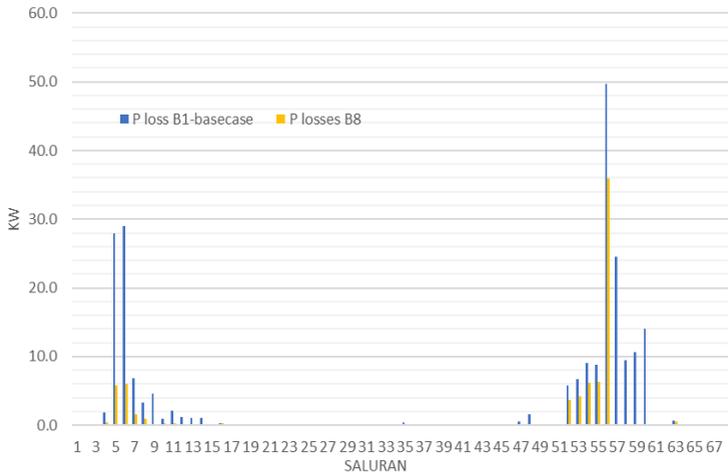
Dari hasil *clustering* yang ditunjukkan Tabel 4.30 dapat ditentukan lokasi pemasangan DG dengan mengurutkan indeks bus dan indeks *cluster*. Sehingga dapat ditentukan bus 10 sebagai lokasi pemasangan DG karena memiliki indeks bus terbesar pada *cluster* dengan indeks *cluster* terbesar.

Tabel 4. 31 Hasil Perhitungan Kapasitas DG Kasus B8

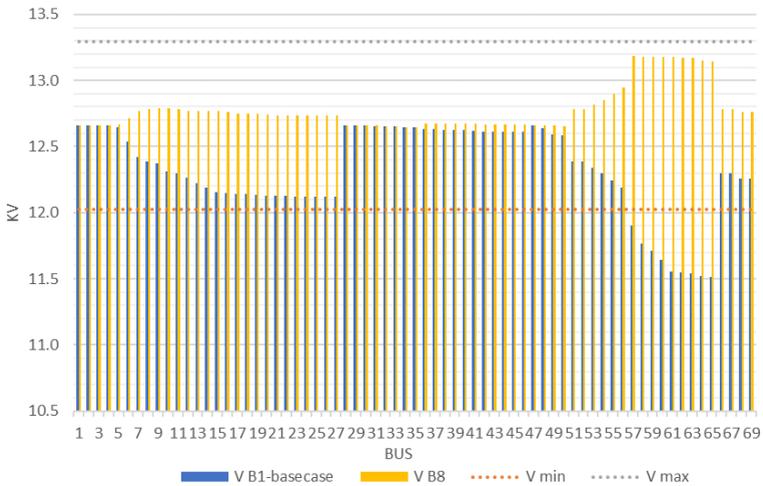
DG ke-	Lokasi DG	Kapasitas	
		P (MW)	Q (MVAR)
1	57	1,7216	1,2092
2	61	1,5628	1,1154
3	15	0,3277	0,2153
4	49	0,7681	0,5492
5	36	0,1851	0,1291
6	41	0,0850	0,0579
7	10	0,4626	0,3037

Setelah didapatkan lokasi pemasangan DG, kemudian pada bus 10 tersebut dihitung kapasitas DG yang akan dipasang menggunakan persamaan matematis. Hasil perhitungan kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem ditunjukkan oleh Tabel 4.31.

Gambar 4.32 dan 4.33 menunjukkan rugi-rugi daya dan tegangan bus berdasarkan simulasi aliran daya. Total rugi-rugi daya aktif (P losses) adalah sebesar 73,7731 kW dengan tegangan rata-rata sistem 12,7805 kV.



Gambar 4. 32 Rugi-rugi Daya Saluran pada Kasus B8



Gambar 4. 33 Tegangan Bus pada Kasus B8

4.1.2.9 Analisis Kasus B

Hasil simulasi kasus B1-*basecase* menunjukkan bahwa total rugi-rugi daya sistem IEEE 69 bus tanpa DG adalah sebesar 223.7626 kW

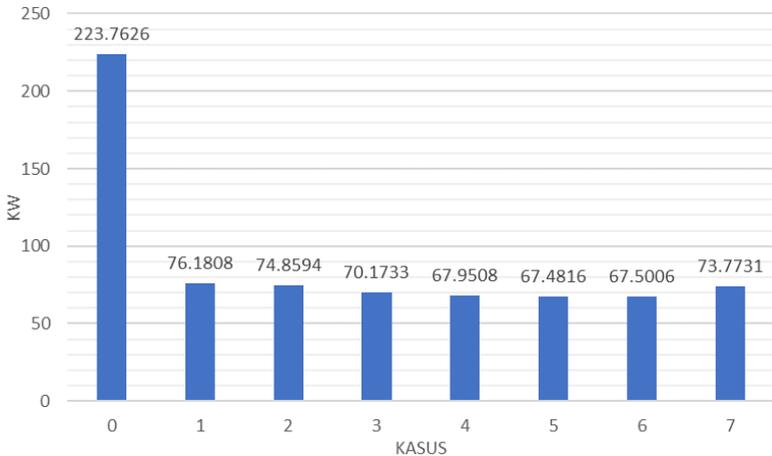
dan kondisi tegangan pada bus 57-65 mengalami keadaan *undervoltage* karena tegangannya berada di bawah 0,95 p.u. Pada kasus ini nilai deviasi tegangan terbesar adalah 9,06% pada bus 65. Selanjutnya sistem tersebut diuji dengan pemasangan DG sebagai solusi perbaikan rugi-rugi daya dan dampaknya terhadap profil tegangan.

Kasus B2 adalah kasus sistem dengan pemasangan 1 unit DG. Pada kasus A2, Gambar 4.20 dan 4.21 menunjukkan bahwa pemasangan 1 unit DG dengan kapasitas sebesar 1.7216 MW dan 1.2092 MVAR pada bus 57 mampu menurunkan rugi-rugi daya menjadi 64,689 KW atau berkurang sebesar 65,95% dari rugi-rugi daya semula. Selain itu kondisi tegangan yang semula mengalami *undervoltage* mampu diperbaiki sehingga tidak ada bus yang mengalami *undervoltage*. Pada kasus ini nilai deviasi tegangan terbesar pada sistem adalah sebesar 3,71% pada bus 18.

Selanjutnya dilakukan pemasangan DG satu persatu hingga 7 unit DG pada kasus B8. Gambar 4.33 menunjukkan penambahan DG hingga 7 unit mampu membuat profil tegangan sistem terjaga pada standar tegangan yang diperbolehkan. Adapun total keluaran daya DG, besar penurunan rugi-rugi daya dan level penetrasi DG setiap kasus ditunjukkan oleh Tabel 4.32.

Tabel 4. 32 Hasil Pemasangan DG pada Kasus B

Kasus	Jumlah DG	Total Keluaran DG (MVA)	Penetrasi DG (%)	Rugi-rugi Daya setelah pemasangan DG (KW)	Penurunan Rugi-rugi Daya (%)
B1	0	0,0000	0,00	223,7626	0,00
B2	1	2,1038	43,11	76,1808	65,95
B3	2	4,0239	82,46	74,8594	66,55
B4	3	4,4160	90,49	70,1733	68,64
B5	4	5,3603	109,84	67,9508	69,63
B6	5	5,5860	114,47	67,4816	69,84
B7	6	5,6889	116,58	67,5006	69,83
B8	7	6,2126	127,31	73,7731	67,03



Gambar 4. 34 Perbandingan Rugi-rugi Daya Semua Kasus B

Tabel 4.32 menunjukkan kasus B6 dengan pemasangan DG sebanyak 5 unit menghasilkan rugi-rugi daya paling minimum dengan penurunan rugi-rugi daya sebesar 69.84%. Sedangkan penambahan 1 hingga 2 unit DG setelahnya pada kasus A7 dan A8 justru menyebabkan rugi-rugi naik dibanding kasus B6. Tabel 4.16 menunjukkan bahwa pemasangan DG berjumlah lebih dari 5 unit pada kasus B7 dan B8 dengan level penetrasi DG sebesar 116.58% dan 127.31% membuat rugi-rugi daya mengalami tren kenaikan. Dengan menganalisa setiap kasus B maka dapat diidentifikasi bahwa jumlah DG yang optimal untuk mengurangi rugi-rugi daya pada sistem IEEE 69 bus adalah sebanyak 5 unit dengan level penetrasi DG mencapai 114.47%.

4.2 Validasi Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG Metode *K-means Clustering* dengan Metode Urutan Prioritas LSF

Pada penelitian ini digunakan metode *K-means clustering* untuk menentukan lokasi penempatan DG untuk kemudian didapat kapasitas DG yang akan dipasang pada sistem distribusi radial menggunakan persamaan matematis. Hasil pemasangan DG pada lokasi dan kapasitas yang ditentukan oleh metode ini memberikan solusi pengurangan rugi-rugi daya sekaligus perbaikan profil tegangan pada sistem. Untuk menguji performa metode ini dalam menentukan lokasi dan kapasitas DG optimal maka digunakan teknik validasi berupa membandingkan

hasil metode ini dengan metode penentuan lokasi dan kapasitas DG berdasarkan urutan prioritas LSF. Metode urutan prioritas LSF ini adalah metode penentuan lokasi dan kapasitas DG berdasarkan LSF dan pendekatan analitis [3]. Pada metode ini LSF tiap bus diurutkan berdasarkan urutan nilainya. Bus dengan nilai LSF paling tinggi pada sistem akan ditentukan sebagai lokasi penempatan DG sedangkan kapasitas DG ditentukan berdasarkan persamaan matematis yang digunakan pada penelitian ini.

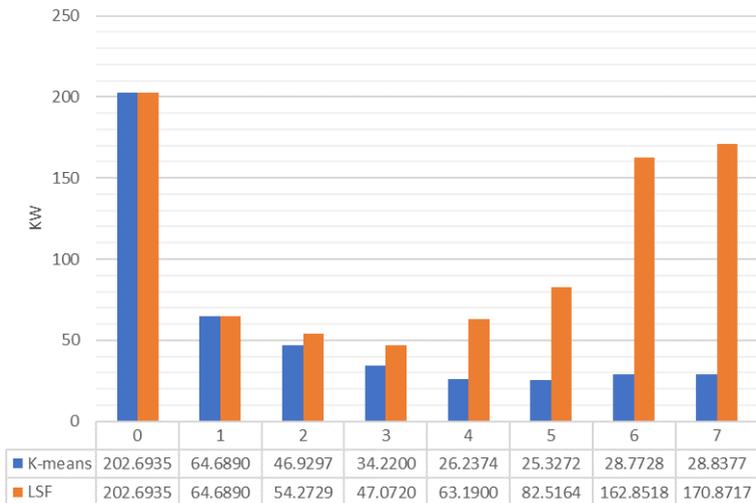
4.2.1 Validasi Hasil Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG pada Sistem IEEE 33 Bus

Tabel 4. 33 Perbandingan Hasil Metode *K-means Clustering* dan Urutan Prioritas LSF pada sistem IEEE 33 bus

DG ke-	Metode	Lokasi (bus)	Total Daya DG (MVA)	Penetrasi DG (%)	Rugi-rugi Daya setelah pemasangan DG (KW)	Penurunan Rugi-rugi Daya (%)
0	Sistem Pasif Tanpa DG				202,6935	0,00
1	<i>K-means</i>	6	2,5982	56,32	64,6890	68,08
	LSF	6	2,5982	56,32	64,6890	68,08
2	<i>K-means</i>	13	3,0947	67,09	46,9297	76,84
	LSF	28	3,8178	82,76	54,2729	73,22
3	<i>K-means</i>	31	3,5646	77,27	34,2200	83,11
	LSF	24	4,7497	102,96	47,0720	76,77
4	<i>K-means</i>	24	4,4965	97,48	26,2374	87,05
	LSF	9	5,5023	119,28	63,1900	68,82
5	<i>K-means</i>	20	4,7922	103,89	25,3272	87,50
	LSF	13	5,9987	130,04	82,5164	59,29
6	<i>K-means</i>	25	5,2573	113,97	28,7728	85,80
	LSF	29	7,1538	162,85	162,8518	19,65
7	<i>K-means</i>	22	5,3558	116,10	28,8377	85,77
	LSF	20	7,4495	170,87	170,8717	15,69

Tabel 4.33 menunjukkan perbandingan hasil penurunan rugi-rugi daya dan level penetrasi DG pada pemasangan *single* hingga *multi* DG yang dihasilkan oleh metode *K-means clustering* dan urutan prioritas LSF. Pada tabel tersebut ditunjukkan bahwa metode *K-means clustering*

mampu mendapatkan penurunan rugi-rugi daya lebih besar dibanding metode urutan prioritas. Penurunan rugi-rugi daya terbesar yang didapatkan oleh metode *K-means clustering* mencapai 87,5% sedangkan metode urutan prioritas mendapatkan penurunan rugi-rugi daya terbesar mencapai 76,77%. Pada Tabel 4.33 juga ditunjukkan bahwa metode *K-means clustering* menghasilkan jumlah DG lebih banyak untuk penurunan rugi-rugi daya yang lebih besar yaitu dengan 5 unit DG dan level penetrasi DG sebesar 103,89%. Sedangkan hasil yang didapatkan oleh metode urutan prioritas hanya mampu menghasilkan DG berjumlah 3 unit dengan level penetrasi DG sebesar 102,96% untuk penurunan rugi-rugi daya terbesar. Penambahan pemasangan DG ke-empat hingga ke-tujuh untuk metode urutan prioritas menunjukkan rugi-rugi daya sistem tidak lagi berkurang namun mengalami tren kenaikan.



Gambar 4. 35 Perbandingan Rugi-rugi Daya oleh Metode *K-means Clustering* dan Urutan Prioritas LSF pada Sistem IEEE 33 Bus

Gambar 4.35 menunjukkan perbandingan rugi-rugi daya akibat pemasangan *single* hingga *multi* DG pada lokasi dan kapasitas yang ditentukan oleh metode *K-means clustering* dan urutan prioritas LSF. Dari Gambar 4.34 dapat ditunjukkan bahwa metode *K-means clustering* menghasilkan penurunan rugi-rugi daya yang lebih besar dibanding

metode urutan prioritas LSF. Hal ini dikarenakan oleh perbedaan teknik dalam menentukan lokasi pemasangan DG pada sistem.

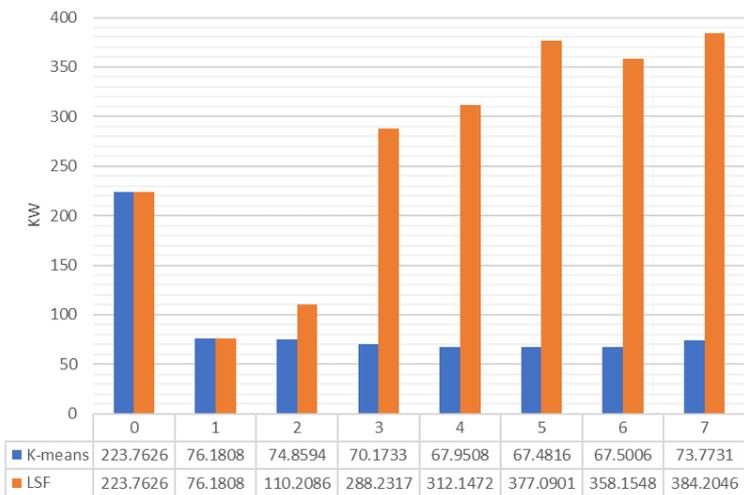
4.2.1 Validasi Hasil Penentuan Lokasi dan Kapasitas DG pada Sistem IEEE 69 Bus

Tabel 4. 34 Perbandingan Hasil Metode *K-means Clustering* dan Urutan Prioritas LSF pada sistem IEEE 69 bus

DG ke-	Metode	Lokasi (bus)	Total Daya DG (MVA)	Penetrasi DG (%)	Rugi-rugi Daya setelah pemasangan DG (KW)	Penurunan Rugi-rugi Daya (%)
0	Sistem Pasif Tanpa DG				223,7626	0,00
1	<i>K-means</i>	57	2,1038	43,11	76,1808	65,95
	LSF	57	2,1038	43,11	76,1808	65,95
2	<i>K-means</i>	61	4,0239	82,46	74,8594	66,55
	LSF	58	4,1790	85,64	110,2086	50,75
3	<i>K-means</i>	15	4,4160	90,49	70,1733	68,64
	LSF	61	6,0989	124,98	288,2317	-28,81
4	<i>K-means</i>	49	5,3603	109,84	67,9508	69,63
	LSF	10	7,0200	143,85	312,1472	-39,50
5	<i>K-means</i>	36	5,5860	114,47	67,4816	69,84
	LSF	12	7,6815	157,41	377,0901	-68,52
6	<i>K-means</i>	41	5,6889	116,58	67,5006	69,83
	LSF	13	8,0947	165,88	358,1548	-60,06
7	<i>K-means</i>	10	6,2126	127,31	73,7731	67,03
	LSF	14	8,4975	174,13	384,2046	-71,70

Tabel 4.34 menunjukkan perbandingan hasil penurunan rugi-rugi daya dan level penetrasi DG pada pemasangan *single* hingga *multi* DG yang dihasilkan oleh metode *K-means clustering* dan urutan prioritas LSF. Pada tabel tersebut ditunjukkan bahwa metode *K-means clustering* mampu mendapatkan penurunan rugi-rugi daya lebih besar dibanding metode urutan prioritas. Penurunan rugi-rugi daya terbesar yang didapatkan oleh metode *K-means clustering* mencapai 69,84% sedangkan metode urutan prioritas mendapatkan penurunan rugi-rugi daya terbesar mencapai 65,95%. Pada Tabel 4.34 juga ditunjukkan

bahwa metode *K-means clustering* menghasilkan jumlah DG lebih banyak untuk penurunan rugi-rugi daya yang lebih besar yaitu dengan 5 unit DG dan level penetrasi DG sebesar 114,47%. Sedangkan hasil yang didapatkan oleh metode urutan prioritas hanya mampu menghasilkan DG berjumlah 1 unit dengan level penetrasi DG sebesar 43,11% untuk penurunan rugi-rugi daya terbesar. Penambahan pemasangan DG ke-dua hingga ke-tujuh untuk metode urutan prioritas menunjukkan rugi-rugi daya sistem tidak lagi berkurang namun mengalami tren kenaikan hingga melebihi rugi-rugi sistem tanpa DG.



Gambar 4. 36 Perbandingan Rugi-rugi Daya oleh Metode *K-means Clustering* dan Urutan Prioritas LSF pada Sistem IEEE 69 Bus

Gambar 4.36 menunjukkan perbandingan rugi-rugi daya akibat pemasangan *single* hingga *multi* DG pada lokasi dan kapasitas yang ditentukan oleh metode *K-means clustering* dan urutan prioritas LSF. Dari Gambar 4.35 dapat ditunjukkan bahwa metode *K-means clustering* menghasilkan penurunan rugi-rugi daya yang lebih besar dibanding metode urutan prioritas LSF. Hal ini dikarenakan oleh perbedaan teknik dalam menentukan lokasi pemasangan DG pada sistem.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis data yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penelitian ini:

1. Total rugi-rugi daya paling minimum pada sistem IEEE 33 bus akibat pemasangan DG dengan lokasi dan kapasitas yang ditentukan oleh metode *K-means clustering* adalah sebesar 25,3272 kW atau turun sebesar 87,5%.
2. Jumlah DG optimal yang dapat dipasang pada sistem IEEE 33 bus untuk perbaikan rugi-rugi daya paling minimum akibat pemasangan DG dengan lokasi dan kapasitas yang ditentukan oleh metode *K-means clustering* adalah 5 unit dengan level penetrasi DG mencapai 103,89%.
3. Total rugi-rugi daya paling minimum pada sistem IEEE 69 bus akibat pemasangan DG dengan lokasi dan kapasitas yang ditentukan oleh metode *K-means clustering* adalah sebesar 67,4816 kW atau turun sebesar 69,84%.
4. Jumlah DG optimal yang dapat dipasang pada sistem IEEE 69 bus untuk perbaikan rugi-rugi daya paling minimum akibat pemasangan DG dengan lokasi dan kapasitas yang ditentukan oleh metode *K-means clustering* adalah 5 unit dengan level penetrasi DG mencapai 114,47%.
5. Metode *K-means clustering* mampu menentukan lokasi dan kapasitas DG lebih optimal untuk menurunkan rugi-rugi daya lebih minimum pada sistem IEEE 33 bus yaitu sebesar 87,5% dibandingkan dengan metode urutan prioritas LSF yaitu sebesar 76,77%.
6. Metode *K-means clustering* mampu menentukan jumlah DG dengan level penetrasi lebih optimal untuk menurunkan rugi-rugi daya lebih minimum pada sistem IEEE 33 bus yaitu 5 unit DG dan level penetrasi DG sebesar 103,89% dibandingkan dengan metode urutan prioritas LSF yaitu 3 unit dengan level penetrasi DG sebesar 102,96%.
7. Metode *K-means clustering* mampu menentukan lokasi dan kapasitas DG lebih optimal untuk menurunkan rugi-rugi daya

lebih minimum pada sistem IEEE 69 bus yaitu sebesar 69,84% dibandingkan dengan metode urutan prioritas LSF yaitu sebesar 65,95%.

8. Metode *K-means clustering* mampu menentukan jumlah DG dengan level penetrasi lebih optimal untuk menurunkan rugi-rugi daya lebih minimum pada sistem IEEE 69 bus yaitu 5 unit DG dan level penetrasi DG sebesar 114,47% dibandingkan dengan metode urutan prioritas LSF yaitu 1 unit dengan level penetrasi DG sebesar 43,11%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangann penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk penelitian lebih lanjut dapat dikembangkan metode analisis aliran daya untuk sistem distribusi tidak seimbang.
2. Untuk penelitian lebih lanjut dapat dikembangkan penentuan lokasi dan kapasitas DG optimal pada sistem kelistrikan nyata.
3. Untuk penelitian lebih lanjut perlu dipertimbangkan teknis pemasangan DG yang nyata seperti biaya investasi pemasangan DG.
4. Untuk penelitian lebih lanjut perlu dianalisis pemodeelan DG yang lain seperti PV model.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Kumar, D. Pal, K. Mandal K and N. Chakraborty, "Optimal Allocation of Multiple DG Units in Radial Distribution System Using Modified Differential Evolution Evolution Technique," *International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication, IEEE*, 2014.
- [2] R. Florina, C. Gianfranco, G. Gheorghe and C. Gheorghe, "Two-Stage Distributed Generation Optimal Sizing with Clustering-Based Node Selection," *Electrical Power and Energy System, ELSEVIER*, vol. 40, pp. 120-129, 2012.
- [3] E. Salem, B. Mohammed and M. Joydeep, "Analytical Approach for Placement and Sizing of Distributed Generation on Distribution System," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 6, pp. 1039-1049, 2014.
- [4] S. Hadi, *Power System Analysis*, WCB McGraw-Hill, 1999.
- [5] K. William, *Distribution System Modelling and Analysis*, CRC Press, 2002.
- [6] T. Jen-Hao, "A Network-Topology-Based Three-Phase Load FLOW for Distribution System," *Proc. Natl. Sci. Council. ROC(A)*, vol. 24, no. 4, pp. 259-264, 1999.
- [7] Q. H. Duong and M. Nadarajah, "Multiple Distributed Generator Placement in Primary Distribution Networks for Loss Reduction," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, 2013.
- [8] T. Avisha and D. Debapriya, "Novel Analytical Method for The Placement and Sizing of Distributed Generation Unit on Distribution Networks with and without Considering P and PQV buses," *Electrical Power and Energy Systems, ELSEVIER*, vol. 78, pp. 401-413, 2015.
- [9] N. Acharya, M. Pukar and M. N, "An Analytical Approach for DG Allocation in Primary Distribution Network," *Electrical Power and Energy Systems, ELSEVIER*, vol. 28, pp. 669-678, 2006.
- [10] T. Ackermann, G. Anderson and L. Soder, "Distributed Generation: A Definition," *Electric Power System Research*, 2000.
- [11] D. Johan and B. Rennie, "Distributed Generation in Future Grid," *Kuleuven-ESAT/ELECTA*, 2003.

- [12] D. S.G Bharathi and R. S. Selvi, "Optimal Siting and Sizing of Hybrid Distributed Generation using EP," *Third International Conference on Power System*, 2009.
- [13] N. J. Karunakar, K. Rosalina and K. N. Prema, "Clustering Analysis and Its Application in Electrical Distribution System," *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems (IJECS)*, vol. 1, pp. 2347-2828, 2013.
- [14] S. Florina, G. Gheorghe, C. Gianfranco and C. Gheorghe, "Using K-Means Clustering Method in Determination of The Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Electrical Distribution Systems," *IEEE*, 2012.
- [15] K. Trupti M. and M. Prashant R, "Review on Determining Number of Cluster in K-Means Clustering," *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 2013.
- [16] H. Duong Quoc and M. Nadarajah, "Analytical Expressions for DG Allocation in Primary Distribution Networks," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, 2010.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Taufani Kurniawan, merupakan anak terakhir dari empat bersaudara. Dilahirkan pada 29 Juni 1995 di Kota Malang oleh pasangan Ibu Siti Nurjanah dan Bapak Andi Mujianto. Mengawali pendidikan di SD Muhammadiyah 8 KH Mas Mansur Malang sampai tahun 2007 kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengahnya di SMPN 3 Malang sampai tahun 2010 dan melanjutkan pendidikan menengah atasnya di SMAN 1 Malang 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. Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis aktif di organisasi sebagai bagian dari Departemen Komunikasi dan Informasi HIMATEKTRO ITS selama dua kepengurusan dan juga aktif sebagai asisten di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik B103. Penulis dapat dihubungi melalui email taufanikurniawan@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan