

**OPTIMISASI INJEKSI *DISTRIBUTED GENERATION*
MENGUNAKAN ALGORITMA *CAT SWARM OPTIMIZATION*
DAN *KRILL HERD ALGORITHM***

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
MINAT SISTEM TENAGA LISTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



**GALUH PRAWESTRI CITRA HANDANI
NIM. 156060300111011**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**

TESIS

OPTIMISASI INJEKSI *DISTRIBUTED GENERATION* MENGUNAKAN ALGORITMA *CAT SWARM OPTIMIZATION* DAN *KRILL HERD ALGORITHM*

GALUH PRAWESTRI CITRA HANDANI
NIM. 156060300111011

Telah dipertahankan di depan penguji
pada Tanggal : **20 Desember 2019**
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Komisi Pembimbing,

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

Malang,

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro
Ketua Program Magister **Teknik Elektro**

Dr.Eng. Panca Mudjirahardjo, S.T., M.T.
NIP. 197003292000121001

JUDUL TESIS :

OPTIMISASI INJEKSI *DISTRIBUTED GENERATION* MENGGUNAKAN ALGORITMA *CAT SWARM OPTIMIZATION* DAN *KRILL HERD ALGORITHM*

Nama Mahasiswa : Galuh Prawestri Citra Handani
NIM : 156060300111011
Program Studi : Program Magister Teknik Elektro
Minat : Sistem Tenaga Listrik

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM.
Anggota : Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Ir. Wijono, M.T., Ph.D.
Dosen Penguji 2 : Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE.
Tanggal Ujian : 20 Desember 2019
SK Penguji : 2645 Tahun 2019

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan Saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran Saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, Saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 30 Desember 201
Mahasiswa,

Nama : **GALUH PRAWESTRI CITRA HANDANI**
NIM : **156060300111011**
PM : **TEKNIK ELEKTRO**
PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO



*Karya ilmiah ini kutujukan kepada
Ayahanda dan Ibunda tercinta,
Kakak dan adikku tersayang*

RIWAYAT HIDUP



Galuh Prawestri Citra Handani, 26 Januari 1991 anak dari Ayah Bambang Rachmad Basuki dan Ibu Woro Sri Wilujeng. Sekolah Dasar di SDN Kauman I Malang, Sekolah Menengah Pertama di SMPN 3 Malang, Sekolah Menengah Atas di SMAN 4 Malang. Studi Program Sarjana di Program Studi Teknik Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada tahun 2009-2014. Pengalaman kerja sebagai asisten laboratorium di Laboratorium Elektronika Daya, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2011-2013. Melanjutkan studi program Magister di Program Magister Sistem Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang pada tahun 2015.

Malang, Desember 2019

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, puji syukur dipanjatkan atas kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis ini dapat terselesaikan dengan baik atas bantuan dari berbagai pihak yang mendukung penulis dalam melakukan penelitian. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT, yang telah memberi kekuatan dan nikmat tanpa batas.
2. Kedua orang tua, Bambang Rachmad Basuki dan Woro Sri Wilujeng, yang selalu mendoakan, memberi kasih sayang, dan memberi restu di tiap langkah perbuatan penulis.
3. Kakakku Gilang dan adikku Citra, yang selalu menemani dan mendukung semua kegiatan penulis.
4. Bapak Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. dan Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing yang senantiasa meluangkan waktu di tengah kesibukan untuk memberi saran, bimbingan, serta motivasi bagi penulis.
5. Bapak Ir. Wijono, M.T., Ph.D. dan Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE., selaku dosen penguji yang selalu memberi saran untuk memperbaiki kekurangan yang ada pada tesis ini.
6. Bapak Dr.Eng. Panca Mudjirahardjo, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro yang selalu memberi kemudahan dalam rangka penyempurnaan tesis ini.
7. Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro, yang telah memberi ilmu dan membantu dalam pengurusan administrasi perkuliahan.
8. Teman-teman angkatan 2009 Jurusan Teknik Elektro.
9. Teman-teman angkatan 2015 Program Studi Magister Teknik Elektro.
10. Teman-teman STL, Agung, Adi, Haris, Mas Seno, Bang Udin, Kino, Alvin, Ruli, Mas Rozi, Mas Baihaqi, Mbak Hani, Mbak Kumala, dan teman-teman lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Terima kasih atas bantuan, dukungan, dan semangatnya untuk penulis.

Terima kasih banyak atas kesempatan yang diberikan bagi penulis, semoga Allah SWT selalu membalas segala kebaikan semuanya.

RINGKASAN

Galuh Prawestri Citra Handani, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2019, *Optimisasi Injeksi Distributed Generation Menggunakan Algoritma Cat Swarm Optimization dan Krill Herd Algorithm*, Dosen Pembimbing : Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. and Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.

Pemanfaatan energi listrik sebagai upaya menciptakan *green energy* memerlukan suatu tindakan yang mendukung produksi energi yang efisien dengan menggunakan satu atau lebih energi alternatif yang dapat digabungkan menjadi sumber energi terdistribusi. Permasalahan pokok permintaan sumber energi yang semakin meningkat adalah keandalan sistem dan kualitas daya. Kualitas daya berkaitan dengan pengurangan nilai rugi-rugi daya listrik, berkurangnya nilai jatuh tegangan serta kontinuitas penyaluran energi listrik yang baik.

Penambahan *distributed generation* (DG) pada sistem *eksisting* dinilai mampu mengurangi permasalahan kualitas daya dan meningkatkan keandalan sistem. Penelitian ini membahas optimisasi injeksi DG dengan menggunakan algoritma *Cat Swarm Optimization* dan *Krill Herd Algorithm*. Optimalisasi dilakukan dengan menginjeksikan DG pada sistem *eksisting* dengan menerapkan 4 skenario pembebanan, yakni pembebanan 20 % dengan 1 lokasi bus, 30 % dengan 2 lokasi bus, 40 % dengan 3 lokasi bus, dan 50 % dengan 4 lokasi bus.

Rugi daya aktif dan reaktif sebelum adanya injeksi DG sebesar 0,314 MW dan 0,235 MVAR. Optimisasi menggunakan skenario 1 algoritma CSO dan KHA menghasilkan nilai rugi daya dan lokasi bus yang sama. Skenario 2, CSO menghasilkan rugi daya aktif sebesar 2,01 %, sedangkan KHA sebesar 1,27 %. Skenario 3, prosentase rugi daya aktif CSO adalah 0,18 % dan KHA 0,13 %. Skenario 4, menghasilkan perbedaan rugi daya aktif CSO dan KHA masing-masing sebesar 0,13 % dan 0,08 %. Peningkatan profil tegangan CSO dan KHA dinilai sesuai dengan standar yaitu $0,90 \text{ p.u} \leq V_{\text{bus}} \leq 1,1 \text{ p.u}$. Penerapan kedua algoritma dapat mengurangi rugi daya sistem dan memperbaiki profil tegangan. Algoritma KHA memiliki waktu *running* iterasi yang lebih lama daripada CSO, namun KHA dinilai lebih baik daripada algoritma CSO karena menghasilkan pengurangan rugi daya yang lebih signifikan daripada CSO.

Kata Kunci : *Distributed Generation, Cat Swarm Optimization, Krill Herd Algorithm, rugi daya listrik.*

SUMMARY

Galuh Prawestri Citra Handani, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, December 2019, Distributed Generation Injection Optimization Using the Cat Swarm Optimization Algorithm and the Krill Herd Algorithm, Academic Supervisor : Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. and Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.*

The use of electricity as an effort to create green energy requires an action that supports efficient energy production by using one or more alternative energy that can be combined into a distributed energy source. The main problems of increasing demand for energy sources are system reliability and power quality. Power quality is associated with reducing the value of electrical power losses, reducing the voltage drop and the continuity of good electrical energy distribution.

The addition of distributed generation (DG) in existing systems is considered capable of reducing power quality problems and increasing system reliability. This study discusses the optimization of DG placement using the Cat Swarm Optimization algorithm and Krill Herd Algorithm. Optimization is done by injecting DG into the existing system by applying 4 loading scenarios, namely loading 20% with 1 bus location), 30% with 2 bus locations, 40% with 3 bus locations, and 50% with 4 bus locations.

Active and reactive power losses prior to DG injection of 0.314 MW and 0.235 MVAR. Optimization using scenario 1 of CSO and KHA algorithm results in the same power loss and bus location. Scenario 2, CSO produces an active power loss of 2.01%, while the KHA is 1.27%. Scenario 3, the percentage of active CSO power loss is 0.18% and KHA 0.13%. Scenario 4 produces a difference in the active power loss of CSO and KHA respectively 0.13% and 0.08%. The increase in the CSO and KHA stress profiles was assessed according to the standard of $0.95 \text{ p.u.} \leq V_{\text{bus}} \leq 1.05 \text{ p.u.}$ The application of both algorithms can reduce system power losses and improve voltage profiles. The KHA algorithm has a longer iteration running time than CSO, but the KHA is judged to be better than the CSO algorithm because it results in a more significant reduction in power loss than CSO.

Keywords : Distributed Generation, Cat Swarm Optimization, electrical power losses, Krill Herd Algorithm.

PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Optimisasi Injeksi *Distributed Generation* Menggunakan Algoritma *Cat Swarm Optimization* dan *Krill Herd Algorithm*” dengan baik. Tesis ini disusun untuk menyelesaikan Studi Magister di Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.

Dalam penyusunan tesis ini, tidak sedikit hambatan yang dihadapi penulis. Namun penulis menyadari bahwa kelancaran dalam penyusunan tesis ini tidak lain berkat bantuan, dorongan, serta bimbingan orang tua, dosen pembimbing, dan juga berbagai pihak sehingga kendala-kendala yang penulis hadapi dapat teratasi.

Penyusunan tesis ini masih terdapat banyak kekurangan, semua karena keterbatasan wawasan penulis. Penulis menyadari bahwa makalah ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Namun, penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat yang lebih luas bagi para pembaca khususnya bagi yang akan melakukan penelitian lanjutan.

Malang, Desember 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	i
IDENTITAS TIM PENGUJI	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS	iii
HALAMAN PERUNTUKAN	iv
RIWAYAT HIDUP	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
RINGKASAN	vii
<i>SUMMARY</i>	viii
PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Sumber Daya Energi	11
2.3 Sistem Tenaga Listrik	12
2.4 Sistem Transmisi	14
2.4.1 Peralatan Utama Saluran Transmisi	14
2.4.2 Parameter Saluran Transmisi	17
2.5 Sistem Distribusi	19
2.5.1 Gardu Induk	20
2.5.2 Sistem Distribusi Primer	20



2.5.3	Transformator Distribusi	22
2.5.4	Sistem Distribusi Sekunder	22
2.6	Studi Aliran Daya	23
2.6.1	Aliran Daya algoritma Newton Raphson	25
2.7	<i>Distributed Generation (DG)</i>	27
2.8	Algoritma	29
2.9	<i>Swarm Intelligence</i>	30
2.9.1	<i>Cat Swarm Optimization</i>	31
2.9.2	<i>Krill Herd Algorithm</i>	35
BAB III	KERANGKA KONSEP PENELITIAN	41
3.1	Kerangka Fikir	41
3.2	Variabel Penelitian	42
3.3	Hipotesis	44
BAB IV	METODE PENELITIAN	45
4.1	Studi Literatur	46
4.2	Pengumpulan Data	46
4.3	Perancangan Algoritma Injeksi	46
BAB V	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	57
5.1	Lokasi Penelitian	57
5.2	Data Sistem Distribusi Penyulang Pujon	59
5.3	Aliran Daya Sistem Eksisting Sebelum Injeksi DG	61
5.4	Optimisasi Injeksi <i>Distributed Generation</i>	64
5.4.1	Optimisasi Injeksi DG dengan Algoritma CSO	67
5.4.2	Optimisasi Injeksi DG dengan Algoritma KHA	76
5.5	Analisis Perbandingan Algoritma CSO dan KHA	85
BAB IV	KESIMPULAN DAN SARAN	89
6.1	Kesimpulan	89
6.2	Saran	89
DAFTAR PUSTAKA	891

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Tipe Bus Dalam Sistem Tenaga Listrik	25
Tabel 2.2	Klasifikasi <i>Distributed Generation</i>	28
Tabel 2.3	Teknologi untuk Distributed Generation	28
Tabel 4.1	Representasi Algoritma CSO dalam Penentuan Lokasi Injeksi DG	50
Tabel 4.2	Representasi Algoritma KHA dalam Penentuan Lokasi Injeksi DG ...	54
Tabel 5.1	Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Sistem Eksisting Sebelum Injeksi DG dengan Kondisi 3 Pembebanan	62
Tabel 5.2	Nilai Parameter <i>Cat Swarm Optimization</i>	67
Tabel 5.3	Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 1	68
Tabel 5.4	Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 2	69
Tabel 5.5	Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 3	71
Tabel 5.6	Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 4	73
Tabel 5.7	Nilai Parameter <i>Krill Herd Algorithm</i>	76
Tabel 5.8	Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 1	76
Tabel 5.9	Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 2	78
Tabel 5.10	Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 3	80
Tabel 5.11	Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 4	82
Tabel 5.12	Hasil Perbandingan Algoritma CSO dan KHA	86

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Gambaran umum sistem tenaga listrik.....	12
Gambar 2.2	<i>Single Line Diagram</i> Penyaluran Energi Listrik dari Pusat Pembangkit ke GI	13
Gambar 2.3	Garis-garis flux listrik yang berasal dari muatan-muatan positif yang tersebar secara seragam di seluruh permukaan suatu penghantar silinder yang terpisah	18
Gambar 2.4	<i>Seeking mode</i>	31
Gambar 2.5	<i>Tracing mode</i>	33
Gambar 2.6	<i>Flowchart</i> algoritma CSO	34
Gambar 2.7	Representasi pergerakan <i>krill</i>	35
Gambar 2.8	<i>Flowchart</i> algoritma KHA	40
Gambar 3.1	Kerangka konsep penelitian	43
Gambar 4.1	Diagram alir metodologi penelitian	45
Gambar 4.2	Diagram aliran daya Newton Raphson	48
Gambar 4.3	Diagram alir optimisasi injeksi DG dengan CSO	52
Gambar 4.4	Diagram alir optimisasi injeksi DG dengan KHA	54
Gambar 5.1	<i>Single line</i> diagram Gardu Induk Sengkaling	57
Gambar 5.2	<i>Single line</i> diagram Penyulang Pujon	58
Gambar 5.3	Profil tegangan bus untuk masing-masing kondisi beban	63
Gambar 5.4	<i>Single line</i> diagram sistem 2 bus	64
Gambar 5.5	Profil tegangan bus dengan algoritma CSO untuk skenario 1	68
Gambar 5.6	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 1	69
Gambar 5.7	Profil tegangan bus dengan algoritma CSO untuk skenario 2	70
Gambar 5.8	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 2	71
Gambar 5.9	Profil tegangan bus dengan algoritma CSO untuk skenario 3	72
Gambar 5.10	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 3	73
Gambar 5.11	Profil tegangan bus dengan algoritma CSO untuk skenario 4	75
Gambar 5.12	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 4	75
Gambar 5.13	Profil tegangan bus dengan algoritma KHA untuk skenario 1	77
Gambar 5.14	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 1	78



Gambar 5.15	Profil tegangan bus dengan algoritma KHA untuk skenario 2	79
Gambar 5.16	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 2	80
Gambar 5.17	Profil tegangan bus dengan algoritma KHA untuk skenario 3	82
Gambar 5.18	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 3	82
Gambar 5.19	Profil tegangan bus dengan algoritma KHA untuk skenario 4	84
Gambar 5.20	<i>Losses</i> per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 4	85
Gambar 5.21	Hasil perbandingan skenario dengan algoritma CSO dan KHA	87
Gambar 5.22	Hasil perbandingan tegangan sebelum injeksi dengan algoritma CSO dan KHA	88



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran A.	<i>Single Line Diagram</i>	95
Lampiran A.1	<i>Single Line Diagram</i> Gardu Induk Sengkaling	96
Lampiran A.2	<i>Single Line Diagram</i> Penyulang Pujon	97
Lampiran A.3	<i>Single Line Diagram</i> Penyulang Pujon Menggunakan ETAP 12.6.0.	98
Lampiran B	Karakteristik Saluran dan Data Pembebanan Penyulang Pujon ...	99
Lampiran B.1	Kapasitas Transformator dan Beban Penyulang Pujon	100
Lampiran B.2	Karakteristik Saluran Penyulang Pujon	102
Lampiran C.	Hasil Perhitungan Karakteristik Saluran dan Hasil Perhitungan Pembebanan Penyulang Pujon dalam per unit	105
Lampiran C.1	Hasil Perhitungan Resistansi dan Reaktansi dalam Satuan per unit	106
Lampiran C.2	Hasil Perhitungan Daya Aktif dan Reaktif untuk Beban Minimum dalam Satuan per unit	109
Lampiran C.3	Hasil Perhitungan Daya Aktif dan Reaktif untuk Beban Rata-Rata dalam Satuan per unit	111
Lampiran C.4	Hasil Perhitungan Daya Aktif dan Reaktif untuk Beban Maksimum dalam Satuan per unit	113
Lampiran D	<i>Script</i> Matlab	115
Lampiran D.1	<i>Script</i> untuk menghitung rugi daya pada kondisi beban maksimum	116
Lampiran D.2	<i>Script</i> Algoritma CSO	121
Lampiran D.3	<i>Script</i> Algoritma KHA	124
Lampiran E	Hasil Perhitungan Aliran Daya	130
Lampiran E.1	Hasil Perhitungan Aliran Daya untuk beban minimum	131
Lampiran E.2	Hasil Perhitungan Aliran Daya untuk beban rata-rata	134
Lampiran E.3	Hasil Perhitungan Aliran Daya untuk beban maksimum	137
Lampiran E.4	Hasil Optimisasi Skenario 1 Penempatan DG dengan Metode <i>Cat Swarm Optimization</i>	140



Lampiran E.5 Hasil Optimisasi Skenario 2 Penempatan DG dengan Metode <i>Cat Swarm Optimization</i>	143
Lampiran E.6 Hasil Optimisasi Skenario 3 Penempatan DG dengan Metode <i>Cat Swarm Optimization</i>	146
Lampiran E.7 Hasil Optimisasi Skenario 4 Penempatan DG dengan Metode <i>Cat Swarm Optimization</i>	149
Lampiran E.8 Hasil Optimisasi Skenario 1 Penempatan DG dengan Metode <i>Krill Herd Algorithm</i>	152
Lampiran E.9 Hasil Optimisasi Skenario 2 Penempatan DG dengan Metode <i>Krill Herd Algorithm</i>	155
Lampiran E.10 Hasil Optimisasi Skenario 3 Penempatan DG dengan Metode <i>Krill Herd Algorithm</i>	158
Lampiran E.11 Hasil Optimisasi Skenario 4 Penempatan DG dengan Metode <i>Krill Herd Algorithm</i>	161



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan kebutuhan pokok yang sangat berpengaruh terhadap kelangsungan hidup bagi makhluk hidup. Semakin meningkatnya populasi manusia setiap tahunnya, secara bertahap akan berdampak pada upaya pemenuhan kebutuhan energi yang terus meningkat. Di Indonesia sumber utama pemenuhan kebutuhan energi listrik masih berasal dari energi konvensional karena ditinjau dari sisi harga yang relatif lebih murah. Energi konvensional merupakan energi yang berasal dari fosil yang tidak dapat diperbarui kembali dan jumlahnya terbatas. Karena semakin menipisnya ketersediaan sumber energi dari fosil, maka mulai dilakukan upaya pemberdayaan potensi alam yang dapat dimanfaatkan untuk energi alternatif. Energi alternatif merupakan sumber energi yang jumlahnya tidak terbatas dan dapat diperbarui kembali.

Berbagai sumber daya yang tersedia di alam merupakan energi primer yang dapat dikembangkan maupun dikonversi menjadi energi sekunder, salah satunya energi listrik. Secara umum penggunaan energi listrik masih kurang efisien, oleh karena perlu dilakukan proses manajemen energi dan penambahan sumber daya energi. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2012 menyatakan bahwa “Manajemen Energi adalah kegiatan terpadu untuk mengendalikan konsumsi energi agar tercapai pemanfaatan energi yang efektif dan efisien untuk menghasilkan keluaran yang maksimal melalui tindakan teknis secara terstruktur dan ekonomis untuk meminimalisasi pemanfaatan energi termasuk energi untuk proses produksi dan meminimalisasi konsumsi bahan baku dan bahan pendukung” (p.2). Disamping proses manajemen energi, penambahan sumber daya energi dapat dilakukan dengan membangun pembangkit tenaga listrik konvensional untuk menunjang ketersediaan energi listrik.

Pemerintah mengatur penggunaan energi melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional yang bertujuan untuk mewujudkan keamanan pasokan energi nasional dengan konservasi sumber daya energi dan diversifikasi energi. Salah satu solusi yang dapat digunakan adalah dengan melakukan interkoneksi sistem tenaga listrik dengan mengintegrasikan pembangkit tenaga listrik yang ada dengan sumber energi terbarukan.

Integrasi ini dikenal dengan istilah *Distributed Generation* (DG) atau pembangkit tersebar. DG menggunakan generator yang memiliki kapasitas daya lebih kecil dari pembangkit utama dan cenderung lebih dekat dengan beban serta menggunakan satu atau beberapa sumber energi terbarukan yang dihubungkan pada jaringan distribusi. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 53 Tahun 2018 menyatakan bahwa “Sumber Energi Terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika dikelola dengan baik, antara lain panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut” (p.4). Permasalahan pokok selain permintaan sumber energi yang semakin meningkat adalah keandalan sistem dan kualitas daya. Kualitas daya berkaitan dengan pengurangan nilai rugi-rugi daya listrik, berkurangnya nilai jatuh tegangan serta kontinuitas penyaluran energi listrik yang baik. Penambahan DG pada sistem *eksisting* dinilai mampu mengurangi permasalahan kualitas daya dan meningkatkan keandalan sistem.

Penambahan DG harus memperhatikan aspek teknis maupun aspek ekonomi yang berkaitan dengan biaya. Aspek teknis berkaitan dengan injeksi yang optimal menggunakan metode penelitian yang tepat. Metode penelitian merupakan cara meneliti dalam bentuk kegiatan yang bersifat rasional, empiris, dan sistematis untuk memperoleh data dan mencapai tujuan tertentu (Sugiyono, 2014, p.2). Saat ini banyak metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi berkaitan dengan algoritma, yang terdiri dari algoritma heuristik dan metaheuristik. Heuristik merujuk pada proses menemukan dan mendapatkan sesuatu berdasarkan pengalaman yang didapat sebelumnya (Conny, 2010, p.90). Metaheuristik merupakan proses menyelesaikan masalah dengan memberikan solusi yang terbaik dalam waktu yang sesuai. Metaheuristik terdiri dari dua kriteria utama yaitu difersifikasi (pencarian suatu solusi) dan intensifikasi (pemanfaatan solusi yang ditemukan) (El-Ghazali, 2009, p.15).

Analisis untuk alokasi injeksi DG pada jaringan distribusi dilakukan oleh Hung, Mithulanathan, dan Bansal (2010). Penelitian mengusulkan tentang analisis untuk mendapatkan kapasitas dari pembangkit tersebar pada tiga sistem uji. Algoritma yang digunakan adalah analisis peningkatan (*Improving the Analytical / IA*) dan aliran beban lengkap (*Exhaustive Load Flow / ELF*). Sistem uji yang pertama adalah sistem radial, 16 bus dengan total daya aktif dan daya reaktif beban masing-masing adalah 28,7 MW dan 5,9 MVAR. Sistem kedua adalah sistem distribusi radial, 33 bus yang memiliki total daya aktif beban sebesar 3,7 MW dan daya reaktif beban yaitu 2,3 MVAR. Sistem yang ketiga yaitu

sistem radial 69 bus dengan total daya aktif dan daya reaktif beban adalah 3,8 MW dan 2,69 MVAR. Dari hasil penelitian, kerugian total dengan IA sedikit lebih besar daripada ELF dan lokasi terbaik DG berdasarkan kerugian terkecil terletak pada bus 9, 6, dan 61.

Penelitian tersebut dikembangkan kembali oleh Hung dan Mithulanathan (2013) dengan menempatkan beberapa DG dengan mengusulkan tambahan algoritma yaitu *Loss Sensitivity Factor* (LSF). Algoritma IA berfokus untuk mengetahui keefektivitasan dan penerapan algoritma, sedangkan algoritma LSF dan ELF untuk mengalokasikan beberapa unit DG yang digunakan. LSF memberikan keuntungan dalam perhitungan pengurangan rugi daya yang signifikan serta waktu komputasi yang lebih singkat jika dibandingkan dengan ELF.

Penjadwalan dan injeksi yang optimal *distributed generation* menggunakan algoritma *Evolutionary Programming* (EP) oleh Nerves & Roncesvalles (2009) diterapkan pada sistem uji 69 bus. Ukuran dan lokasi optimum DG dilakukan dengan meminimalkan biaya kerugian sistem. Algoritma EP menjelaskan tentang pengambilan keputusan yang didasarkan pada aliran daya dan analisis biaya (keuntungan) menggunakan perbandingan antara pengurangan kerugian sistem dengan kapasitas DG. Dalam penentuan lokasi yang optimal, bus yang mengakibatkan pengurangan terbesar kerugian sistem atau mengakibatkan kerugian terkecil dibandingkan dengan keadaan *default* tanpa adanya DG yang terpasang.

Penelitian dengan menggunakan algoritma pendekatan *swarm* (sekawanan) mulai banyak dikembangkan, salah satunya oleh El-Zonkoly (2011) yang menggunakan algoritma *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). DG yang digunakan sejumlah 3 unit yang diterapkan pada sistem radial 38 bus dan IEEE 30 bus. Dari hasil pengujian, algoritma PSO menghasilkan penurunan nilai rugi daya aktif yang lebih besar daripada algoritma GA.

Bhumkittipich & Phuangpornpitak (2013) juga menerapkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada sistem distribusi radial, 26 bus Thailand dengan menempatkan sebuah *distributed generation* yaitu *photovoltaic*. Alasan penggunaan PV karena penyinaran matahari yang sangat baik jika dibandingkan sumber daya lainnya. Dari hasil optimisasi diperoleh bus 14 yang merupakan bus paling optimal dengan kapasitas DG sebesar 6,9486 MW.

Masalah optimisasi dapat juga diibaratkan sebagai distribusi geografi dari spesies biologi dalam algoritma *Biogeography Based Optimization* (BBO) (Vizhiy & Santhi, 2016). Hasil BBO berdasarkan pencarian terbaik dari migrasi dan mutasi spesies biologi dalam hal

injeksi DG yang diujikan pada sistem 33 bus. Dengan menerapkan BBO dapat meminimalkan rugi daya aktif, memperoleh profil tegangan yang lebih baik, serta mengurangi biaya operasi.

Hakim (2016) melakukan studi mengenai pembangkit listrik tenaga *hybrid* dengan menggabungkan potensi angin dan surya yang potensinya cukup besar di daerah Batu. Sistem *hybrid* ini dihubungkan dengan sistem jala-jala 20 kV Penyulang Pujon dan diharapkan dapat memperbaiki drop tegangan. Dengan menggunakan algoritma analisis *Weibull*, drop tegangan yang dapat diperbaiki sebesar 5,15 % dan dari sisi ekonomi dapat memberikan keuntungan sebesar 4,1 % dari biaya investasi.

Algoritma lain pendekatan *swarm* yaitu *Cat Swarm Optimization* (CSO) (Hwang, 2010). Penelitian yang diusulkan yaitu penerapan algoritma CSO untuk *economic dispatch* dari sistem pembangkitan hibrida. CSO dibandingkan dengan algoritma PSO, dimana CSO menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada PSO. Hasil menunjukkan bahwa CSO lebih cepat konvergen pada pemilihan *economic dispatch* yang optimal, manajemen beban, dan untuk menurunkan biaya listrik pada industri Taiwan.

Meziane (2015) menggunakan algoritma CSO untuk mengetahui keandalan optimisasi *hybrid* solar dan gas di Aljazair, dimana implementasi tenaga surya masih sangat terbatas. Pemanfaatan surya sebagai sumber energi bergantung pada ketersediaan sinar matahari dan iklim. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, pemanfaatan solar kurang efektif dalam memenuhi kebutuhan listrik yang diinginkan sehingga perlu di*hybrid* dengan gas.

Algoritma pendekatan *Krill Herd Algorithm* (KHA) digunakan untuk injeksi DG dalam sistem distribusi radial oleh Sultana & Roy (2016). Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan rugi daya aktif dalam saluran distribusi dengan mempertahankan tegangan bus dalam batas tertentu. Dalam hal ini, KHA juga dibandingkan dengan algoritma GA dan PSO untuk mengetahui solusi yang terbaik.

ChithraDevi (2017) menjelaskan bahwa KHA didasarkan pada pergerakan udang yang bergantung pada jarak makanan dan kepadatan tertinggi dari populasi. Solusi optimal dilakukan dengan pemilihan indukan terbaik dan perubahan dari satu aktivitas ke aktivitas lainnya. KHA diimplementasikan pada sistem uji IEEE 33 bus, 69 bus dan sistem distribusi radial Portugis 94 bus dengan menggunakan 3 unit DG. Optimisasi ini dijalankan sebanyak 15 kali percobaan untuk mendapatkan nilai konvergen yang lebih baik daripada 10 kali percobaan. Hasil yang didapatkan menunjukkan tingkat keefektifan dengan berkurangnya rugi-rugi daya aktif dan reaktif, serta meningkatkan profil tegangan.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini berfokus pada penentuan lokasi DG menggunakan algoritma pendekatan *Cat Swarm Optimization* (CSO) dan *Krill Herd Algorithm* (KHA). CSO dikembangkan oleh Chu dan Tsai pada tahun 2006, dengan mengamati perilaku kucing dan harimau sedangkan KHA dikembangkan oleh Gandomi dan Alavi pada tahun 2012 mengadaptasi pergerakan udang. Penggunaan CSO dan KHA berkaitan dengan populasi, evolusi biologis, dan pengamatan perilaku spesies. Pemilihan algoritma CSO karena menurut pemaparan dan penelitian yang telah dilakukan, algoritma ini memiliki tingkat keefektifan dalam penentuan nilai mendekati nilai yang diinginkan daripada penggunaan PSO. Algoritma KHA juga digunakan dalam penelitian ini karena merupakan algoritma yang memiliki parameter nilai kompleks dalam pengoperasiannya. Selain itu, masih jarang penelitian yang menggunakan algoritma KHA jika dibandingkan dengan algoritma evolusioner lainnya. Operasi KHA yang kompleks memberi manfaat dalam penentuan lokasi DG dan menghasilkan konvergensi iterasi yang maksimal. Pada intinya, penggunaan kedua algoritma ini bertujuan untuk mendapatkan solusi optimal dalam memperbaiki kualitas daya serta diharapkan memberi dampak positif injeksi DG yang tepat.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini ditekankan pada :

1. Bagaimana rancangan skenario injeksi DG dengan menggunakan algoritma CSO dan KHA ?
2. Bagaimana perbandingan pengaruh rugi daya sebelum dan setelah injeksi DG pada sistem distribusi ?
3. Apa algoritma terbaik diantara CSO dan KHA yang paling optimal dalam mengurangi rugi daya listrik ?

1.3 Batasan Masalah

Penyusunan penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan menggunakan data sistem distribusi 20 kV pada GI Sengkaling Penyulang Pujon.
2. Mengingat adanya beberapa algoritma optimisasi, maka dalam penelitian ini yang digunakan adalah algoritma *Cat Swarm Optimization* (CSO) dan *Krill Herd Algorithm* (KHA).
3. Perancangan algoritma menggunakan *software* Matlab 2013b.

1.4 Tujuan

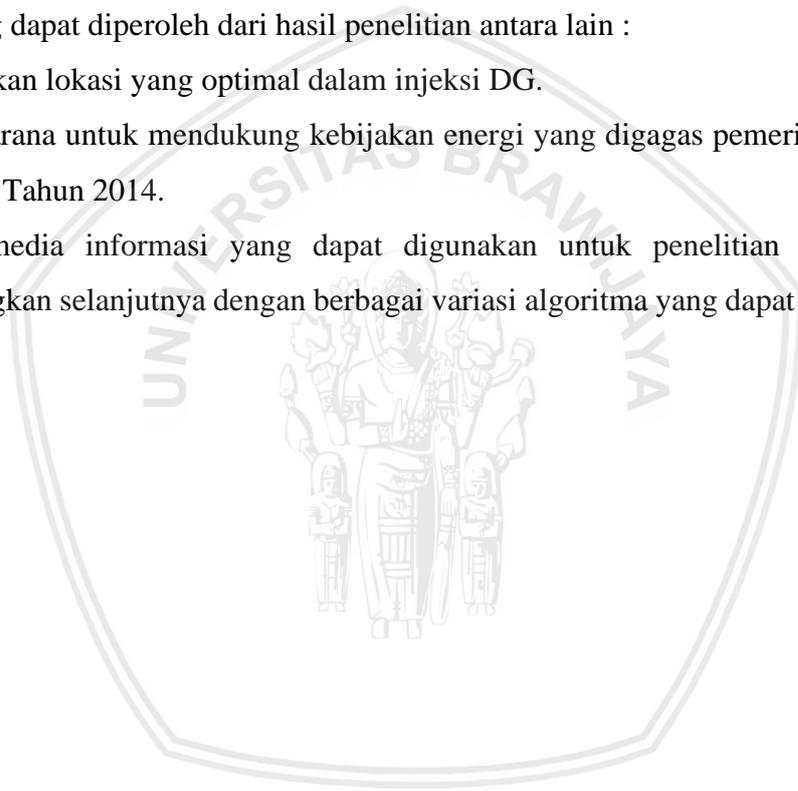
Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui rancangan skenario injeksi DG dengan menggunakan algoritma CSO dan KHA.
2. Mengetahui perbandingan dampak sistem *eksisting* terhadap rugi daya dan setelah dilakukan injeksi DG.
3. Menganalisis perbandingan kedua algoritma yang digunakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari hasil penelitian antara lain :

1. Mendapatkan lokasi yang optimal dalam injeksi DG.
2. Sebagai sarana untuk mendukung kebijakan energi yang digagas pemerintah dalam PP No. 79 Tahun 2014.
3. Sebagai media informasi yang dapat digunakan untuk penelitian yang akan dikembangkan selanjutnya dengan berbagai variasi algoritma yang dapat diterapkan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Injeksi *distributed generation* mempertimbangkan beberapa aspek antara lain panjang saluran, resistansi saluran, jumlah beban, jumlah DG, serta kapasitas DG. Berikut ini merupakan beberapa penelitian terdahulu dengan menggunakan algoritma yang berbeda, diantaranya yaitu :

Hung, 2010 melakukan penelitian pada 3 sistem distribusi radial 16 bus, 33 bus, dan 69 bus dengan menggunakan algoritma *Improving the Analytical* (IA) dan *Exhaustive Load Flow* (ELF). Sistem distribusi 16 bus, rugi dayanya sebesar 511,43 kW dan injeksi DG diletakkan pada bus 9. Algoritma ELF menghasilkan dengan kapasitas DG sebesar 13,1551 MVA, rugi dayanya adalah 164,01 kW. Algoritma IA, rugi daya yang diperoleh sebesar 164,02 kW dengan kapasitas DG 13,0877 MVA. Sistem uji yang kedua yaitu 33 bus, DG ditempatkan pada bus 6 dengan total rugi daya sebesar 211,20 kW. Kapasitas DG dengan ELF adalah 3,1034 MVA dan dengan IA yaitu 3,0247 MVA. Perbandingan rugi daya dengan algoritma ELF dan IA masing-masing sebesar 68,20 kW dan 68,28 kW. Sistem distribusi yang terakhir adalah 69 bus dengan rugi daya total 219,28 kW. Kapasitas DG dengan ELF adalah 2,2429 MVA dan rugi daya yang diperoleh sebesar 22,62 kW, sedangkan dengan IA kapasitas DG yaitu 2,2219 MVA dan rugi dayanya 22,64 kW. Kenaikan profil tegangan juga diperoleh untuk masing-masing sistem uji dari 0,9693, 0,9037, dan 0,9113 menjadi 0,9849, 0,9570, dan 0,9730.

Hung, 2013 mengembangkan penelitiannya dengan menambahkan algoritma *Loss Sensitivity Factor* (LSF). LSF memilih kandidat lokasi injeksi *single* DG untuk mengurangi ruang pencarian. Algoritma IA berfungsi untuk menganalisis algoritma yang digunakan, sedangkan ELF dikenal sebagai solusi aliran beban berulang karena membutuhkan waktu komputasi lebih lama. Hal ini disebabkan perhitungan semua bus untuk mendapatkan hasil optimal. Sistem uji 16 bus, 1 unit DG dengan kapasitas 10,40 MW menggunakan LSF terjadi penurunan rugi daya menjadi 193,60 kW yang diletakkan pada bus 12. Injeksi 2 unit DG berkapasitas 15,60 MW yang diletakkan pada bus 12 dan 7 menghasilkan rugi daya sebesar 142,12 kW. Injeksi 3 unit DG dengan kapasitas total 19,50 MW memberikan kontribusi penurunan rugi daya menjadi 106,82 kW. Hal yang sama juga terjadi saat melakukan injeksi

DG pada sistem uji 33 bus dan 69 bus, diperoleh penurunan rugi daya yang signifikan dengan injeksi 3 unit DG dengan menggunakan algoritma LSF, serta profil tegangan yang lebih baik.

Nerves, 2009 menjelaskan tentang injeksi *distributed generation* pada sistem uji 69 bus menggunakan *Evolutionary Programming* (EP). EP terbukti mampu menentukan solusi optimal global dengan iterasi pengambilan keputusan yang didasarkan pada *loadflow* sistem. DG yang digunakan adalah *solar plant* dengan kapasitas maksimum masing-masing 0,6 MW dan 1,4 MW. Pada keadaan *default* tanpa injeksi DG, diperoleh total kerugian sistem sebesar 1,6897 MWh (4,0581 %) dan fungsi fitness sebesar 306.676,79. DG diterapkan pada bus 27 dan bus 65 yang berkontribusi besar dalam kerugian sistem. Setelah proses injeksi diperoleh penurunan kerugian sistem sebesar 0,6635 MWh (1,5685 %) serta fungsi fitness sebesar 230.666,20.

El-Zonkoly, 2011 melakukan injeksi 3 unit DG pada sistem radial 38 bus dan 2 unit DG pada sistem IEEE 30 bus dengan melakukan perbandingan algoritma *Genetic Algorithm* (GA) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Nilai dasar yang digunakan adalah 100 MVA dan 23 kV, rentang kapasitas DG yaitu 0 – 0,63 pu. Dalam hal ini, saat menggunakan algoritma PSO dianggap bahwa DG dioperasikan pada faktor daya yang tidak ditentukan. Lima jenis beban digunakan dalam penelitian ini, diantaranya beban konstan, industri, perumahan, komersial, dan beban campuran. Pada kasus pertama, sistem uji 38 bus diperoleh penurunan rugi daya sistem setelah injeksi DG dari 438,57 MVA menjadi 300,2462 MVA untuk beban konstan. Beban industri menghasilkan pengurangan dari 425,35 MVA menjadi 304,4423 MVA. Masing-masing penurunan yang diperoleh dari beban perumahan dan beban campuran yaitu dari 428,67 MVA menjadi 311,0265 MVA serta 429,47 MVA menjadi 305,5652 MVA. Pada beban komersial terjadi pengurangan dari 429,93 MVA menjadi 308,0879 MVA. Sistem uji yang kedua yaitu IEEE 30 bus untuk beban konstan dan beban industri DG diletakkan pada bus 24 dan bus 7. Penurunan rugi daya masing-masing dari 108,79 MVA menjadi 39,8475 MVA, serta 109,25 MVA menjadi 39,9897 MVA. Injeksi DG untuk beban perumahan dan beban campuran pada bus 20 dan bus 7 menghasilkan pengurangan masing-masing sebesar 110,78 MVA menjadi 40,3807 MVA serta dari 109,42 MVA menjadi 40,1011 MVA. Yang terakhir adalah beban komersial terjadi pengurangan dari 112,09 MVA menjadi 40,4207 MVA setelah injeksi DG pada bus 17 dan bus 7. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PSO lebih efisien dalam upaya untuk meningkatkan profil tegangan dan pengurangan rugi daya.

Bhumkittipich, 2013 menempatkan DG (*photovoltaik*) dengan algoritma PSO pada sistem distribusi radial 26 bus, 22 kV yang dimodifikasi dari pusat sistem distribusi *Provincial Electricity Authority* (PEA) Thailand. Sistem 26 bus memiliki 25 *sections* dengan total daya aktif dan daya reaktif masing-masing 8,49 MW dan 5,28 MVAR. Total rugi daya aktif dan reaktif sebesar 11,68 kW (0,14 %) dan 26,08 kVAR (0,49 %). Setelah dilakukan injeksi DG, diperoleh rugi daya minimum terdapat pada bus 14 yaitu sebesar 4,56 kW dan 10,20 kVAR. Penggunaan algoritma ini dapat menurunkan rugi daya sebesar 61 % dari nilai rugi awal. Selain itu, injeksi DG berdampak pada kenaikan profil tegangan dari 0,9977 per unit menjadi 0,9985 per unit.

Vizhiy, 2016 melakukan penelitian untuk menentukan injeksi DG sebagai masalah optimalisasi dengan menggunakan algoritma *Biogeography Based Optimization* (BBO). BBO merupakan distribusi geografi dari spesies biologi. BBO diterapkan pada jaringan distribusi radial 12,66 kV, 33 bus yang menggunakan distribusi aliran daya sederhana. Total daya aktif dan reaktif pada jaringan masing-masing 3715 kW dan 2300 kVAR. Rugi daya aktif jaringan sebesar 210,97 kW. DG diinjeksikan pada bus 31, 15, dan 8 dengan rating DG sebesar 0,7434 MW, 0,5662 MW, dan 0,4645 MW. Penginjeksian menghasilkan penurunan rugi daya aktif yang signifikan yaitu 85,43 kW dan biaya operasi yang minimal.

Hakim, 2016 melakukan studi pembangkit listrik tenaga *hybrid* dengan menggunakan algoritma probabilitas *Weibull*. Pembangkit listrik tenaga *hybrid* (angin dan surya) dihubungkan sistem jala-jala 20 kV Penyulang Pujon yang terdiri dari 117 bus. Injeksi berada di bus 18, dengan kapasitas pembangkit pv yang tersedia sebesar 1,3 MVA dan pembangkit angin sebesar 2,5 MVA. Dari hasil penelitian, penambahan DG dapat mengurangi daya aktif sebesar 54 % (0,0155 MW) dibandingkan tanpa adanya DG. Selain itu diperoleh keuntungan biaya investasi sebesar 4,1 % dengan menggunakan konsep *Annual Cost System* (ACS).

Hwang, 2010 membandingkan algoritma PSO dan CSO dalam menghasilkan *economic dispatch* yang optimal. Dalam kasus ini total beban adalah 880 kW dan ditetapkan 50 iterasi untuk proses optimisasi. Hasil yang diperoleh dari $G1 = 294$ kW, $G2 = 196$ kW, $G3 = 146$ kW, dan $G4 = 241$ kW menghasilkan biaya minimum sebesar \$8721000. CSO konvergen pada iterasi ke 3, sedangkan PSO pada iterasi ke 4. *Mean Squared Deviation* (MAD) atau error CSO = 0,0273 % lebih rendah daripada MAD PSO yaitu 0,2438 %. CSO menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam menemukan solusi global daripada PSO.

Meziane, 2015 menerapkan *Cat Swarm Optimization* (CSO) dalam mengkombinasikan solar dan gas pada area gas alam Hassi R'Mel di Aljazair. *Plant* ini menggabungkan 25 MW dari solar *array* dengan 125 MW turbin gas. Sistem pembangkit listrik dirancang dengan 5 subsistem dasar, yaitu daya listrik dihasilkan dari matahari dan unit gas (subsistem 1). Kemudian ditransformasikan untuk tegangan tinggi oleh transformator 1 (subsistem 2) dan disalurkan oleh saluran 1 (subsistem 3). Perubahan kedua terjadi pada transformator 2 (subsistem 4) yang menyuplai beban melalui saluran 2 (subsistem 5). Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin menurunnya *constraints* akan berpengaruh pada daya yang disalurkan, dengan *constraints* 86 didapatkan daya sebesar 150 MW. *Constraints* 76 diperoleh daya sebesar 120 MW dan *constraints* 70 menghasilkan daya 100 MW.

Sultana, 2015 mengembangkan algoritma *Krill Herd* (KHA) untuk memecahkan masalah alokasi DG. Untuk menguji kelayakan serta keefektifannya, KHA diuji pada jaringan distribusi radial 33 bus, 69 bus, dan 118 bus. Pada sistem uji 33 bus total rugi daya adalah 210,998 kW dan 143 kVAR. DG yang digunakan berjumlah 3 unit, menghasilkan injeksi yang optimal pada bus 13, 25, dan 30 (KHA), bus 11, 29, dan 30 (GA), serta bus 8, 13, dan 32 (PSO). Dari ketiga algoritma menghasilkan penurunan rugi daya masing-masing sebesar 75,412 kW, 106,300 kW, dan 105,350 kW. Sistem uji kedua, 69 bus, rugi daya yaitu 1381,53 MWh. Dengan pendekatan KHA, pada bus 61 diinjeksi secara bergantian 3 DG yaitu biomassa, angin, dan *solar cell*. Setelah diinjeksi, terdapat penurunan rugi daya masing-masing sebesar 147,4989 MWh, 283,1044 MWh, dan 615,2985 MWh. Sistem uji terakhir yaitu 118 bus memiliki rugi daya aktif dan reaktif sebesar 1296,3 kW dan 978,36 kVAR. Dalam kasus ditempatkan 5 DG dan 7 DG. Rugi daya yang diperoleh saat menempatkan 5 DG yaitu 576,46 kW, sedangkan saat 7 DG sebesar 574,7097 kW.

ChithraDevi, 2017 menggunakan pendekatan *Krill Herd Algorithm* (KHA) dalam menempatkan 3 unit DG pada IEEE 33 bus, 69 bus, dan sistem distribusi radial Portugis 94 bus dengan 15 kali percobaan. Pada sistem uji IEEE 33 bus, 12,66 kV, total beban adalah $3,715 + j2,3$ MVA dan total rugi sistem yaitu 210,9876 kW. Setelah injeksi DG pada bus 24, 14, dan 30 terjadi penurunan rugi daya sebesar 73,2968 kW (pengurangan 65,2601 %). Sistem uji 69 bus, 12,66 kV, memiliki total beban $3,80 + j2,69$ MVA dan rugi daya tanpa DG yaitu 220,534 kW. Ketika DG ditempatkan pada bus 15, 61, dan 49 penurunan rugi daya menjadi 69,1977 kW (68,6227 %). Pada kasus 3, 94 bus, 15 kV, total beban adalah $4,797 + j2,324$ MVA. Rugi daya sistem sebesar 362,8678 kW, setelah penambahan DG yang diletakkan pada bus 10, 58, dan 20 terjadi penurunan sebesar 79,4907 % atau 74,4197 kW.

2.2 Sumber Daya Energi

Sumber daya energi adalah sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi secara langsung maupun tidak langsung dengan cara konservasi dan diversifikasi energi. Konservasi energi adalah kegiatan terpadu dan sistematis yang bertujuan untuk melestarikan sumber daya serta meningkatkan pemanfaatannya. Diversifikasi energi adalah penganekaragaman dari hasil pemanfaatan sumber daya energi. Pemanfaatannya bergantung pada banyak atau tidaknya energi di permukaan bumi.

Menurut buku Panduan Energi yang Terbarukan, sumber energi dikelompokkan menjadi dua golongan yaitu :

1. Energi konvensional

Energi berasal dari sumber yang jumlahnya terbatas dan tidak dapat diperbarui. Sumber energi akan habis dalam jangka waktu tertentu dan beberapa sumber energi berdampak negatif bagi lingkungan.

2. Energi terbarukan

Energi berasal dari sumber alami seperti matahari, biomassa, panas bumi, angin, dan air dan dapat diperbarui. Sumber tersedia dalam jangka waktu yang lama dan tidak merugikan lingkungan.

Berdasarkan pemanfaatannya, energi dikelompokkan menjadi dua yaitu :

1. Energi primer

Energi yang dimanfaatkan secara langsung dengan proses pengolahan bahan baku sesuai standar yang berlaku, misalnya batu bara, minyak bumi, gas alam.

2. Energi sekunder

Energi yang memerlukan proses pengolahan yang melibatkan banyak pertimbangan aspek dalam pemanfaatannya, misalnya aliran sungai untuk membuat pembangkit mikrohidro yang menghasilkan energi listrik untuk mensuplai kebutuhan energi.

Apabila dilihat dari nilai komersilnya, sumber energi diklasifikasikan menjadi :

1. Energi komersial

Energi yang dapat dipakai dan sepenuhnya diperjualbelikan dalam skala ekonomis.

2. Energi non komersial

Energi yang dipakai dan diperjualbelikan, namun belum mencapai skala ekonomis.

3. Energi baru

Energi yang pemanfaatannya sangat terbatas, masih dalam tahap pengembangan, dan belum bisa diperjualbelikan.

Berdasarkan prosedur perhitungan konsumsi energi listrik, ada beberapa fungsi yang dapat diambil, antara lain :

a. Fungsi Teknis

Dapat meningkatkan efektivitas dan produktivitas penggunaan energi yang akan meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

b. Fungsi Ekonomis

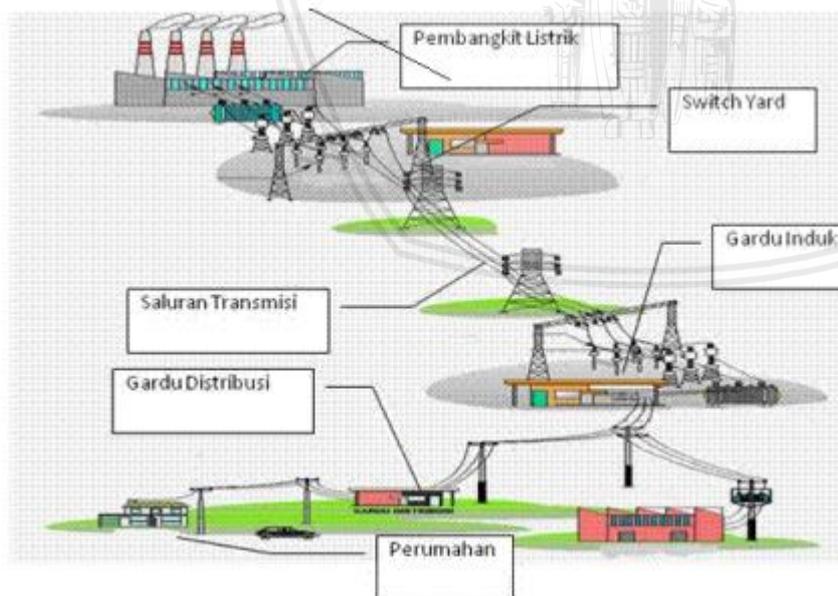
Berkaitan dengan biaya operasional. Dengan perhitungan konsumsi energi dapat dilakukan pengolahan data yang dapat mengurangi biaya operasional.

c. Fungsi Lingkungan

Dengan pola penghematan energi, diharapkan dapat mengurangi krisis energi yang terjadi.

2.3 Sistem Tenaga Listrik

Sistem adalah semua unsur yang secara teratur saling berhubungan dan bekerja sama dengan tujuan menghasilkan sesuatu. Sistem tenaga listrik adalah beberapa unsur komponen yang terdiri dari pembangkit, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban yang saling berhubungan untuk menghasilkan tenaga listrik.

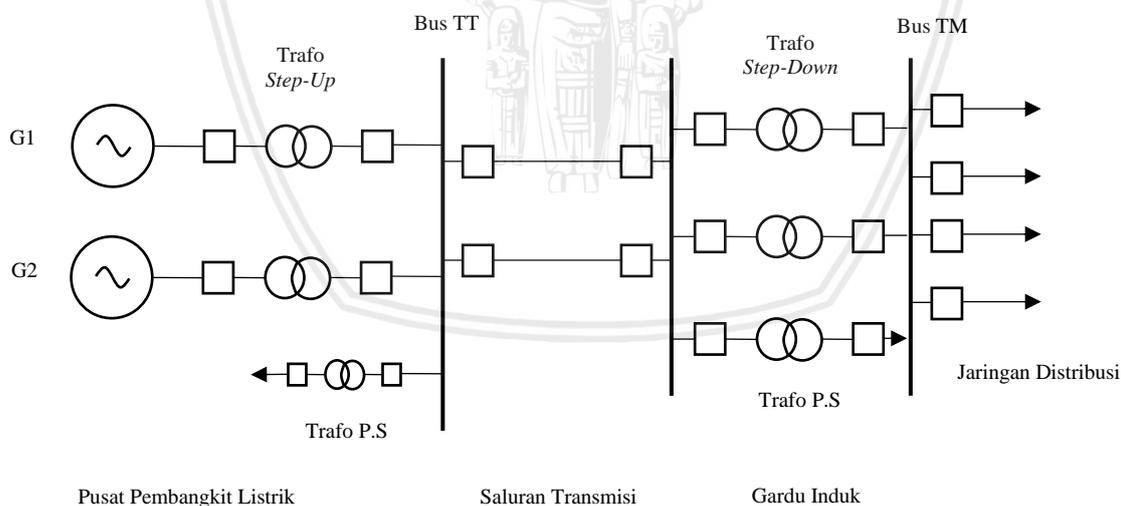


Gambar 2.1 Gambaran umum sistem tenaga listrik.

Sumber : Suropto (2017, p.1).

Pusat pembangkit listrik, seperti PLTU, PLTD, PLTA, dsb. berfungsi untuk mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik sesuai kebutuhan nasional. Sistem pembangkit yang terdiri dari satu atau lebih unit pembangkit akan membangkitkan tenaga listrik yang tegangannya dinaikkan terlebih dahulu oleh *step up transformer* kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Peningkatan tegangan berfungsi untuk mengurangi arus yang dikirim pada saluran transmisi. Arus yang besar dapat menyebabkan rugi-rugi panas sehingga dengan adanya peningkatan tegangan, nilai I^2R akan menurun.

Pada pusat pembangkit listrik maupun di Gardu Induk (GI), selalu ada transformator pemakaian sendiri untuk melayani kebutuhan listrik internal seperti untuk penerangan dan menggerakkan motor listrik. Jaringan antara pusat pembangkit listrik dan GI disebut saluran transmisi, sedangkan saluran yang keluar dari GI adalah jaringan distribusi. Setelah tenaga listrik yang disalurkan sampai di GI, kemudian diturunkan tegangannya oleh *step down transformer* menjadi tegangan menengah yang disebut tegangan distribusi primer 20 kV. Tenaga listrik yang disalurkan melalui jaringan distribusi primer, sebagian tegangannya diturunkan dalam gardu-gardu distribusi menjadi tegangan rendah dengan rating 380/220 volt. Tegangan rendah ini kemudian disalurkan ke konsumen melalui sambungan rumah.



Gambar 2.2 Single Line Diagram Penyaluran Energi Listrik dari Pusat Pembangkit ke GI.

Sumber : Hermawan (2012, p.2).

2.4 Sistem Transmisi

Sistem transmisi berfungsi menyalurkan energi listrik dari unit pembangkitan di berbagai lokasi dengan jarak yang jauh ke sistem distribusi. Saluran transmisi yang banyak digunakan adalah SUTT/SUTET karena harganya yang relatif lebih murah jika dibandingkan dengan jenis lainnya dan pemeliharaan yang mudah. Dalam proses penyaluran energi listrik, memerlukan tegangan transmisi yang tinggi karena dengan tegangan lebih tinggi dan daya yang disalurkan sama maka akan menyebabkan beberapa hal berikut ini :

- a. Rugi-rugi jaringan yang lebih rendah
- b. Dengan luas konduktor yang sama mampu menyalurkan daya yang lebih besar
- c. Lebih andal terhadap gangguan seperti pohon, petir, angin, dll.
- d. Lebih ekonomis

Saluran udara ditinjau dari klasifikasi tegangannya antara lain :

- a. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 150 kV - 500 kV
- b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30 kV - 150 kV
- c. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) 6 kV - 30 kV
- d. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) 40 volt – 1 kV

Pada jaringan antar pulau, daerah yang sulit mendapatkan ruang bebas, mempertimbangkan estetika serta memerlukan keandalan yang tinggi maka perlu dipasang saluran kabel, diantaranya :

- a. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30 kV - 150 kV
- b. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) 6 kV - 20 Kv
- c. Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) 40 volt – 1 kV
- d. Saluran Kabel Laut Tegangan Tinggi (SKLTT) 150 kV

2.4.1 Peralatan Utama Saluran Transmisi

2.4.1.1 Tiang / Tower

Tower adalah konstruksi yang kokoh berfungsi untuk menyangga atau merentangkan kawat penghantar yang disekat dengan isolator dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan. Konstruksi *tower* harus kuat menyangga gaya, antara lain :

- Gaya tekan akibat gaya berat *tower* dan konduktor
- Gaya tarik akibat rentangan kawat
- Gaya angin akibat aliran angin yang melalui kawat maupun *tower*

2.4.1.2 Isolator

Isolator adalah media yang mengisolasi bagian yang bertegangan yaitu kawat fasa dengan bagian yang tidak bertegangan yaitu *tower*. Nilai isolasi umumnya 3 – 3,3 kali tegangan sistem untuk menahan tegangan petir. Pada bagian ujung saluran isolator mengalami tegangan permukaan yang paling tinggi, maka diperlukan *arching horn* untuk membagi tegangan secara merata pada beberapa piringan isolator. Kegagalan isolasi disebabkan oleh penurunan nilai isolasi karena adanya kerusakan isolasi maupun semakin banyaknya polutan yang menempel pada isolator. Tenaga listrik yang disalurkan melalui saluran transmisi umumnya menggunakan kawat telanjang dengan udara sebagai media isolasinya. Jenis isolator terbagi dalam beberapa jenis, antara lain :

- a. Bahan pembuatannya
 - Kaca, harganya relatif murah dan mudah pecah.
 - Keramik, harganya mahal, tidak mudah pecah, dan tahan terhadap cuaca.
- b. Bentuk pemasangannya
 - *V string*, *I string*, horisontal *string*
 - *Single string*, *double string*, *quadruple string*
- c. Bentuknya
 - Piringan, berbentuk piring yang sisinya dipasang semacam mangkuk logam dan sisi lainnya dipasang pasak yang umumnya digantung. Jumlah piringan dalam rangkaian isolator disesuaikan dengan kebutuhan isolasi terhadap tegangan yang bekerja.
 - *Long rod*, berbentuk batang panjang yang dikedua ujungnya dipasang sarana penghubung terbuat dari logam dengan sirip-sirip isolator berada di antara kedua ujung tersebut dan peletakan isolator ini digantung.
 - *Pin & post* isolator, berbentuk batang panjang yang dikedua ujungnya dipasang sarana penghubung terbuat dari logam dan penggunaannya sebagai isolator yang didudukkan.

2.4.1.3 Konduktor / Kawat Penghantar

Konduktor adalah media penghantar yang berfungsi untuk mengalirkan arus listrik yang direntangkan dengan bantuan *tower*. Konduktor yang digunakan dalam penyaluran, harus memiliki sifat konduktivitas tinggi, kekuatan tarik mekanikal tinggi, memiliki berat, serta tidak mudah putus. Konduktor jenis tembaga memiliki konduktivitas dan kekuatan tarik mekanikal yang cukup baik, namun memiliki kelemahan dari sisi investasi yang mahal.

Konduktor jenis aluminium tergolong lebih murah dan lebih ringan jika dibandingkan dengan tembaga. Dengan nilai resistansi yang sama, aluminium memiliki diameter yang lebih besar dari tembaga yang mengakibatkan garis fluks listrik aluminium akan lebih berjauhan satu dengan lainnya pada permukaan penghantar dengan nilai tegangan yang sama. Hal ini mengindikasikan di permukaan penghantar terdapat gradien tegangan yang lebih rendah, dan menurunkan resiko ionisasi udara di sekitar penghantar. Berikut ini merupakan jenis-jenis penghantar aluminium, yaitu :

- *All Aluminium Conductors* (AAC), seluruhnya terbuat dari aluminium
- *All Aluminium Alloy Conductors* (AAAC), seluruhnya terbuat dari campuran aluminium
- *Aluminium Conductors Steel Reinforced* (ACSR), terbuat dari aluminium yang diperkuat dengan baja
- *Aluminium Conductors Alloy Reinforced* (ACAR), terbuat dari aluminium yang diperkuat dengan logam campuran

Penghantar dari campuran aluminium mempunyai kuat tarik mekanikal yang lebih besar dari aluminium biasa. ACAR mempunyai inti yang terbuat dari aluminium dengan kuat tarik mekanikal tinggi yang dikelilingi lapisan-lapisan penghantar aluminium biasa. SUTT maupun SUTET umumnya menggunakan kawat penghantar jenis ACSR karena bagian dalam kawat berupa inti serat baja yang mempunyai kuat mekanikal tinggi dan bagian luarnya dikelilingi lapisan dari serat aluminium yang memiliki konduktivitas yang baik. Penampang dan jumlah konduktor disesuaikan dengan kapasitas daya yang disalurkan, sedangkan jarak antar kawat fasa disesuaikan dengan tegangan operasinya.

2.4.1.4 Overhead Ground Wire

Overhead ground wire atau biasa dikenal dengan *earth wire* adalah kawat petir atau kawat tanah sebagai media untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir yang dipasang di atas kawat fasa. Jumlah *earth wire* adalah satu buah di atas kawat fasa, tetapi umumnya dipasang dua buah. Hal ini disebabkan karena jika hanya memasang satu buah untuk dua penghantar, maka akan menghasilkan sudut perlindungan yang besar sehingga kawat fasa akan mudah tersambar petir. Bahan pembuatan kawat tanah terbuat dari baja yang digalvanis maupun dilapisi dengan aluminium. Selain sebagai kawat tanah, di dalam *ground wire* dapat difungsikan untuk *fibre optic* yang dikenal dengan *Optic Ground Wire* (OPGW) untuk keperluan teleproteksi maupun telekomunikasi.

2.4.2 Parameter Saluran Transmisi

2.4.2.1 Resistansi

Resistansi penghantar saluran transmisi adalah penyebab rugi daya utama dalam saluran transmisi, dimana persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots (2-1)$$

dimana, R = resistansi penghantar (Ω)

ρ = resistivitas bahan (Ωm)

l = panjang penghantar (m)

A = luas penampang (m^2)

Di Amerika Serikat, satuan yang biasa dipakai untuk l adalah *feet* (1 *feet* = 0,3048 meter), A dalam *circular mil* / CM (CM = 1973 x penampang mm^2 , yang berarti $1 \text{ mm}^2 = 1/1973 = 5,068 \times 10^{-4}$). Resistansi kawat akan naik seiring dengan naiknya temperatur, untuk perubahan temperatur yang kecil maka kenaikan akan linier. Hubungan resistansi dengan temperatur dapat dituliskan dalam persamaan berikut.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \dots\dots\dots (2-2)$$

dimana, R_1 = resistansi penghantar 1

R_2 = resistansi penghantar 2

t_1 = suhu penghantar 1

t_2 = suhu penghantar 2

T = konstanta

Nilai-nilai konstanta T adalah :

$T = 234,5$ untuk tembaga *annealed*

$T = 241$ untuk tembaga

$T = 228$ untuk aluminium

Sebaran arus seragam di seluruh penampang melintang penghantar hanya terjadi pada arus searah. Pada saat arus AC mengalir pada konduktor, maka sebaran arus yang mengalir tidak *uniform*, semakin tinggi frekuensi maka semakin tidak *uniform* dan cenderung mengalir lewat kulit, fenomena ini disebut efek kulit (*skin effect*). Efek kulit akan semakin besar dengan bertambahnya penampang dan frekuensi.

2.4.2.2 Induktansi

Pada konduktor yang dilalui arus yang berubah-ubah, maka flux magnet yang dihasilkan juga berubah-ubah. Persamaan berikut memberikan hubungan antara perubahan flux dengan arus suatu rangkaian.

$$L = \frac{d\tau}{di} \dots\dots\dots (2-3)$$

dimana, L = induktansi rangkaian (H)

τ = banyaknya fluks *linkage* (Wbt – *weberturn* / weber lilitan)

Apabila arus berubah, maka medan magnetnya yang berhubungan juga harus berubah. Jika medium dimana medan magnet itu terjadi diandaikan mempunyai permeabilitas konstan, banyaknya *flux linkage* / fluks gandeng berbanding lurus dengan arus yang menyebabkan tegangan sebanding dengan kecepatan perubahan arus, maka persamaannya menjadi :

$$e = L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (2-4)$$

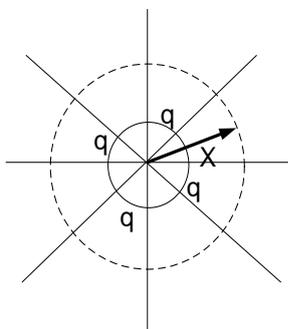
dimana, e = tegangan (volt)

L = induktansi rangkaian (H)

di/dt = perubahan arus terhadap waktu

2.4.2.3 Kapasitansi

Kapasitansi saluran transmisi adalah akibat adanya beda potensial antara penghantar. Jika suatu konduktor lurus berbentuk silinder berada pada medium yang *uniform* seperti udara dan mempunyai muatan yang seragam di seluruh panjangnya pada jarak X, dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.3 Garis-garis flux listrik yang berasal dari muatan-muatan positif yang tersebar secara seragam di seluruh permukaan suatu penghantar silinder yang terpisah.

Sumber : Hermawan (2012, p.29).

Kerapatan flux listriknya adalah :

$$D = \frac{q}{2\pi x} \dots\dots\dots (2-5)$$

dimana, D = kerapatan flux listrik (C/m^2)

q = muatan (coulomb/m)

x = jarak (m)

Kuat medan listriknya yaitu sama dengan kerapatan flux listrik dibagi dengan permitivitas medium, persamaannya menjadi :

$$\varepsilon = \frac{q}{2\pi kx} \dots\dots\dots (2-6)$$

dimana, ε = kuat medan listrik (V/m)

q = muatan (coulomb/m)

x = jarak (m)

k = permitivitas medium ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)

Kapasitansi antara dua kawat penghantar pada suatu saluran dua kawat didefinisikan sebagai muatan pada penghantar-penghantar itu persatuan beda potensial diantara keduanya. Dalam bentuk persamaan, kapasitansi saluran adalah :

$$C = \frac{q}{v} \dots\dots\dots (2-7)$$

dimana, C = kapasitansi (F/m)

q = muatan (coulomb/m)

v = beda potensial (volt)

Pada saluran transmisi yang panjangnya kurang dari 80 km (50 mil) nilai kapasitansinya kecil dan dapat diabaikan. Tetapi untuk saluran yang lebih panjang dan tegangan yang lebih tinggi kapasitansi harus diperhitungkan.

2.5 Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari gardu induk sampai ke konsumen. Di Indonesia saat ini menggunakan SUTM dengan rating tegangan 20 kV dan SKTM untuk distribusi primer (tegangan menengah). Untuk distribusi sekunder (tegangan rendah) rating tegangan yang digunakan adalah 380/220 volt, yaitu SUTR dan SKTR.

2.5.1 Gardu Induk

Gardu induk berperan penting dalam penyaluran tenaga listrik dari saluran transmisi ke jaringan distribusi primer. GI letaknya dekat dengan pusat beban dan berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik yang umumnya sebesar 150 kV diturunkan menjadi 2,4 kV – 33 kV, tergantung kebutuhan beban yang dilayani. Berdasarkan letak pemasangan peralatan, GI dibedakan menjadi tiga yaitu GI pasangan luar, GI pasangan dalam, dan GI kombinasi pasangan luar dan pasangan dalam. GI pasangan luar (GI konvensional) merupakan gardu induk yang meletakkan sebagian besar komponennya di luar bangunan, kecuali komponen proteksi dan kontrol yang diletakkan dalam sebuah bangunan. GI konvensional menggunakan udara sebagai media isolasi antar peralatan. GI pasangan dalam (*Gas Insulated Switchgear*) adalah gardu induk yang hampir semua komponennya diletakkan di dalam bangunan, kecuali transformator daya diluar bangunan. GIS menggunakan gas SF₆ sebagai media isolasi. Pada daerah dengan kerapatan penduduk yang padat umumnya menggunakan GI pasangan dalam karena tidak membutuhkan tempat yang luas dalam pengoperasiannya. GI kombinasi pasangan dalam dan pasangan luar meletakkan sebagian komponen *switchgear* di dalam bangunan dan sebagian lagi di luar bangunan, tetapi transformator tenaga tetap diletakkan di luar bangunan.

2.5.2 Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer adalah sistem yang menyalurkan tenaga listrik dari GI sampai ke trafo distribusi (20 kV/220 V). Struktur jaringan distribusi primer yang akan digunakan, pemilihannya tergantung dari karakteristik beban yang ada pada daerah tersebut. Macam-macam struktur jaringan distribusi primer yaitu :

2.5.2.1 Sistem Radial

Sistem radial adalah struktur sistem paling sederhana yang terdiri dari satu sumber daya yang ditarik secara radial dan dicabangkan ke titik-titik beban. Luas penampang konduktor pada sistem ini tidak sama karena adanya perbedaan besarnya arus yang mengalir dari sumber daya ke beban. Saluran yang dekat dengan GI mengalirkan arus yang besar karena luas penampangnya juga cukup besar. Kebalikannya, saluran dengan titik percabangan beban memiliki luas penampang yang berbeda-beda tergantung besarnya arus yang dialirkan. Semakin jauh percabangan dari titik sumber maka luas penampang konduktor akan semakin kecil. Apabila pada GI terjadi gangguan maka gardu-gardu distribusi juga akan mengalami gangguan yang mengakibatkan pemadaman total. Untuk melokalisir gangguan, sistem radial dilengkapi dengan alat pengaman yang diletakkan pada

saluran yang terletak dibelakang titik gangguan. Semakin panjang saluran dari GI ke konsumen akan mengakibatkan rugi-rugi tegangan yang lebih besar, namun sistem radial masih sering digunakan karena faktor investasi yang lebih ekonomis. Sistem radial digunakan untuk mensuplai daerah yang memiliki kerapatan beban rendah hingga menengah, diharapkan keandalannya masih diterima oleh konsumen.

2.5.2.2 Sistem Loop

Sistem *loop* adalah struktur sistem yang terdiri dari dua atau lebih saluran *feeder* yang saling berhubungan membentuk rangkaian berbentuk cincin. Kontinuitas penyaluran tenaga listrik cukup baik karena gangguan dapat dilokalisir hanya pada saluran yang terganggu saja dengan memasang sebuah pemutus (PMT) atau pemisah (PMS). Saluran lain masih bisa menyalurkan tenaga listrik dari sumber lain dalam rangkaian yang tidak terganggu. Ukuran konduktor pada sistem *loop* umumnya memiliki struktur yang sama untuk menyalurkan tenaga listrik. Apabila ada dua sumber pembangkit, besar kapasitas tegangan akan lebih baik. Tetapi apabila beban bertambah, maka kapasitas pelayanan akan lebih jelek. Sistem *loop* digunakan untuk mensuplai daerah yang memiliki kerapatan beban yang cukup besar dan biaya investasinya lebih mahal.

2.5.2.3 Sistem Network/Mesh

Sistem *network/mesh* adalah struktur sistem yang terdiri dari beberapa *feeder* yang bekerja secara paralel dari beberapa sumber pembangkit. Kapasitas dan kontinuitas pelayanan sangat baik karena sistem penyaluran dilakukan secara terus-menerus dan dilayani lebih dari dua sumber tenaga listrik. Tingkat beban yang dilayani biasanya adalah daerah yang memiliki kepadatan yang tinggi. Sistem ini merupakan sistem yang paling baik karena apabila terjadi gangguan listrik pada salah satu saluran, maka saluran yang lain tidak akan terganggu. Namun dari sisi investasi, membutuhkan biaya yang besar dalam pembangunan dan pembuatan sistem proteksi yang kompleks.

2.5.2.4 Sistem Interkoneksi

Sistem interkoneksi merupakan pengembangan dari sistem *network/mesh* yang terdiri dari beberapa pembangkit yang bekerja secara paralel. Sistem ini bekerja pada daerah dengan tingkat kepadatan yang tinggi dengan penyaluran tenaga listrik terus-menerus. Perbedaan dengan sistem *mesh* adalah jika pada sistem interkoneksi terdapat pembangkit yang memiliki kapasitas kecil, maka dapat digunakan sebagai *back-up* pembangkit utama yang bekerja secara bergantian secara terjadwal dan memperpanjang umur pembangkit utama.

2.5.3 Transformator Distribusi

Transformator adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya. Umumnya jarak pembangkit listrik ke beban sangat jauh dan sering memunculkan drop tegangan. Oleh karena itu, tegangan perlu dinaikkan atau diturunkan untuk mengurangi drop tegangan. Contohnya, tegangan yang dihasilkan pembangkit sebesar 13,8 kV dinaikkan oleh *step up transformer* menjadi 150 kV kemudian diturunkan sampai menjadi 380 V untuk didistribusikan ke pelanggan.

Transformator distribusi biasanya juga dikenal dengan sebutan gardu distribusi yang terdiri dari perlengkapan hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR) dan transformator distribusi. Gardu distribusi sesuai konstruksinya terdiri dari gardu portal, gardu beton, gardu kios, dan gardu cantol. Di Indonesia, transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan 20 kV menjadi tegangan rendah 380/220 V yang sesuai dengan kebutuhan konsumen.

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana saat kumparan primer dialiri arus maka akan memunculkan medan magnet. Semakin besar arus yang dialirkan maka kuat medan magnet (*density flux*) juga akan semakin besar. Flux medan pada kumparan primer akan menginduksi kumparan sekunder menghasilkan gaya gerak listrik dan akan terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer ke sekunder. Disini terjadi perubahan tegangan listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun tegangan rendah ke tegangan yang lebih tinggi.

2.5.4 Sistem Distribusi Sekunder

Sistem distribusi sekunder adalah sistem jaringan hasil dari penurunan tegangan sistem distribusi primer ke tegangan rendah. Sistem ini dapat melayani beban perumahan, komersial, dan industri. Beban perumahan dirancang menggunakan sistem satu fasa, sedangkan beban komersial dan industri memakai sistem tiga fasa. Jaringan dari gardu distribusi dikenal dengan jaringan tegangan rendah dimulai dari sisi sekunder transformator distribusi sampai ke sambungan rumah (SR). Struktur jaringan tegangan rendah terdiri dari pelayanan pelanggan, serta kWh meter yang ada di pelanggan. Pada sambungan rumah menggunakan *twisted cable* dengan inti penghantar yang terbuat dari aluminium maupun tembaga.

2.6 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan salah satu penyelesaian yang digunakan dalam analisis rangkaian sistem daya. Studi bertujuan untuk mengetahui besarnya daya aktif dan daya reaktif sumber pembangkit serta mengetahui tegangan, daya aktif dan daya reaktif komponen tenaga listrik. Studi aliran daya biasanya disebut juga dengan aliran beban. Persamaan aliran beban dapat diselesaikan dengan cara teknik iterasi (*numerical analysis*). Untuk memudahkan perhitungan aliran beban, dianggap sistem dalam kondisi seimbang dan menggunakan empat parameter yaitu P_i , Q_i , V_i , dan θ_i . Secara umum, sistem bus dibedakan menjadi tiga, yaitu :

a. *Slack bus*

Satu bus yang dikenal sebagai *slack* atau *swing bus*, yang diambil sebagai referensi dimana besarnya tegangan dan sudut fasa ditentukan. Bus ini membuat perbedaan antara beban yang dijadwalkan dan daya yang dihasilkan, yang disebabkan adanya *losses* di jaringan.

b. *Load buses*

Bus beban dimana pada bus ini daya aktif dan daya reaktif ditentukan, sedangkan besarnya tegangan bus dan sudut fasa tidak diketahui. Bus beban ini dikenal dengan sebutan P-Q bus.

c. *Regulated buses*

Bus ini merupakan bus pembangkit atau juga dikenal sebagai bus tegangan yang dikontrol (*voltage-controlled buses*). Pada bus ini besarnya daya reaktif dan sudut fasa tidak diketahui. Nilai daya aktif dan besarnya tegangan ditentukan, bus ini disebut juga sebagai P-V bus.

Persamaan jaringan bisa diselesaikan menggunakan metode tegangan-node dalam persamaan linear yang kompleks dalam perhitungan arus node dan tegangan node. Tetapi dalam sistem tenaga listrik lebih banyak menggunakan perhitungan daya daripada arus, persamaan yang dihasilkan dikenal sebagai aliran daya non linear.

Dengan menggunakan simbol matriks, persamaan tegangan node adalah

$$Y.V = I \dots\dots\dots (2-8)$$

dimana,

Y = admitansi bus (mho)

V = tegangan (volt)

I = arus (ampere)

Arus node yang diinjeksikan pada sistem dapat dihitung dari :

$$S_i^s = V_i \cdot I_i^* \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

$$I_i = \frac{S_i^{s*}}{V_i^*} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

$$S_i^{s*} = (P_{gi} - P_{di}) - j(Q_{gi} - Q_{di}) = P_i^s - jQ_i^s \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

dimana,

S_i = jumlah pembangkitan (daya semu) pada node i (VA)

s = nilai injeksi

P_{gi} = daya aktif pembangkitan (W)

P_{di} = daya aktif pembebanan (W)

Q_{gi} = daya reaktif pembangkitan (W)

Q_{di} = daya reaktif pembebanan (W)

Persamaan aliran beban untuk node i dinyatakan sebagai berikut.

$$\sum_{k \in i} Y_{ik} V_k = I_i \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

Persamaan (2-12) dimasukkan dalam persamaan (2-10) menjadi :

$$\sum_{k \in i} Y_{ik} V_k = \frac{S_i^{s*}}{V_i^*} \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

atau

$$V_i^* \sum_{k \in i} Y_{ik} V_k = S_i^{s*} \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

Persamaan di atas dapat diubah dalam bentuk koordinat kutub sebagai berikut.

$$S_i^{s*} = V_i \angle -\theta_i \sum_{k \in i} Y_{ik} V_k \angle \theta_k \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

$$S_i^{s*} = V_i \sum_{k \in i} Y_{ik} V_k \angle \theta_k - \theta_i \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

Dengan menyamakan bagian real dan imajiner, persamaan di atas menjadi :

$$\begin{aligned} P_i^s &= V_i \sum_{k \in i} (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) V_k \\ &= +V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{k \in i, k \neq i} (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) V_k \quad \dots\dots\dots (2-17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_i^s &= V_i \sum_{k \in i} (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) V_k \\ &= -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{k \in i, k \neq i} (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) V_k \quad \dots\dots\dots (2-18) \end{aligned}$$

dimana $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$ adalah unsur baris i dan kolom k matriks admitansi node dan nilai $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$.

Pada setiap node ada empat parameter yaitu P_i , Q_i , V_i , dan θ_i dan ada dua persamaan pada setiap node. Dengan menetapkan dua variabel maka akan diperoleh penyelesaian dua variabel lainnya, seperti dituliskan dalam tabel berikut.

Tabel 2.1
Tipe Bus Dalam Sistem Tenaga Listrik

Node	Variabel ditentukan	Variabel tak diketahui
PQ	P_i^{sp}, Q_i^{sp}	V_i, θ_i
PV	P_i^{sp}, V_i^{sp}	Q_i, θ_i
Referensi (<i>Swing</i>)	$\theta_i^{sp} = 0, V_i^{sp}$	P_i, Q_i

Sumber : Suyono (2014, p.2)

Oleh karena itu, berlaku persamaan berikut ini.

$$S_i^{sp} = (P_{gi}^{sp} - P_{di}^{sp}) + j(Q_{gi}^{sp} - Q_{di}^{sp}) = V_i I_i^* \dots\dots\dots (2-19)$$

Aliran daya yang diselesaikan dengan iterasi perlu memperhatikan nilai error konvergenya. Nilai error berkaitan dengan nilai beda daya yang nilainya harus dibawah atau sama dengan nilai error konvergen. Perbedaan yang dimaksud adalah nilai perbedaan daya antara daya yang diinjeksikan dengan daya yang mengalir pada setiap node rangkaian. Beda daya pada node *i* adalah perbedaan daya antara daya yang ditentukan S_i^* (daya yang diinjeksikan) dan $V_i^r I_i^*$ (daya yang mengalir), dimana V_i^r merupakan tegangan yang dihitung pada iterasi ke *r*.

$$\Delta S_i = S_i^* - V_i^r I_i^* = P_i^s + jQ_i^s - V_i^r (\sum_{k \in i} Y_{ki}^* V_k^*) \dots\dots\dots (2-20)$$

Persamaan di atas dapat dipisahkan bagian real dan imajineranya dalam koordinat kutub sebagai berikut.

$$\Delta P_i = P_i^s - V_i \sum_{k \in i} (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) V_k \dots\dots\dots (2-21)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^s - V_i \sum_{k \in i} (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) V_k \dots\dots\dots (2-22)$$

2.6.1 Aliran Daya Algoritma Newton Raphson

Persamaan aliran daya pada sistem tenaga dapat diselesaikan dengan menggunakan algoritma Newton Raphson (NR). NR dinilai cukup efektif untuk memperoleh solusi iterasi yang diperoleh dari penyelesaian perhitungan dalam menerapkan deret *taylor* dan matriks *jacobian*. Pada persamaan tak linear jika suatu variabel x^r diketahui, maka berlaku persamaan sebagai berikut.

$$f(x^{r+1} + \Delta x) = f(x^r) + \Delta x f'(x^r) + \frac{(\Delta x)^2}{2!} f''(x^r) + \dots \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{d^n x}{dx^n} \Big|_{x^r} \dots\dots (2-23)$$

Apabila fungsi pada bagian sebelah kiri dianggap bernilai 0 karena sudah konvergen dan variabel bernilai pangkat dua dan seterusnya diabaikan, maka persamaan di atas menjadi :

$$0 = f(x^r) + \Delta x f'(x^r) \dots\dots\dots (2-24)$$

$$\Delta x = - \frac{f(x^r)}{f'(x^r)} \dots\dots\dots (2-25)$$

Dimana Δx adalah perbedaan antara nilai saat ini dan nilai sebelumnya, maka didapatkan algoritma NR sebagai berikut.

$$x^{r+1} = x^r - \frac{f(x^r)}{f'(x^r)} \dots\dots\dots (2-26)$$

Jika (x_1, x_2) merupakan penyelesaian perhitungan untuk fungsi $f_1(x_1, x_2)$ dan $f_2(x_1, x_2)$, maka dengan menerapkan deret *taylor* diperoleh :

$$0 = f_1(x_1^r, x_2^r) + \Delta x_1^r \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_r + \Delta x_2^r \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_r + \dots \dots\dots (2-27)$$

$$0 = f_2(x_1^r, x_2^r) + \Delta x_1^r \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_r + \Delta x_2^r \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_r + \dots \dots\dots (2-28)$$

Apabila turunan kedua dan seterusnya diabaikan, maka diperoleh :

$$\begin{bmatrix} -f_1(x_1^r, x_2^r) \\ -f_2(x_1^r, x_2^r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x_1^r \\ \Delta x_2^r \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-29)$$

$$\begin{bmatrix} -f_1^{(r)} \\ -f_2^{(r)} \end{bmatrix} = J^{(r)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^r \\ \Delta x_2^r \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-30)$$

dan $x_1^{r+1} = x_1^r + \Delta x_1^r \dots\dots\dots (2-31)$

Persamaan (2-30) dapat ditulis sebagai berikut.

$$[f]^r = [J]^r [\Delta x]^r \dots\dots\dots (2-32)$$

dimana,

r = nomor iterasi

J = matriks *jacobian*

Persamaan NR (2-29) dapat dinyatakan dalam variabel aliran beban sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-33)$$

atau

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J^{-1}] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-34)$$

Matriks *jacobian* dapat dituliskan dengan variabel seperti di bawah ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J' & L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-35)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-36)$$

dimana $\Delta V/V$ merupakan perubahan tegangan.

Matriks *Jacobian* dapat dijabarkan berikut.

$$H_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{k \in i, k \neq 1} (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) V_k \approx Q_i^{sp} + V_i^2 B_{ii} \dots\dots\dots (2-37)$$

$$H_{ik} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_k} = -V_i (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) V_k \dots\dots\dots (2-38)$$

$$J_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = -V_i \sum_{k \in i, k \neq 1} (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) V_k \approx -P_i^{sp} + V_i^2 G_{ii} \dots\dots\dots (2-39)$$

$$J_{ik} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_k} = V_i (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) V_k \dots\dots\dots (2-40)$$

$$N_{ii} = V_i \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} = -V_i \sum_{k \in i} (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) V_k - V_i^2 G_{ii} \approx -P_i^{sp} + V_i^2 G_{ii} \dots (2-41)$$

$$N_{ik} = V_k \frac{\partial P_i \Delta_i}{\partial V_k} = -J_{ik} \dots\dots\dots (2-42)$$

$$L_{ii} = V_i \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} = -V_i \sum_{k \in i} (G_{ik} \sin \theta_{ik} + B_{ik} \cos \theta_{ik}) V_k + V_i^2 B_{ii} \approx -Q_i^{sp} + V_i^2 B_{ii} \dots (2-43)$$

$$L_{ik} = V_k \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_k} = H_{ik} \dots\dots\dots (2-44)$$

$$P_i^{sp} = P_i^{sp} - P_i^d \dots\dots\dots (2-45)$$

$$Q_i^{sp} = Q_i^{sp} - Q_i^d \dots\dots\dots (2-46)$$

2.7 Distributed Generation (DG)

Distributed Generation (pembangkit terdistribusi) adalah pembangkit tenaga listrik dalam jaringan distribusi atau di sisi pelanggan jaringan (Ackermann, 2000). DG termasuk sumber energi tambahan berskala kecil yang digunakan untuk membantu memenuhi permintaan beban tinggi (misalnya, angin, surya, biomassa, mikrohidro) dimana pemakaiannya dapat dikombinasikan dengan sumber energi yang ada.

Pembangkit terdistribusi memiliki beberapa keunggulan, antara lain :

1. Letaknya biasanya berdekatan dengan beban yang dapat meminimalkan rugi-rugi, biaya operasional, serta dapat menjangkau daerah terpencil yang jauh dari pembangkit utama.
2. Dapat memperbaiki kualitas daya dan ramah lingkungan.
3. Sebagian hasil produksi energi listrik dapat dijual ke pihak lain dan dapat meningkatkan tingkat ekonomi suatu daerah.

Dalam hal injeksi DG perlu memperhatikan beberapa faktor teknis, misalnya lokasi yang tepat, potensi alam yang berpengaruh besar untuk dimanfaatkan, dan kapasitas pembangkit yang akan diterapkan. Pengelompokan pembangkit terdistribusi berdasarkan kapasitas pembangkitannya dapat dijelaskan pada tabel berikut ini.

Tabel 2.2
Klasifikasi *Distributed Generation*

Klasifikasi <i>Distributed Generation</i>	Kapasitas <i>Distributed Generation</i>
<i>Micro DG</i>	~ 1 Watt < 5 kW
<i>Small DG</i>	5 kW < 5 MW
<i>Medium DG</i>	5 MW < 50 MW
<i>Large DG</i>	50 MW < ~ 300 MW

Sumber : Ackermann (2000, p.197)

Besarnya kapasitas pembangkit terdistribusi berkaitan dengan teknologi yang akan digunakan dalam sistem tenaga listrik. Teknologi yang dimaksud adalah jenis pembangkit baru yang dipasang secara mandiri maupun yang dikombinasikan dengan jenis pembangkit lain. Untuk mendapatkan kapasitas DG yang tepat, perlu memasang beberapa modul yang dapat dipasang sendiri dan ada juga yang berasal dari rakitan pabrik. Keuntungan pemasangan antar modul secara tunggal yaitu apabila ada salah satu modul yang mengalami kerusakan, maka modul lainnya tetap bisa beroperasi secara normal. Berikut ini merupakan klasifikasi pembangkit tersebar berdasarkan jenis teknologi yang dapat digunakan dalam menunjang injeksi pembangkit terdistribusi.

Tabel 2.3
Teknologi untuk *Distributed Generation*

Teknologi	Besar Kapasitas per Modul
<i>Combined cycle gas turbine</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
Renewable	
<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, phosphoric acid</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

Sumber : Ackermann (2000, p.198)

Masalah injeksi pembangkit terdistribusi dapat diselesaikan menggunakan fungsi fitness dengan meminimalkan kerugian sistem, yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Rugi\ sistem_{min} = \sum_s P_{gs} - \sum_t P_{dt} \dots\dots\dots (2-47)$$

dimana,

P_{gs} = daya yang dihasilkan generator s

P_{dt} = daya beban t

Pengurangan rugi daya total sistem distribusi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{nbr} R_i \cdot |I_i|^2 \dots\dots\dots (2-48)$$

dimana,

f_1 = rugi daya sistem

R_i = resistansi cabang i

I_i = arus dari cabang i

nbr = jumlah cabang total

Batas operasi pembangkitan dari pembangkit tersebar yaitu :

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{maks} \dots\dots\dots (2-49)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{maks} \dots\dots\dots (2-50)$$

dimana,

P_{gi}^{min} = kapasitas pembangkitan daya aktif minimum yang dihasilkan i DG

P_{gi}^{maks} = kapasitas pembangkitan daya aktif maksimum yang dihasilkan i DG

Q_{gi}^{min} = kapasitas pembangkitan daya reaktif minimum yang dihasilkan i DG

Q_{gi}^{mak} = kapasitas pembangkitan daya reaktif maksimum yang dihasilkan i DG

2.8 Algoritma

Algoritma yang dapat digunakan dalam menyelesaikan permasalahan secara umum adalah algoritma eksak dan algoritma pendekatan. Algoritma eksak menggunakan formulasi matematis untuk mendapatkan hasil yang optimal, sedangkan algoritma pendekatan biasanya membandingkan dua atau lebih algoritma penyelesaian untuk mendapatkan solusi terbaik. algoritma pendekatan terdiri dari dua macam yaitu :

a. Algoritma heuristik

Algoritma heuristik berasal dari bahasa Yunani yaitu "*heuriskein*" yang artinya menemukan dan mendapatkan. Secara umum algoritma heuristik adalah proses penyelesaian dari titik awal sampai ditemukan solusi yang diinginkan. Algoritma ini hanya dapat digunakan untuk masalah tertentu, seperti *Nearest Neighborhood*.

b. Algoritma metaheuristik

Algoritma metaheuristik adalah algoritma lanjut dalam menyelesaikan masalah dengan menggunakan proses iterasi untuk memperbaiki solusi sebelumnya atau mendapatkan solusi yang terbaik dalam optimisasi. Algoritma ini bisa digunakan untuk berbagai permasalahan, seperti *Genetic Algorithm*.

Penyelesaian masalah optimisasi berkaitan dengan algoritma yang digunakan. Algoritma merupakan langkah – langkah sistematis untuk menyelesaikan permasalahan dengan tujuan memperoleh hasil solusi yang terbaik dan efisien. Algoritma yang terinspirasi dari alam biasanya berkaitan dengan spesies untuk mempertahankan hidup. Spesies akan melakukan perburuan mangsa dan berpindah tempat untuk mendapatkan tempat yang lebih baik. Algoritma ini dapat dikelompokkan menjadi 3 bagian, yaitu :

a. Algoritma berbasis lokal

Algoritma ini mengandalkan solusi sementara dan dilakukan proses iterasi sampai menemukan solusi yang diinginkan, contohnya adalah *Annealing Simulation*.

b. Algoritma evolusioner

Algoritma ini menggunakan individu yang secara acak bergabung kembali setelah solusi ditemukan dan bersama-sama mengikuti proses tersebut sampai solusi yang terbaik didapatkan. Contohnya adalah Algoritma Genetika.

c. Algoritma berbasis kawanan (*swarm*)

Algoritma ini berkaitan dengan kawanan yang menggunakan iterasi untuk mendapatkan hasil yang tepat. Hasil tersebut diperoleh berdasarkan hasil atau pengalaman sebelumnya. Contohnya adalah Algoritma Koloni Semut, Lebah.

2.9 *Swarm Intelligence*

Swarm intelligence merupakan bagian dari bidang *computation intelligence* yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi. *Swarm intelligence* mengadopsi tingkah laku hewan dalam mengamati lingkungan maupun perburuan mangsa. Beberapa perilaku hewan yang pernah digunakan sebagai bahan penelitian yaitu semut, burung, ikan, udang, dan kucing. Penelitian tentang perilaku semut dalam kebiasaan yang berkoloni dikenal dengan sebutan *Ant Colony Optimization (ACO)*. ACO menggunakan jejak semut saat berpindah. Penelitian perilaku burung dan ikan yang pergerakannya sering bersama dalam kelompoknya dikenal dengan sebutan *Particle Swarm Optimization (PSO)*. PSO

berfokus pada pergerakan partikel di ruang bebas untuk menentukan lokasi partikel yang terbaik. Perilaku serta pergerakan udang di tambak dikenal dengan *Krill Herd Algorithm* (KHA), yang mengamati kepadatan populasi serta pergerakan objek. Tingkah laku kucing yang cenderung lebih banyak mengamati pergerakan dikenal dengan *Cat Swarm Optimization* (CSO). Dalam penelitian ini menggunakan pendekatan CSO dan KHA.

2.9.1 *Cat Swarm Optimization*

Cat Swarm Optimization (CSO) dikembangkan pada tahun 2006 oleh Shu-Chuan Chu dan Pei-Wei Tsai di Taiwan. Algoritma CSO adalah salah satu algoritma optimisasi yang mengamati perilaku kucing yang berkaitan dengan perilaku pengamatan dan perburuan mangsa. Sebenarnya hewan lain yang memiliki kemiripan tingkah laku dengan kondisi lingkungan yang berbeda juga dapat digunakan sebagai objek penelitian, seperti singa atau harimau. Pemilihan kucing sebagai objek pengembangan algoritma optimisasi disebabkan karena kucing banyak dijumpai di sekitar lingkungan dan manusia pun sudah tidak asing lagi dengan kucing, bahkan ada yang menjadikan kucing sebagai hewan peliharaan. Kucing lebih banyak menghabiskan waktu hidupnya untuk bersantai atau bermalas-malasan seperti duduk hingga tertidur. Biasanya kucing akan berpindah tempat dari satu tempat ke tempat lainnya jika merasa tidak aman atau untuk mencari makanan.

Dalam hal ini kucing yang terlihat bermalas-malasan, jika diperhatikan lebih teliti kucing tersebut bersantai sambil mengamati sekeliling untuk mencari potensi perburuan mangsa atau pun sebagai perlindungan diri dari bahaya. Ketika ada perburuan, kucing akan mengamati terlebih dahulu sambil bersiap untuk menangkap mangsanya. Ketika mangsa lengah kucing siap untuk menyergap buruannya. Oleh sebab itu, tidak jarang kucing mempunyai reflek perlindungan diri dan pelacakan dalam perhitungan menangkap mangsa yang baik.

Berdasarkan perilaku tersebut, algoritma CSO dikategorikan menjadi 2 mode, yaitu :

- a. *Seeking mode* (mode pencarian)



Gambar 2.4 *Seeking mode*.

Sumber : Meziane (2015, p.255).

Model ini diadaptasi dari tingkah laku kucing saat bersantai sambil melakukan pengamatan sekitar. Banyaknya waktu yang digunakan dalam mengamati sebelum menyergap mangsa diimplementasikan dalam mode ini untuk menentukan variasi solusi yang akan digunakan. Dari berbagai macam solusi yang ada, nantinya akan dipilih solusi terbaik seperti halnya dengan kucing saat bersiap untuk melakukan sergapan. *Seeking mode* terbagi menjadi 4 sub bagian, yaitu :

1. *Seeking Memory Pool (SMP)*

SMP menentukan ukuran memori kucing untuk menentukan jumlah solusi acak yang diciptakan.

2. *Seeking Range of the selected Dimension (SRD)*

SRD menunjukkan mutasi untuk dimensi yang dipilih. Perbedaan nilai antara lama dan baru dari dimensi yang dipilih untuk mutasi memiliki kemungkinan yang tidak terlalu jauh.

3. *Counts of Dimension to Change (CDC)*

CDC digunakan untuk menentukan banyaknya dimensi yang akan divariasikan.

4. *Self Position Consideration (SPC)*

SPC adalah nilai boolean (0 dan 1) yang mengindikasikan posisi kucing perlu dipindahkan atau tidak.

Langkah – langkah *seeking mode* dapat dijelaskan sebagai berikut.

- (1) Membuat salinan j posisi saat ini kucing k , dimana $j = SMP$. Jika nilai SPC benar, misalkan $j = (SMP - 1)$, maka simpan posisi saat ini sebagai satu dari kandidat.
- (2) Untuk setiap salinan, berdasarkan CDC , secara acak plus atau minus nilai persentase SRD saat ini dan gantikan yang lama

$$X_{cn} = (1 \pm SRD \times R) \times X_c \dots\dots\dots (2-51)$$

dimana,

X_{cn} = posisi baru

R = nomor acak (antara 0 dan 1)

X_c = posisi saat ini

- (3) Menghitung nilai fitness (FS) dari semua titik kandidat
- (4) Jika semua FS tidak sama persis, maka harus menghitung probabilitas ($P_i = x_{kd}$) yang dipilih dari setiap titik kandidat dengan persamaan berikut.

$$P_i = \frac{|FS_i - FS_b|}{FS_{maks} - FS_{min}} \dots\dots\dots (2-52)$$

dimana, $0 < i < j$

- P_i = probabilitas kandidat kucing saat ini
- FS_i = nilai fitness kucing
- FS_{maks} = nilai maksimum fungsi fitness
- FS_{min} = nilai minimum fungsi fitness
- $FS_b = FS_{maks}$ = untuk menemukan solusi minimum
- $FS_b = FS_{min}$ = untuk menemukan solusi maksimum

(5) Secara acak pilih titik berpindah dari titik kandidat dan gantikan posisi kucing k .

b. *Tracing mode* (mode pelacakan)



Gambar 2.5 *Tracing mode*.

Sumber : Meziane (2015, p.255).

Tracing mode merupakan model yang diadaptasi saat melakukan sergapan mangsa. Posisi asal dan kecepatan saat menyergap akan berubah, maka perlu dilakukan pencatatan posisi dan kecepatan baru. Model ini membutuhkan lebih sedikit waktu daripada *seeking mode*.

Langkah – langkah *tracing mode* dapat dijelaskan sebagai berikut.

(1) Perbarui kecepatan untuk setiap dimensi ($v_{k,d}$) menurut persamaan berikut.

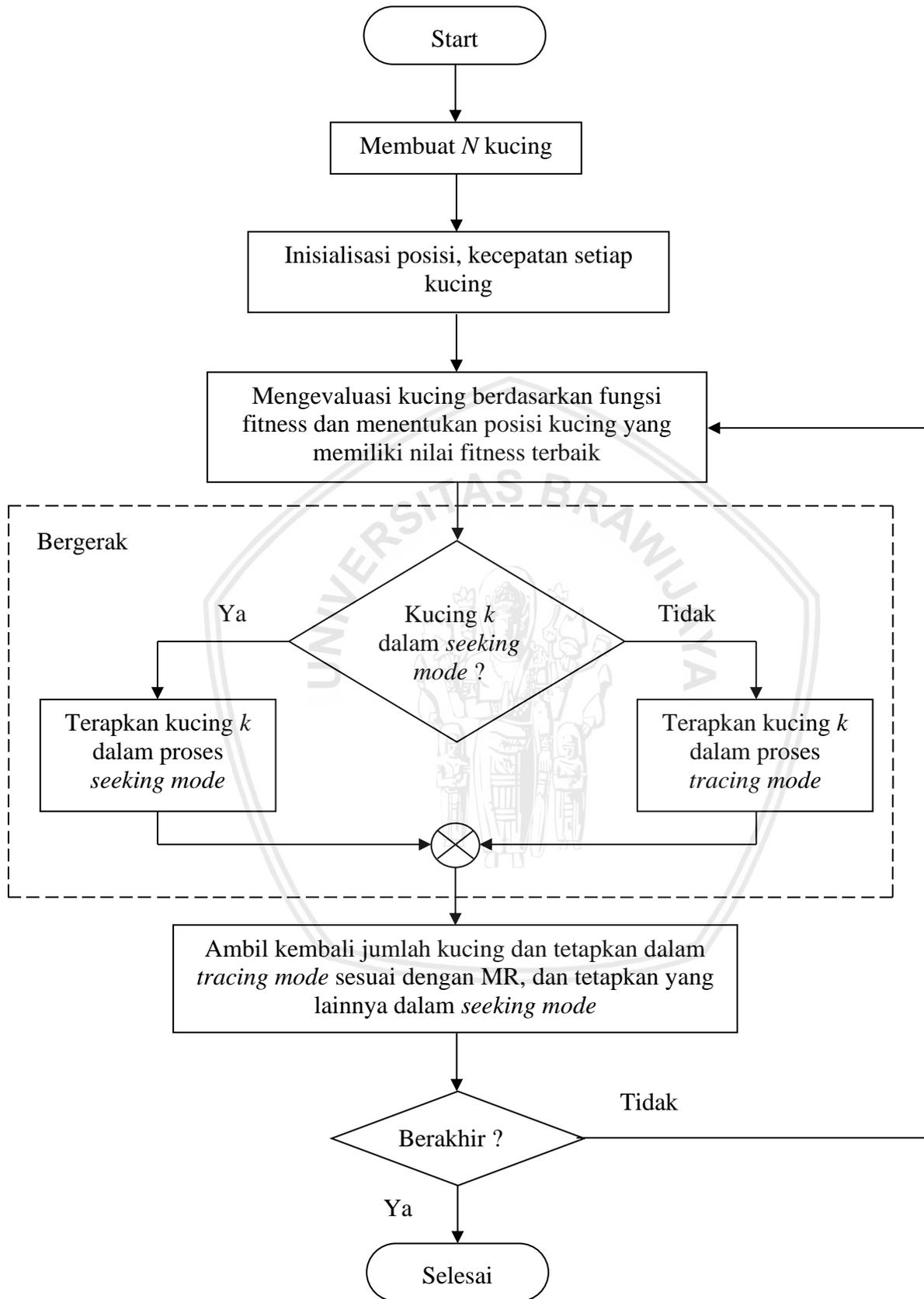
$$v_{k,d} = v_{k,d} + r_1 \cdot c_1 \cdot (x_{cn} - x_{k,d}), \quad d = 1, 2, \dots, M \dots\dots\dots (2-53)$$

(2) Cek jika kecepatan berada pada kisaran kecepatan maksimum. Dalam kasus kecepatan baru adalah melebihi kisaran maka diatur sama dengan batasnya

(3) Perbarui posisi kucing k menurut persamaan berikut.

$$x_{terbaik} = x_{k,d} + v_{k,d} \dots\dots\dots (2-54)$$

dimana $x_{terbaik,d}$ merupakan posisi kucing yang memiliki nilai fitness terbaik, $x_{k,d}$ adalah posisi kucing k , c_1 adalah konstanta, dan r_1 adalah nilai acak kisaran [0, 1].



Gambar 2.6 Flowchart algoritma CSO.

Sumber : Chu (2006, p.167).

2.9.2 *Krill Herd Algorithm*

Krill Herd Algorithm (KHA) adalah salah satu pendekatan untuk menyelesaikan permasalahan optimisasi yang dikembangkan oleh Gandomi dan Alavi pada tahun 2012 dengan menggunakan *krill* sebagai objek pengamatan untuk menemukan solusi yang tepat. *Krill* adalah sejenis udang kecil yang berada di laut lepas dan tergolong spesies yang banyak dijadikan makanan oleh paus, cumi-cumi, maupun burung yang ada disekitar lautan. *Krill* berukuran kurang lebih 8 mm sampai 60 mm, serta hidup secara berkelompok dalam jumlah yang besar yaitu 10.0000 *krill*/m³. Setiap individu *krill* dalam kelompoknya diamati pergerakannya dalam jarak antar individu dan jarak makanan yang dapat dibedakan menjadi 3 pergerakan, yaitu :

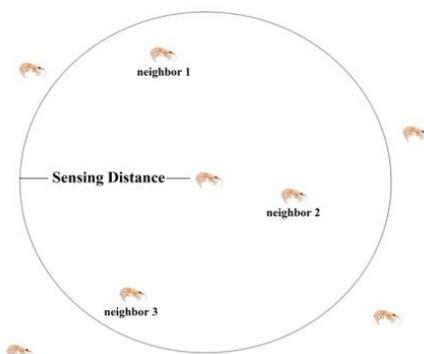
- Gerakan yang disebabkan kehadiran individu *krill* lainnya.
- Gerakan *krill* dalam pencarian makanan.
- Difusi fisik

Model Lagrangian dapat digunakan untuk menggambarkan ketiga pergerakan *krill*, dituliskan seperti persamaan berikut.

$$\frac{dX_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \dots\dots\dots (2-55)$$

dimana,

- N_i = gerakan yang disebabkan individu *krill* lainnya
- F_i = gerakan *krill* dalam pencarian makanan
- D_i = difusi acak
- i = *krill* ke - ...
- t = generasi



Gambar 2.7 Representasi pergerakan *krill*.

Sumber : Gandomi (2012, p.4834).

Pergerakan pertama, yaitu gerakan yang disebabkan kehadiran *krill* lainnya akan menghasilkan arah pergerakan yang disebabkan oleh efek target dan efek lokal, dituliskan pada persamaan berikut.

$$\alpha_i = \alpha_i^{target} + \alpha_i^{lokal} \dots\dots\dots (2-56)$$

dimana,

- α_i = arah pergerakan *krill*
- α_i^{target} = efek target
- α_i^{lokal} = efek lokal

Pergerakan baru *krill* dapat dituliskan dalam persamaan berikut.

$$N_i^{baru} = N^{max} \alpha_i + \omega_n N_i^{lama} \dots\dots\dots (2-57)$$

dimana,

- N_i^{baru} = pergerakan baru *krill*
- N^{max} = kecepatan maksimum
- α_i = arah pergerakan *krill*
- ω_n = berat inersia dalam [0,1]
- N_i^{lama} = pergerakan *krill* sebelumnya

Pergerakan kawan *krill* atau biasanya disebut tetangga akan berpengaruh pada pergerakan individu, dapat dituliskan pada persamaan berikut.

$$\alpha_i^{lokal} = \sum_{j=1}^{NN} \hat{R}_{ij} \hat{X}_{ij} \dots\dots\dots (2-58)$$

$$\hat{X}_{ij} = \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\| + \varepsilon} \dots\dots\dots (2-59)$$

$$\hat{R}_{ij} = \frac{K_i - K_j}{K^{terburuk} - K^{terbaik}} \dots\dots\dots (2-60)$$

dimana,

- $K^{terburuk}$ = nilai fitness terburuk dari individu *krill*
- $K^{terbaik}$ = nilai fitness terbaik dari individu *krill*
- K_i = fitness atau nilai fungsi objektif individu *krill* i
- K_j = fitness dari tetangga j ($j = 1, 2, \dots, NN$)
- X = posisi terkait
- NN = jumlah tetangga

Jarak penginderaan *krill* diusulkan untuk menentukan efek lokal, yang menentukan tetangga dari *krill* dapat dituliskan dalam persamaan berikut.

$$d_{si} = \frac{1}{5N} \sum_{j=1}^N \|X_i - X_j\| \dots\dots\dots (2-61)$$

dimana,

d_{si} = jarak penginderaan individu *krill* i

N = jumlah *krill*

Solusi optimal sebagai arah target akan berpengaruh pada gerak *krill* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\alpha_i^{target} = C^{terbaik} \hat{K}_{i,terbaik} \hat{X}_{i,terbaik} \dots\dots\dots (2-62)$$

$$C^{terbaik} = 2 \left(rand + \frac{I}{I_{maks}} \right) \dots\dots\dots (2-63)$$

dimana,

$C^{terbaik}$ = koefisien efektif individu *krill* dengan fitness terbaik pada *krill* i

N = jumlah *krill*

$rand$ = nilai acak antara 0 dan 1

I = jumlah iterasi aktual

I_{maks} = jumlah iterasi maksimal

Pergerakan kedua, yaitu gerakan mencari makanan yang dipengaruhi lokasi makanan dan pengalaman sebelumnya berkaitan dengan lokasi makanan.

$$\beta_i = \beta_i^{makanan} + \beta_i^{terbaik} \dots\dots\dots (2-64)$$

dimana,

β_i = arah pergerakan *krill*

$\beta_i^{makanan}$ = lokasi makanan,

$\beta_i^{terbaik}$ = lokasi makanan terbaik berdasarkan pengalaman sebelumnya

Gerakan *krill* dalam pencarian makanan dituliskan sebagai berikut.

$$F_i = V_f \beta_i + \omega_f F_i^{lama} \dots\dots\dots (2-65)$$

dimana,

F_i = pergerakan *krill*

V_f = kecepatan pencarian makanan

β_i = arah pergerakan *krill*

ω_f = berat inersia dalam [0,1]

F_i^{lama} = pergerakan pencarian sebelumnya

Efek pencarian makanan berkaitan dengan pusat lokasi makanan yang ditentukan diawal kemudian menentukan daya tarik makanan, dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\chi^{\text{makanan}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{K_i} X_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{K_i}} \dots\dots\dots (2-66)$$

$$\beta_i^{\text{makanan}} = C^{\text{makanan}} \hat{K}_{i,\text{makanan}} \hat{X}_{i,\text{makanan}} \dots\dots\dots (2-67)$$

$$C^{\text{makanan}} = 2 \left(1 - \frac{I}{I_{\text{maks}}} \right) \dots\dots\dots (2-68)$$

$$\beta_i^{\text{terbaik}} = \hat{K}_{i,\text{terbaik}} \hat{X}_{i,\text{terbaik}} \dots\dots\dots (2-69)$$

dimana,

χ^{makanan} = jarak daya tarik makanan

X_i = posisi dari *krill* i

K_i = fitness atau nilai fungsi objektif individu *krill* i

$K_{i,\text{terbaik}}$ = nilai fitness terbaik dari individu *krill*

$X_{i,\text{terbaik}}$ = posisi terbaik sebelumnya dari *krill* i

C^{makanan} = koefisien makanan

Pergerakan ketiga, yaitu difusi fisik yang merupakan vektor acak dan tidak berkurang secara terus menerus dengan adanya peningkatan jumlah itersi. Pergerakan berkaitan dengan kecepatan difusi maksimum dan vektor acak berikut ini.

$$D_i = D^{\text{maks}} \delta \dots\dots\dots (2-70)$$

dimana,

D_i = difusi fisik

D^{maks} = kecepatan difusi maksimum

δ = vektor acak, dalam $[-1,1]$.

Gerakan *krill* yang diakibatkan individu lainnya dan pergerakan mencari makanan akan menurun seiring bertambahnya iterasi atau waktu yang digunakan.

$$D_i = D^{\text{maks}} \left(1 - \frac{I}{I_{\text{maks}}} \right) \delta \dots\dots\dots (2-71)$$

Berdasarkan ketiga pergerakan *krill*, maka dapat diketahui posisi terbaru yang merupakan posisi optimal dari *krill* melalui persamaan berikut ini.

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + \Delta t \frac{dX_i}{dt} \dots\dots\dots (2-72)$$

$$\Delta t = C_t \sum_{j=1}^{NV} (UB_j - LB_j) \dots\dots\dots (2-73)$$

dimana,

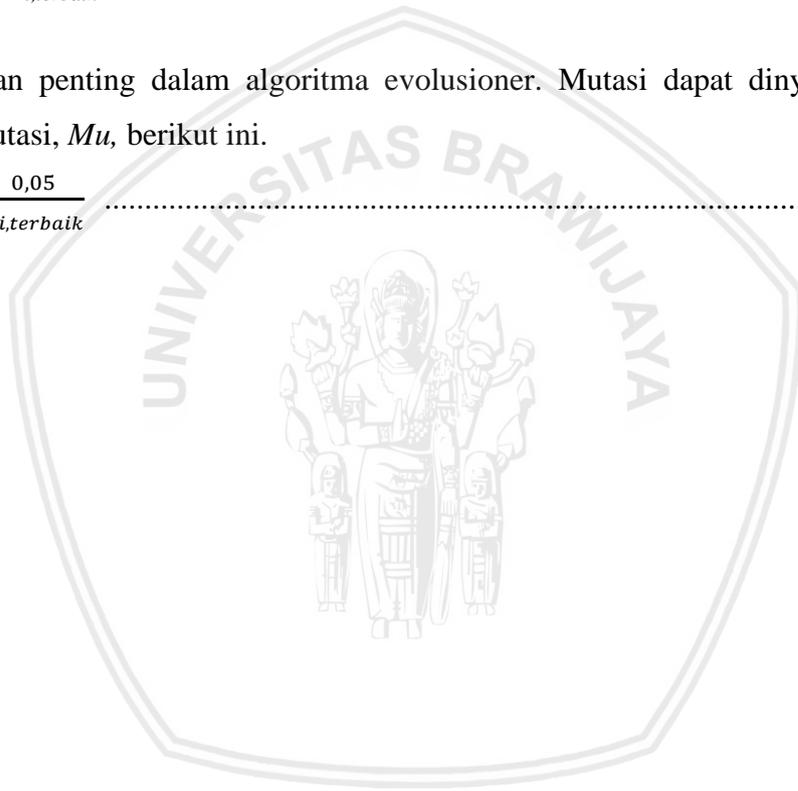
- NV = jumlah total variabel
- UB_j = batas atas variabel j ($j = 1, 2, \dots, NV$)
- LB_j = batas bawah variabel j ($j = 1, 2, \dots, NV$)
- C_t = nomor konstanta antara $[0, 2]$

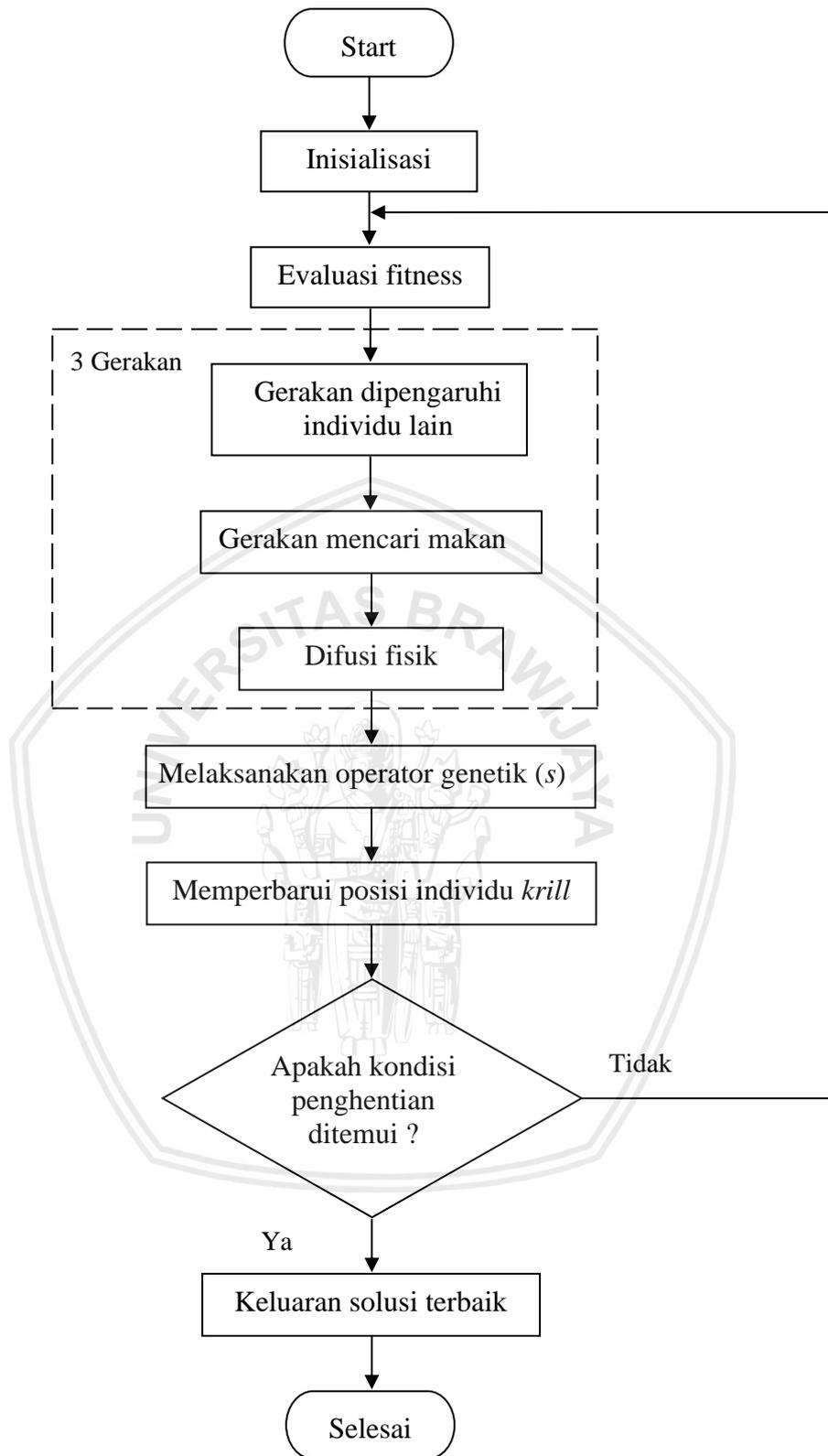
Untuk meningkatkan kinerja algoritma maka ditambahkan mekanisme reproduksi genetik yaitu *crossover* dan mutasi. Operator *crossover* dinilai efektif dalam menentukan global optimisasi. *Crossover* dinyatakan dalam probabilitas *crossover*, Cr , berikut.

$$Cr = 0,2 K_{i,terbaik} \dots\dots\dots (2-74)$$

Mutasi berperan penting dalam algoritma evolusioner. Mutasi dapat dinyatakan dalam probabilitas mutasi, Mu , berikut ini.

$$Mu = \frac{0,05}{K_{i,terbaik}} \dots\dots\dots (2-75)$$





Gambar 2.8 Flowchart algoritma KHA.

Sumber : Gandomi (2012, p.4837).

BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Fikir

Pemanfaatan energi listrik sebagai upaya menciptakan *green energy* memerlukan suatu tindakan yang mendukung produksi energi yang efisien dengan menggunakan satu atau lebih energi alternatif yang dapat digabungkan menjadi sumber energi terdistribusi. Sumber energi yang terdistribusi (*distributed generation*) mulai dikembangkan karena kadangkala sistem terpusat masih belum bisa melayani daerah yang terpencil. DG dapat berperan sebagai sumber daya tambahan di luar sistem terpusat dengan memperhatikan alokasi kebutuhan, topografi wilayah, kepadatan penduduk, serta lokasi injeksinya. Pemilihan lokasi injeksi DG harus sesuai dengan kemungkinan skenario injeksi yang optimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses optimisasi untuk meningkatkan kualitas daya yang berkaitan dengan pengurangan rugi daya listrik karena penambahan DG.

Penyelesaian masalah optimisasi terdiri dari dua solusi, yaitu secara eksak dan pendekatan. Solusi secara eksak berkaitan dengan penelitian kualitatif dan kuantitatif yang dapat diselesaikan dengan formulasi matematis. Solusi secara pendekatan dibagi menjadi algoritma heuristik dan metaheuristik. Algoritma heuristik biasanya dikenal dengan algoritma dasar untuk menyelesaikan masalah-masalah tertentu dengan konsep penyelesaian sederhana hingga ditemukannya solusi. Algoritma metaheuristik merupakan algoritma lanjut dari pengembangan heuristik, karena solusi penyelesaian masalahnya dicari yang terbaik diantara beberapa solusi yang ditemukan. Oleh karena itu, algoritma metaheuristik dianggap sesuai untuk digunakan dalam penelitian ini.

Dalam pencarian solusi, diperlukan suatu urutan sistematis yang disebut algoritma. Secara umum algoritma optimisasi terdiri dari algoritma berbasis lokal, algoritma evolusioner yang berkaitan dengan proses biologis makhluk hidup, serta algoritma *swarm* yang berdasarkan kepadatan makhluk hidup. Dalam penelitian ini menggunakan algoritma berbasis *swarm* yang mengadopsi perilaku sosial dalam suatu populasi. Konsep ini memperlihatkan suatu pergerakan individu secara mandiri dan sosial yang diakibatkan individu lain dalam populasinya. Selain itu, faktor lingkungan juga berpengaruh, yang menyebabkan suatu individu memperoleh suatu pengalaman untuk menentukan posisi yang tepat. Dalam hal ini, posisi baru dianggap merupakan solusi akhir yang dicari dalam injeksi DG.

Pemilihan *swarm* berdasarkan penggunaan DG yang jumlahnya lebih dari satu unit. Lebih spesifik *swarm* mengadopsi perilaku kucing yang dikenal dengan *Cat Swarm Optimization* dan perilaku krill yang dikenal dengan *Krill Herd Algorithm*. Kedua algoritma memiliki keunggulan daripada algoritma lainnya seperti *Ant Colony Optimization* (ACO), *Bee Colony Optimization* (BCO), *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang hanya melalui 1 pergerakan, yaitu pergerakan karena individu lain. CSO terdapat 2 pergerakan dan KHA terdapat 3 pergerakan dalam menentukan lokasi yang terbaik. CSO dan KHA mengamati perilaku secara lebih rinci yang dapat menunjang perhitungan dalam memperbaiki kualitas daya.

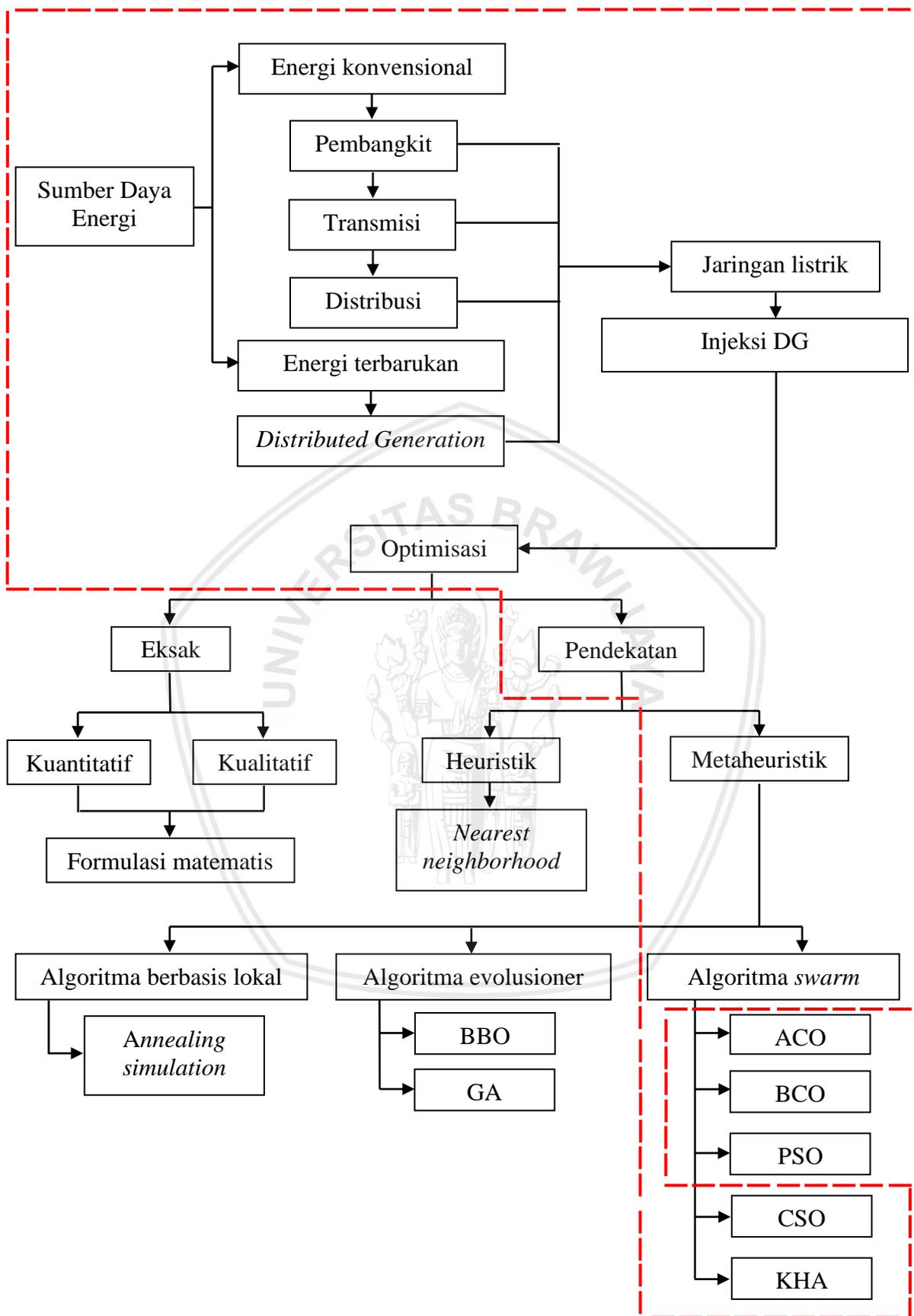
Injeksi DG dengan algoritma CSO, menggunakan pendekatan individu kucing yang dianalogikan sebagai DG. Pergerakan kucing yang pertama merupakan proses penentuan variasi solusi injeksi DG dengan menghitung probabilitas setiap titik kandidat yaitu titik bus yang dipilih. Kemudian pergerakan kedua yaitu menganalisis nilai fitness dari setiap kandidat untuk mendapatkan nilai fitness terbaik yang merupakan lokasi baru dari DG.

Algoritma KHA, menggunakan sekumpulan *krill* yang dianalogikan sebagai sumber utama. Injeksi DG berdasarkan persamaan Lagrangian yang terdiri dari perubahan lokasi karena adanya pengaruh individu *krill* lainnya yang dianalogikan dengan inisiasi DG yang akan diinjeksikan. Kemudian pergerakan *krill* karena adanya umpan baru dianalogikan dengan mencari lokasi injeksi DG berdasarkan nilai fitness. Pergerakan selanjutnya adalah penurunan aktivitas *krill* yang dianalogikan dengan penurunan jumlah iterasi seiring dengan diperolehnya nilai fitness terbaik yang menunjukkan lokasi injeksi DG yang diinginkan. Gambar 3.1 menjelaskan tentang kerangka konsep yang digunakan dalam penelitian.

3.2 Variabel Penelitian

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain :

1. *Single line diagram* jaringan distribusi
2. Data saluran dan data bus yang diperlukan
3. Perhitungan aliran daya menggunakan algoritma Newton Raphson
4. Perhitungan aliran daya menggunakan algoritma *Cat Swarm Optimization*
5. Perhitungan aliran daya menggunakan algoritma *Krill Herd Algorithm*
6. Lokasi dan kapasitas DG yang akan diinjeksikan berdasarkan hasil perhitungan



Gambar 3.1 Kerangka konsep penelitian.

3.3 Hipotesis

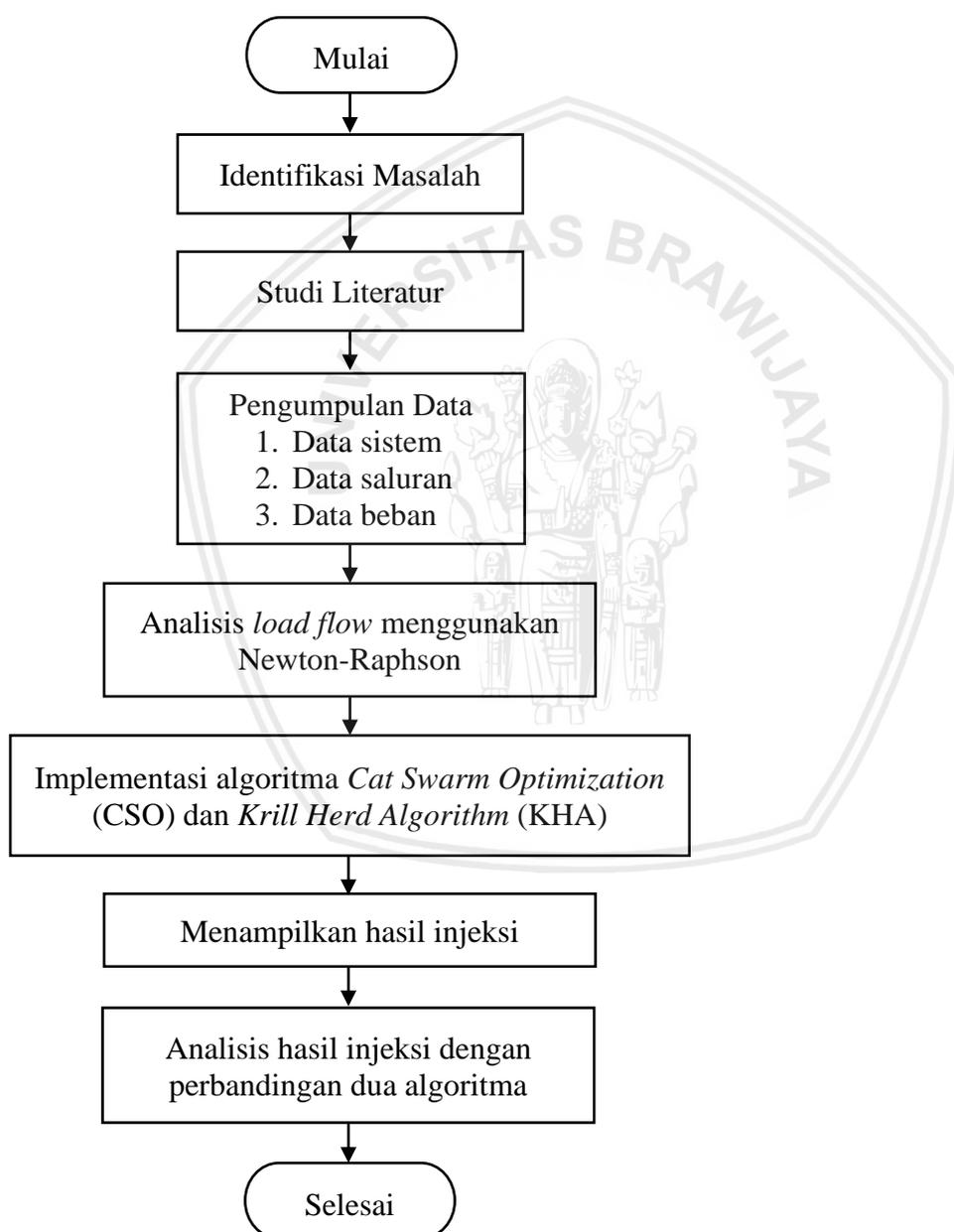
Penambahan sumber daya energi alternatif pada sistem distribusi kadangkala kurang mempertimbangkan aspek lokasi injeksi yang mempengaruhi kualitas daya. Usaha untuk meningkatkan kualitas daya dengan mengurangi rugi-rugi daya listrik perlu dilakukan. Berdasarkan hasil studi kelayakan pembangkit *hybrid* surya-angin yang terhubung grid dengan saluran distribusi 20 kV sistem GI Sengkaling penyulang Pujon, diperoleh drop tegangan yang cukup merugikan. Perbaikan drop tegangan hanya dilakukan pada sebagian kecil bus dari 117 bus.

Oleh karena itu, dilakukan injeksi lokasi DG dengan menggunakan pendekatan yang berbeda untuk mengetahui hasil yang lebih baik. Dengan menggunakan pendekatan algoritma *Cat Swarm Optimization* (CSO) dan *Krill Herd Algorithm* (KHA) diharapkan dapat memperoleh suatu keuntungan dalam segi teknis maupun biaya.



BAB IV METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam optimisasi injeksi *distributed generation* berbasis pendekatan *Cat Swarm Optimization* (CSO) dan *Krill Herd Algorithm* (KHA) dimulai dengan pencarian literatur atau sumber pendukung sampai pengambilan kesimpulan, yang dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 4.1 Diagram alir metodologi penelitian.

4.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan berupa pencarian teori pendukung yang sesuai dengan topik penelitian, bersumber dari buku, referensi jurnal, maupun penelitian dasar yang pernah dilakukan sebelumnya. Jurnal yang digunakan sebagai literatur antara lain *IEEE Transaction on Power Systems* dan Elsevier. Pustaka buku yang digunakan adalah buku *Power System Analysis*, buku metodologi penulisan, serta buku Matlab. Studi literatur diperlukan sebagai bahan acuan dalam melakukan proses perancangan algoritma, serta dalam melakukan proses injeksi sumber energi yang baru.

4.2 Pengumpulan Data

Proses pendataan bertujuan untuk mendapatkan data yang digunakan untuk menentukan variasi pola dan kemungkinan alternatif dalam penambahan sumber energi lain diluar sistem yang sudah ada. Data yang digunakan yaitu *single line diagram* GI Sengkaling Penyulang Pujon, data saluran, dan beban. Data akan diolah dalam 2 tahap, yang pertama data diolah tanpa adanya penambahan sumber apapun dan yang kedua, data diolah dengan mengimplementasikan algoritma CSO dan KHA.

4.3 Perancangan Algoritma Injeksi

Perancangan diawali dengan melakukan proses penginstalan *software* Matlab 2013b pada PC. Kemudian membuat rancangan program dengan fasilitas *editor* yang tersedia untuk menampilkan bentuk rancangan yang diinginkan. Rancangan algoritma berisi rumusan perhitungan dan skenario injeksi yang lebih efektif. Algoritma perhitungan dituliskan dalam bentuk *script* program secara berurutan dari proses perhitungan data awal sampai akhir. Langkah selanjutnya adalah melakukan validasi program untuk mengetahui tingkat kebenaran suatu algoritma. Pengujian dilakukan dengan proses *running* dan diamati apakah dapat bekerja sesuai dengan perintah yang diberikan tanpa terjadi kesalahan. Kesalahan dalam bahasa pemrograman biasanya adalah kesalahan *sintaksis* (penulisan program), kesalahan logika, maupun kesalahan *runtime* (kesalahan pengoperasian).

Tahap pertama, membuat pemodelan sistem dari *single diagram* GI Sengkaling Penyulang Pujon. Pemodelan bertujuan untuk mengetahui penggambaran operasi sistem secara ideal dengan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 (*Electrical Power System Analysis Software*).

Tahap kedua, gambar pemodelan sistem perlu ditambahkan nilai parameter pada tiap-tiap saluran dan beban. Penambahan nilai menggunakan satuan per unit (p.u.) untuk memudahkan dalam proses perhitungan dan analisis pada sistem tenaga listrik. Perhitungan per unit dengan cara menskalakan nilai parameter listrik terhadap nilai referensinya (*base*) yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

Daya semu (S), VA

$$S_{base} = V_{base} \times I_{base} \dots\dots\dots (4-1)$$

Tegangan (V), Volt

$$V_{base} = \frac{S_{base}}{I_{base}} \dots\dots\dots (4-2)$$

Arus (I), Ampere

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \dots\dots\dots (4-3)$$

$$I_{base} = \frac{kVA_{base}}{kV_{base}} \dots\dots\dots (4-4)$$

Impedansi (Z), Ω

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \dots\dots\dots (4-5)$$

$$Z_{base} = \frac{(kV_{base})^2 \times 1000}{kVA_{base}} \dots\dots\dots (4-6)$$

$$Z_{base} = \frac{(kV_{base})^2}{MVA_{base}} \dots\dots\dots (4-7)$$

Perumusan per unit

$$V = I \cdot Z \dots\dots\dots (4-8)$$

$$\frac{V}{V_{base}} = \frac{I \cdot Z}{I_{base} \cdot Z_{base}} \dots\dots\dots (4-9)$$

$$V_{pu} = I_{pu} \cdot Z_{pu} \dots\dots\dots (4-10)$$

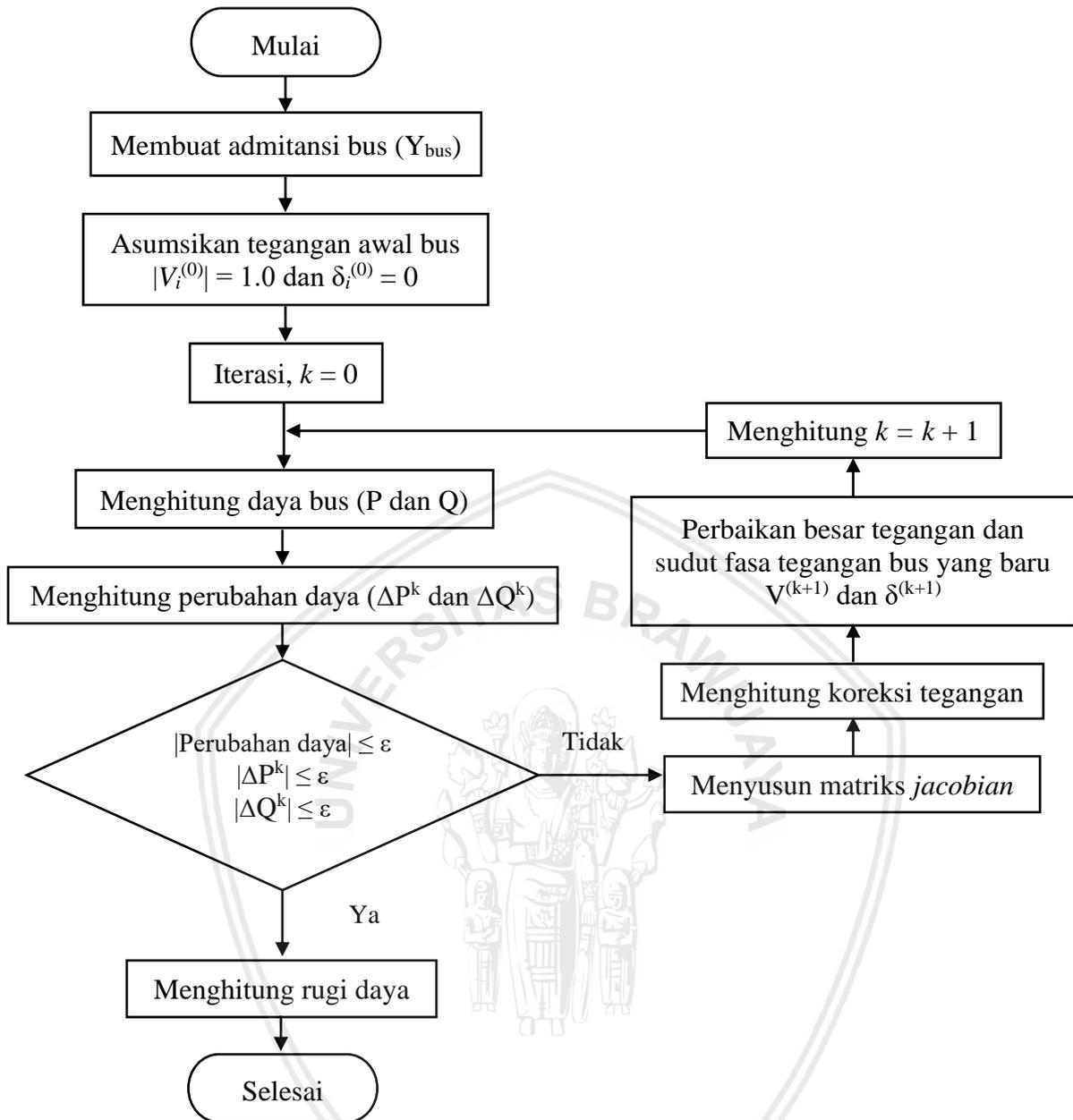
Impedansi per unit (Z_{pu})

$$Z_{pu} = \frac{Z (\Omega)}{Z_{base}} = \frac{Z \cdot MVA_{base}}{kV_{base}^2} \dots\dots\dots (4-11)$$

Daya per unit

$$Daya_{pu} = \frac{Daya \text{ sebenarnya (kW)}}{Daya \text{ dasar (kVA)}} \dots\dots\dots (4-12)$$

Tahap ketiga, membuat *script* pada Matlab dengan memasukkan data-data saluran dan beban. Data digunakan untuk mendapatkan total rugi saluran dengan menggunakan studi aliran daya Newton Raphson. Berikut merupakan diagram aliran daya menggunakan algoritma Newton Raphson.



Gambar 4.2 Diagram aliran daya Newton Raphson.

Langkah-langkah perhitungan aliran daya dengan Newton Raphson dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Membuat matriks admitansi bus (Y_{bus}).
2. Memberikan nilai awal untuk bus beban, dimana P dan Q diketahui, dengan mengasumsikan tegangan dan sudut fasa bernilai $|V_i^{(0)}| = 1.0$ dan $\delta_i^{(0)} = 0$.
3. Melakukan iterasi pertama.
4. Menghitung nilai daya aktif dan daya reaktif dengan persamaan (2-17) dan (2-18).
5. Menghitung perubahan daya aktif (ΔP^k) dan perubahan daya reaktif (ΔQ^k) dengan persamaan (2-21) dan (2-22).

6. Besar ΔP^k dan ΔQ^k dibatasi oleh nilai tertentu, jika sudah memenuhi maka dapat dilanjutkan ke langkah 10 dan jika belum memenuhi harus melalui langkah ke 6 terlebih dahulu.
7. Menyusun matriks *Jacobian*.
8. Menghitung koreksi tegangan untuk mendapatkan nilai perbaikan besar tegangan dan sudut fasa tegangan bus yang baru.
9. Menghitung iterasi selanjutnya sampai nilai pada langkah ke 5 mencapai nilai konvergen.
10. Menghitung nilai rugi daya.

Tahap keempat, membuat rancangan program optimisasi injeksi *distributed generation* pada penyulang Pujon menggunakan CSO dan KHA. Fungsi objektif yang dapat digunakan yaitu.

$$P_L = \sum P_{DG} - \sum P_D \dots\dots\dots (4-13)$$

$$\text{Minimize } F = \min (P_L) \dots\dots\dots (4-14)$$

dimana,

$$P_L = \text{rugi daya aktif}$$

$$P_{DG} = \text{rugi daya aktif pembangkitan DG}$$

$$P_D = \text{rugi daya aktif pembebanan}$$

Optimisasi injeksi *distributed generation* harus memenuhi batasan (*constraint*) sebagai berikut.

$$V_{min} \leq V \leq V_{maks} \dots\dots\dots (4-15)$$

$$P_{DGmin} \leq P_{DG} \leq P_{DGmaks} \dots\dots\dots (4-16)$$

$$\sum P_{DG} = \sum P_D + P_L \dots\dots\dots (4-17)$$

$$1 < DG_{loc} < n \dots\dots\dots (4-18)$$

dimana,

$$V_{min} = \text{batas minimum tegangan (0,90 p.u)}$$

$$V_{maks} = \text{batas maksimum tegangan (1,1 p.u)}$$

$$V = \text{tegangan}$$

$$P_{DGmin} = \text{batas bawah daya pembangkitan DG}$$

$$P_{DGmaks} = \text{batas atas daya pembangkitan DG}$$

$$P_{DG} = \text{daya pembangkitan DG}$$

$$n = \text{jumlah bus}$$

Rancangan algoritma pertama yaitu CSO, mengadopsi tingkah laku kucing dalam perburuan mangsa. Representasi CSO dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1
Representasi Algoritma CSO dalam Penentuan Lokasi Injeksi DG

Parameter CSO	Representasi DG
<i>cat</i>	Kandidat bus pada sistem yang diuji
<i>Seeking Memory Pool (SMP)</i>	Identifikasi lokasi awal DG
<i>Self Position Consideration (SPC)</i>	Ada atau tidaknya DG
<i>Counts of Dimension to Change (CDC)</i>	Penentuan bus yang akan divariasikan
<i>Seeking Range of the selected Dimension (SRD)</i>	Lokasi baru DG sesuai nilai acak CDC
MR	<i>Mix Ratio</i> – perbandingan dimensi
<i>cat.Velocity</i>	Kecepatan perubahan lokasi bus
alpha	Taraf kesalahan pengujian
<i>BestCost</i>	Nilai <i>losses</i> yang terbaik
<i>GlobalBestCat</i>	Letak bus terbaik dengan <i>losses</i> terendah

Representasi CSO pada Tabel 4.1 dapat dikelompokkan menurut fungsinya, yaitu :

a. Inisialisasi

Serangkaian kondisi awal yang diberikan dalam batasan minimum dan maksimum dari variabel kontrol yang dipilih. Variabel yang diatur antara lain minimal bus, maksimal bus, batas bawah daya injeksi, batas atas daya injeksi, serta jumlah DG yang diinjeksikan kedalam sistem.

Inisialisasi jumlah populasi yaitu sebesar 20. Inisialisasi jumlah maksimum iterasi, yaitu sebesar 100. Penentuan batas maksimum injeksi mengacu pada jumlah maksimum beban pada penyulang Pujon yaitu sebesar 2,08 MW dan batas minimum injeksi sebesar 0,83 MW.

b. Seleksi

Seleksi bertujuan untuk memperoleh individu yang lebih baik, dalam hal ini adalah lokasi bus terbaik yang didapatkan dari nilai fitness terbaik dalam populasi. Seleksi terdiri dari 2 tahap yaitu :

- *Seeking mode*

Seeking mode merupakan pencarian lokasi DG dengan identifikasi SMP yang merupakan titik awal DG. Pencarian SMP dipengaruhi nilai SPC, bernilai 0 atau 1. Nilai 0 mengidentifikasi ketidakhadiran DG pada sistem, dan nilai 1 menunjukkan adanya DG yang diinjeksikan pada sistem. Posisi awal DG memenuhi persamaan $X_c = SMP - I$. CDC digunakan untuk menentukan

banyaknya bus yang akan divariasikan. CDC mempengaruhi nilai SRD yang menunjukkan mutasi individu yakni lokasi baru DG berdasarkan nilai acak CDC. CDC dapat juga disimbolkan dengan R yang nilainya antara 0 dan 1. Lokasi DG yang baru disimbolkan dengan X_{cn} .

- *Tracing mode*

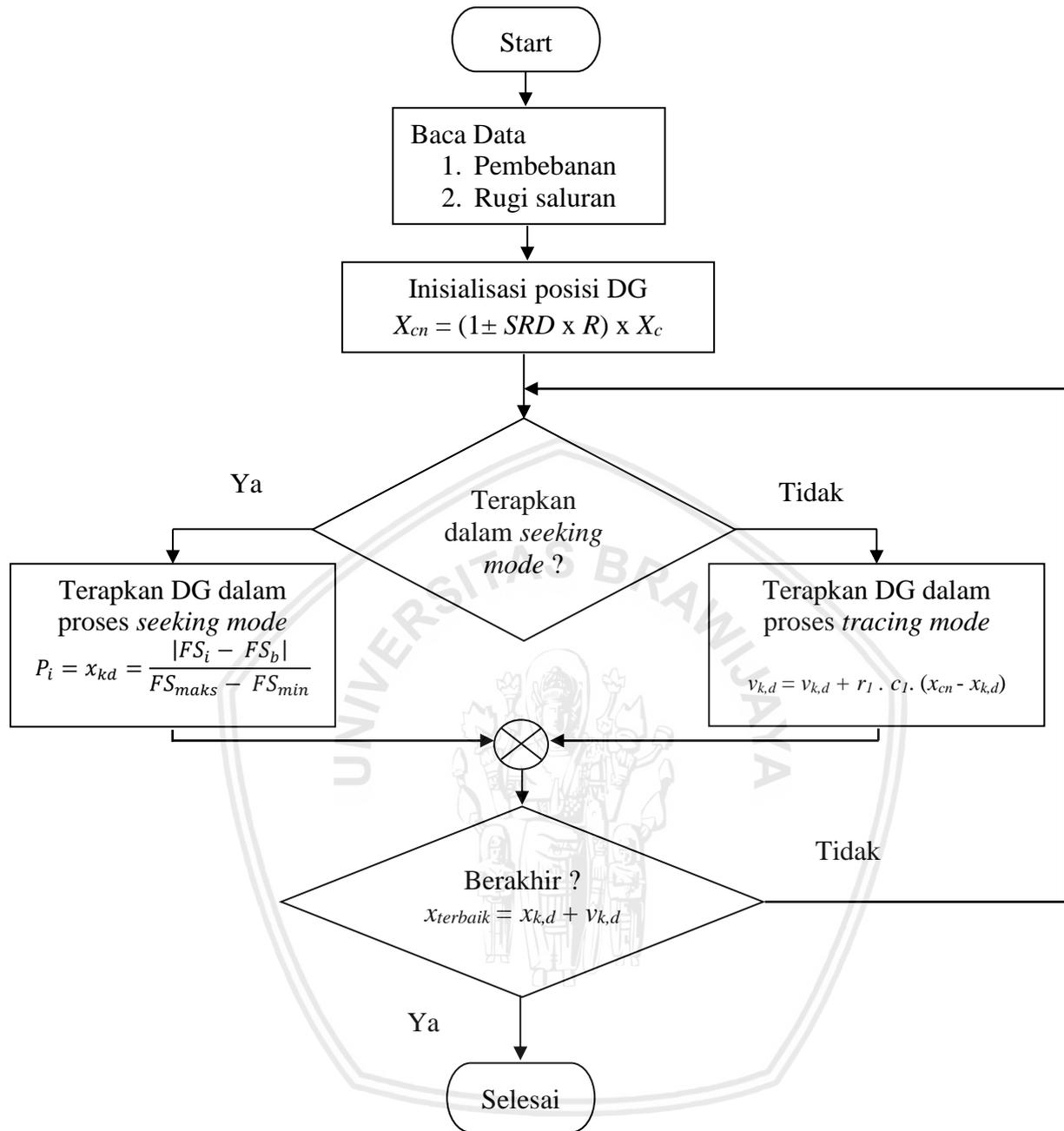
Tracing mode adalah pencarian akhir yang mengidentifikasi kecepatan pencarian lokasi bus dan titik akhir lokasi bus yang akan diinjeksi DG. $v_{k,d}$ adalah simbol untuk kecepatan penentuan titik lokasi. $x_{terbaik}$ merupakan titik lokasi bus injeksi yang memenuhi persamaan $x_{terbaik} = x_{k,d} + v_{k,d}$.

c. Evaluasi fungsi

Evaluasi yang bertujuan untuk menentukan nilai fitness terbaik dari proses optimisasi, mendapatkan kapasitas injeksi DG dan lokasi bus yang tepat sesuai skenario pembebanan. Langkah yang dilakukan yaitu menentukan *BestCost* dan *GlobalBestCat* sesuai dengan maksimum iterasi sejumlah 100 iterasi.

Optimisasi dengan algoritma CSO digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 4.3, langkah penyelesaiannya dijelaskan sebagai berikut.

1. Mengisialisasi posisi awal dengan persamaan $X_{cn} = (1 \pm SRD \times R) \times X_c$.
2. Apakah *distributed generation* diterapkan dalam pencarian (*seeking*), jika ya maka dapat melanjutkan ke langkah 4, jika tidak maka dilanjutkan ke langkah 5.
3. Proses pencarian dapat menggunakan persamaan $P_i = x_{kd} = \frac{|FS_i - FS_b|}{FS_{maks} - FS_{min}}$.
4. Proses pelancakan dapat menggunakan persamaan $v_{k,d} = v_{k,d} + r1 \cdot C1 \cdot (x_{cn} - x_{k,d})$.
5. Langkah 4 dan langkah 5 diproses untuk memperoleh nilai posisi baru yang dituliskan dengan persamaan $x_{terbaik} = x_{k,d} + v_{k,d}$.
6. Jika nilai posisi baru tidak sesuai maka proses diulang kembali ke langkah 3 sampai posisi yang diinginkan konvergen.



Gambar 4.3 Diagram alir optimisasi injeksi DG dengan CSO.

Algoritma kedua adalah KHA yang mengadopsi perilaku kawanan *krill*. Representasi KHA dalam optimisasi penentuan lokasi bus dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. Inisialisasi

Inisialisasi dilakukan dengan pemberian nilai awal saat deklarasi variabel yaitu jumlah minimal dan maksimal bus, serta batasan kapasitas DG yang diinjeksikan.

b. Seleksi

Pencarian solusi terbaik dilakukan dengan proses seleksi individu-individu, yaitu bus-bus yang menjadi kandidat lokasi terbaik berdasarkan nilai fitness masing-masing bus. Seleksi yang digunakan terdiri dari 3 tahap yaitu :

- *Movement Effect*

Perubahan yang disebabkan adanya penambahan kapasitas daya DG. Kondisi awal seleksi yaitu dengan menggunakan pembebanan maksimum. Kondisi kedua yaitu dengan menggunakan skenario pembebanan 10 %, 20 %, 30 %, dan 40 %.

- *Foraging Effect*

Tahapan seleksi ini berkaitan dengan *virtual food* yang memungkinkan perubahan kecepatan penentuan titik lokasi bus baru.

- *Difusion Effect*

Seleksi yang terakhir yaitu proses difusi yang mengindikasikan perubahan lokasi bus akibat adanya penambahan jumlah DG yang diinjeksikan kedalam sistem eksisting.

c. Crossover

Proses *crossover* berkaitan dengan sejumlah bilangan acak yang dibangkitkan pada setiap skenario pembebanan. Jika nilai bilangan acak melebihi parameter *crossover* yang ditentukan, maka individu (bus) akan dipindahsilangkan pada titik lokasi yang ditentukan.

d. Mutasi

Tahapan mutasi akan dijalankan setelah hasil proses *crossover* telah diperoleh. Pada proses ini juga dibangkitkan bilangan acak yang nilainya telah ditentukan pada inisialisasi awal. Hasil mutasi diperoleh nilai *bestcost* secara keseluruhan, yaitu *losses* terendah dan kapasitas injeksi DG.

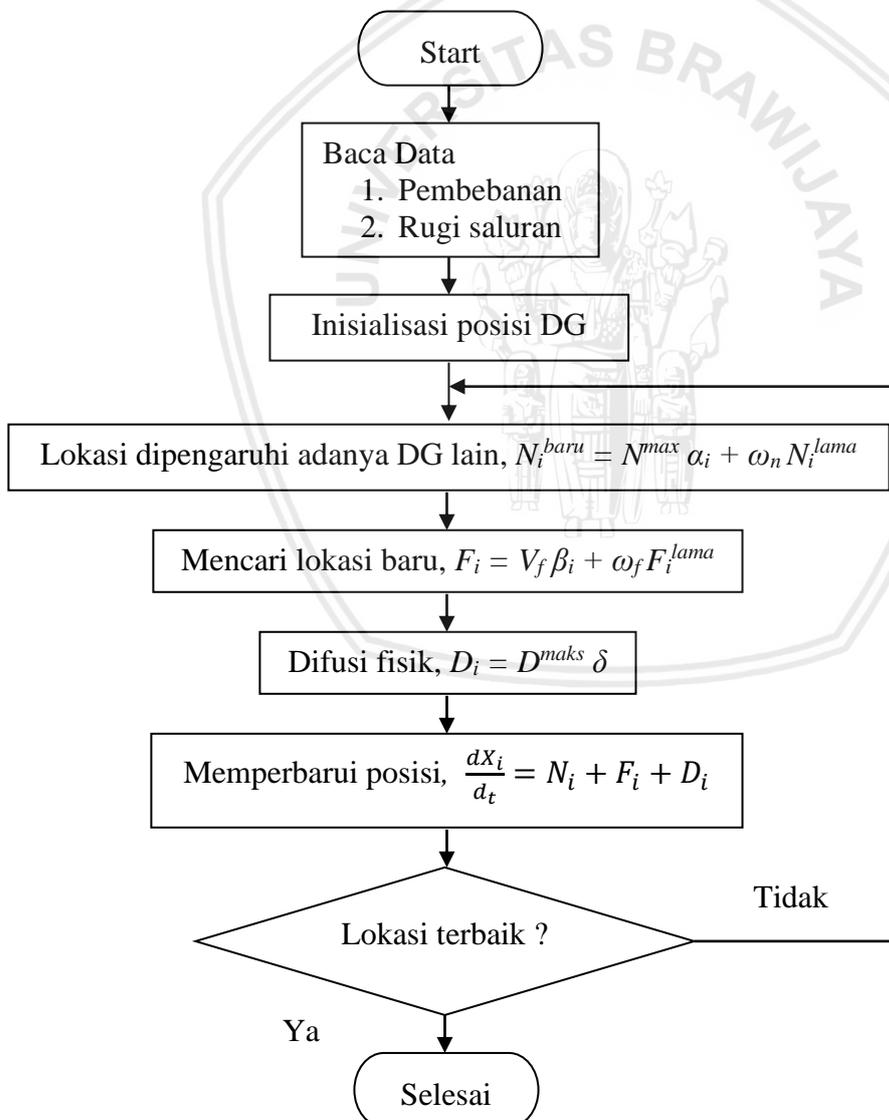
e. Evaluasi fungsi

Evaluasi penentuan nilai fitness terbaik untuk mendapatkan lokasi bus injeksi dengan fungsi rugi daya terendah.

Berdasarkan penjelasan di atas, representasi algoritma KHA dalam penentuan titik lokasi dapat dilihat pada Tabel 4.2. Diagram alir algoritma KHA digambarkan dalam Gambar 4.4.

Tabel 4.2
Representasi Algoritma KHA dalam Penentuan Lokasi Injeksi DG

Parameter KHA	Representasi DG
<i>krill</i>	Kandidat bus sistem uji
<i>MaxMovment</i>	Parameter <i>Movement Effect</i> – penambahan kapasitas DG
<i>ForagingVelocity</i>	Parameter <i>Foraging Effect</i> - kecepatan penentuan bus baru
<i>MaxDifusion</i>	Parameter <i>Difusion Effect</i> - penambahan jumlah DG
gamma	Parameter <i>crossover</i>
mu	Parameter mutasi
<i>BestCost</i>	<i>Losses</i> yang terendah
<i>LocalBestKrill</i>	Titik lokasi bus terbaik
<i>GlobalBestKrill</i>	Titik lokasi bus terbaik dengan <i>losses</i> terendah



Gambar 4.4 Diagram alir optimisasi injeksi DG dengan KHA.

Langkah-langkah optimisasi injeksi dengan algoritma KHA dari diagram alir di atas adalah sebagai berikut.

1. Melakukan pembacaan data pembebanan dan data saluran.
2. Inisialisasi posisi awal DG.
3. Melakukan proses pencarian titik lokasi dengan melalui 3 tahapan.
4. Tahap pertama, pencarian titik berdasarkan pengaruh adanya DG lain dengan menerapkan persamaan $N_i^{baru} = N^{max} \alpha_i + \omega_n N_i^{lama}$.
5. Tahap kedua, pencarian lokasi baru dengan persamaan $F_i = V_f \beta_i + \omega_f F_i^{lama}$.
6. Tahap ketiga, memperhitungkan proses difusi fisik ($D_i = D^{maks} \delta$).
7. Melakukan pembaruan posisi setelah melewati langkah ke 4 – ke 6 dengan menerapkan persamaan $\frac{dx_i}{dt} = N_i + F_i + D_i$.
8. Apakah *distributed generation* telah menemukan lokasi yang sesuai, jika ya maka dapat melanjutkan ke langkah 9, jika tidak maka kembali lagi ke langkah 3.

Tahap kelima, menampilkan lokasi hasil keseluruhan injeksi *distributed generation* dan melakukan analisis perbandingan penggunaan kedua algoritma. Analisis meliputi ada atau tidaknya selisih nilai rugi daya sebelum adanya injeksi DG maupun setelah injeksi. Setelah dilakukan injeksi dapat diketahui pengaruh antara algoritma CSO atau KHA yang berkontribusi dalam mengurangi rugi daya yang lebih baik.

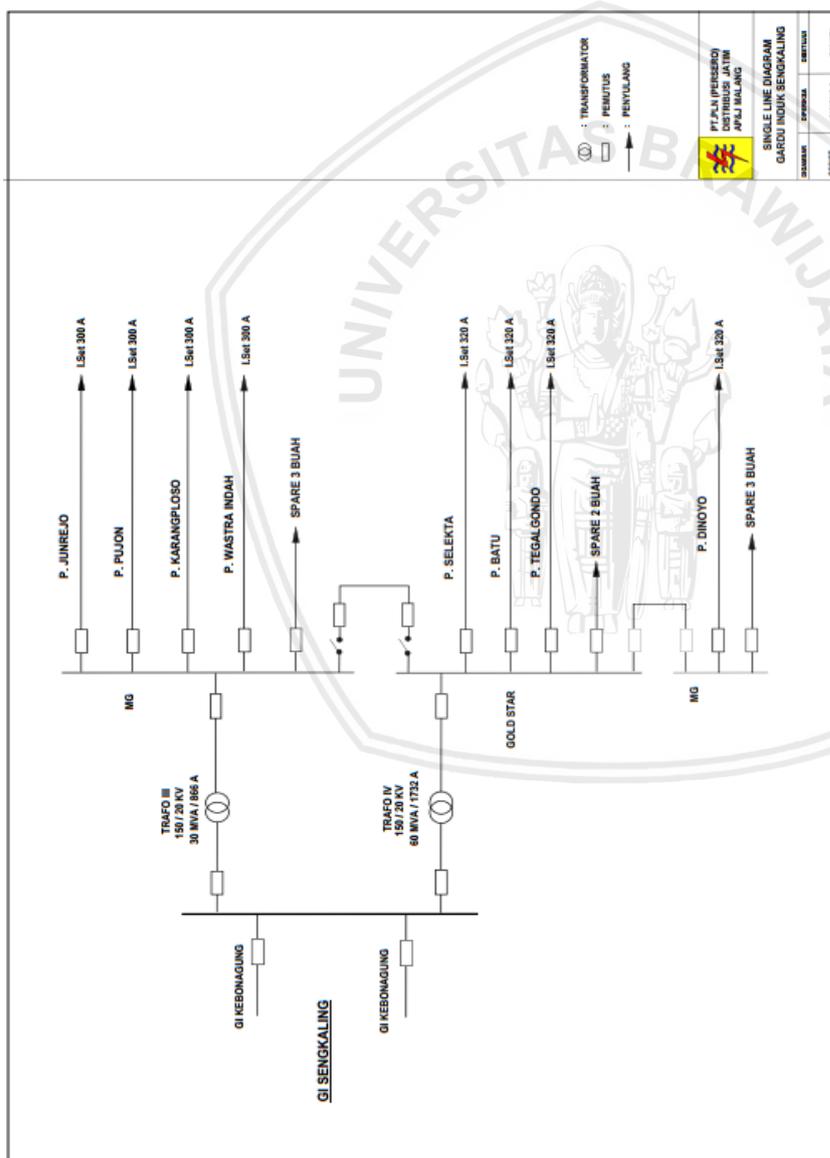


BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Lokasi Penelitian

Optimisasi injeksi pembangkit tersebar menggunakan data sistem distribusi radial 20 kV yang diperoleh dari PT. PLN APJ Malang Raya, terdiri dari 11 Gardu Induk (GI) dan 74 penyulang. Penelitian ini menggunakan salah satu area pelayanan APJ Malang Raya yaitu GI Sengkaling Penyulang Pujon. Berikut merupakan *single line* diagram GI Sengkaling.



Gambar 5.1 Single line diagram Gardu Induk Sengkaling.

Sumber : PT. PLN APJ Malang.

5.2 Data Sistem Distribusi Penyulang Pujon

Penggambaran operasi sistem distribusi penyulang Pujon dapat dilakukan dengan membuat pemodelan sistem dari gambar *single diagram* pada Gambar 5.2. Pemodelan dibuat menggunakan *software* ETAP 12.6.0, hasil penggambaran dapat dilihat pada Lampiran A.3.

Daya penyulang Pujon disuplai oleh trafo III GI Sengkaling sebesar 6 MVA dengan pembatas arus trafo III sebesar 866 A. Saluran distribusi penyulang Pujon menggunakan penghantar berjenis *All Aluminium Alloy Conductor* (AAAC). Panjang saluran distribusi penyulang Pujon sejauh 59,624 kms dengan total 117 bus. Saluran terpanjang adalah dari GI ke bus 1 sejauh 7,112 km sedangkan saluran terpendek yaitu dari bus 91 ke bus 92 sejauh 0,016 km yang dapat dilihat pada Lampiran B.2.

Setiap saluran tersebut terdapat nilai resistansi dan reaktansi dalam satuan ohm yang harus diganti terlebih dahulu ke dalam satuan per unit (p.u.) untuk memudahkan dalam perhitungan aliran daya. Perhitungan per unit dapat menggunakan persamaan (4-1), (4-7), dan (4-11). Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan per unit saluran M104 yang menghubungkan GI ke bus 1 sejauh 7,112 km yang menggunakan penghantar berjenis AAAC 3x70 mm².

Jarak saluran	: 7,112 km
V	: 20 kV
KHA	: 255 A
Resistansi	: 3,27721 Ω
Reaktansi	: 2,54041 Ω

$$\begin{aligned}
 S_{base} &= V_{base} \times I_{base} \\
 &= 20 \times 255 \\
 &= 5100 \text{ kVA} \\
 &= 5,1 \text{ MVA}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{base} &= \frac{(kV_{base})^2}{MVA_{base}} \\
 &= \frac{(20)^2}{5,1} \\
 &= 78,43137 \Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{pu} = \frac{Z(\Omega)}{Z_{base}}$$

$$\begin{aligned}
 R_{pu} &= \frac{R (\Omega)}{Z_{base}} \\
 &= \frac{3,27721}{78,43137} \\
 &= 0,04178 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{pu} &= \frac{X (\Omega)}{Z_{base}} \\
 &= \frac{2,54041}{78,43137} \\
 &= 0,03239 \text{ p.u.}
 \end{aligned}$$

Perhitungan saluran lain dari bus 1 sampai bus 117 dilakukan dengan cara seperti di atas. Hasil perhitungan keseluruhan saluran dapat dilihat pada Lampiran C.1.

Selain nilai resistansi dan reaktansi yang dirubah dalam satuan per unit, nilai beban terpasang yang dilayani oleh penyulang Pujon juga harus dirubah dalam satuan per unit. Penyulang Pujon terdiri dari 71 unit bus gardu distribusi dengan total beban minimum sebesar 1,18221 MW dan 0,73267 MVAR. Total beban rata-rata sebesar 2,67118 MW dan 1,65545 MVAR. Total beban maksimum sebesar 4,15719 MW dan 2,57639 MVAR. Perhitungan dilakukan sesuai dengan masing-masing kapasitas daya dari gardu distribusi. Berikut ini salah satu contoh perhitungan per unit pada bus 2 dengan kode gardu D0031.

Kode Gardu	: D0031
Kapasitas trafo	: 75 kVA
cos ϕ	: 0,85
Beban minimum	: 10,8 kVA
Beban rata-rata	: 17,0 kVA
Beban maksimum	: 23,2 kVA

$$P = S \times \cos \phi \dots\dots\dots (5-1)$$

Pada beban minimum, nilai daya aktif : $P = 10,8 \times 0,85 = 9,18 \text{ kW}$

Pada beban rata-rata, nilai daya aktif : $P = 17,0 \times 0,85 = 14,45 \text{ kW}$

Pada beban maksimum, nilai daya aktif : $P = 23,2 \times 0,85 = 19,72 \text{ kW}$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \dots\dots\dots (5-2)$$

Pada beban minimum, nilai daya reaktif : $Q = \sqrt{10,8^2 - 9,18^2}$
 $= 5,68925 \text{ kVAR}$

Pada beban rata-rata, nilai daya reaktif : $Q = \sqrt{17,0^2 - 14,45^2}$
 $= 8,95531 \text{ kVAR}$

Pada beban maksimum, nilai daya reaktif : $Q = \sqrt{23,2^2 - 19,72^2}$
 $= 12,22136 \text{ kVAR}$

Beban minimum, nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dalam perhitungan per unit

$$P_{pu} = \frac{9,18}{75} = 0,12240 \text{ pu}$$

$$Q_{pu} = \frac{5,68925}{75} = 0,07586 \text{ pu}$$

Beban rata-rata, nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dalam perhitungan per unit

$$P_{pu} = \frac{14,45000}{75} = 0,19267 \text{ pu}$$

$$Q_{pu} = \frac{8,95531}{75} = 0,11940 \text{ pu}$$

Beban maksimum, nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dalam perhitungan per unit

$$P_{pu} = \frac{19,72}{75} = 0,26293 \text{ pu}$$

$$Q_{pu} = \frac{12,22136}{75} = 0,16295 \text{ pu}$$

Perhitungan daya aktif dan reaktif untuk beban minimum, beban rata-rata, dan beban maksimum dari masing-masing gardu dilakukan dengan cara seperti di atas. Hasil perhitungan per unit secara keseluruhan untuk beban minimum dapat dilihat pada Lampiran C.2, beban rata-rata pada Lampiran C.3, dan beban maksimum pada Lampiran C.4.

5.3 Aliran Daya Sistem Eksisting Sebelum Injeksi DG

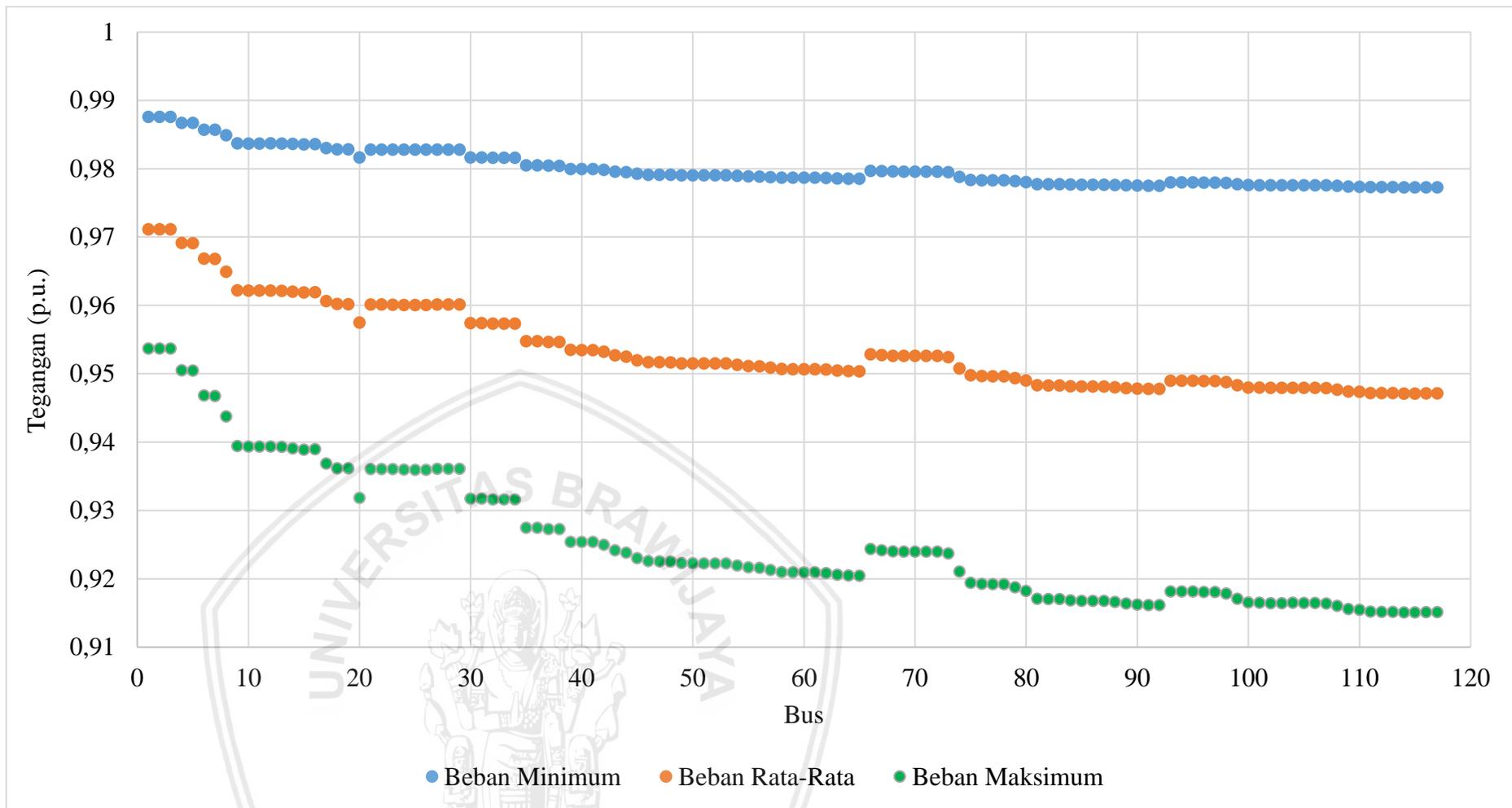
Proses optimisasi injeksi DG perlu mempertimbangkan analisis aliran daya sistem eksisting penyulang Pujon dengan menggunakan algoritma Newton Raphson untuk mengetahui nilai parameter pada setiap bus. Parameter yang diperoleh antara lain tegangan, besar sudut fasa, dan daya. Parameter ini menjadi pertimbangan untuk mengetahui kapasitas injeksi DG. Analisis aliran daya yang dihitung menggunakan kondisi beban minimum, beban rata-rata, dan beban maksimum. Hasil perhitungan aliran daya dengan kondisi ketiga pembebanan tersebut dapat dilihat pada Lampiran E.1, E.2, dan E.3. Berikut ini merupakan perbandingan hasil perhitungan aliran daya sebelum injeksi DG.

Tabel 5.1
Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Sistem Eksisting Sebelum Injeksi DG dengan Kondisi 3 Pembebanan

Kondisi Pembebanan	Pembangkitan		Pembebanan		Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi	
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)
Beban Minimum	1,205	0,750	1,182	0,733	0,023	0,017	1,91	2,27
Beban Rata-Rata	2,793	1,746	2,671	1,655	0,122	0,091	4,37	5,21
Beban Maksimum	4,471	2,811	4,157	2,576	0,314	0,235	7,02	8,36

Tabel 5.1 menunjukkan pada kondisi beban minimum (40 %), daya pembangkitan sebesar 1,205 MW dan 0,750 MVAR. Daya pembebanan yaitu 1,182 MW dan 0,733 MVAR dengan rugi-rugi 0,023 MW (1,91 %) dan 0,017 MVAR (2,27 %). Kondisi pembebanan kedua yaitu beban rata-rata (70 %), daya yang dibangkitkan adalah 2,793 MW dan 1,746 MVAR dengan daya pembebanan sebesar 2,671 MW dan 1,655 MVAR. Rugi daya aktif sebesar 0,122 MW dengan prosentase 4,37 % dan rugi daya reaktif 0,091 MVAR (5,21 %). Prosentase rugi daya terbesar terdapat pada kondisi beban maksimum (100 %). Rugi daya aktif sebesar 0,314 MW dengan prosentase 7,02%. Rugi daya reaktif sebesar 0,235 dengan prosentase 8,36 %. Daya pembangkitan sebesar 4,471 MW dan 2,811 MVAR, sedangkan daya pembebanan yaitu 4,157 MW dan 2,576 MVAR.

Besarnya nilai rugi daya pada kondisi beban maksimum dapat dijadikan acuan untuk pertimbangan penambahan DG. Hal ini dikarenakan kondisi beban maksimum memiliki indikasi profil tegangan yang lebih rendah, rata-rata berkisar di bawah 0,95 p.u jika dibandingkan dengan kondisi beban minimum maupun beban rata-rata. Profil tegangan yang diijinkan sesuai SPLN 1 : 1995 memiliki batasan nilai $0,90 \text{ p.u} \leq V_{bus} \leq 1.1 \text{ p.u}$. Berdasarkan kondisi penurunan profil tegangan, maka dalam penelitian ini digunakan beban maksimum dalam proses optimisasi injeksi DG. Berikut ini merupakan perbandingan profil tegangan sistem untuk setiap pembebanan yang digambarkan dalam Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Profil tegangan bus untuk masing-masing kondisi beban.

5.4 Optimisasi Injeksi *Distributed Generation*

Distributed generation dikelompokkan menjadi tiga tipe berdasarkan jenis daya yang diinjeksikannya, yaitu :

1. Tipe 1

Hanya menghasilkan daya aktif (P) untuk diinjeksikan ke dalam sistem *eksisting*, misalnya penggunaan *photovoltaik* (PV).

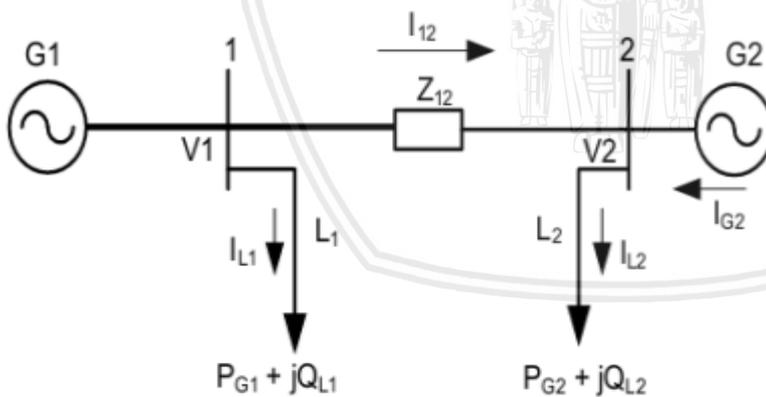
2. Tipe 2

Menghasilkan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang diinjeksikan ke dalam sistem *eksisting*, misalnya dalam penggunaan DG berbasis mikrohidro.

3. Tipe 3

Menghasilkan daya aktif (P), namun juga menyerap daya reaktif (Q), misalnya dalam pemanfaatan sumber daya angin.

Berdasarkan ketiga tipe DG di atas, maka dalam penelitian ini proses injeksi menggunakan tipe 1 yaitu DG yang digunakan adalah PV. Injeksi DG bertujuan untuk meminimalkan rugi daya sistem dan memperbaiki profil tegangan setiap bus. Berikut ini merupakan hubungan antara daya aktif, tegangan, arus, dan sudut fasa yang digambarkan dalam Gambar 5.4 dalam sistem 2 bus.



Gambar 5.4 *Single line* diagram sistem 2 bus.

Sumber : Elias (2012, p.3).

Hubungan antara P, V, I dari gambar di atas adalah :

$$P = |V||I| \cos \theta \dots\dots\dots (5-3)$$

$$P_{L2} = |V_2||I_{L2}| \cos \theta_{L2} \dots\dots\dots (5-4)$$

$$P_{G2} = |V_2||I_{G2}| \cos \theta_{G2} \dots\dots\dots (5-5)$$

dimana,

- P_{L2} = Daya aktif yang mengalir ke beban L_2
- P_{G2} = Daya aktif yang mengalir dari generator G_2
- V_2 = Tegangan bus 2
- I_{L2} = Arus yang mengalir ke beban L_2
- I_{G2} = Arus yang mengalir dari generator G_2
- θ = Sudut fasa antara tegangan dan arus

Berdasarkan Hukum KCL, berlaku persamaan berikut :

$$I_{L2} = I_{12} + I_{G2} \dots\dots\dots (5-6)$$

dimana,

- I_{12} = Arus yang mengalir antara bus 1 dan bus 2

Impedansi (Z) antara bus 1 dan bus 2 berlaku :

$$Z_{12} = Z_{sal} = R_{sal} + jX_{sal} \dots\dots\dots (5-7)$$

dimana,

- Z_{12} = Impedansi antara bus 1 dan bus 2
- Z_{sal} = Impedansi saluran
- R_{sal} = Resistansi saluran
- X_{sal} = Reaktansi saluran

Rugi daya aktif saluran dapat berkurang, yang memenuhi persamaan berikut ini.

$$P_{loss} = I_{12}^2 \cdot R_{sal} \dots\dots\dots (5-8)$$

Hasil dari perhitungan aliran daya sistem, selanjutnya dilakukan optimisasi dengan algoritma. Injeksi menggunakan dua algoritma berbeda untuk mengetahui perbandingan terbaik, diantaranya algoritma *Cat Swarm Optimization (CSO)* dan *Krill Herd Algorithm (KHA)*. Selain membandingkan hasil optimisasi kedua algoritma, perbandingan juga dilakukan untuk menganalisis *losses* sebelum dan setelah adanya injeksi DG. Berdasarkan penelitian injeksi DG yang dilakukan oleh Hwang, Meziiane, Sultana, dan ChitraDevi, 3 unit DG digunakan dalam proses pengurangan rugi daya listrik pada sistem uji yang berbeda. Hasil penelitian, menghasilkan injeksi yang optimal pada 3 lokasi bus sistem distribusi radial. Berdasarkan literasi penelitian tersebut, maka dalam penelitian ini dilakukan proses injeksi DG dengan menggunakan empat cara. Cara pertama yaitu skenario 1 dengan injeksi lokasi 1 bus dengan nilai daya injeksi adalah 20 % dari daya beban maksimum. Cara kedua adalah skenario 2 dengan injeksi lokasi 2 bus, daya injeksi sebesar 30 % dari daya beban

maksimum. Cara ketiga adalah skenario 3 dengan injeksi 3 lokasi bus dengan daya injeksi 40 % dari daya beban maksimum. Cara keempat, injeksi 4 lokasi bus dengan injeksi daya 50 % dari daya beban maksimum.

Nilai kapasitas daya aktif DG yang akan diinjeksikan harus memenuhi persamaan di bawah ini :

$$P_{DG} = N \times P_{loadmax} \dots\dots\dots (5-9)$$

dimana,

$$P_{DG} = \text{kapasitas daya injeksi DG (MW)}$$

$$N = \text{prosentase nilai daya (\%)}$$

$$P_{loadmax} = \text{kapasitas daya beban maksimum (MW)}$$

Skenario 1 adalah menentukan 1 lokasi bus dengan nilai daya injeksi 20 % dari beban maksimum. Kapasitas daya injeksi DG yaitu :

$$\begin{aligned} P_{DG} &= N \times P_{loadmax} \\ &= \frac{20}{100} \times 4,157 \\ &= 0,83 \text{ MW} \end{aligned}$$

Skenario 2 adalah menentukan 2 lokasi bus dengan nilai daya injeksi 30 % dari beban maksimum. Kapasitas daya injeksi DG yaitu :

$$\begin{aligned} P_{DG} &= N \times P_{loadmax} \\ &= \frac{30}{100} \times 4,157 \\ &= 1,25 \text{ MW} \end{aligned}$$

Skenario 3 adalah menentukan 3 lokasi bus dengan nilai daya injeksi 40 % dari beban maksimum. Kapasitas daya injeksi DG yaitu :

$$\begin{aligned} P_{DG} &= N \times P_{loadmax} \\ &= \frac{40}{100} \times 4,157 \\ &= 1,66 \text{ MW} \end{aligned}$$

Skenario 4 adalah menentukan 4 lokasi bus dengan nilai daya injeksi 50 % dari beban maksimum. Kapasitas daya injeksi DG yaitu :

$$\begin{aligned} P_{DG} &= N \times P_{loadmax} \\ &= \frac{50}{100} \times 4,157 \\ &= 2,08 \text{ MW} \end{aligned}$$



Setiap skenario dilakukan percobaan sebanyak 15 kali, 30 kali, dan 50 kali seperti pada penelitian yang dilakukan ChithraDevi untuk mendapatkan titik kandidat lokasi yang sesuai. Namun pada penelitian ini yang ditampilkan hanya 15 kali percobaan karena nilai yang diinginkan telah mencapai konvergensi dalam rentang 15 kali percobaan. Jumlah iterasi yang dilakukan sebanyak 100 iterasi secara terus menerus sampai diperoleh nilai variabel yang mengarah pada satu titik konvergensi.

5.4.1 Optimisasi Injeksi *Distributed Generation* dengan Algoritma *Cat Swarm Optimization*

Algoritma CSO merupakan algoritma pertama yang digunakan dalam optimisasi injeksi DG. Langkah pertama setelah memasukkan data beban dan data saluran kedalam perhitungan Newton Raphson, yaitu menentukan batas kapasitas daya DG yang diinjeksikan sesuai persamaan (5-9). Langkah kedua, memasukkan parameter awal yang digunakan sebagai pertimbangan dalam memperoleh titik lokasi bus terbaik. Parameter tersebut dituliskan dalam Tabel 5.2. Langkah ketiga yaitu menjalankan optimisasi menggunakan 4 skenario untuk memperoleh nilai fitness terbaik.

Tabel 5.2
Nilai Parameter *Cat Swarm Optimization*

Parameter	Keterangan	Nilai
nPop	Ukuran populasi	20
c1_cat	Koefisien cat	1
c2_cat	Koefisien populasi cat	2
alpha	Taraf signifikansi	0,3
SMP	Identifikasi lokasi awal DG	7,5
SRD	Lokasi baru DG sesuai nilai acak CDC	0,2
CDC	Variasi dimensi, penentuan bus yang akan divariasikan	0,2
MR	<i>Mix Ratio</i> – perbandingan dimensi	0,3
w	Faktor bobot	0,5
MaxIt	Maksimum generasi / iterasi	100

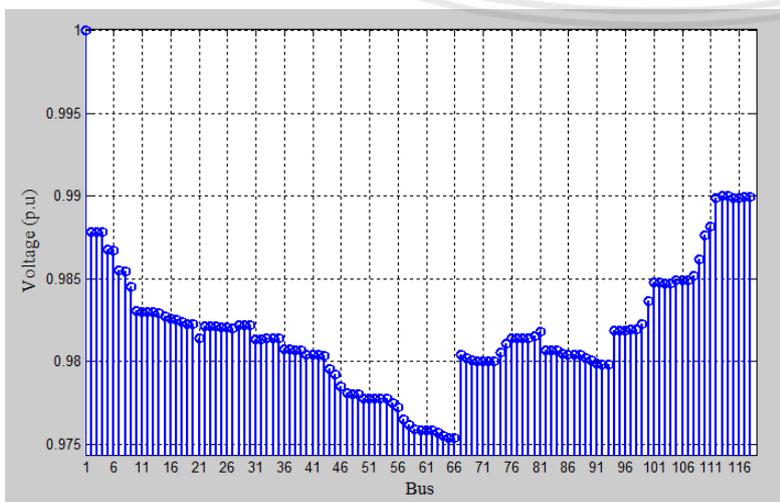
a. Skenario 1

Pada skenario 1, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 0,83 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.3.

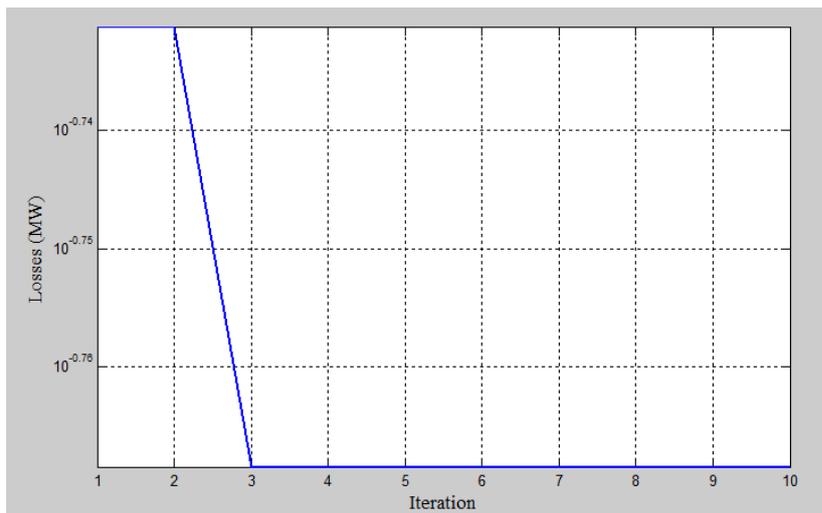
Tabel 5.3
Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 1

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	46	0.649	0,101	0,075	2,25	2,66	10	207.3
2	68	0.830	0,113	0,085	2,53	3,04	10	191.2
3	92	0.830	0,165	0,152	3,68	5,41	4	119.2
4	92	0.830	0,165	0,152	3,68	5,41	5	100.1
5	90	0.830	0,102	0,079	2,28	2,84	9	208.7
6	102	0.690	0,108	0,081	2,42	2,89	9	224.5
7	102	0.830	0,099	0,074	2,22	2,64	9	231.5
8	15	0.830	0,118	0,090	2,64	3,21	3	197.2
9	113	0.830	0,043	0,032	0,96	1,14	3	215.1
10	113	0.830	0,043	0,032	0,96	1,14	3	210.4
11	92	0.830	0,165	0,152	3,68	5,41	6	109.0
12	113	0.830	0,043	0,032	0,96	1,14	3	222.4
13	45	0.830	0,101	0,076	2,25	2,69	4	236.0
14	89	0.830	0,103	0,083	2,29	2,94	5	236.1
15	45	0.830	0,101	0,076	2,25	2,69	6	230.8
Terbaik	113	0.830	0,043	0,032	0,96	1,14	3	210.4

Tabel 5.3 menunjukkan bahwa lokasi bus terbaik pada bus 113 dengan kapasitas daya yang diinjeksi sebesar 0,830 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan setelah optimisasi adalah 0,043 MW (0,96 %) dan rugi daya reaktif sebesar 0,032 MVAR dengan prosentase 1,14 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi ketiga dalam waktu 210,4 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.4, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.5 dan Gambar 5.6.



Gambar 5.5 Profil tegangan bus algoritma CSO untuk skenario 1.



Gambar 5.6 Losses per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 1.

b. Skenario 2

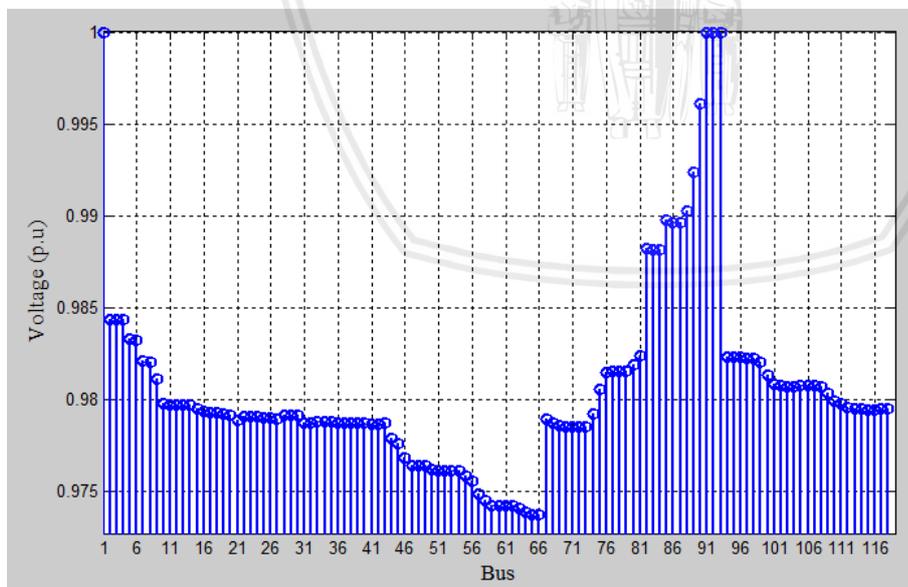
Pada skenario 2, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 1,25 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4
Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 2

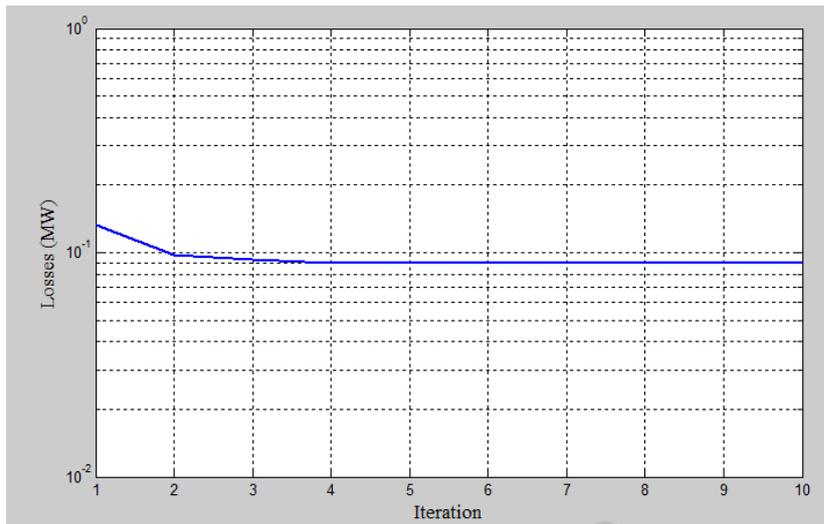
Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG P (MW)	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	92	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	4	77.7
	91	1.000						
2	92	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	6	78.9
	91	1.000						
3	118	1.000	0.097	0.082	2,17	2,92	3	79.7
	91	1.000						
4	92	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	4	77.4
	91	1.000						
5	92	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	6	79.6
	91	1.000						
6	118	1.000	0.097	0.082	2,17	2,92	3	78.4
	91	1.000						
7	118	1.000	0.112	0.084	2,51	2,98	3	80.7
	63	1.000						
8	92	0.967	0.105	0.091	2,35	3,24	10	122.9
	61	1.000						
9	91	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	4	73.7
	92	1.000						
10	91	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	5	79.5
	92	1.000						

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG P (MW)	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
11	92	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	5	75.7
	91	1.000						
12	91	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	10	77.8
	92	0.999						
13	92	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	4	76.5
	91	1.000						
14	118	1.000	0.097	0.082	2,17	2,92	3	75.9
	91	1.000						
15	91	1.000	0.097	0.082	2,17	2,92	4	83.4
	118	1.000						
Terbaik	91	1.000	0.090	0.090	2,01	3,20	4	73.7
	92	1.000						

Tabel 5.4 menunjukkan bahwa injeksi DG ditempatkan pada bus 91 dan bus 92 dengan masing-masing daya sebesar 1,000 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan sebesar 0,090 MW dengan prosentase 2,01 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,090 MVAR dengan prosentase 3,20 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi keempat dalam waktu 73,7 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.5, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.7 dan Gambar 5.8.



Gambar 5.7 Profil tegangan bus algoritma CSO untuk skenario 2.



Gambar 5.8 Losses per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 2.

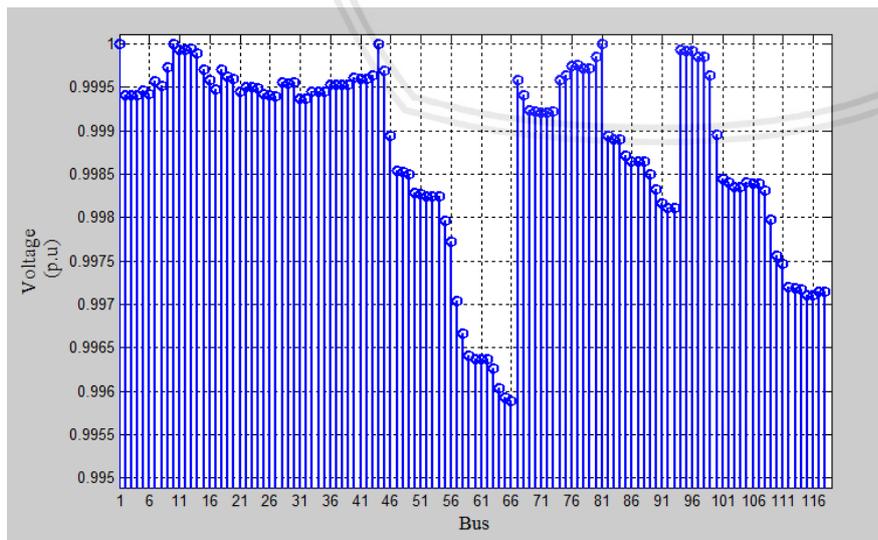
c. Skenario 3

Pada skenario 3, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 1,66 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.5.

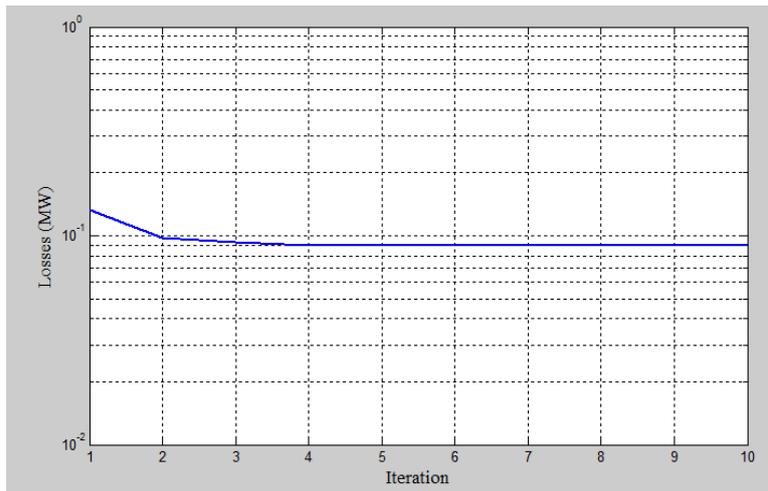
Tabel 5.5
Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 3

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG P (MW)	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	81	1.656					4	74.9
	10	1.240	0.008	0.007	0,18	0,25		
	44	1.190						
2	15	0.953					3	73.1
	81	1.660	0.01	0.004	0,22	0,14		
	43	1.426						
3	11	1.148					7	77.1
	97	1.660	0.013	0.007	0,29	0,25		
	43	1.272						
4	43	1.197					8	78.2
	97	1.659	0.014	0.008	0,31	0,32		
	18	1.229						
5	81	1.660					6	76.9
	18	1.660	0.009	0.004	0,20	0,14		
	47	0.810						
6	99	1.602					6	76.5
	43	1.443	0.011	0.004	0,11	0,14		
	15	1.013						
7	74	0.922					4	74.5
	81	1.590	0.011	0.005	0,24	0,18		
	18	1.639						

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG P (MW)	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
8	74	1.527						
	20	1.386	0.013	0.005	0,29	0,18	10	75.9
	100	1.178						
9	75	1.468						
	105	1.049	0.01	0.005	0,22	0,18	5	73.5
	18	1.568						
10	38	1.660						
	81	1.660	0.009	0.006	0,20	0,18	3	72.5
	57	0.500						
11	10	1.658						
	81	1.660	0.009	0.004	0,20	0,14	2	70.5
	47	0.847						
12	74	1.520						
	81	1.299	0.01	0.005	0,22	0,18	2	71.6
	10	1.184						
13	75	1.448						
	101	1.042	0.01	0.005	0,22	0,18	5	75.3
	10	1.660						
14	97	1.584						
	10	1.240	0.009	0.004	0,20	0,14	8	78.2
	44	1.278						
15	10	1.077						
	38	1.346	0.008	0.008	0,18	0,28	10	80.6
	99	1.660						
Terbaik	81	1.656						
	10	1.240	0.008	0.007	0,18	0,25	4	74.9
	44	1.190						



Gambar 5.9 Profil tegangan bus algoritma CSO untuk skenario 3.



Gambar 5.10 Losses per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 3.

Tabel 5.5 menunjukkan bahwa injeksi DG ditempatkan pada bus 81, bus 10 dan bus 44 dengan masing-masing daya sebesar 1,656 MW, 1,240 MW, 1,190 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan sebesar 0,008 MW dengan prosentase 0,18 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,007 MVAR dengan prosentase 0,25 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi keempat dalam waktu 74,9 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.6, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.9 dan Gambar 5.10.

d. Skenario 4

Pada skenario 4, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 2,08 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.6.

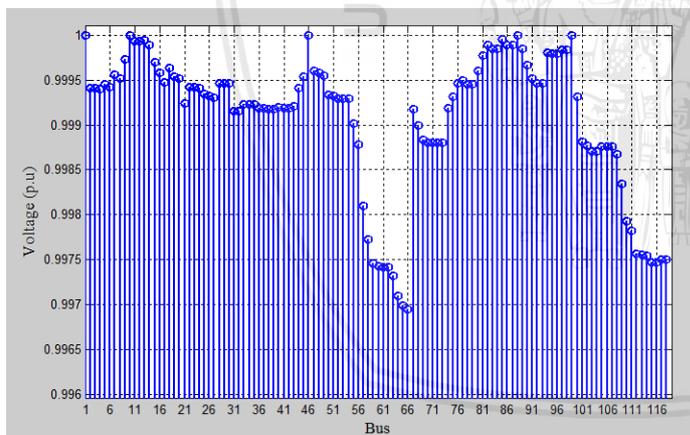
Tabel 5.6
Hasil Percobaan dengan Algoritma CSO untuk Skenario 4

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	46	0.981	0.007	0.003	0,16	0,11	10	75.6
	81	1.733						
	28	0.524						
	11	0.834						
2	12	1.019	0.008	0.003	0,18	0,11	9	82.4
	97	1.017						
	40	1.450						
	109	0.607						
3	10	1.044	0.007	0.003	0,16	0,11	9	78.5
	81	0.933						
	101	0.792						
	43	1.274						

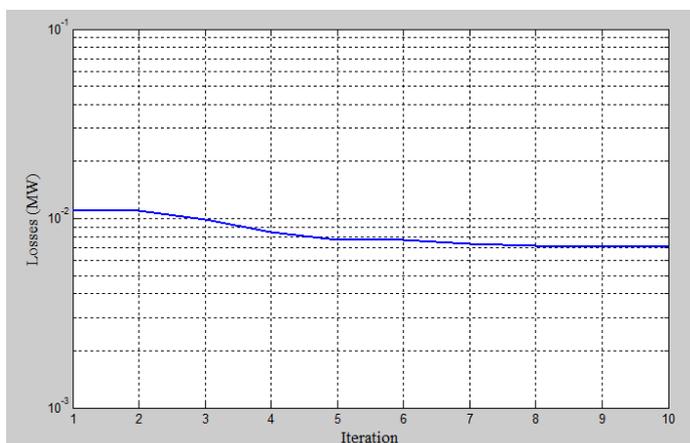
Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
4	97	1.327					9	77.5
	10	1.230	0.007	0.003	0,16	0,11		
	77	0.658						
	47	0.826						
5	27	0.814					10	67.4
	77	0.926	0.006	0.006	0,13	0,21		
	47	1.002						
	99	1.226						
6	99	1.218					8	78.3
	10	1.337	0.006	0.005	0,13	0,18		
	88	0.621						
	46	0.909						
7	57	0.508					9	74.0
	75	0.737	0.008	0.006	0,18	0,21		
	10	1.399						
	81	1.481						
8	44	1.276					10	74.8
	85	0.787	0.007	0.004	0,16	0,14		
	108	0.951						
	22	0.965						
9	110	0.505					7	67.9
	10	1.170	0.006	0.006	0,13	0,21		
	81	1.421						
	36	1.012						
10	20	0.754					9	72.7
	11	0.762	0.007	0.005	0,16	0,18		
	76	2.080						
	113	0.500						
11	48	0.680					9	79.0
	10	1.018	0.009	0.003	0,20	0,11		
	99	1.608						
	21	0.880						
12	97	1.180					5	79.4
	82	0.829	0.008	0.003	0,18	0,11		
	58	0.548						
	10	1.559						
13	56	0.718					10	73.1
	108	0.742	0.007	0.003	0,16	0,11		
	97	1.163						
	18	1.456						
14	43	1.977					8	74.3
	5	0.500	0.007	0.006	0,16	0,21		
	82	0.997						
	33	0.667						

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
15	58	0.500					10	75.3
	76	1.831	0.007	0.003	0,16	0,11		
	11	1.226						
	111	0.500						
Terbaik	99	1.218					8	78.3
	10	1.337	0.006	0.005	0,13	0,18		
	88	0.621						
	46	0.909						

Tabel 5.6 menunjukkan bahwa injeksi DG ditempatkan pada bus 99, bus 10, bus 88 dan bus 46 dengan masing-masing daya sebesar 1,218 MW, 1,337 MW, 0,621 MW, dan 0,909 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan sebesar 0,006 MW dengan prosentase 0,13 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,005 MVAR dengan prosentase 0,18 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi kedelapan dalam waktu 78,3 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.7, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.11 dan Gambar 5.12.



Gambar 5.11 Profil tegangan bus algoritma CSO untuk skenario 4.



Gambar 5.12 Losses per iterasi dengan algoritma CSO untuk skenario 4.

5.4.2 Optimisasi Injeksi *Distributed Generation* dengan Algoritma *Krill Herd Algorithm*

Algoritma *Krill Herd Algorithm* adalah algoritma kedua dalam optimisasi injeksi DG. Langkah pertama setelah menghitung aliran daya, yaitu menentukan batas kapasitas daya DG yang diinjeksikan sesuai persamaan (5-9). Langkah kedua adalah memasukkan parameter algoritma. Parameter KHA terdiri dari tiga hal utama yaitu berkaitan dengan perpindahan posisi yaitu parameter *movement effect*, *foraging effect*, serta *diffusion effect*. Parameter KHA secara lebih detail dituliskan dalam tabel 5.5. Langkah ketiga yaitu menjalankan proses optimisasi untuk memperoleh nilai fitness terbaik yang menunjukkan rugi daya terendah.

Tabel 5.7 Nilai Parameter *Krill Herd Algorithm*

Parameter	Keterangan	Nilai
nPop	Ukuran populasi	20
MaxMovment	Parameter <i>Movement Effect</i>	0,01
ForagingVelocity	Parameter <i>Foraging Effect</i>	0,01
MaxDifusion	Parameter <i>Difusion Effect</i>	0,01
gamma	Taraf signifikansi	0,5
pm	Parameter mutasi	0,3
mu	<i>Mutation rate</i> – perbandingan mutasi	0,5
MaxIt	Maksimum generasi / iterasi	100

a. Skenario 1

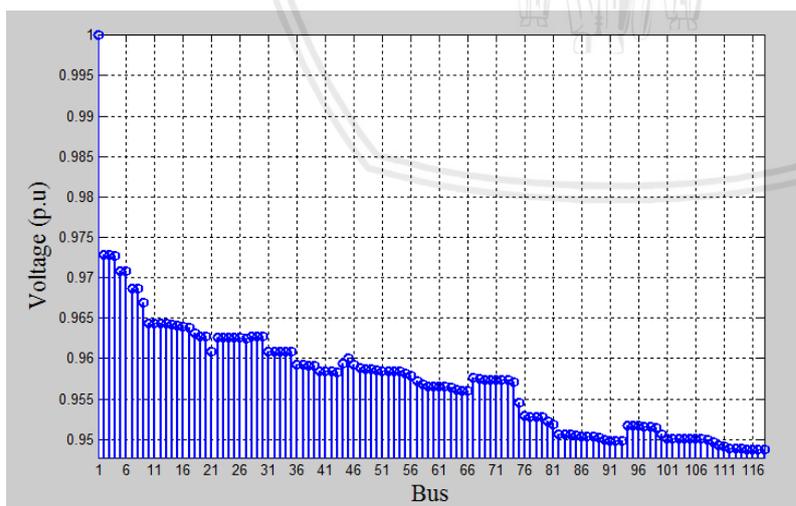
Pada skenario 1, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 0,83 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 1

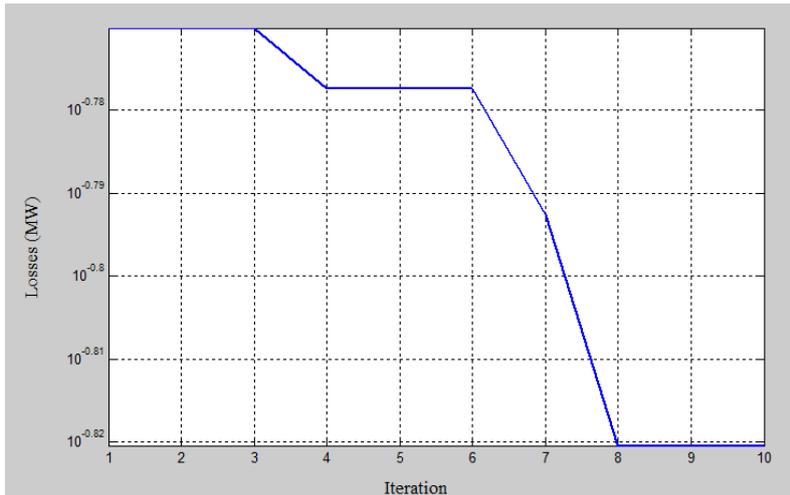
Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	86	0,711	0,165	0,124	3,69	4,41	10	233,7
2	102	0,719	0,153	0,115	3,42	4,09	9	276,4
3	113	0,83	0,043	0,032	0,96	1,14	8	212,4
4	90	0,736	0,155	0,121	3,47	4,30	9	247,9
5	86	0,83	0,158	0,119	3,53	4,23	10	236,1
6	68	0,83	0,163	0,123	3,65	4,38	8	224,8

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
7	100	0,5	0,127	0,095	2,84	3,37	10	235,1
8	100	0,5	0,127	0,095	2,84	3,37	10	222,9
9	100	0,5	0,127	0,095	2,84	3,37	10	208,8
10	102	0,802	0,145	0,109	3,24	3,88	7	210,8
11	90	0,747	0,154	0,121	3,44	4,30	9	227,2
12	55	0,731	0,152	0,114	3,39	4,06	10	221,7
13	100	0,501	0,117	0,088	2,62	3,13	10	227,7
14	89	0,772	0,155	0,124	3,47	4,41	10	231,9
15	90	0,745	0,154	0,121	3,44	4,30	9	240,4
Terbaik	113	0,83	0,043	0,032	0,96	1,14	8	212,4

Tabel 5.8 menunjukkan bahwa injeksi DG ditempatkan pada bus 113 dengan kapasitas daya 0,83 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan sebesar 0,043 MW dengan prosentase 0,96 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,032 MVAR dengan prosentase 1,14 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi kedelapan dalam waktu 212,4 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.8, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.13 dan Gambar 5.14.



Gambar 5.13 Profil tegangan bus algoritma KHA untuk skenario 1.



Gambar 5.14 Losses per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 1.

b. Skenario 2

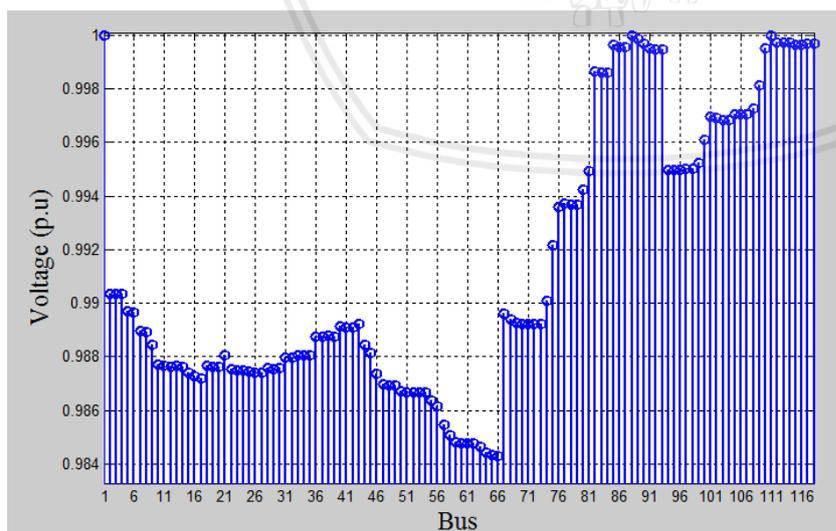
Pada skenario 2, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 1,25 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.9.

Tabel 5.9
Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 2

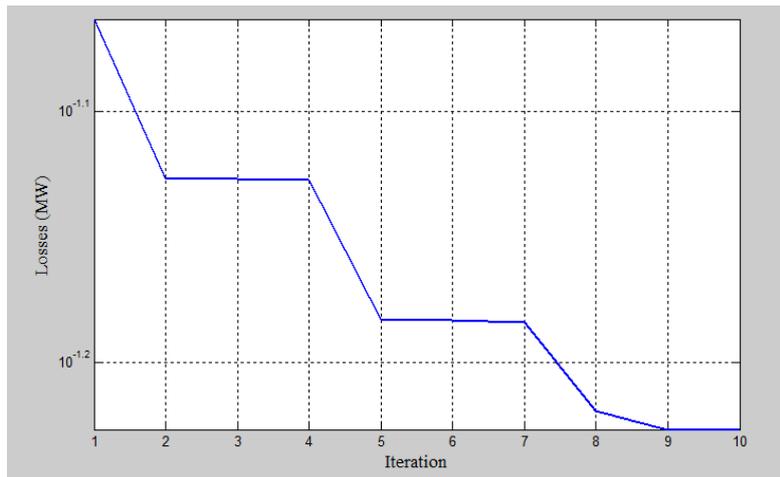
Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG P (MW)	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	88	1,207	0,060	0,055	1,34	1,96	8	102,9
	82	1,250						
2	47	1,250	0,065	0,052	1,45	1,85	2	100,5
	86	1,250						
3	112	1,250	0,058	0,049	1,29	1,74	9	98,3
	88	1,250						
4	84	1,223	0,058	0,055	1,29	1,96	2	95,7
	88	1,250						
5	118	1,238	0,059	0,052	1,32	1,85	5	92,2
	91	1,249						
6	115	1,223	0,059	0,050	1,32	1,78	2	98,7
	89	1,242						
7	85	1,231	0,059	0,058	1,32	2,06	5	98,1
	90	1,250						
8	84	1,204	0,062	0,058	1,39	2,06	2	98,9
	88	1,204						
9	82	1,250	0,058	0,054	1,29	1,92	6	96,7
	89	1,242						

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG P (MW)	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
10	88	1,250	0,057	0,047	1,27	1,67	2	97,6
	111	1,250						
11	89	1,248	0.060	0.051	1,34	1,81	6	92.7
	116	1,199						
12	83	1.221	0.060	0.056	1,34	1,99	2	96.4
	89	1.230						
13	82	1,207	0.060	0.049	2,34	1,74	6	93.5
	110	1,250						
14	84	1.192	0.060	0.058	3,34	2,06	2	5.5
	83	1.250						
15	84	1.250	0.057	0.054	1,27	1,92	8	101.4
	89	1.245						
Terbaik	88	1,250	0,057	0,047	1,27	1,67	2	97,6
	111	1,250						

Tabel 5.9 menunjukkan bahwa injeksi DG ditempatkan pada bus 88 dan bus 111 dengan kapasitas daya masing-masing sebesar 1,250 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan sebesar 0,057 MW dengan prosentase 1,27 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,047 MVAR dengan prosentase 1,67 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi kedua dalam waktu 97,6 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.9, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.15 dan Gambar 5.16.



Gambar 5.15 Profil tegangan bus algoritma KHA untuk skenario 2.



Gambar 5.16 Losses per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 2.

c. Skenario 3

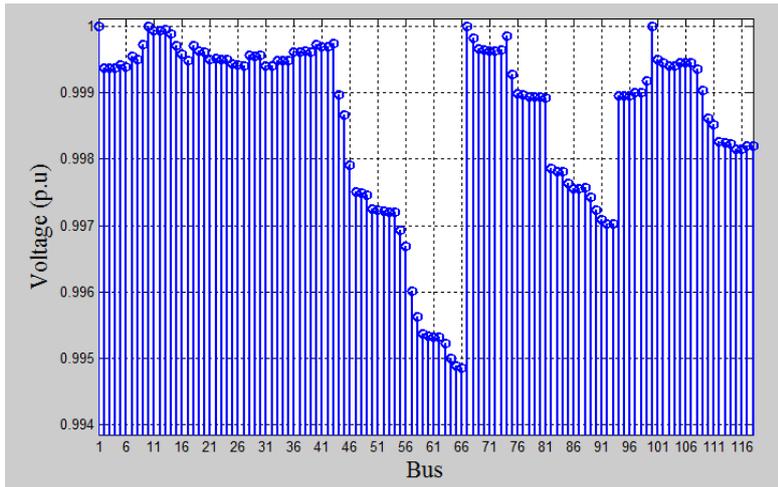
Pada skenario 3, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 1,66 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.10.

Tabel 5.10
Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 3

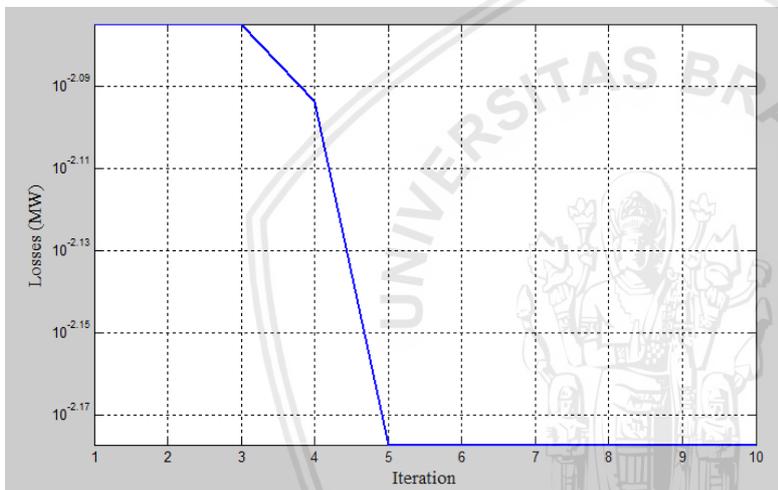
Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG P (MW)	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	81	1.660	0.007	0.006	0,16	0,21	2	101.8
	43	1.373						
	16	1.223						
2	7	1.328	0.007	0.005	0,16	0,18	2	91.1
	81	1.660						
	40	1.342						
3	29	1.563	0.009	0.007	0,20	0,25	2	95.6
	100	1.395						
	44	1.113						
4	67	1.627	0.007	0.006	0,16	0,21	2	103.3
	98	1.132						
	19	1.188						
5	13	0.918	0.007	0.005	0,16	0,18	2	94.4
	96	1.660						
	38	1.438						
6	82	1.132	0.007	0.006	0,16	0,21	2	85.5
	45	1.464						
	18	1.455						
7	99	1.647	0.007	0.005	0,16	0,18	2	84.9
	53	0.819						
	24	1.422						

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
8	12	1.644						
	43	0.887	0.006	0.005	0,13	0,18	2	96.8
	98	1.660						
9	42	1.229						
	20	1.473	0.008	0.006	0,18	0,21	2	93.1
	101	1.269						
10	44	1.295						
	100	1.118	0.008	0.006	0,18	0,21	2	95.6
	21	1.586						
11	105	1.413						
	45	1.425	0.007	0.006	0,16	0,21	2	97.7
	24	1.280						
12	43	1.465						
	12	1.296	0.007	0.006	0,16	0,21	2	95.5
	106	1.459						
13	67	1.469						
	10	1.555	0.006	0.005	0,13	0,18	5	93.1
	100	1.198						
14	19	1.565						
	94	1.431	0.006	0.005	0,13	0,18	9	98.6
	47	0.950						
15	12	1.483						
	68	1.112	0.006	0.005	0,13	0,18	6	96.9
	100	1.515						
Terbaik	67	1.469						
	10	1.555	0.006	0.005	0,13	0,18	5	93.1
	100	1.198						

Tabel 5.10 menunjukkan bahwa injeksi DG ditempatkan pada bus 67, bus 10 dan bus 100 dengan masing-masing daya sebesar 1,469 MW, 1,555 MW, 1,198 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan sebesar 0,006 MW dengan prosentase 0,13 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,005 MVAR dengan prosentase 0,18 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi kelima dalam waktu 93,1 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.10, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.17 dan Gambar 5.18.



Gambar 5.17 Profil tegangan bus algoritma KHA untuk skenario 3.



Gambar 5.18 Losses per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 3.

d. Skenario 4

Pada skenario 4, batas bawah pembangkitan adalah 0,5 kW dan batas atas pembangkitan adalah 2,08 MW. Hasil perhitungan aliran daya ditampilkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.11

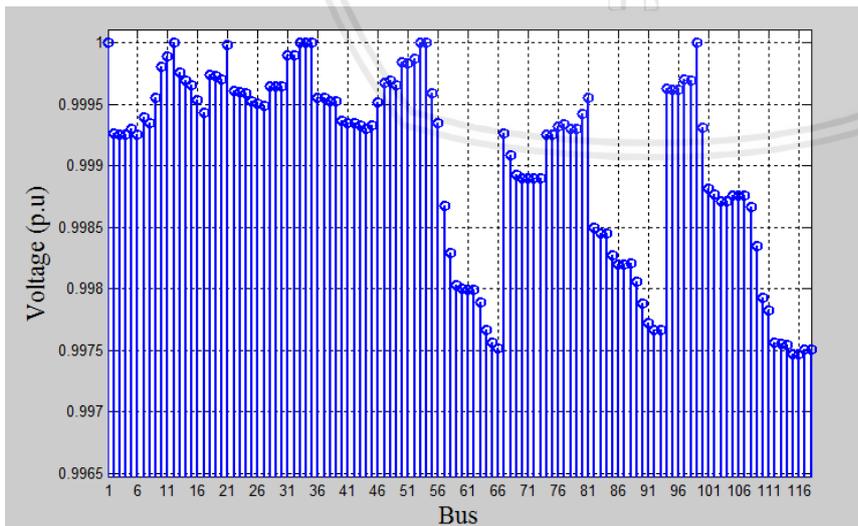
Hasil Percobaan dengan Algoritma KHA untuk Skenario 4

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
1	2	0.715	0.009	0.007	0,20	0,25	6	107.2
	38	1.266						
	42	0.685						
	107	1.303						

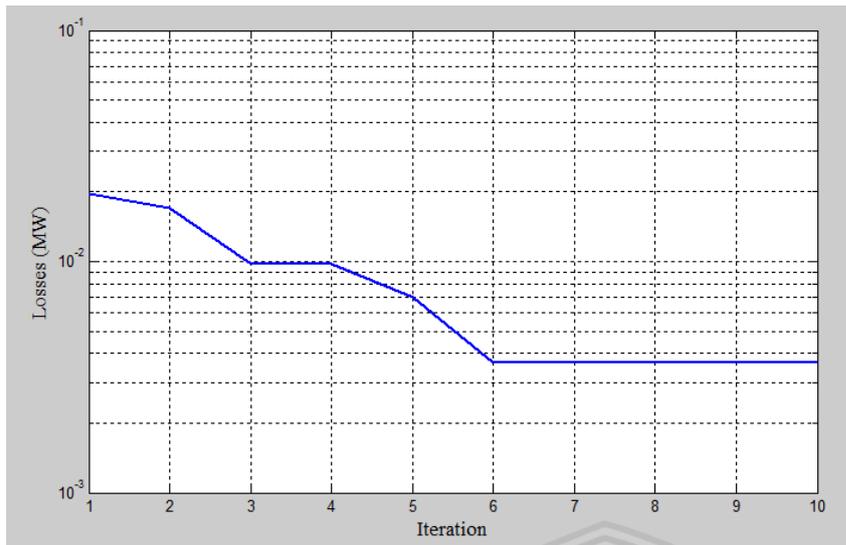
Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
2	57	0.866					4	92.6
	22	0.946	0.008	0.006	0,18	0,21		
	98	1.625						
	86	0.606						
3	56	0.595					6	91.8
	10	1.415	0.004	0.003	0,89	0,11		
	91	0.517						
4	98	1.432					5	97.5
	42	0.974						
	85	0.500	0.005	0.004	0,11	0,14		
	11	1.422						
5	100	1.157					8	105.2
	46	0.991						
	98	1.110	0.005	0.004	0,11	0,14		
	7	1.304						
6	89	0.762					9	97.4
	12	1.176						
	46	0.955	0.004	0.004	0,89	0,14		
	99	0.936						
7	78	1.063					3	94.4
	67	0.796						
	109	0.500	0.007	0.006	0,16	0,21		
	97	1.179						
8	39	1.365					6	105.1
	46	0.837						
	41	1.168	0.006	0.006	0,13	0,21		
	88	1.110						
9	15	1.007					5	99.4
	18	0.748						
	79	1.575	0.007	0.006	0,16	0,21		
	39	1.051						
10	56	0.534					10	100.2
	47	0.644						
	99	0.835	0.006	0.005	0,13	0,18		
	75	1.247						
11	19	1.480					0,145	96.6
	95	1.686						
	53	0.640	0.006	0.005	0,13	0,18		
	2	0.529						
12	38	1.255					9	103.3
	67	1.234						
	55	0.536	0.005	0.004	0,11	0,14		
	10	0.802						
13	81	1.590					9	109.3
	106	1.091	0.007	0.006	0,16	0,21		
	12	1.611						

Percobaan ke	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG	Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi ke	Waktu Running (sekon)
		P (MW)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
14	56	0.749						
	41	0.718						
	33	0.673						
	99	1.701	0.004	0.003	0,08	0,11	6	166.2
	53	0.803						
15	12	0.911						
	76	1.517						
	11	1.669	0.006	0.005	0,13	0,18	9	126.5
	83	0.500						
Terbaik	55	0.701						
	33	0.673						
	99	1.701	0.004	0.003	0,08	0,11	6	166.2
	53	0.803						
	12	0.911						

Tabel 5.11 menunjukkan bahwa injeksi DG ditempatkan pada bus 33, bus 99, bus 53 dan bus 12 dengan masing-masing daya sebesar 0,673 MW, 1,701 MW, 0,803 MW, dan 0,911 MW. Rugi daya aktif yang dihasilkan sebesar 0,004 MW dengan prosentase 0,08 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,003 MVAR dengan prosentase 0,11 %. Lokasi bus diperoleh pada iterasi keenam dalam waktu 166,2 sekon. Hasil perhitungan aliran daya dapat dilihat pada Lampiran E.11, profil tegangan dan rugi daya ditampilkan pada Gambar 5.19 dan Gambar 5.20.



Gambar 5.19 Profil tegangan bus algoritma KHA untuk skenario 4.



Gambar 5.20 Losses per iterasi dengan algoritma KHA untuk skenario 4.

5.5 Analisis Perbandingan Algoritma CSO dan KHA

Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menerapkan program CSO dan KHA yang diaplikasikan pada data Penyulang Pujon. Penyelesaian awal dilakukan dengan menggunakan algoritma Newton Raphson untuk mengetahui kondisi awal aliran daya sebelum dilakukan optimisasi. Perhitungan aliran daya digunakan dalam tiga kondisi beban yaitu beban minimum, beban rata-rata, dan beban maksimum guna mengetahui pemilihan data yang akan digunakan dalam optimisasi.

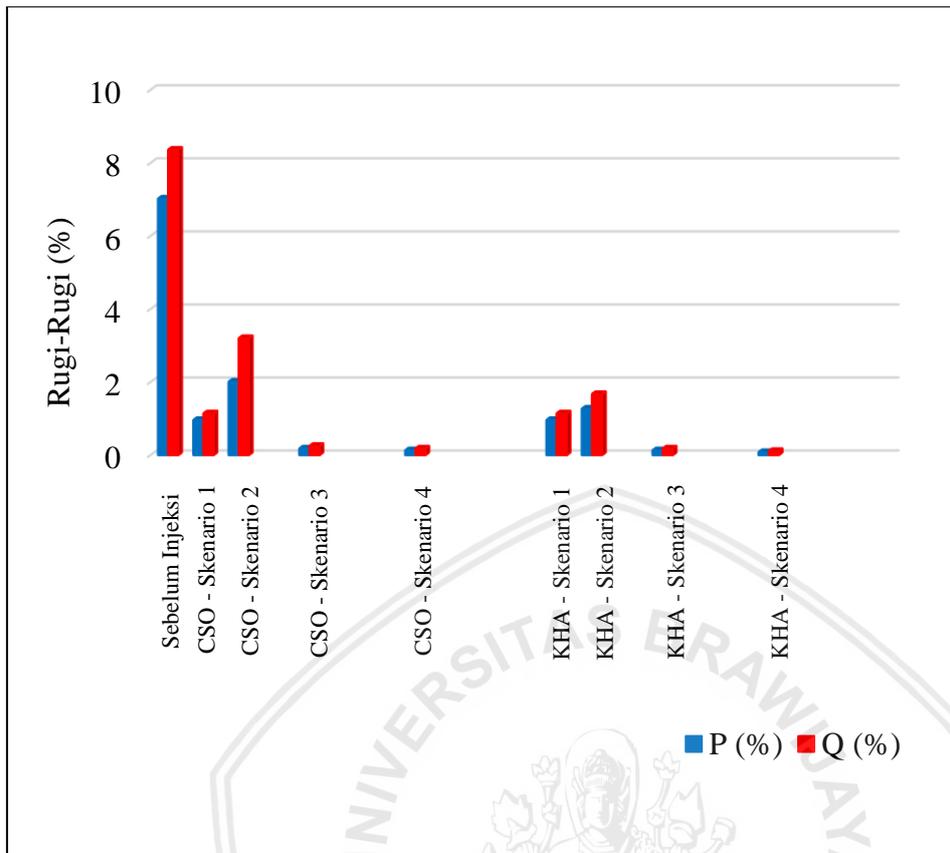
Batasan profil tegangan yang baik berkisar antara $0,90 \text{ p.u} \leq V_{bus} \leq 1.1 \text{ p.u}$. Berdasarkan hasil perhitungan, digunakan beban maksimum karena dinilai memiliki penurunan profil tegangan yang signifikan yaitu di bawah $0,95 \text{ p.u}$. Hasil analisis aliran daya pada Penyulang Pujon sebelum injeksi DG diperoleh daya yang dibangkitkan sebesar $4,471 \text{ MW}$ dan $2,811 \text{ MVAR}$. Daya pembebanan adalah $4,157 \text{ MW}$ dan $2,576 \text{ MVAR}$ dengan rugi daya aktif sebesar $0,314 \text{ MW}$ dan daya reaktif sebesar $0,235 \text{ MVAR}$. Prosentase rugi daya aktif adalah $7,02 \%$ dan rugi daya reaktif sebesar $8,36 \%$.

Algoritma optimisasi yang digunakan yaitu CSO dan KHA, kedua algoritma ini dapat digunakan untuk membandingkan lokasi terbaik untuk injeksi DG. Selain itu, profil tegangan juga memiliki nilai yang berbeda ketika menerapkan kedua algoritma tersebut. Di bawah ini dituliskan perbandingan daya pembangkitan dan *losses* dari proses optimisasi.

Tabel 5.12
Hasil Perbandingan Algoritma CSO dan KHA

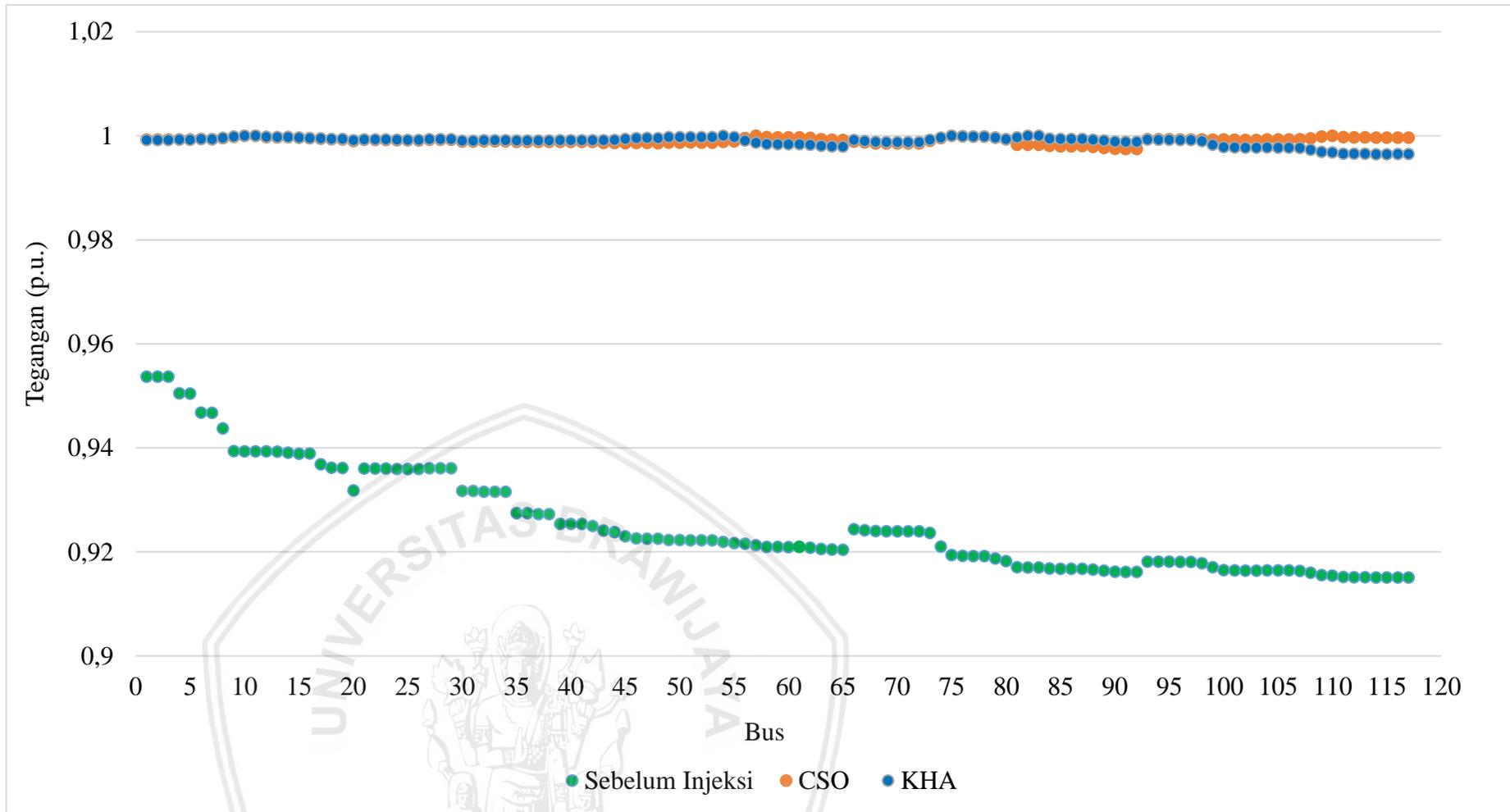
Algoritma	Skenario	Titik Lokasi Bus	Injeksi DG		Rugi-Rugi		% Rugi-Rugi		Waktu Iterasi Ke-	Waktu Running (sekon)
			P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)	P (%)	Q (%)		
Sebelum injeksi DG	-	-	-	-	0,314	0,235	7,02	8,36	-	-
CSO	1	113	0,830	-	0,043	0,032	0,96	1,14	3	210,4
	2	91	1,000	-	0,090	0,090	2,01	3,20	4	73,7
		92	1,000	-	-	-	-	-	-	-
	3	81	1,656	-	0,008	0,007	0,18	0,25	4	74,9
		10	1,240	-	-	-	-	-	-	-
		44	1,190	-	-	-	-	-	-	-
	4	99	1,218	-	0,006	0,005	0,13	0,18	8	78,3
		10	1,337	-	-	-	-	-	-	-
88		0,621	-	-	-	-	-	-	-	
46		0,909	-	-	-	-	-	-	-	
KHA	1	113	0,830	-	0,043	0,032	0,96	1,14	8	212,4
	2	88	1,250	-	0,057	0,047	1,27	1,67	2	97,6
		111	1,250	-	-	-	-	-	-	-
	3	67	1,469	-	0,006	0,005	0,13	0,18	5	93,1
		10	1,555	-	-	-	-	-	-	-
		100	1,198	-	-	-	-	-	-	-
	4	33	0,673	-	0,004	0,003	0,08	0,11	6	166,2
		99	1,701	-	-	-	-	-	-	-
53		0,803	-	-	-	-	-	-	-	
12		0,911	-	-	-	-	-	-	-	

Tabel 5.12 menunjukkan adanya perbandingan daya pembangkitan. Pada skenario 1, daya pembangkitan dan rugi daya bernilai sama. Perbedaan terletak pada waktu iterasi, dimana KHA lebih lama daripada CSO. Pada skenario 2, 3, dan 4 terdapat selisih daya aktif maupun reaktif. Skenario 2 dengan algoritma CSO, pengurangan rugi daya aktif sebesar 2,01 % dan daya reaktif 3,02 %. Algoritma KHA, prosentase rugi daya aktif dan reaktif masing-masing sebesar 1,27 % dan 1,67 %. Skenario 3 dengan penambahan 3 DG, didapatkan prosentase rugi daya sebesar 0,18 % dan 0,25 % dengan CSO. KHA menghasilkan rugi daya aktif 0,13 % dan rugi daya reaktif 0,18 %. Skenario 4, dengan menggunakan KHA diperoleh rugi daya aktif sebesar 0,08 % dan rugi daya reaktif sebesar 0,11 %. CSO menghasilkan rugi daya aktif maupun reaktif masing-masing sebesar 0,13 % dan 0,18 %. Penggambaran hasil optimisasi keempat skenario dapat dilihat dalam Gambar 5.21.



Gambar 5.21 Hasil perbandingan skenario dengan algoritma CSO dan KHA

Optimisasi juga berpengaruh pada perbaikan profil tegangan, seperti pada Gambar 5.22 dimana dengan menerapkan algoritma CSO dan KHA diperoleh profil tegangan yang lebih baik. Secara keseluruhan CSO dan KHA menghasilkan kenaikan nilai profil tegangan masing-masing bus yang memenuhi batasan $0,90 \text{ p.u.} \leq V_{bus} \leq 1.1 \text{ p.u.}$ Hasil optimisasi kedua algoritma memperoleh penurunan rugi daya dan kenaikan profil tegangan yang dapat meningkatkan efisiensi Penyulang Pujon.



Gambar 5.22 Hasil perbandingan tegangan sebelum injeksi dengan algoritma CSO dan KHA

BAB IV

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan tentang optimisasi injeksi *distributed generation* dengan menggunakan algoritma *Cat Swarm Optimization* dan *Krill Herd Algorithm*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penentuan lokasi injeksi DG dilakukan dengan menerapkan 4 skenario injeksi, yakni injeksi 20 % dengan 1 lokasi bus, 30 % dengan 2 lokasi bus, 40 % dengan 3 lokasi bus, dan 50 % dengan 4 lokasi bus.
2. Rugi daya aktif dan reaktif sebelum adanya injeksi DG sebesar 0,314 MW dan 0,235 MVAR. Optimisasi menggunakan skenario 1 algoritma CSO dan KHA menghasilkan nilai rugi daya dan lokasi bus yang sama. Skenario 2, CSO menghasilkan rugi daya aktif sebesar 2,01 %, sedangkan KHA sebesar 1,27 %. Skenario 3, prosentase rugi daya aktif CSO adalah 0,18 % dan KHA 0,13 %. Skenario 4, menghasilkan perbedaan rugi daya aktif CSO dan KHA masing-masing sebesar 0,13 % dan 0,08 %.
3. Secara keseluruhan, penerapan kedua algoritma dapat mengurangi rugi daya sistem dan memperbaiki profil tegangan. Algoritma KHA memiliki waktu *running* iterasi yang lebih lama daripada CSO, namun KHA dinilai lebih baik daripada algoritma CSO karena menghasilkan pengurangan rugi daya yang lebih signifikan daripada CSO.

6.2 Saran

Proses optimisasi injeksi DG pada penelitian ini, khususnya dengan menggunakan algoritma CSO menghasilkan perbaikan profil tegangan di bawah algoritma KHA. Oleh karena itu, pada penelitian selanjutnya diharapkan bisa menerapkan algoritma optimisasi pengembangan dari CSO yang memiliki spesifikasi dan parameter algoritma yang lebih baik. Selain itu, juga diharapkan mampu membuat pengurangan waktu *running* iterasi algoritma KHA, baik dengan pengembangan algoritma maupun dengan mengkombinasikan algoritma perancangan



DAFTAR PUSTAKA

- Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. 2000. *Distributed Generation : a Definition*. Electric Power System Research 57 (2001) 195-2014.
- Biro Hukum dan Humas. 2014. *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional*. Jakarta : Biro Hukum dan Humas.
- Bawan, Elias K. 2012. *Dampak Pemasangan Distributed Generation Terhadap Rugi-Rugi Daya*. Jurnal Ilmiah Forsitek Vol.2, No. 21, September 2012.
- Bhumkittipich, K. & Phuangpornpitak, W. 2013. *Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation for Power Loss Reduction using Particle Swarm Optimization*. Energi Procedia 34 (2013). Power and Energi System Research Centre, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand.
- ChithraDevi, S.A., Lakshminarasimman, & L., Balamurugan, R. 2017. *Stud Krill Herd Algorithm for Multiple DG Placement and Sizing in a Radial Distribution System*. Engineering Science and Technology, an International Journal 20 (2017). 2215-0986/ © 2016 Karabuk University.
- Chu, S.C. & Tsai, P.W. 2007. *Computational Intelligence Based on the Behaviour of Cats*. International Journal of Innovative Computing, Information, and Control Volume 3, Number 1, February 2007.
- El-Ela, A.A.A., El-Sehiemy, R.A., Kinawy, A.M., & Ali, E.S. 2016. *Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Units Using Different Cat Swarm Optimization Algorithms*. 978-1-4673-9063-7/16/\$31.00 ©2016 IEEE.
- El-Zonkoly, A. M. 2011. *Optimal Placement of Multi-Distributed Generation Units Including Different Load Models Using Particle Swarm Optimization*. Swarm and Evolutionary Computation 1 (2011) 50-59.
- Gandomi, A.H. & Alavi, A.H. 2012. *Krill herd : A new bio-inspired optimization algorithm*. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 17 (2012) 4831-4845.
- Hakim, L. 2016. *Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Surya-Angin Terhubung Grid Di Gunung Banyak Kota Batu*. Tesis. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- Hermawan, Ahmad. 2012. *Transmisi dan Distribusi Sistem Tenaga Listrik*. Malang : Politeknik Negeri Malang.

- Hung, D.Q., Mithulananthan, N., & Bansal, R.C. 2010. *Analytical Expressions for DG Allocation in Primary Distribution Networks*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, No. 3, September 2010.
- Hung, D.Q., & Mithulananthan, N., 2013. *Multiple Distributed Generator Placement in Primary Distribution Networks for Loss Reduction*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 4, April 2013.
- Hwang, J.C., Chen, J.C., Pan, J.S., & Huang, Y.C. 2010. *CSO Algorithm for Economic Dispatch Decision of Hybrid Generation System*. New Aspects of Applied Informatics, Biomedical Electronics & Informatics and Communications, ISBN : 978-960-474-216-5.
- Kementerian ESDM. 2012. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor : 14 Tahun 2012 Tentang Manajemen Energi*. Jakarta : Kementerian ESDM.
- Kementerian ESDM. 2018. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 53 Tahun 2018 Tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 50 Tahun 2017 Tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik*. Jakarta : Kementerian ESDM.
- Meziane, R., Amara, M., Hamzi, A., & Boufala, S. 2015. *Hybrid Solar Gas Reliability Optimization using Cat Swarm Optimization under Performance and Cost Constraints*. 978-1-4799-9982-8/115/\$31.00 ©2015 IEEE.
- Nerves, A.C. & Roncesvalles, J.C.K. 2009. *Application of Evolutionary Programming to Optimal Siting and Sizing and Optimal Scheduling of Distributed Generation*. TENCON 2009. IEEE 978-1-4244-4547-9/09.
- Rani, Septia. 2013. *Modul Pelatihan Pemrograman Matlab*. Yogyakarta : Himpasikom UGM.
- Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. United States of America : McGraw-Hill.
- Semiawan, Conny R. 2010. *Metode Penelitian Kualitatif*. Jakarta : Grasindo.
- SPLN 1 : 1995. *Tegangan-Tegangan Standar*. PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero).
- Sugiyono. 2014. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung : Alfabeta.
- Sultana, Sneha & Roy P.K. 2015. *Krill Herd Algorithm for Optimal Location of Distributed Generator in Radial Distribution System*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.036> 1568-4946/© 2015 Elsevier B.V.

- Suripto, Slamet. 2017. *Buku Ajar Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta : JTE FT Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Surwa. 2002. *Keterampilan Jasa Komputer Microsoft Word*. Jakarta : Ganeca Exact.
- Suswanto, Daman. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Padang : JTE FT Universitas Negeri Padang.
- Suyono, Hadi. 2014. *Advanced Power System Analysis (Load Flow Analysis)*. Department of Electrical Engineering, Brawijaya University.
- Syahputra, Ramadoni. 2012. *Distributed Generation, State of the Arts dalam Penyediaan Energi Listrik*. Yogyakarta : LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Syahputra, Ramadoni. 2017. *Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik*. Yogyakarta : LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Talbi, El-Ghazali. 2009. *Metaheuristics From Design To Implementation*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.
- Tim Contained Energi Indonesia. *Buku Panduan Energi yang Terbarukan*. Jakarta : Kementerian Dalam Negeri.
- Vizhiy, S. Aruul & R. K. Santhi. 2016. *Biogeography Based Optimal Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks*. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), IEEE 978-1-4673-9939-5/16.
- Wang, G.G., Guo, L., Gandomi, A.H., Hao, G.S, & Wang, H. 2014. *Chaotic Krill Herd Algorithm*. Information Sciences 274 (2014) 17-34.

