

**OPTIMASI KAPASITAS *CAPACITOR BANK* UNTUK MEREDUKSI
RUGI-RUGI DAYA PADA PENYULANG WORTEL MENGGUNAKAN
METODE *GREY WOLF OPTIMIZER (GWO)***

Skripsi

Oleh

CHRISTOPHER THEOPHILUS PRAYOGO



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

OPTIMASI KAPASITAS CAPACITOR BANK UNTUK MEREDUKSI RUGI-RUGI DAYA PADA PENYULANG WORTEL MENGGUNAKAN METODE GREY WOLF OPTIMIZER (GWO)

Oleh

CHRISTOPHER THEOPHILUS PRAYOGO

Jarak yang jauh antara sisi penyuplai energi listrik dan sisi konsumen (beban) pada jaringan distribusi dapat menimbulkan permasalahan seperti meningkatnya rugi-rugi daya di sepanjang saluran, jatuh tegangan, dan menurunnya faktor daya. Pemasangan kapasitor adalah salah satu solusi untuk meminimalkan rugi-rugi daya serta memperbaiki profil tegangan.

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah mencari nilai kapasitas optimal dari beberapa *capacitor bank* yang dipasang pada jaringan distribusi menggunakan metode *Grey Wolf Optimizer* dengan fungsi objektif meminimisasi rugi-rugi daya aktif. Lokasi penempatan *capacitor bank* ditentukan dengan menggunakan metode faktor sensitivitas rugi-rugi atau *Loss Sensitivity Factor* (LSF). Studi kasus yang digunakan adalah jaringan distribusi 20 kV Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala, Provinsi Lampung. Simulasi penentuan lokasi penempatan dan optimasi kapasitas *capacitor bank* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa lokasi penempatan empat *capacitor bank* menggunakan metode LSF adalah pada bus 42, 51, 58, dan 60 dan kapasitas optimal *capacitor bank* pada bus-bus tersebut menggunakan metode GWO masing-masing sebesar 0,15 MVar, 0,45 MVar, 0,15 MVar, dan 0,15 MVar. Rugi-rugi daya aktif yang diperoleh adalah sebesar 0,1041 MW atau pengurangan sebesar 23% dari nilai rugi-rugi daya aktif sebelum penempatan bank kapasitor, yakni 0,1352 MW. Nilai tegangan minimum yang diperoleh setelah penempatan *capacitor bank* adalah 0,944 pu sedemikian sehingga memperbaiki profil tegangan dari nilai minimum sebelum penempatan yang sebesar 0,916 pu.

Kata-kata kunci: optimasi kapasitas, capacitor bank, Grey Wolf Optimizer, rugi-rugi daya aktif, faktor sensitivitas rugi-rugi.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF CAPACITOR BANK CAPACITY TO REDUCE POWER LOSSES AT WORTEL FEEDER USING GREY WOLF OPTIMIZER (GWO) METHOD

By

CHRISTOPHER THEOPHILUS PRAYOGO

Long distance between the electricity supply side and the consumer side (load) on a distribution network can cause problems such as power losses increasing along the line, voltage drop, and power factor decreasing. Installing capacitors is one of the solutions to minimize power losses while improving the voltage profile.

This script aims to find the optimal capacity value of several capacitor banks installed in distribution network using Grey Wolf Optimizer (GWO) method with the objective function is to minimize active power losses. The location of capacitor banks placement is determined by Loss Sensitivity Factor (LSF) method. The case study used is 20 kV distribution network of Wortel Feeder in Menggala Substation, Lampung Province. Simulation of determining the placement location and optimization of capacitor banks capacity is performed using MATLAB software.

The simulation results show that the location of four capacitor banks using the LSF method is on buses 42, 51, 58, and 60 and the optimal capacitor banks capacity on those buses obtained using the GWO method are 0.15 MVar, 0.45 MVar, 0.15 MVar, and 0.15 MVar, respectively. The active power losses obtained is 0.1041 MW or reduction of 23% from the value of active power losses before the placement of capacitor banks, which is 0.1352 MW. The minimum voltage value obtained after the placement of capacitor banks is 0.944 pu so that improves the voltage profile from minimum voltage value before the placement which is equal to 0.916 pu.

Keywords: capacity optimization, capacitor bank, Grey Wolf Optimizer, active power losses, loss sensitivity factor.

**OPTIMASI KAPASITAS CAPACITOR BANK UNTUK MEREDUKSI
RUGI-RUGI DAYA PADA PENYULANG WORTEL MENGGUNAKAN
METODE *GREY WOLF OPTIMIZER* (GWO)**

Oleh

CHRISTOPHER THEOPHILUS PRAYOGO

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

Judul Skripsi

: **OPTIMASI KAPASITAS CAPACITOR BANK
UNTUK MEREDUKSI RUGI-RUGI DAYA
PADA PENYULANG WORTEL
MENGUNAKAN METODE *GREY WOLF*
OPTIMIZER (GWO)**

Nama Mahasiswa

: **Christopher Theophilus Prayogo**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1415031038

Jurusan

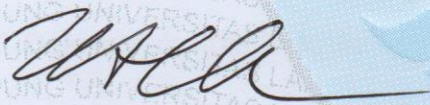
: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

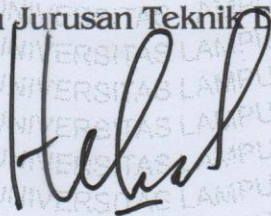

Osea Zebua, S.T., M.T.

NIP 19700609 199903 1 002


Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng.

NIP 19700719 200012 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro


Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.

NIP 19711130 199903 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Osea Zebua, S.T., M.T.

Sekretaris

: Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng.

Penguji

Bukan Pembimbing : Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T., IPM.

2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Suharno, M.Sc., Ph.D.

NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 24 Mei 2019

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Juni 2019



Christopher Theophilus Prayogo

NPM. 1415031038

RIWAYAT HIDUP



Berkat anugerah Tuhan Allah Yang Maha Pengasih, penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada 6 Desember 1995 dari pasangan Bapak Agus Toto Prayogo dan Ibu Yuliana.

Kesempatan pendidikan yang dinikmati penulis dimulai dari SD Xaverius 3 Bandar Lampung yang diselesaikan pada 2007, kemudian SMP Xaverius 4 Bandar Lampung yang diselesaikan pada 2010, hingga SMA Negeri 9 Bandar Lampung yang diselesaikan pada 2013.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung pada 2014 melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi internal maupun eksternal kampus yaitu himpunan mahasiswa teknik elektro (HIMATRO) sebagai anggota Divisi Pendidikan pada 2015/2016 dan anggota Divisi Kerohanian pada 2016/2017 serta persekutuan kristen antar universitas (PERKANTAS) Lampung dalam pelayanan siswa di Bandar Lampung dari 2014 hingga sekarang. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik untuk salah satu judul pada Praktikum Dasar Tenaga Listrik, Praktikum Mesin Listrik, dan Praktikum Elektronika Daya.

Penulis memilih konsentrasi Teknik Tenaga Listrik yang pada Juli sampai Agustus 2017 mendapat kesempatan melaksanakan kerja praktik di PT. Bukit Asam (Persero), Tbk. di bagian *Main Switch Station* (MSS) dan mengangkat judul “Analisis Penempatan *Lightning Arrester* Terhadap Transformator Daya Pada

Substation 5 MTB PT. Bukit Asam (Persero), Tbk.” Pada Februari 2017, penulis juga turut mengabdikan dan memberdayakan desa dalam mata kuliah Kuliah Kerja Nyata di Desa Sidodadi, Kecamatan Bandar Surabaya, Kabupaten Lampung Tengah. Selain itu, penulis juga pernah dua kali menjadi surveyor dalam proyek studi elektrifikasi PLN bekerjasama dengan dosen untuk daerah dengan listrik baru dan daerah tanpa listrik pada 2018.



“

karya mungil ini

kupersembahkan untuk

”

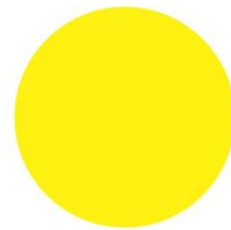
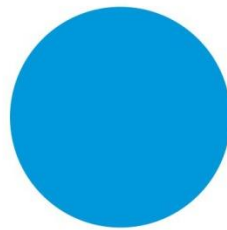
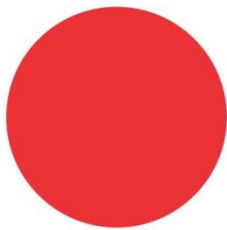
*bapak, mamak, adek, mbah
akan kasihnya yang mendekati tak terhingga
yang mengingatkan hati dan jiwaku
untuk lebih lagi berkarya
untuk Sang Maha Pengasih
akan kasihNya yang tak terhingga*

*orang-orang yang pantang menyerah
memperjuangkan keadilan elektrifikasi secara optimal
hingga pelosok negeri*

anak-anak Ibu Pertiwi yang penuh harapan



**CARILAH,
MAKA KAMU AKAN MENDAPAT**
(MATIUS 7:7b)



**Allah terlalu mengasihi Anda sampai-sampai
Allah tidak rela membagi Anda dengan yang lain
–Kyle Idleman**

**Learn from yesterday,
live for today,
hope for tomorrow.
The important thing is not to stop questioning.
–Albert Einstein**

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat yang diberikan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Tugas akhir yang berjudul “Optimasi Kapasitas *Capacitor Bank* Untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya Pada Penyulang Wortel Menggunakan Metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO)” disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yesus, satu entitas kekal yang kupercaya akan kasihNya yang begitu dalam kepada alam semesta.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M. P. selaku Rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Suharno, M. Sc., Ph. D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S. T., M. T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Osea Zebua, S. T., M. T., selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan pelajaran dan motivasi hidup, *sharing* hal-hal sederhana, hingga pengalaman di bidang teknik tenaga listrik.
6. Bapak Khairudin, S. T., M. Sc., Ph. D. Eng. selaku dosen pembimbing pendamping yang mengingatkan saya tentang pentingnya filosofi dibandingkan hafalan rumus belaka.

7. Ibu Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T., IPM, selaku penguji yang memberikan masukan yang membangun dan melengkapi.
8. Bapak Abdul Haris, Ir., M. T., selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, dan bimbingan yang membangun bagi penulis dalam mempersiapkan diri menjadi seorang Sarjana Teknik.
9. Para dosen dan para guru, yang menjadi perpanjangan Tuhan dalam berkarya dan mengabdikan kepada anak-anak Indonesia secara khusus mendidik penulis menjadi pribadi yang semakin pantang menyerah.
10. Segenap staff di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah membantu penulis baik dalam hal administrasi maupun hal-hal lainnya.
11. Awansah, Ega, dan Tengil, selaku tiga pribadi seperguruan yang telah memberikan saran dan masukan yang sangat berharga.
12. Keluarga besar ELITE 2014 yang terus berjuang bersama di himpunan serta sekumpulan orang-orang yang terlanjur merasa gabut tapi sebenarnya tidak (Satrio, Dapin, Adit, Adam, Tyo, Lihin, Aswin, Rovic, dan Bangkit).
13. Agung, Komti, Andri, Fandi, Hayu, Dona, Namut, Kak Kotjong, Mas Eko, Kak Iroel, Kak Tiyo, Kak Dirya, Kak Restu, dan punggawa Lab Kendali lainnya yang sudah berbagi pengalaman dengan keseruannya saat saya masih menjadi staf walaupun tidak lama karena setelahnya pindah konsentrasi ke arus kuat.
14. Budi, Bram, Bagus, Aswin, Bangkit, Salim, Made, Cahya, Rey, dan keluarga Lab Konversi lainnya yang terus membangkitkan energi dalam mengerjakan skripsi.
15. Manda, Ruri, dan Bram sebagai kawan KP yang mengajarkan untuk bisa saling menguatkan dalam kerja praktik di Tanjung Enim.

16. Kawan KKN Sidodadi Lamteng Dion, Fakhri, Ridho, Budiyanto, Kukuh, Aji, Bang Geo, Kadek, Nita, Nir, Anisa, Nisa, dan Rara yang sudah berbagi ide dalam mengabdikan di desa.
17. Dian, Firdaus, Ernest, dan Kak Ester yang menjadi sahabat kelompok kecil (KK) penulis dalam belajar untuk bertumbuh, tidak sekedar menjadi fans tetapi menjadi pengikut sejati Kristus.
18. TPS Perkantas Bandar Lampung yang mengajarkan untuk selalu bersyukur dan menikmati Tuhan dalam setiap bentuk pelayanan.
19. PMK Perkantas Bandar Lampung dan FKMK-FT sebagai persekutuan yang memberikan waktu untuk mendapatkan makanan rohani agar bisa terus mengasah hati, pikiran, dan jiwa sebagai pribadi yang berintegritas.
20. Pihak-pihak lain yang tidak bisa disebutkan penulis satu per satu pada kesempatan ini.

Penulis menyadari bahwa banyak kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini maka penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai pembelajaran di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini dapat berguna dan bermanfaat bagi yang membaca.

Bandar Lampung, 10 Juni 2019

Christopher Theophilus Prayogo

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
RIWAYAT HIDUP	viii
SANWACANA.....	xii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GRAFIK	xx
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Perumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Hipotesis	5
1.7 Sistematika Penulisan	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik dan Distribusinya.....	7
2.2 Rugi-Rugi Daya pada Sistem Distribusi.....	9
2.3 Aplikasi <i>Capacitor Bank</i> pada Sistem Distribusi	10

2.4	Aliran Daya.....	14
2.5	<i>Loss Sensitivity Factor</i> (LSF)	20
2.6	Rumusan Matematis	22
2.7	<i>Grey Wolf Optimizer</i> (GWO)	23
2.8	<i>Literature Review</i> Terhadap Kasus Penelitian yang Serupa.....	27
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.....		29
3.1	Waktu dan Tempat.....	29
3.2	Alat dan Bahan	29
3.3	Tahapan Pengerjaan Skripsi	29
3.4	Pemodelan Kasus dengan MATPOWER	33
3.5	Pemodelan Kasus dengan Algoritma GWO	39
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		42
4.1	Data Sistem Distribusi Penyulang Wortel Gardu Induk Menggala	42
4.2	Penentuan Kandidat Bus Menggunakan Perhitungan <i>Loss Sensitivity Factor</i> (LSF).....	44
4.3	Skenario Simulasi	45
4.4	Hasil Simulasi.....	47
4.4.1	Rugi-Rugi Daya Aktif Pada Setiap Simulasi	48
4.4.2	Perbaikan Tegangan Pada Setiap Bus Dengan <i>Capacitor Bank</i> Hasil Optimasi GWO	51
4.4.3	Pengaruh Kapasitas Optimal <i>Capacitor Bank</i> Untuk Penyulang Wortel Dengan Kondisi Pembebanan Yang Berbeda.....	54

4.4.4	Metode GWO Pada Sistem <i>IEEE-10 Bus Radial Distribution Test</i> <i>System</i> Sebagai Pembanding Dengan Penelitian Sebelumnya	59
BAB V. PENUTUP.....		61
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran	62
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN A		65
LAMPIRAN B		69
LAMPIRAN C		76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Capacitor bank</i> pada sistem distribusi [6]	11
Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen saluran (a) dan diagram fasornya (c) serta rangkaian dengan <i>capacitor bank</i> seri (b) dan diagram fasornya (d) [6]	12
Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen saluran (a) dan diagram fasornya (c) serta rangkaian dengan <i>capacitor bank shunt</i> (b) dan diagram fasornya (d) [6].....	14
Gambar 2.4 Bus tipikal pada sistem tenaga listrik.....	16
Gambar 2.5 Saluran distribusi dari bus- <i>i</i> ke bus- <i>j</i>	21
Gambar 2.6 Pembaruan posisi dalam metode GWO [8].....	25
Gambar 3.1 mpc.baseMVA dan mpc.bus Penyulang Wortel	34
Gambar 3.2 mpc.gen dan mpc.branch Penyulang Wortel.....	36
Gambar 3.3 <i>Flowchart</i> optimasi kapasitas <i>capacitor bank</i> dengan GWO pada Penyulang Wortel	41
Gambar 4.1 Diagram garis Penyulang Wortel 113 bus	43
Gambar 4.2 Diagram garis <i>IEEE-10 bus radial distribution test system</i>	44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nilai parameter GWO	32
Tabel 3.2 mpc.bus Penyulang Wortel	35
Tabel 3.3 Format Data Generator (mpc.gen)	36
Tabel 3.4 Format Data <i>Branch</i> (mpc.branch)	38
Tabel 4.1 Empat besar nilai LSF dari kandidat bus yang membutuhkan kompensasi daya reaktif pada Penyulang Wortel.....	44
Tabel 4.2 Empat besar nilai LSF dari kandidat bus yang membutuhkan kompensasi daya reaktif pada sistem <i>IEEE-10 Bus Radial Distribution Test System</i>	45
Tabel 4.3 Nilai parameter pada skenario GWO untuk Penyulang Wortel maupun <i>IEEE-10 bus radial distribution test system</i>	47
Tabel 4.4 Hasil simulasi optimasi kapasitas <i>capacitor bank</i> pada Penyulang Wortel dengan GWO	48
Tabel 4.5 Perbaikan tegangan Penyulang Wortel dengan <i>capacitor bank</i> hasil optimasi GWO.....	51
Tabel 4.6 Durasi beban harian Penyulang Wortel	56
Tabel 4.7 Perbandingan metode GWO yang diusulkan dengan metode lain untuk kasus <i>IEEE-10 Bus Radial Distribution Test System</i>	60

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Kurva konvergensi <i>alpha score</i> di setiap iterasi.....	50
Grafik 4.2 Kurva beban harian Penyulang Wortel.....	55
Grafik 4.3 Perbandingan rugi-rugi daya aktif sistem dengan kondisi pembebanan yang berbeda sebelum dan setelah dipasang <i>capacitor bank</i> hasil GWO.....	57
Grafik 4.4 Nilai tegangan minimum dan maksimum sistem dengan kondisi pembebanan berbeda sebelum dan setelah dipasang <i>capacitor bank</i> hasil GWO	58

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dari tahun ke tahun pertumbuhan jumlah penduduk dan industri semakin meningkat sehingga mengakibatkan kebutuhan akan tenaga listrik mengalami peningkatan. Hal ini menyebabkan proses penyaluran tenaga listrik menjadi semakin kompleks dan rentan terhadap masalah kualitas daya yang disalurkan. Proses penyaluran tenaga listrik dimulai dari proses transmisi tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkit menuju ke gardu induk kemudian proses distribusi tenaga listrik dari gardu induk ke pelanggan.

Sistem distribusi memegang peranan yang penting dalam keseluruhan proses penyaluran tenaga listrik karena langsung berhubungan dengan pelanggan (beban). Jumlah beban yang terus bertambah pada sistem distribusi akan diiringi dengan meningkatnya permintaan suplai daya reaktif untuk beban yang bersifat reaktif-induktif. Jika di daerah sekitar beban tidak terdapat komponen penghasil daya reaktif, maka kebutuhan akan daya reaktif hanya disuplai melalui generator yang berada di sisi pembangkitan. Dengan jarak yang jauh antara sisi pembangkitan dan sisi beban, hal ini akan menimbulkan permasalahan seperti meningkatnya rugi-rugi daya di sepanjang saluran, *voltage drop* (menurunnya level tegangan), serta menurunnya *power factor* (faktor daya). Oleh karena itu,

diperlukan optimasi daya reaktif yang dapat diselesaikan dengan beberapa cara yakni dengan penambahan generator baru, pengaturan *tap-trafo*, pemasangan *auto-voltage regulator*, pemasangan *capacitor bank*, dan lain-lain.

Studi kasus pada skripsi ini adalah jaringan distribusi 20 kV milik PT. PLN (PERSERO) di Penyulang Wortel, Gardu Induk Menggala, yang berada di Kabupaten Tulang Bawang, Provinsi Lampung. Penyulang dengan 113 bus dan 112 saluran serta beban aktif 2,65 MW dan beban reaktif 1,59 MVar ini, memiliki rugi-rugi daya aktif 0,1352 MW dan rugi-rugi daya reaktif 0,22 MVar serta memiliki besar tegangan pada sisi beban paling rendah mencapai 0,916 per unit, dari total daya pada sisi suplai sebesar 9,586 MW dan 8,293 MVar [1].

Permasalahan utama dalam melakukan pemasangan *capacitor bank* pada sistem distribusi adalah menentukan lokasi dan kapasitas yang optimal. Jika tidak tepat, akan membuat pengurangan rugi-rugi daya tidak optimal dan akan membuat nilai tegangan bus tidak pada nilai batas operasi (atau di luar batas 0,95 per unit hingga 1,05 per unit) sedemikian sehingga mengakibatkan kualitas daya yang disalurkan menjadi buruk atau memiliki faktor daya yang tidak sesuai standar (standar faktor daya menurut NEMA adalah 0,8 *lagging*) serta mengakibatkan kerusakan isolasi, performa peralatan elektronik yang memburuk, dan sebagainya [2]. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan beberapa metode yaitu menggunakan metode deterministik seperti *Mixed Integer Linear Programming* dan *Mixed Integer Non-Linear Programming* ataupun menggunakan metode metaheuristik seperti *Genetic Algorithm*, *Gravitational Local Search*, *Artificial Bee Colony*, dan *Particle Swarm Optimization*. Berdasarkan permasalahan dan beberapa metode yang telah

digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi seperti yang telah disebutkan, penulis mencoba menerapkan metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO) dalam menentukan kapasitas optimal *capacitor bank* untuk mereduksi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian optimasi kapasitas *capacitor bank* dengan metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO) ini adalah:

1. Untuk menentukan kapasitas optimal *capacitor bank* di Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.
2. Untuk mengetahui pengaruh pemasangan *capacitor bank* dalam mereduksi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan di setiap bus pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.

1.3 Perumusan Masalah

Tujuan utama dari optimasi kapasitas *capacitor bank* adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan pada setiap bus agar terjaga pada *range* yang dapat diterima dengan cara menginjeksikan daya reaktif sedemikian rupa sehingga dapat mengurangi penyerapan daya reaktif sistem oleh beban.

Pokok permasalahannya adalah bagaimana menentukan *capacitor bank* dengan kapasitas yang optimal menggunakan metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO).

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem yang ditinjau diasumsikan dalam keadaan setimbang dan *steady state*.
2. Tipe *capacitor bank* yang digunakan adalah *fixed capacitor bank* (tidak membahas *switched capacitor bank*).
3. Tidak membahas pengaruh harmonisa yang ditimbulkan akibat pemasangan *capacitor bank*.
4. Beban penyulang yang digunakan dalam analisis adalah beban puncak (tetap) di setiap bus.

1.5 Manfaat Penelitian

Berikut manfaat penelitian yang dilakukan:

1. Memberikan pemahaman mengenai teknik optimasi *Grey Wolf Optimizer* (GWO) sekaligus penerapannya pada sistem tenaga listrik.

2. Memberikan gambaran dan alternatif solusi mengenai optimasi kapasitas *capacitor bank* dalam mereduksi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan di setiap bus pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.

1.6 Hipotesis

Dengan kemampuan yang dimiliki *capacitor bank* dalam mengkompensasi daya reaktif serta kapasitasnya yang dioptimasi menggunakan metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO), maka pemasangan *capacitor bank* pada bus yang lokasinya ditentukan menggunakan metode perhitungan *Loss Sensitivity Factor* (LSF), akan mampu mereduksi rugi-rugi daya dan mampu memperbaiki profil tegangan di setiap bus pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan kerja praktik ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, tujuan penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, dan sistematika penulisan dari skripsi ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tinjauan teori tentang masalah yang dibahas meliputi rugi-rugi daya, studi aliran daya, *capacitor bank*, *Loss Sensitivity Factor* (LSF), dan metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memaparkan waktu dan tempat pengerjaan skripsi, alat dan bahan yang digunakan dalam pengerjaan skripsi, langkah-langkah, dan metode yang digunakan dalam proses pengerjaan skripsi.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan tentang analisis hasil dari simulasi yang telah didapatkan dalam pengerjaan skripsi.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang didapatkan dari hasil pembahasan dan saran-saran yang membangun.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik dan Distribusinya

Energi listrik merupakan bentuk energi yang paling populer karena dengan mudahnya berpindah dari satu tempat ke tempat lain untuk dapat dimanfaatkan dalam kehidupan [3]. Menurut Hadi Saadat dalam “*Power System Analysis*”, jaringan listrik pertama di Amerika Serikat berdiri pada 1882 di Pearl Street Station, New York City oleh Thomas Edison tetapi dengan jarak penyaluran yang pendek, akibat rugi energi yang berlebihan dan penurunan tegangan yang signifikan pada sisi konsumen. Seiring dengan penemuan motor induksi (Nikola Tesla, 1888) serta penemuan transformator (William Stanley, 1885) dalam menaikkan atau menurunkan level tegangan saat penyaluran, sistem *Alternating Current* (AC) semakin populer diaplikasikan dibandingkan yang sebelumnya (*Direct Current/DC*) karena lebih banyak energi dengan mudah dihasilkan pada tegangan yang lebih tinggi jika menggunakan sistem AC. Sementara itu, berdasarkan buku “Pembangkit Tenaga Listrik” oleh Abdul Kadir, jaringan listrik di Indonesia mulai berkembang setelah didirikannya pembangkit listrik di Gambir, Jakarta pada Mei 1897, kemudian disusul Medan, Surakarta, Bandung, Surabaya, Banjarmasin, dan lainnya [4].

Ada tiga bagian besar dari sistem tenaga listrik yaitu pembangkit, penyaluran (transmisi dan distribusi), dan beban seperti yang akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Pembangkit

Bagian ini mengubah energi mekanik menjadi energi listrik untuk kemudian disalurkan. Bisa menghasilkan daya dari 50 MW hingga 1.500 MW dengan tegangan sekitar 30 kV. Beberapa generator bisa berinterkoneksi dalam *power grid* dan terhubung pada titik (bus) tertentu dalam menyediakan total daya yang dibutuhkan.

2. Transmisi dan Distribusi

Untuk mentransfer energi di daerah-daerah jauh, transmisi diaplikasikan dengan menaikkan level tegangan menggunakan transformator daya. Hal ini akan mengurangi rugi-rugi daya. Berdasarkan *American National Standards Institute* (ANSI), tegangan *line to line* (fasa ke fasa) transmisi beroperasi lebih dari 60 kV dan terstandarisasi di 69 kV, 115 kV, 138 kV, 161 kV (tergolong *High Voltage*), 230 kV, 345 kV, 500 kV, dan 765 kV (tergolong *Extra High Voltage*), dan di atas 765 kV (tergolong *Ultra High Voltage*) [2].

Sistem distribusi adalah penghubung Gardu Induk (GI) ke konsumen (beban). Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan menengah memiliki tegangan sistem di atas 1 kV sampai dengan 35 kV dan biasanya tegangan ini memiliki nilai sebesar 20 kV. Jaringan distribusi sekunder atau jaringan distribusi tegangan rendah merupakan jaringan yang langsung berhubungan dengan beban.

Besarnya tegangan ini adalah 0,23/0,4; 0,23 kV merupakan tegangan antara fasa dengan netral sedangkan 0,4 kV merupakan tegangan fasa ke fasa [5].

3. Beban

Secara umum beban dalam sistem tenaga listrik terbagi menjadi beban industri, beban komersil, dan beban rumah. Biasanya berupa motor, penerangan, pemanasan, dan pendinginan. Adakalanya, beban industri yang sangat luas bisa dilayani dari sistem transmisi.

2.2 Rugi-Rugi Daya pada Sistem Distribusi

Proses penyaluran tenaga listrik terutama sistem distribusi mengalami *power losses* (rugi-rugi daya) yang signifikan. Hal ini, selain karena rugi-rugi peralatan dan transformator daya yang digunakan, diakibatkan oleh rugi-rugi saluran serta meningkatnya beban. Kerugian ini memberikan pengaruh terhadap kualitas daya yang disalurkan menuju ke beban, yang biasanya direpresentasikan sebagai faktor daya ($\cos \phi$), serta terhadap tegangan pada sisi beban. Rugi-rugi daya (kompleks) terbagi menjadi dua yaitu rugi-rugi daya aktif (nyata) dan rugi-rugi daya reaktif (imajiner) serta dituliskan dengan persamaan berikut:

$$S_L = P_L + jQ_L \quad (2.1)$$

Derangan:

$$P_L = \sum_{i=1}^{n-1} |I_i|^2 \times R_i \quad (2.2)$$

$$Q_L = \sum_{i=1}^{n-1} |I_i|^2 \times X_i \quad (2.3)$$

Di mana:

S_L = Total rugi-rugi daya pada saluran (VA)

P_L = Rugi-rugi daya aktif pada saluran (watt)

Q_L = Rugi-rugi daya reaktif pada saluran (VAr)

I_i = Arus yang mengalir pada saluran ke- i (Ampere)

R_i = Resistansi pada saluran ke- i (Ohm)

X_i = Reaktansi pada saluran ke- i (Ohm)

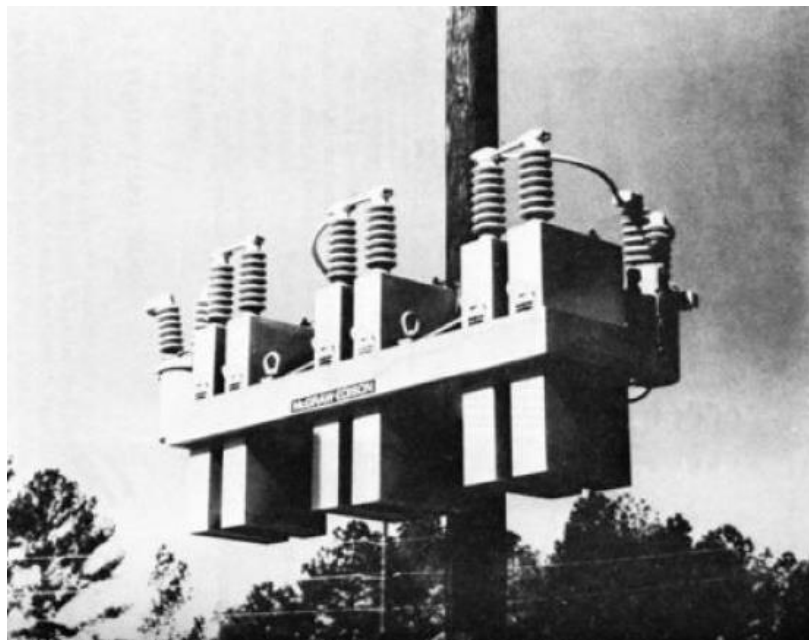
n = Jumlah bus yang terhubung pada sistem

2.3 Aplikasi *Capacitor Bank* pada Sistem Distribusi

Dalam perbaikan kualitas daya dan pengaturan tegangan sistem, insinyur kelistrikan menggunakan *capacitor bank* karena kemampuan kompensasi daya reaktif yang ditawarkannya. Pada saluran transmisi dan distribusi, beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif yang kemudian akan mempengaruhi kualitas daya dan menimbulkan *voltage drop* (penurunan tegangan) di sisi beban. Di sinilah *capacitor bank* berfungsi. Pemasangan *capacitor bank* secara optimal adalah salah satu usaha yang dilakukan untuk memberikan suplai daya reaktif secara optimal sedemikian rupa sehingga akan mengurangi penyerapan daya

reaktif sistem oleh beban. Hal ini dilakukan agar rugi-rugi sistem dan penurunan tegangan yang terjadi dapat dikurangi [6]. Menurut Turan Gonen, secara umum fungsi *capacitor bank* pada sistem tenaga listrik di antaranya adalah:

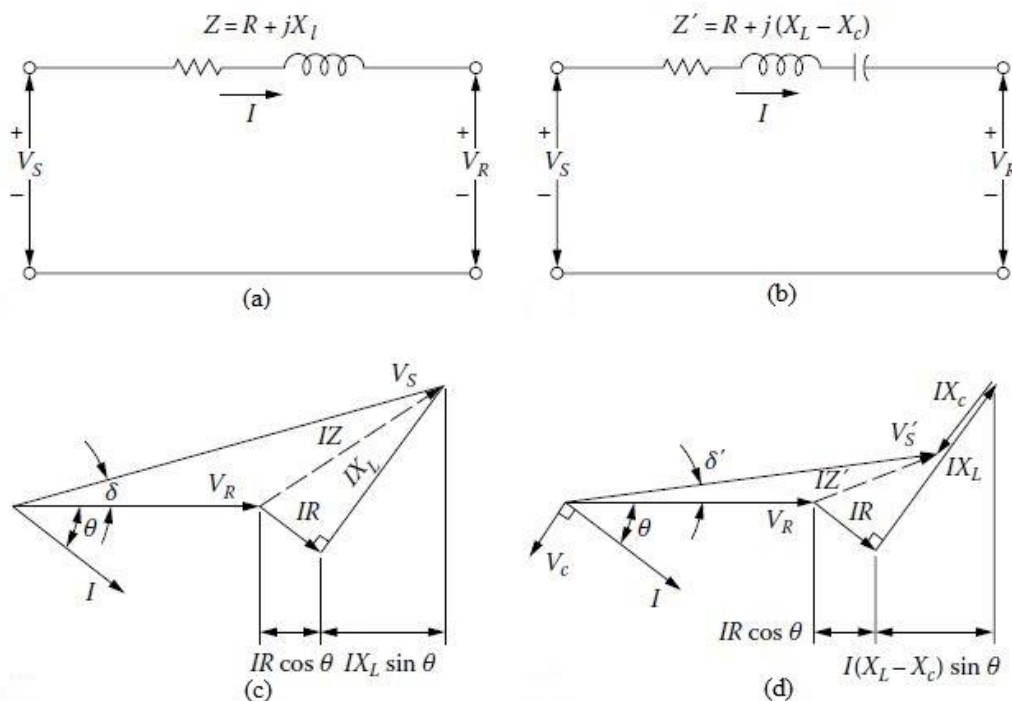
1. Menyuplai daya reaktif sehingga memaksimalkan penggunaan daya kompleks
2. Mengurangi rugi-rugi daya pada sistem
3. Memperbaiki faktor daya
4. Mengurangi penurunan tegangan



Gambar 2.1 *Capacitor bank* pada sistem distribusi [6]

Pemasangan *capacitor bank* baik secara seri ataupun *shunt* (paralel) dapat mengoreksi aliran daya reaktif dan menurunkan penurunan tegangan pada suatu sistem tenaga. Pemasangan paralel bekerja dengan mengubah faktor daya beban, sementara pemasangan seri menurunkan reaktansi induktif secara langsung.

Pemasangan seri jarang digunakan di sistem distribusi. Hal ini untuk menghindari kesulitan dalam mengatasi kondisi gangguan di sistem distribusi yang dapat mengakibatkan *overvoltage* (tegangan lebih) dan merusak peralatan ataupun beban di hilir serta untuk menghindari *overcompensation* yang dapat mengakibatkan kenaikan tegangan dengan luar biasa. Oleh karena itu, pemasangan seri lebih digunakan di sistem transmisi terutama untuk mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki tegangan dalam peningkatan kemampuan menyalurkan daya pada sistem transmisi seiring peningkatan beban yang diminta.



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen saluran (a) dan diagram fasornya (c) serta rangkaian dengan *capacitor bank* seri (b) dan diagram fasornya (d) [6]

Penurunan tegangan yang terjadi saat saluran dipasang *capacitor bank* seri seperti Gambar 2.2(d) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$VD = IR \cos \theta + IX_L \sin \theta \quad (2.4)$$

Di mana:

R = Resistansi saluran (Ohm)

X_L = Reaktansi saluran (Ohm)

$\cos \theta$ = *Power factor*

$\sin \theta$ = *Reactive factor*

Pemasangan paralel sering diterapkan pada sistem distribusi karena dapat meningkatkan faktor daya, mengurangi rugi-rugi daya, mengatasi penurunan tegangan, serta dapat menerapkan sistem proteksi dengan mudah. Penurunan tegangan yang terjadi saat saluran dipasang *capacitor bank* paralel seperti Gambar 2.3(d) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_L \quad (2.5)$$

Di mana:

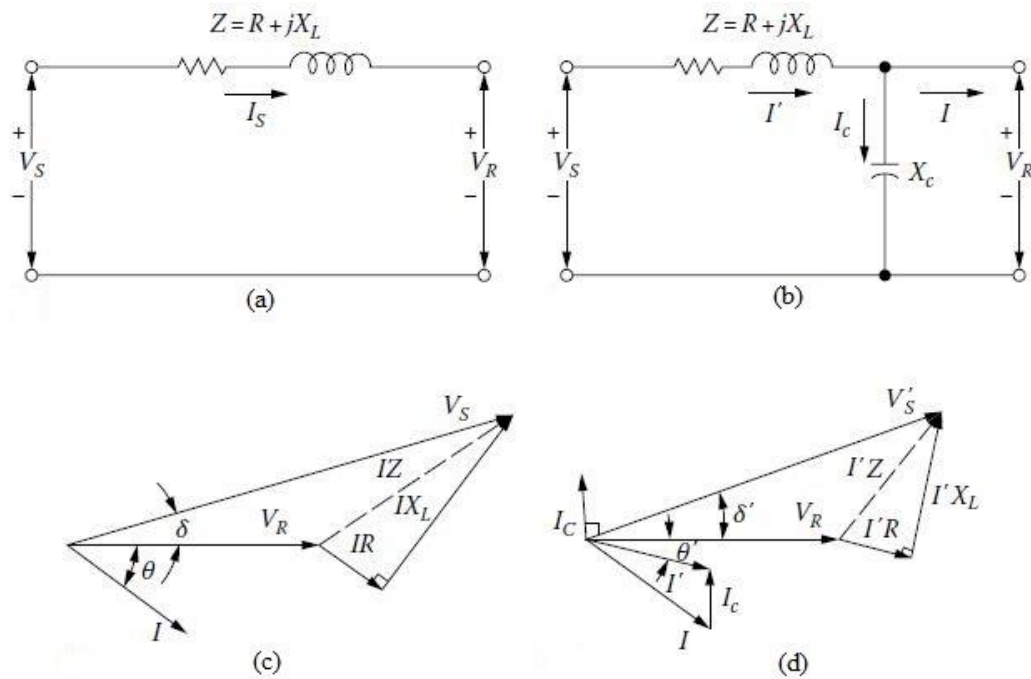
R = Total resistansi saluran (Ohm)

X_L = Total reaktansi saluran (Ohm)

I_R = Komponen aktif dari arus (Ampere)

I_X = Komponen reaktif dari arus *lagging* $\frac{\pi}{2}$ rad (Ampere)

I_C = Komponen reaktif dari arus *leading* $\frac{\pi}{2}$ rad (Ampere)



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen saluran (a) dan diagram fasornya (c) serta rangkaian dengan *capacitor bank shunt* (b) dan diagram fasornya (d) [6]

2.4 Aliran Daya

Secara umum, sistem tenaga beroperasi dalam kondisi yang tetap dan jarang berubah dan dapat dianalisis menggunakan analisis keadaan tunak (*steady state analysis*). Sistem transmisi yang beroperasi dalam keadaan setimbang atau hampir setimbang membuat analisis satu fasa dapat digunakan secara meyakinkan. Analisis terhadap aliran daya (dalam Bahasa Inggris disebut *power flow* atau *load flow*) merupakan tahap awal bagi analisis selanjutnya dalam sistem tenaga. Sebagai contoh, dampak kestabilan transien dan kestabilan kondisi tunak dari suatu gangguan dalam sistem tenaga sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi sebelum gangguan. Studi aliran daya di dalam sistem tenaga diperlukan untuk

perencanaan, penjadwalan ekonomis, dan pengendalian sistem yang ada serta perencanaan pengembangan sistem di masa depan. Masalah yang ada di dalam analisis aliran daya adalah menentukan besaran dan sudut fasa tegangan di setiap bus serta aliran daya aktif dan reaktif di setiap saluran. Untuk pemecahan masalah di dalam analisis aliran daya, sistem diasumsikan dalam keadaan yang seimbang sehingga model satu fasa dapat digunakan dalam pemecahan masalah. Terdapat empat besaran yang mempengaruhi aliran daya di setiap bus, yaitu besaran tegangan ($|V|$), sudut fasa tegangan (δ), daya aktif (P), dan daya reaktif (Q) [3].

Biasanya, dua variabel pada setiap bus diasumsikan diketahui sedangkan dua variabel lain diselesaikan dengan perhitungan. Oleh karena itu bus dalam sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu:

1. *Slack Bus (Swing Bus/Bus Referensi)*

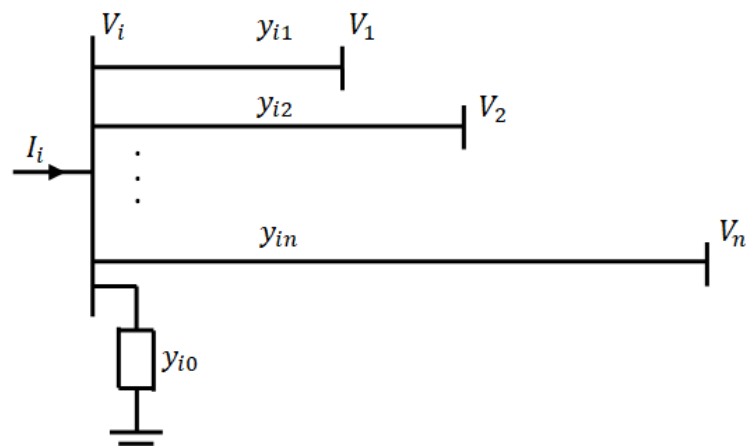
Salah satu bus diambil sebagai referensi dengan besaran tegangan ($|V|$) dan sudut fasa tegangan (δ) ditetapkan sedemikian sehingga bus ini disebut sebagai bus referensi. Daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) adalah dua variabel yang dicari dalam perhitungan.

2. *Bus Beban (P - Q bus)*

Daya aktif dan daya reaktif (P , Q) pada bus ini ditetapkan sebagai variabel yang diketahui nilainya, sementara besaran tegangan dan sudut fasa tegangan ($|V|$, δ) adalah dua variabel yang dicari nilainya.

3. Regulated Bus (Voltage-Controlled Bus/P-V Bus)

Bus ini merupakan bus generator dengan nilai daya aktif (P) dan besaran tegangan ($|V|$) diketahui. Sedangkan nilai daya reaktif (Q) dan sudut fasa tegangan (δ) diselesaikan dengan perhitungan.



Gambar 2.4 Bus tipikal pada sistem tenaga listrik

Dengan *Kirchoff's Current Law* (KCL), dari Gambar 2.4, didapatkan:

$$\begin{aligned}
 I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\
 &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j, \quad j \neq i \tag{2.7}$$

Dengan I_i merupakan nilai arus yang masuk ke bus- i , V_i adalah nilai tegangan pada bus- i , dan y_{ij} adalah admitansi antara bus- i dan bus- j .

Admitansi antar bus tersebut dapat disusun menjadi elemen-elemen dari matriks admitansi sedemikian rupa sehingga persamaan (2.6) dapat ditampilkan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Persamaan (2.7) dapat ditulis menjadi:

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

atau

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

Dengan:

θ_{ij} = Sudut fasa dari elemen matriks Y_{ij}

δ_j = Sudut fasa dari tegangan bus- j

Daya aktif dan daya reaktif pada bus- i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.10)$$

Sehingga persamaan (2.7) menjadi:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad , j \neq i \quad (2.11)$$

Dari persamaan (2.8), daya aktif dan reaktif dapat juga ditulis menjadi:

$$\begin{aligned} P_i + jQ_i &= V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| e^{j\delta_{ij}} (G_{ij} - jB_{ij}) \\ &= \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (\cos\delta_{ij} + j\sin\delta_{ij}) (G_{ij} - jB_{ij}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Di mana:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.13)$$

$$V_i = |V_i| e^{j\delta_i} = |V_i| \angle \delta_i \quad (2.14)$$

$$e^{j\delta_i} = \cos\delta_i + j\sin\delta_i \quad (2.15)$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (2.16)$$

Dengan:

G_{ij} = konduktansi dari elemen matriks Y_{ij}

B_{ij} = suseptansi dari elemen matriks Y_{ij}

Kemudian daya kompleks dari persamaan (2.12) dapat diuraikan menjadi daya nyata (aktif) dan daya imajiner (reaktif):

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos\delta_{ij} - B_{ij} \sin\delta_{ij}) = P_{G_i} - P_{D_i} \quad (2.17)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin\delta_{ij} - B_{ij} \cos\delta_{ij}) = Q_{G_i} - Q_{D_i} \quad (2.18)$$

Persamaan-persamaan aliran daya seperti yang telah dijelaskan tidak memiliki bentuk tertutup (*closed form*) sehingga akan diselesaikan dengan teknik iterasi.

Metode yang umum digunakan adalah: *Gauss-Seidel*, *Newton-Raphson*, dan *Fast Decoupled*.

Dalam metode *Gauss-Seidel*, persamaan (2.11) dapat diselesaikan menjadi:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum_{j=0}^n Y_{ij}}, j \neq i \quad (2.19)$$

Begitu juga untuk nilai Q pada bus generator ataupun variabel lain yang diperlukan penyelesaiannya, memerlukan proses iterasi yang konvergen (mendekati nilai sesungguhnya) dengan kriteria yang diinginkan. Perbedaan antara hasil pada iterasi ke- $(k + 1)$ dan ke- k tidak lebih dari toleransi yang diinginkan.

$$\Delta V_i = |V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \leq \epsilon_V \quad (2.20)$$

$$\Delta P_i = |P_i^{(k+1)} - P_i^{(k)}| \leq \epsilon_P \quad (2.21)$$

$$\Delta Q_i = |Q_i^{(k+1)} - Q_i^{(k)}| \leq \epsilon_Q \quad (2.22)$$

Metode *Newton-Raphson* memberikan penyelesaian yang lebih cepat dalam menyelesaikan masalah aliran daya pada sistem yang lebih besar. Turunan parsial digunakan untuk menyusun matriks *Jacobian* sedemikian rupa sehingga:

$$\Delta S = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Persoalan aliran daya memberikan pola yakni P lebih sensitif terhadap sudut tegangan dan kurang terhadap nilai tegangan sementara Q lebih sensitif terhadap

nilai tegangan dan kurang terhadap sudut tegangan. Oleh karena itu, metode *Fast Decoupled* menyederhanakan *Newton-Raphson*, yang memerlukan inversi matriks *Jacobian* setiap iterasi, dengan membuat elemen J_2 dan J_3 menjadi nol sedemikian rupa sehingga didapatkan bentuk umum penyelesaian sebagai berikut:

$$\Delta\delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \quad (2.24)$$

$$\Delta|V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (2.25)$$

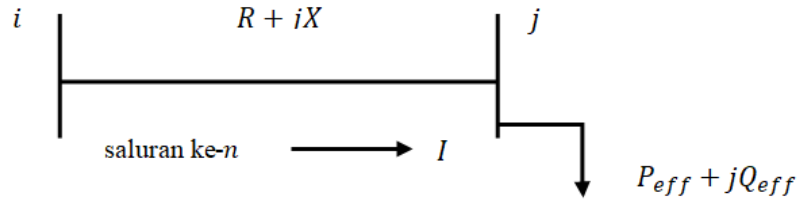
Dengan:

B' = Bagian imajiner dari matriks admitansi, dengan ordo $(n - 1)$

B'' = Bagian imajiner dari matriks admitansi, dengan ordo $(n - 1 - m)$; m banyak *regulated bus*

2.5 Loss Sensitivity Factor (LSF)

Dari jurnal Niken Basyarach dkk., faktor sensitivitas rugi-rugi (*Loss Sensitivity Factor*) digunakan untuk menentukan lokasi optimal *capacitor bank* pada suatu sistem distribusi. LSF akan memprediksi bus-bus yang akan dipilih sebagai kandidat bus di mana *capacitor bank* akan ditempatkan sedemikian rupa sehingga akan memberi dampak pengurangan rugi-rugi paling besar pada bus yang terpilih [7].



Gambar 2.5 Saluran distribusi dari bus- i ke bus- j

Rugi-rugi daya aktif pada saluran ke- n dapat dirumuskan:

$$P_L[j] = \frac{(P_{eff}^2[j] + Q_{eff}^2[j]) R[n]}{(V[j])^2} \quad (2.26)$$

Rugi-rugi daya reaktif pada saluran ke- n dapat dirumuskan:

$$Q_L[j] = \frac{(P_{eff}^2[j] + Q_{eff}^2[j]) X[n]}{(V[j])^2} \quad (2.27)$$

Di mana:

$P_{eff}[j]$ = total daya aktif yang efektif disuplai keluar bus- j

$Q_{eff}[j]$ = total daya reaktif yang efektif disuplai keluar bus- j

LSF dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{\partial P_L[j]}{\partial Q_{eff}[j]} = \frac{2Q_{eff}[j] \cdot R[n]}{(V[j])^2} \quad (2.28)$$

Kemudian nilai LSF diurutkan dari yang terbesar. Dengan menghitung besaran tegangan normal bus ($norm[i] = \frac{|V(i)|}{0,95}$), bus-bus dapat dipilih sebagai kandidat bus untuk dipasang *capacitor bank* dengan syarat nilai tegangan $norm[i]$ kurang dari 1,01 pu.

2.6 Rumusan Matematis

Tujuan utama dari skripsi ini adalah menentukan kapasitas yang optimal dari pemasangan *capacitor bank* untuk meminimalisasi total rugi-rugi daya dan juga memperbaiki profil tegangan di setiap bus pada Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala. Oleh karena itu, fungsi objektif pada penelitian ini adalah meminimalisasi rugi-rugi daya aktif yang diberikan pada persamaan berikut:

$$\text{minimize } P_{L,total} = \sum_{i=1}^{n-1} P_{L_i} \quad (2.29)$$

Dengan fungsi kendala (*constraint*) sebagai berikut:

1. Batasan keseimbangan daya aktif-reaktif yang dibangkitkan dan daya aktif-reaktif yang digunakan:

$$P_{G_i} - P_{D_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.30)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.31)$$

2. Batasan besaran tegangan:

$$|V_{min}| \leq |V_i| \leq |V_{max}| \quad (2.32)$$

3. Batasan kapasitas *capacitor bank*:

$$Q_{c_i}^{min} \leq Q_{c_i} \leq Q_{c_i}^{max} \quad (2.33)$$

Di mana:

$P_{L,total}$ = Total rugi-rugi daya (MW)

P_{L_i} = Rugi-rugi daya pada saluran i (MW)

n = Banyak bus pada sistem

$|V_i|$ = Nilai tegangan pada bus- i (pu)

Q_{C_i} = Daya reaktif yang diinjeksikan *capacitor bank* di bus- i (MVar)

2.7 Grey Wolf Optimizer (GWO)

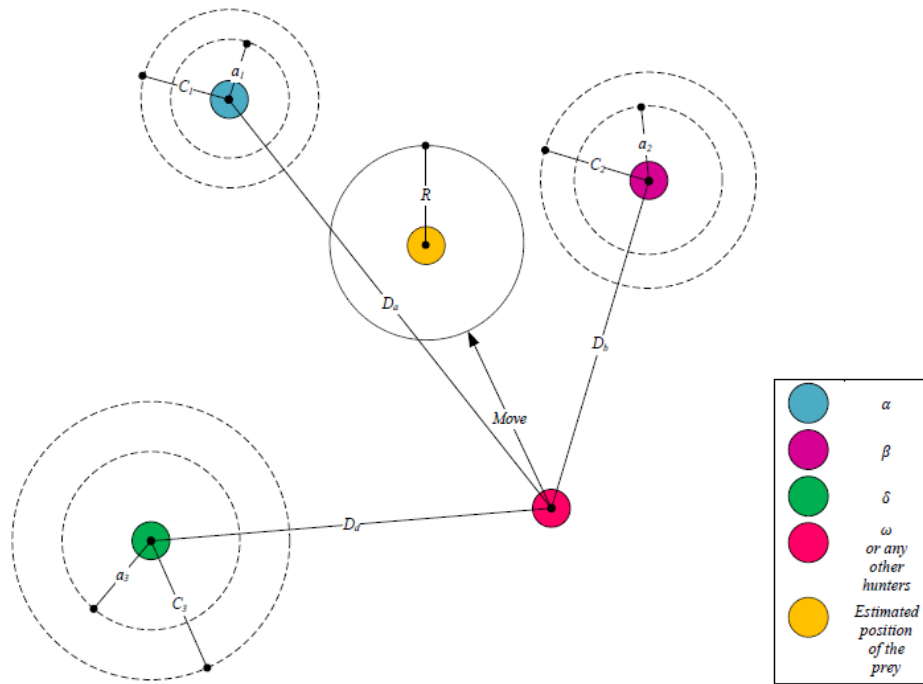
Teknik optimasi memiliki dua kelompok utama yakni deterministik dan (meta)heuristik. Metode deterministik memiliki hanya satu jalan proses mencari solusi sehingga jika permasalahan terlalu kompleks, akan lebih sulit mendapatkan nilai optimal (optima) global yang diharapkan. Sedangkan metode (meta)heuristik dengan lebih mudah dan lebih fleksibel, akan terus menghasilkan solusi baru di setiap iterasi untuk mendapatkan optima global terbaik meskipun nilainya berupa pendekatan. Untuk heuristik dan metaheuristik, perbedaannya terletak pada keterikatan pada masalah. Heuristik bersifat *problem dependent* sehingga hanya bisa digunakan untuk permasalahan tertentu, contohnya *Nearest Neighborhood* hanya digunakan pada permasalahan yang menggunakan konsep tetangga seperti masalah rute kendaraan. Metaheuristik bersifat *problem independent* sehingga dapat digunakan pada setiap bentuk permasalahan. Salah satu metode metaheuristik yang ada adalah *Grey Wolf Optimizer* (GWO).

GWO merupakan optimasi metaheuristik berbasis kumpulan cerdas (*swarm intelligence*) yang didasarkan pada hierarki sosial dan perilaku sekumpulan anjing serigala abu-abu (*grey wolf*) dalam memburu mangsa. Hierarki sosial ini mempengaruhi keputusan (solusi) akhir dalam perburuan mangsa, dengan

tingkatannya dari yang teratas adalah serigala *alpha*, *beta*, *delta*, dan *omega*. Tingkat terakhir adalah *omega* yang walaupun seperti bagian yang tidak penting dalam kelompok, memiliki peran juga terutama mempertahankan struktur kelompok serigala abu-abu tersebut secara keseluruhan [8].

Langkah dalam teknik GWO adalah pelacakan (*tracking*), pengepungan (*encircling*), dan penyerangan mangsa (*attacking prey*) oleh para serigala abu-abu (*search agent*) sedemikian sehingga didapat tiga solusi yakni *alpha* (α), *beta* (β), dan *delta* (δ), dengan *alpha* adalah solusi yang terbaik. Solusi selebihnya adalah *omega* (ω).

Search agent, terutama *alpha*, *beta*, dan *delta*, memiliki kemampuan mengenali posisi mangsa sebelum mengepungnya sehingga didapat tiga solusi terbaik untuk kemudian mewajibkan serigala lain (*omega*) memperbarui posisinya seperti ilustrasi pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pembaruan posisi dalam metode GWO [8]

Situasi ini dinyatakan dengan persamaan:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (2.34)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (2.35)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (2.36)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (2.37)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (2.38)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (2.39)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (2.40)$$

Di mana $\vec{D}_\alpha$, $\vec{D}_\beta$, dan $\vec{D}_\delta$ adalah jarak *omega* terhadap *alpha*, *beta*, dan *delta*. $\vec{X}_1$, $\vec{X}_2$, dan $\vec{X}_3$ adalah vektor posisi terhadap *alpha*, *beta*, dan *delta*. $\vec{X}$ merupakan

vektor posisi yang akan terus diperbarui setiap iterasi. Sementara itu, $\vec{A}$ dan $\vec{C}$ adalah *coefficient vector* (vektor koefisien) yang dihitung dengan persamaan:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (2.41)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (2.42)$$

Di mana $\vec{r}_1$ dan $\vec{r}_2$ adalah vektor random (acak) antara 0 dan 1 dan nilai $\vec{a}$ diset menurun secara linier dari 2 ke 0 selama perjalanan iterasi. Namun operator $\vec{A}$ ini cenderung mengeksplorasi solusi di daerah optima lokal sehingga diperlukan operator $\vec{C}$ untuk eksplorasi solusi dengan mendivergenkan daerah pencarian (*search space*) sehingga diharapkan didapat daerah optima lebih baik (global) untuk kemudian dieksploitasi lagi dengan operator $\vec{A}$.

Metode GWO dalam penyelesaian optimasi kapasitas *capacitor bank* pada Penyulang Wortel adalah dengan membentuk matriks populasi, dengan kolom menyatakan banyaknya dimensi (variabel kontrol) seperti tegangan bus dan nilai kapasitas *capacitor bank* dan baris menyatakan banyaknya serigala abu-abu sebagai *search agent*.

Nilai posisi setiap *search agent* diperbarui di setiap iterasi begitu juga nilai fungsi objektifnya (*fitness*) yakni rugi-rugi daya aktif. Hal ini dilakukan sampai nilai iterasi maksimum dicapai dengan menampilkan nilai *fitness* terbaik dan posisi setiap variabelnya.

2.8 Literature Review Terhadap Kasus Penelitian yang Serupa

Optimasi kapasitas *capacitor bank* yang menggunakan metode algoritma metaheuristik sebelumnya sudah pernah dilakukan. Pada 2007, peneliti asal India bernama K. Prakash dan M. Sydulu dalam jurnal berjudul “*Particle Swarm Optimization based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems*” menyatakan bahwa algoritma PSO yang menggunakan sekumpulan partikel dalam optimasi, dapat digunakan untuk menentukan kapasitas optimal *capacitor bank* dalam mengkompensasi daya reaktif. Hasilnya menunjukkan bahwa algoritma PSO mampu mereduksi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan dalam studi kasus 10, 15, 34, 69, dan 85 bus [9].

Sebelumnya sebuah penelitian berjudul “*A New Fuzzy Reasoning Approach to Optimum Capacitor Allocation For Primary Distribution Systems*” oleh Ching-Tzong Su dan Chih-Cheng Tsai pada 1996 menggunakan pendekatan berbasis algoritma *fuzzy* untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya. Mereka menggunakan dua fungsi keanggotaan untuk nilai tegangan dan rugi-rugi daya dalam mendapatkan kapasitas optimal *capacitor bank* [10].

Gnanasekaran dkk. dalam jurnalnya pada 2015, juga meneliti optimasi kapasitas *capacitor bank* pada sistem distribusi radial menggunakan algoritma *Modified Artificial Bee Colony (Modified ABC)*. Hasilnya menunjukkan bahwa algoritma yang menggunakan kumpulan lebah madu dalam optimasi ini dapat mereduksi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan [11].

Metode *Grey Wolf Optimizer* (GWO) dipublikasikan oleh Sayedali Mirjalili, Sayed Mohammad Mirjalili, dan Andrew Lewis. Salah satu metode metaheuristik ini dapat diaplikasikan pada masalah keteknikan klasik seperti rancangan optimal untuk *spring* tegangan/tekanan (*tension/compression spring*) dan optimasi balok lasan (*welded beam*) serta aplikasi gangguan optikal (*optical buffer*). Pada sistem tenaga listrik, GWO dapat diaplikasikan untuk studi *optimal power flow*, stabilitas tegangan, ataupun kontrol daya reaktif. Dalam penelitian kali ini, penulis mencoba menggunakan metode GWO dalam meminimalisasi rugi-rugi daya aktif sedemikian sehingga didapat kapasitas *capacitor bank* yang optimal dengan kasus Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Skripsi ini dilaksanakan pada Februari 2018 – November 2018 di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada skripsi ini yaitu:

1. Satu unit laptop sebagai media pemodelan dan simulasi.
2. MATLAB R2014a, *toolbox* MATPOWER 6.0, dan Microsoft Excel 2010 sebagai perangkat lunak untuk simulasi dan analisis.
3. Data bus beban, data saluran, data bus generator (*swing bus*), dan *single line diagram* sistem distribusi 20 kV Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.

3.3 Tahapan Pengerjaan Skripsi

Adapun proses pengerjaan skripsi ini terbagi menjadi beberapa tahapan yaitu:

1. Mengidentifikasi Masalah

Penulis mengidentifikasi permasalahan yang terdapat pada sistem kelistrikan terutama yang berada di Provinsi Lampung. Dalam skripsi ini, penulis mengangkat kasus mengenai kapasitas optimal yang diperlukan untuk pemasangan *capacitor bank* dalam mereduksi rugi-rugi daya aktif dan memperbaiki profil tegangan di setiap bus pada sistem distribusi 20 kV Penyulang Wortel di Gardu Induk Menggala.

2. Studi Literatur

Penulis mempelajari materi-materi yang berkaitan dengan kasus dari sumber referensi ilmiah seperti jurnal ilmiah, skripsi terdahulu, buku yang berkaitan, serta *website* terkait.

3. Pengambilan Data dan Pengolahan Data

Penulis mengumpulkan data-data yang dibutuhkan dalam pengerjaan skripsi untuk dianalisis dengan MATLAB R2014a, MATPOWER, serta Microsoft Excel 2010. Adapun data-data yang dibutuhkan meliputi data bus beban, data saluran, dan data bus generator seperti terlampir pada Lampiran A.

4. Simulasi dan Analisis

Penulis mengumpulkan data-data sistem distribusi Penyulang Wortel ke dalam suatu *casedata* dengan format *m-file* MATLAB serta ke dalam Microsoft Excel 2010 untuk perhitungan *Loss Sensitivity Factor* (LSF) yang akan menentukan kandidat bus terpilih untuk pemasangan *capacitor bank*. Program optimasi GWO

dengan format *m-file* ini dibantu MATPOWER dalam menjalankan program dengan *casedata* Penyulang Wortel.

Fungsi objektif dalam optimasi ini adalah meminimumkan rugi-rugi daya aktif dengan batasan tegangan pada *swing bus* 0,95 sampai 1,00 pu dan batasan kapasitas *capacitor bank* 0,15 sampai 2,1 MVar sedemikian sehingga akan mendapatkan nilai optimal kapasitas yang akan dipasang pada 4 kandidat bus terpilih dan dapat memperbaiki profil tegangan di setiap bus.

Setelah menentukan dimensi atau yang disebut variabel kontrol (tegangan pada *swing bus* dan kapasitas *capacitor bank* pada bus terpilih) dengan batas-batasnya, menentukan banyaknya *search agent*, nilai inisial posisi dan *score* dari *alpha*, *beta*, dan *delta*, serta banyaknya iterasi yang diinginkan.

Kemudian mengevaluasi fungsi objektif untuk setiap *search agent* (dengan masing-masing posisinya) dengan perhitungan aliran daya dan menyimpan nilai rugi-rugi daya aktif (*fitness*) yang terbaik sebagai *alpha score* beserta posisi *alpha*, nilai yang terbaik ke dua sebagai *beta score* beserta posisi *beta*, dan nilai yang terbaik ke tiga sebagai *delta score* beserta posisi *delta*.

Setelah posisi *alpha*, *beta*, dan *delta* diperbarui, jika variabel di luar batas maka variabel dimasukkan ke dalam batasnya atau jika variabel tidak di luar batas maka iterasi akan ditambahkan dalam optimasi hingga iterasi maksimum yang diinginkan. Terakhir, mencetak rugi-rugi daya aktif minimum (*alpha score*) dan

variabel-variabel kontrolnya yakni nilai tegangan pada *swing bus* dan nilai kapasitas optimal pada keempat bus (posisi *alpha*) sebagai penyelesaian akhir.

Tabel 3.1 merupakan nilai parameter GWO untuk optimasi kapasitas *capacitor bank* di Penyulang Wortel dengan simulasi sebanyak 5 kali:

Tabel 3.1 Nilai parameter GWO

No.	Parameter GWO	Nilai
1.	Banyak dimensi (variabel)	5
2.	Batas atas tegangan <i>swing bus</i> (pu)	1,00
3.	Batas bawah tegangan <i>swing bus</i> (pu)	0,95
4.	Batas atas kapasitas <i>capacitor bank</i> (MVar)	2,1
5.	Batas bawah kapasitas <i>capacitor bank</i> (MVar)	0,15
6.	Kandidat bus terpilih untuk Penyulang Wortel	42, 51, 58, dan 60 (Lampiran B)
7.	Banyak <i>search agent</i>	20
8.	Banyak iterasi	200

5. Pembuatan Laporan

Penulis membuat laporan mengenai hasil yang telah didapat sebagai suatu bentuk pertanggungjawaban terhadap skripsi yang telah dikerjakan.

3.4 Pemodelan Kasus dengan MATPOWER

MATPOWER adalah suatu *toolbox* dari MATLAB yang memiliki fungsi utama dalam menyelesaikan masalah yang terkait dengan aliran daya, terutama dalam kasus ini, untuk mencari nilai rugi-rugi daya aktif optimum seperti yang telah disebutkan di poin ke 4 bagian 3.3. Fungsi utama ini melibatkan persiapan data input, simulasi, dan hasil. [12]

Dalam pemodelan suatu sistem tenaga, data input ditentukan dalam set data matriks yang dikemas sebagai daerah (*field*) dari suatu struktur MATPOWER *case* (MATPOWER *case struct*) atau disimbolkan mpc. Besaran nilai input dalam satuan per unit (pu) dan sudut dalam radian. Semua bus diberi nomor berurutan dari 1 (bus generator) dst. Pemodelan dan persamaan yang terkait berbentuk matriks dan vektor.

Data input ini dapat berupa *m-file* yang berupa struktur mpc ataupun MAT-file yang berupa mpc saat dimuat (*diload*). Daerah struktur yang akan dijalankan terdiri dari *baseMVA*, *bus*, *branch*, dan *gen*, serta *gencost* (opsional). *BaseMVA* merupakan nilai skalar dari basis MVA pada sistem untuk konversi daya ke satuan per unit. Daerah struktur yang lain, yakni *bus*, *branch*, dan *gen*, merupakan matriks-matriks yang setiap barisnya berkorespondensi dengan bus terkait dalam sistem tenaga yang diketahui dan setiap kolomnya menyatakan parameter-parameter yang berdasarkan format standar IEEE CDF (*Common Data Format*) dan format PTI (matriks *gencost* atau biaya pembangkitan dapat diabaikan karena lebih berguna dalam analisis aliran daya optimal).

Setelah data input berisikan nilainya masing-masing, sistem tenaga tersebut dapat dianalisis aliran dayanya yang secara *default* menggunakan metode *Newton-Raphson* seperti dijelaskan pada bagian 2.4. Berikut ini adalah bentuk umum fungsinya:

```
>> results = runpf(casedata);
```

```

8 - mpc.baseMVA = 100;
9
10 %% bus data FIX
11
12 % bus_i : bus number
13 % type  : tipe bus
14 %       3 - slack bus (V,angle)
15 %       2 - PV bus (P,V)
16 %       1 - PQ bus (P,Q)
17 % Pd    : P demand ( daya aktif yang dipakai) (MW/KW/W)
18 % Qd    : Q demand ( daya reaktif yang diperbaiki) (MVAR/KVAR/VAR)
19 % Gs    : konduktansi paralel (S)
20 % Bs    : suseptansi paralel (MVar)
21 %
22
23 % bus_i | type  Pd Qd Gs Bs area  Vm Va baseKV zone
24
25 - mpc.bus = [
26 1 3 0 0 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
27 2 1 0.014 0.008 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
28 3 1 0.007 0.004 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
29 4 1 0.014 0.008 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
30 5 1 0.014 0.008 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
31 6 1 0.007 0.004 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
32 7 1 0.014 0.008 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
33 8 1 0.007 0.004 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
34 9 1 0.014 0.008 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
35 10 1 0.014 0.008 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95
36 11 1 1.224 0.759 0 0 1 1 0 20 1 1.05 0.95

```

Gambar 3.1 mpc.baseMVA dan mpc.bus Penyulang Wortel

Dari Gambar 3.1, nilai yang diketahui pada data mpc.baseMVA Penyulang Wortel adalah 100 MVA. Pada mpc.bus, terdapat 113 baris yang menunjukkan banyak bus serta 13 kolom yang menunjukkan nilai tertentu seperti dipaparkan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2 mpc.bus Penyulang Wortel

Nama	Kolom	Deskripsi
BUS_I	1	Nomor bus
BUS_TYPE	2	Tipe bus (1=PQ, 2=PV, 3=ref)
PD	3	Beban aktif (MW)
QD	4	Beban reaktif (MVar)
GS	5	Konduktansi <i>shunt</i> (MW yang dikonsumsi saat $V = 1$ pu)
BS	6	Suseptansi <i>shunt</i> (MVar yang diinjeksi saat $V = 1$ pu)
BUS_AREA	7	Nomor area
VM	8	Nilai tegangan (pu)
VA	9	Sudut tegangan (derajat)
BASE_KV	10	Tegangan basis (kV)
ZONE	11	<i>Loss zone</i>
VMAX	12	Nilai tegangan maksimum (pu)
VMIN	13	Nilai tegangan minimum (pu)

Gambar 3.2 menunjukkan mpc.gen dan mpc.branch yang merupakan data generator dan saluran.

```

142 %% generator data
143 % bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pcl Pc2 Qc
144 - mpc.gen = [
145     1  9.586  8.293  8.293  0  1  20  1  9.586  0  0  0  0  0
146 ];
147
148 %% branch data
149 % fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
150
151 % fbus : dari bus no
152 % tbus : ke bus no
153 % r : resistansi (pu)
154 % x : reaktansi (pu)
155 % b : suseptansi (pu)
156 %
157
158 - mpc.branch = [
159     112 1  0.006  0.007875  0  250 250 250 0  0  1  -360  360 %1
160     113 112 0.0525  0.085  0  250 250 250 0  0  1  -360  360 %2
161     111 113 0.0525  0.085  0  250 250 250 0  0  1  -360  360 %3
162     2  111 0.0525  0.085  0  250 250 250 0  0  1  -360  360 %4
163     4  111 0.0525  0.085  0  250 250 250 0  0  1  -360  360 %5
164     5  4  0.0525  0.085  0  250 250 250 0  0  1  -360  360 %6
165     7  5  0.0525  0.085  0  250 250 250 0  0  1  -360  360 %7

```

Gambar 3.2 mpc.gen dan mpc.branch Penyulang Wortel

Pada mpc.generator, baris menyatakan banyaknya bus generator dan kolom menyatakan nilai dari parameter yang dipaparkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Format Data Generator (mpc.gen)

Nama	Kolom	Deskripsi
GEN_BUS	1	Nomor bus
PG	2	Output daya aktif (MW)
QG	3	Output daya reaktif (MVar)
QMAX	4	Output daya reaktif maksimum (MVar)
QMIN	5	Output daya reaktif minimum (MVar)
VG	6	Setpoint nilai tegangan (pu)
MBASE	7	Nilai basis MVA dari mesin
GEN_STATUS	8	Status mesin

Nama	Kolom	Deskripsi
PMAX	9	Output daya aktif maksimum (MW)
PMIN	10	Output daya aktif minimum (MW)
PC1	11	<i>Lower output</i> daya aktif dari kurva <i>PQ capability</i> (MW)
PC2	12	<i>Upper output</i> daya aktif dari kurva <i>PQ capability</i> (MW)
QC1MIN	13	Output daya reaktif minimum pada PC1 (MVar)
QC1MAX	14	Output daya reaktif maksimum pada PC1 (MVar)
QC2MIN	15	Output daya reaktif minimum pada PC2 (MVar)
QC2MAX	16	Output daya reaktif maksimum pada PC2 (MVar)
RAMP_AGC	17	<i>Ramp rate</i> untuk beban yang mengikuti/AGC (MW/menit)
RAMP_10	18	<i>Ramp rate</i> untuk 10 menit <i>reserve</i> (MW)
RAMP_30	19	<i>Ramp rate</i> untuk 30 menit <i>reserve</i> (MW)
RAMP_Q	20	<i>Ramp rate</i> untuk daya reaktif (skala waktu 2 detik) (MVar/menit)
APF	21	<i>Area participation factor</i>

Sementara pada `mpc.branch`, baris menyatakan banyaknya saluran yang terhubung dalam sistem dan kolom menyatakan nilai dari parameter yang dipaparkan pada Tabel 3.4.

Dari format data bus, generator, dan saluran, ada beberapa parameter yang dibuat nol, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2, karena parameter tersebut digunakan pada analisis aliran daya optimal sementara kasus penelitian ini tidak memerlukannya.

Kemudian data Penyulang Wortel ini dapat dimuat untuk kemudian dimodifikasi dalam algoritma GWO, di mana bentuk umum fungsinya:

```
>> mpc = loadcase(casefilename);
```

Tabel 3.4 Format Data *Branch* (mpc.branch)

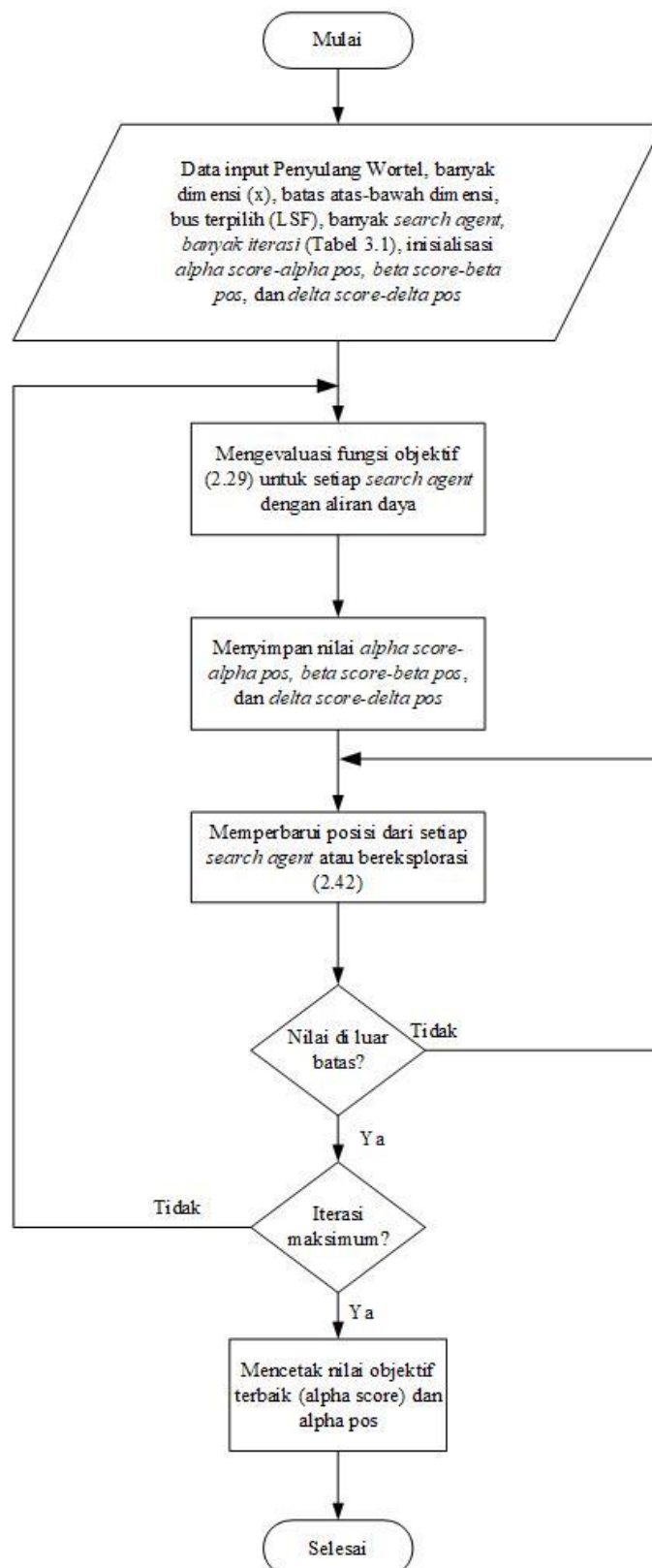
Nama	Kolom	Deskripsi
F_BUS	1	Nomor bus " <i>from</i> "
T_BUS	2	Nomor bus " <i>to</i> "
BR_R	3	Resistansi (pu)
BR_X	4	Reaktansi (pu)
BR_B	5	Total suseptansi saluran (pu)
RATE_A	6	<i>Long term rating</i> MVA, diatur 0 sampai tak hingga
RATE_B	7	<i>Short term rating</i> MVA, diatur 0 sampai tak hingga
RATE_C	8	<i>Emergency rating</i> MVA, diatur 0 sampai tak hingga
TAP	9	<i>Transformer off nominal turns ratio</i>
SHIFT	10	<i>Shift angle</i> fasa transformator (derajat)
BR_STATUS	11	Status saluran inisial
ANGMIN	12	Beda sudut minimum (derajat)
ANGMAX	13	Beda sudut maksimum (derajat)

3.5 Pemodelan Kasus dengan Algoritma GWO

GWO memiliki dua fase yaitu eksplorasi dan eksploitasi. Eksplorasi adalah proses mencari daerah yang menjanjikan sebagai daerah pencarian (*search space*) seluas mungkin serta membutuhkan operator stokastik seperti pada persamaan (2.42) yang secara random dan global mencari daerah pencarian agar diharapkan menghindari optima lokal. Eksploitasi adalah proses mencari solusi dari daerah pencarian yang didapat dari eksplorasi seperti pada persamaan (2.41).

Setelah merepresentasi data input (*baseMVA*, *bus*, *branch* dan *gen*) ke algoritma GWO dengan fungsi *loadcase*, seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, kemudian mendefinisikan nilai parameter-parameter pada Tabel 3.1 serta menginisialisasikan *alpha pos*, *beta pos*, dan *delta pos* dengan vektor nol serta *alpha score*, *beta score*, dan *delta score* dengan nilai tak terhingga (karena kasus minimisasi). Dimensi pencarian mewakili variabel tegangan *swing bus* (x_1) dan kapasitas *capacitor bank* pada keempat bus terpilih ($x_2 - x_5$). Kemudian dari banyaknya variabel ini, dibentuk matriks posisi yang memiliki elemen acak dengan banyaknya *search agent* merupakan baris, di mana salah satu dari baris-baris ini kemudian merupakan solusi terbaik yakni *alpha pos*. Setelah itu, menghitung nilai fungsi objektif (*fitness*) yakni rugi-rugi daya aktif dengan menambahkan fungsi aliran daya dari MATPOWER (*runpf*) untuk setiap *search agent* beserta nilai-nilai variabelnya (posisi *search agent*) kemudian memperbarui parameter eksploitasi (2.41) dan eksplorasi (2.42) sehingga didapat *alpha score* dan *alpha pos*, *beta score* dan *beta pos*, serta *delta score* dan *delta pos*. Perbaruan ini dilakukan hingga iterasi yang diinginkan (Tabel 3.1) sedemikian rupa sehingga

didapatkan nilai rugi-rugi daya aktif (*alpha score*) terbaik beserta posisinya (*alpha pos*) dengan $x_2 - x_5$ merupakan kapasitas optimal dari keempat *capacitor bank*. Pemodelan GWO ini dapat ditunjukkan dalam diagram alir dalam Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Flowchart optimasi kapasitas capacitor bank dengan GWO pada Penyulang Wortel

BAB V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian mengenai optimasi GWO untuk mereduksi rugi-rugi daya pada Penyulang Wortel, diperoleh kesimpulan antara lain:

1. Metode GWO dapat digunakan untuk mencari kapasitas optimal *capacitor bank* dan mereduksi rugi-rugi daya pada Penyulang Wortel sebesar 23%.
2. Kapasitas optimal *capacitor bank* (dalam MVar) yang didapatkan untuk mereduksi rugi-rugi daya pada Penyulang Wortel adalah 0,15; 1,45; 0,15; dan 0,15 yang ditempatkan pada bus 42, 51, 58, dan 60.
3. Kapasitas optimal *capacitor bank* hasil metode GWO pada Penyulang Wortel dapat memperbaiki profil tegangan di setiap bus, dengan tegangan minimum 0,916 pu menjadi 0,944 pu.
4. *Capacitor bank* dengan kapasitas optimal yang telah diperoleh dapat juga diaplikasikan pada kasus Penyulang Wortel dengan persentase pembebanan yang berbeda di mana saat beban naik dari 45% hingga 75%, maka akan mengurangi rugi-rugi daya aktif serta memperbaiki nilai tegangan sistem.
5. Metode GWO yang diuji pada *IEEE-10 Bus Radial Distribution Test System* memberikan hasil yang baik dengan pengurangan rugi-rugi daya

sebesar 12,62% dan perbaikan tegangan yang kompetitif dengan metode lainnya.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penulis memberikan saran agar dikembangkan program optimasi kapasitas *capacitor bank* dengan GWO untuk kasus *switched capacitor*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PLN, "One Line Diagram," PLN Distribusi, Menggala, 2015.
- [2] American National Standards Institute, Inc., "ANSI C84.1-2006 American National Standard for Electric Power Systems and Equipment-Voltage," National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, 2006.
- [3] H. Saadat, Power System Analysis, New York: The McGraw-Hill Companies, 1999.
- [4] A. Kadir, Pembangkit Tenaga Listrik, Jakarta: UI Press, 1996.
- [5] Standar Perusahaan Listrik Negara, "SPLN 1: 1995 Tegangan-Tegangan Standar," PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero), Jakarta, 1995.
- [6] T. Gonen, Third Edition Electric Power Distribution Engineering, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [7] N. A. Basyarach, O. Penangsang, and A. Soeprijanto, "Optimal Capacitor Placement and Sizing in Radial Distribution System Using Accelerated Particle Swarm Optimization," *International Seminar on Intelligent Technology and Its Application*, pp. 93-97, 2017.
- [8] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [9] K. Prakash and M. Sydulu, "Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems," *IEEE*, 2007.
- [10] Ching-Tzong Su and Chih-Cheng Tsai, "A New Fuzzy-Reasoning Approach To Optimum Capacitor Allocation For Primary Distribution Systems," in *Proceedings of The IEEE International Conference of Industrial Technology*, 1996.
- [11] N. Gnanasekaran, S. Chandramohan, T. D. Sudhakar, and P. Satish Kumar, "Maximum Cost Saving Approach for Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Systems using Modified ABC Algorithm," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 665-678, 2015.

- [12] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas,
"MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for
Power Systems Research and Education," *Power Systems, IEEE Transactions*
on, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, 2011.