

Optimasi Penempatan Kapasitor Bank pada Sistem Mahakam 150 kV 12 Bus Menggunakan Metode *Modified Particle Swarm Optimization*

Rindra Maulana¹, Bella Cahya Ningrum², Wahdiyatur Nisa³

¹²³Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda
rndramaulna2910@gmail.com

Abstrak- Pertumbuhan beban pada Sistem Mahakam 150 kV menyebabkan penurunan profil tegangan dan bertambahnya rugi-rugi daya akibat keterbatasan suplai daya reaktif. Penelitian ini bertujuan menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor bank yang optimal pada sistem tersebut menggunakan metode *Modified Particle Swarm Optimization* (MPSO). Metode yang digunakan meliputi analisis aliran daya dengan Newton-Raphson pada perangkat lunak MATLAB, dilanjutkan optimasi MPSO dengan fungsi objektif berupa minimisasi total rugi-rugi daya aktif, serta perbandingan hasil dengan standar operasional yang berlaku. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum optimasi, tegangan seluruh bus berada pada rentang 0,9337–0,9600 pu dengan total rugi-rugi daya aktif sebesar 1,2874 MW. Algoritma MPSO berhasil mencapai konvergensi pada iterasi ke-8 dan menentukan penempatan kapasitor bank pada Bus 9 Karang Joang (3,6562 MVar), Bus 10 Senipah (8,7670 MVar), dan Bus 12 Industri (6,9199 MVar). Setelah optimasi, profil tegangan seluruh bus meningkat ke rentang 0,9986–1,0127 pu sehingga memenuhi standar operasional 0,95–1,05 pu, sementara rugi-rugi daya aktif turun menjadi 0,9578 MW atau setara penurunan 25,60%. Penelitian ini membuktikan bahwa MPSO efektif digunakan untuk optimasi penempatan kapasitor bank pada sistem transmisi 150 kV.

Kata kunci: *Modified Particle Swarm Optimization, kapasitor bank, profil tegangan, rugi-rugi daya, Sistem Mahakam*

I. PENDAHULUAN

Pasokan listrik yang andal merupakan syarat mutlak bagi kehidupan masyarakat modern, sehingga performa sistem tenaga listrik mencakup kontinuitas penyaluran daya maupun mutu daya seperti kestabilan tegangan menjadi perhatian utama baik bagi perusahaan penyedia listrik maupun konsumennya.

Salah satu jaringan yang melayani kebutuhan tersebut adalah Sistem Mahakam, dikelola oleh PT PLN (Persero) Wilayah Kalimantan Timur dan Utara untuk memasok listrik ke kawasan Balikpapan, Samarinda, Kutai Kartanegara, dan Bontang. Naiknya konsumsi daya secara terus-menerus pada jaringan ini menimbulkan penurunan level tegangan sekaligus membengkaknya susut daya, sebagai akibat dari terbatasnya pasokan daya reaktif dan bertambahnya beban aliran daya di sepanjang saluran transmisi.

Pemasangan kapasitor bank menjadi salah satu solusi yang lazim diterapkan untuk mengatasi kondisi tersebut, karena

perangkat ini dapat menyuplai daya reaktif sehingga tegangan membaik dan susut daya berkurang. Meski begitu, manfaat optimalnya baru tercapai bila penentuan titik pemasangan serta besar kapasitasnya dihitung secara tepat, bukan sekadar perkiraan. Untuk itu, penelitian ini memakai *Modified Particle Swarm Optimization* (MPSO), sebuah teknik optimasi berbasis kecerdasan buatan yang dikenal efisien dalam mencari solusi terbaik pada permasalahan semacam ini. Penelitian mengenai perbaikan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya melalui pemasangan kapasitor bank telah dilakukan pada berbagai sistem tenaga listrik. Ada penelitian dengan judul “Analisa Perbaikan Profil Tegangan Sistem Tenaga Listrik Sumbar Menggunakan Kapasitor Bank dan Tap Transformator” dibahas upaya perbaikan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik Sumatera Barat menggunakan kapasitor bank dan pengaturan tap transformator. Penelitian dilakukan dengan menggunakan simulasi *PowerWorld* untuk menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor serta pengaturan tap transformator yang sesuai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kapasitor bank mampu meningkatkan profil tegangan dan menurunkan rugi-rugi sistem dari 14,4 MW menjadi 14,1 MW. Sementara itu, kombinasi pemasangan kapasitor bank dan pengaturan tap transformator mampu menurunkan rugi-rugi sistem hingga 13,9 MW serta menghilangkan kondisi drop tegangan yang melebihi batas 5% [3]. Selain itu, ada penelitian dengan judul “Optimasi Penempatan dan Kapasitas Bank Capacitor untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya Menggunakan Kombinasi Metode *Loss Sensitivity Factors* dan *Particle Swarm Optimization* (PSO)” dibahas optimasi lokasi dan kapasitas bank kapasitor pada sistem distribusi untuk mengurangi rugi-rugi daya. Penelitian tersebut menggunakan kombinasi metode *Loss Sensitivity Factors* dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menentukan penempatan kapasitor yang sesuai dengan kondisi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan optimasi tersebut dapat digunakan untuk menentukan lokasi dan kapasitas bank kapasitor secara optimal dalam upaya mereduksi rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik [6]. Penelitian terdahulu yang lebih spesifik pada Sistem Mahakam juga telah dilakukan menggunakan pendekatan *Modified Particle Swarm Optimization* (MPSO). Penelitian tersebut mengkaji optimasi penempatan capacitor bank pada Sistem Mahakam dengan tujuan memperoleh lokasi dan kapasitas kompensasi daya reaktif yang dapat mengurangi rugi-rugi daya

dan memperbaiki profil tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan MPSO mampu menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor bank secara optimal sehingga terjadi peningkatan profil tegangan dan penurunan rugi-rugi daya pada sistem. Penelitian tersebut menjadi salah satu dasar dalam pemilihan metode MPSO pada penelitian ini, dengan analisis yang selanjutnya dilakukan berdasarkan konfigurasi dan kondisi sistem yang digunakan dalam penelitian ini.

Bertolak dari uraian di atas, penelitian ini disusun untuk mengkaji kondisi profil tegangan serta susut daya pada Sistem Mahakam 150 kV, menemukan titik dan kapasitas kapasitor bank paling optimal melalui metode MPSO, dan menilai sejauh mana perbaikan tegangan maupun penurunan susut daya yang tercapai setelah optimasi diterapkan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Rugi-Rugi Daya

Rugi-rugi daya merupakan kehilangan sebagian energi listrik selama proses penyaluran daya dari pembangkit menuju beban. Kehilangan energi tersebut terjadi akibat adanya resistansi dan reaktansi pada penghantar transmisi sehingga sebagian daya berubah menjadi panas. Besarnya rugi-rugi daya dipengaruhi oleh nilai arus yang mengalir pada saluran, di mana semakin besar arus maka semakin besar pula daya yang hilang. Rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif secara matematis dapat dinyatakan sebagai.

$$P_{loss} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

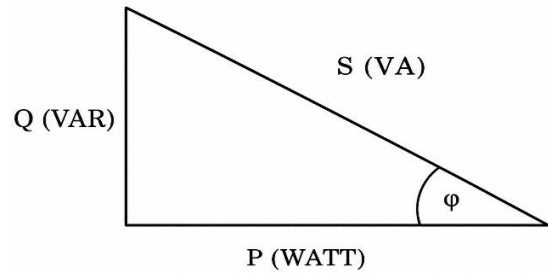
$$Q_{loss} = I^2 \cdot X \quad (2)$$

Keterangan :

P_{loss}	=	rugi-rugi daya aktif (W)
I^2	=	arus yang mengalir pada saluran (A)
R	=	resistansi penghantar (Ω)
Q_{loss}	=	rugi-rugi daya reaktif (VAR)
I^2	=	arus listrik yang mengalir (A)
X	=	reaktansi saluran (Ω)

dengan (I) merupakan arus yang mengalir pada penghantar, (R) adalah resistansi saluran, sedangkan (X) menyatakan reaktansi saluran.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya rugi-rugi daya berbanding lurus terhadap kuadrat arus. Oleh sebab itu, pengurangan aliran arus, khususnya arus yang membawa daya reaktif, menjadi salah satu upaya untuk menekan kehilangan daya pada sistem tenaga listrik [1]. Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu tersebut dapat digambarkan melalui segitiga daya seperti pada Gambar 1.

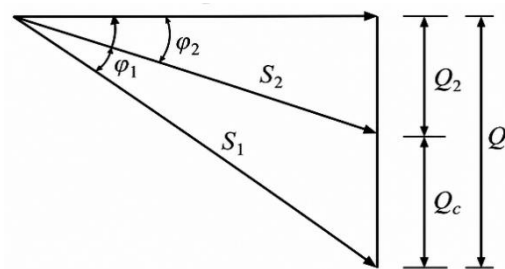


Gambar 1. Segitiga Daya

Selain rugi-rugi daya, parameter penting yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem tenaga listrik adalah profil tegangan. Profil tegangan menunjukkan distribusi nilai tegangan pada setiap bus yang diperoleh melalui analisis aliran daya (*power flow analysis*). Keberadaan beban yang didominasi sifat induktif menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat sehingga memicu penurunan tegangan (*voltage drop*), terutama pada bus yang berlokasi jauh dari sumber pembangkitan [2]. Untuk menjaga kualitas penyaluran tenaga listrik, nilai tegangan operasi umumnya dipertahankan pada rentang 0,95–1,05 pu sesuai batas operasi yang diizinkan [3].

B. Kapasitor Bank

Susunan beberapa unit kapasitor yang dirangkai secara seri maupun paralel membentuk apa yang disebut kapasitor bank, dengan tujuan memperoleh besaran kapasitansi tertentu sesuai kebutuhan sistem. Perangkat ini berperan menyuplai tambahan daya reaktif ke jaringan, sehingga nilai faktor daya sistem terangkat mendekati satu. Besar kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk mengoreksi faktor daya dapat ditentukan melalui diagram segitiga daya seperti pada Gambar 2. Meski demikian, apabila lokasi pemasangannya tidak tepat, perbaikan tegangan yang diinginkan tidak akan tercapai secara optimal karenanya, penentuan titik dan besar kapasitas kapasitor perlu ditempuh melalui pendekatan optimasi yang terstruktur [6].



Gambar 2. Penentuan Rating Kapasitor

Kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk mengoreksi faktor daya, dari kondisi $\cos \phi_1$ (sebelum perbaikan) menuju $\cos \phi_2$ (setelah perbaikan), dapat diperoleh lewat perhitungan daya reaktif kapasitor (Q_c), sebagaimana persamaan berikut:

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (3)$$

Keterangan:

Q_c	=	Daya reaktif yang disuplai oleh kapasitor (VAR)
P	=	Daya aktif (Watt)

- $\varphi 1$ = Sudut faktor daya sebelum perbaikan
 $\varphi 2$ = Sudut faktor daya setelah perbaikan

Adapun besar daya reaktif sistem yang tersisa setelah kapasitor terpasang (Q2) diperoleh melalui:

$$Q2 = Q1 - Qc \quad (4)$$

Keterangan:

- Q1 = Daya reaktif sebelum perbaikan (VAR)
 Q2 = Daya reaktif setelah perbaikan (VAR)
 Qc = Daya reaktif kapasitor (VAR)

C. Modified Particle Swarm Optimization (MPSO)

Modified Particle Swarm Optimization (MPSO) merupakan hasil pengembangan dari algoritma *Particle Swarm Optimization* yang pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, dengan mengambil inspirasi dari cara kawanan burung bergerak mencari makanan [4]. Tiap kandidat solusi digambarkan sebagai sebuah partikel yang berpindah-pindah di ruang pencarian; posisi maupun kecepatannya terus dimutakhirkan mengikuti capaian terbaik yang pernah diraih partikel itu sendiri (*personal best*) maupun capaian terbaik seluruh kelompok (*global best*), dengan acuan nilai fungsi *fitness* [6]. Modifikasi yang diterapkan pada parameter kecepatan dan posisi ditujukan untuk menyeimbangkan tahap eksplorasi dan eksploitasi ruang solusi secara lebih baik dibandingkan PSO konvensional [5]. Berkas struktur yang relatif sederhana serta beban komputasi yang ringan, MPSO banyak diaplikasikan pada berbagai persoalan optimasi sistem tenaga listrik, termasuk di antaranya penentuan lokasi kapasitor bank [6].

Sasaran yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah menekan total rugi-rugi daya aktif sistem serendah mungkin, sebagaimana dituangkan dalam fungsi objektif berikut:

$$f = \min \Sigma P_{loss} \quad (5)$$

Keterangan:

- f = Nilai fungsi objektif (MW)
 $\min$ = Operator minimisasi
 ΣP_{loss} = Total rugi-rugi daya aktif seluruh saluran transmisi (MW)

Proses menuju solusi terbaik ditempuh dengan memutakhirkan kecepatan dan posisi masing-masing partikel secara berulang, mengacu pada persamaan:

$$vi(t+1) = w \cdot vi(t) + c1 \cdot r1 \cdot (pbest_i - xi(t)) + c2 \cdot r2 \cdot (gbest - xi(t)) \quad (6)$$

$$xi(t+1) = xi(t) + vi(t+1) \quad (7)$$

Keterangan:

- $vi(t+1)$ = Kecepatan partikel ke-i pada iterasi t+1
 $xi(t+1)$ = Posisi partikel ke-i pada iterasi t+1
 w = Bobot inersia
 $c1, c2$ = Koefisien akselerasi kognitif dan sosial
 $r1, r2$ = Bilangan acak antara 0 dan 1

- $pbest_i$ = Posisi terbaik partikel ke-i
 $gbest$ = Posisi terbaik global seluruh partikel

III. METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Objek Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT PLN (Persero) Wilayah Kalimantan Timur dan Utara, Balikpapan, dengan objek kajian berupa Sistem Mahakam 150 kV yang terdiri atas 12 bus dan 20 saluran transmisi sepanjang 624,5 km.

B. Jenis dan Sumber Data

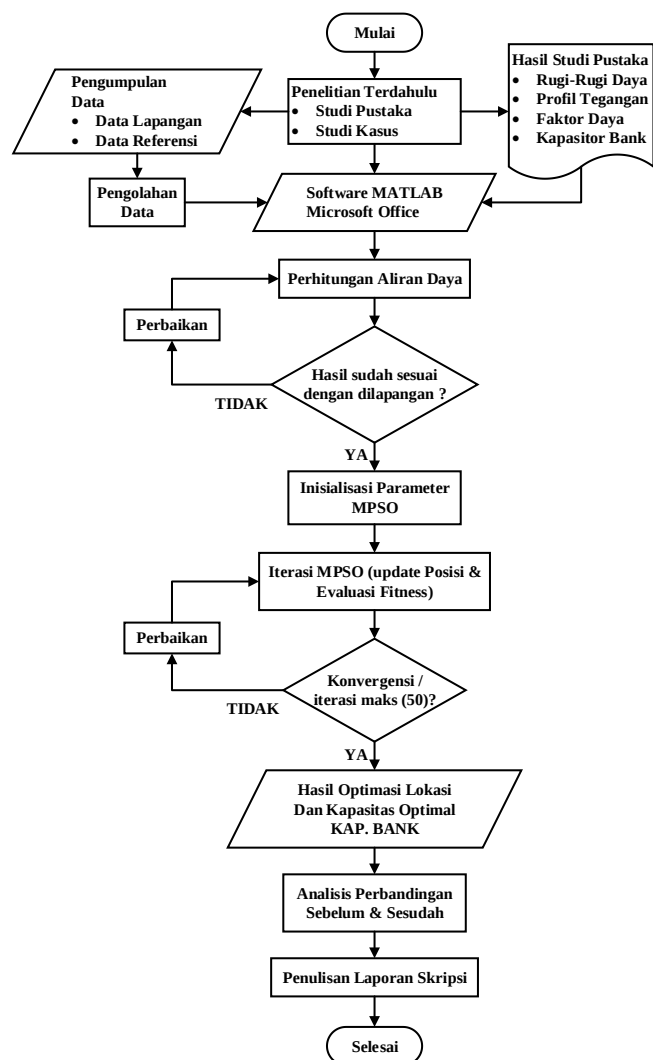
Data yang digunakan merupakan data sekunder yang bersumber dari basis data Operasi Sistem dan Penyaluran PT PLN (Persero) Wilayah Kalimantan Timur dan Utara, didukung dengan observasi langsung di lapangan. Data yang dihimpun mencakup profil tegangan tiap bus, parameter teknis saluran transmisi, serta data pembebanan gardu induk. Pengolahan data dan simulasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB, dengan data *single line diagram* (SLD) Sistem Mahakam sebagai acuan utama.

C. Diagram Alir Penelitian

Penelitian Penelitian diawali dengan pengumpulan data lapangan dan data referensi, dilanjutkan dengan perancangan strategi simulasi mencakup pemetaan bus Sistem Mahakam serta penetapan parameter algoritma MPSO sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, yaitu bobot inersia (w) sebesar 0,5, koefisien akselerasi kognitif ($c1$) sebesar 0,15, koefisien akselerasi sosial ($c2$) sebesar 0,3, jumlah partikel sebanyak 30, dan batas maksimum iterasi sebanyak 50. Penetapan parameter ini dilakukan agar algoritma mampu menjaga keseimbangan antara proses eksplorasi ruang solusi yang luas pada tahap awal iterasi dan proses eksploitasi solusi terbaik yang telah ditemukan menjelang iterasi akhir.

Data yang telah dihimpun kemudian diolah dan divalidasi melalui perhitungan aliran daya (*power flow*) menggunakan metode Newton-Raphson pada perangkat lunak MATLAB, untuk memastikan model yang dibangun benar-benar merepresentasikan kondisi nyata Sistem Mahakam di lapangan. Apabila hasil perhitungan belum sesuai dengan data lapangan, dilakukan perbaikan pada model hingga diperoleh kesesuaian yang memadai sebelum dilanjutkan ke tahap optimasi.

Setelah model dinyatakan sesuai, dilakukan optimasi penempatan kapasitor bank memakai algoritma MPSO secara iteratif, di mana posisi dan kecepatan setiap partikel diperbarui pada tiap iterasi hingga tercapai kondisi konvergen atau batas iterasi maksimum terpenuhi. Hasil optimasi berupa lokasi dan kapasitas kapasitor bank tersebut selanjutnya diterapkan kembali pada model sistem dan diverifikasi melalui simulasi aliran daya, kemudian hasilnya dibandingkan dengan kondisi sebelum optimasi untuk menilai sejauh mana efektivitas metode MPSO dalam memperbaiki profil tegangan dan menekan rugi-rugi daya pada Sistem Mahakam. Keseluruhan tahapan tersebut diringkaskan pada [Gambar 3](#) berikut ini.



Gambar 3. Diagram Alir Operasional

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Sistem Sebelum Optimasi

Simulasi aliran daya awal yang dijalankan dengan metode Newton-Raphson pada MATLAB memperlihatkan tegangan di seluruh bus Sistem Mahakam 150 kV berkisar antara 0,9337 hingga 0,9600 pu. Titik terendah berada di Bus 12 (Industri) dengan 0,9337 pu, sementara titik tertinggi tercatat di Bus 10 (Senipah) sebesar 0,9600 pu selaku *slack bus*. Dengan demikian, hampir seluruh bus belum mencapai ambang minimum standar operasional 0,95 pu, kecuali Bus 10 yang berperan sebagai *slack bus*.

Beban yang ditanggung sistem secara keseluruhan mencapai 366,34 MW untuk daya aktif dan 104,92 MVar untuk daya reaktif, dengan pusat beban terbesar berada di Bus 3 Tengawang (96,26 MW) disusul Bus 12 Industri (67,78 MW). Rendahnya tegangan pada sebagian besar bus inilah yang menjadi alasan utama dilakukannya optimasi penempatan kapasitor bank pada sistem ini.

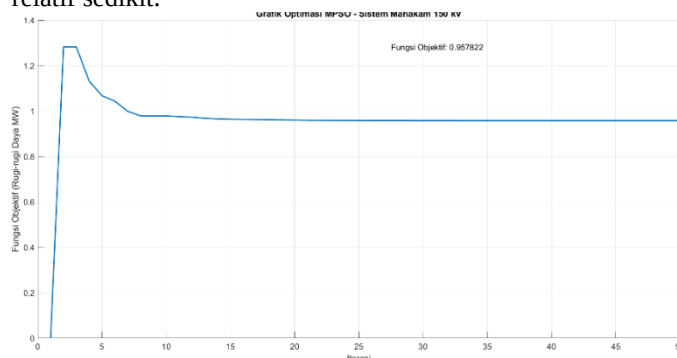
Sementara itu, dari sisi rugi daya, saluran Senipah–Manggar Sari tercatat mengalami rugi terbesar (0,28 MW), disusul saluran Karang Joang–Senipah (0,16 MW). Secara keseluruhan, sistem mengalami rugi daya aktif total sebesar 1,29 MW dan rugi daya reaktif total sebesar 5,70 MVar, sebagaimana dirangkum pada [Tabel 1](#).

TABEL 1.
KONDISI SISTEM MAHAKAM 150 KV SEBELUM
PENAMBAHAN KAPASITOR BANK

Parameter	Nilai
Rentang tegangan	0,9337–0,9600 pu
Total beban aktif	366,34 MW
Total beban reaktif	104,92 Mvar
Total rugi daya aktif	1,29 MW
Total rugi daya reaktif	5,70 MVar

B. Implementasi dan Konvergensi MPSO

Algoritma MPSO dijalankan sebanyak 50 iterasi untuk mencari posisi dan kapasitas kapasitor bank yang menghasilkan rugi-rugi daya minimum, dengan parameter sebagaimana telah dijelaskan pada Tabel 1. Grafik konvergensi fungsi objektif yang ditunjukkan pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa algoritma berhasil mencapai kondisi konvergen pada sekitar iterasi ke-8, dengan nilai fungsi objektif sebesar 0,957822 MW, dan kondisi tersebut tetap stabil hingga iterasi ke-50. Hasil ini membuktikan bahwa MPSO mampu menemukan solusi optimal secara efisien meskipun dengan jumlah iterasi yang relatif sedikit.



Gambar 3. Grafik Konvergensi Fungsi Objektif Algoritma MPSO

C. Hasil Optimasi Penempatan Kapasitor Bank

Hasil optimasi MPSO menunjukkan bahwa lokasi optimal penempatan kapasitor bank berada pada tiga bus Sistem Mahakam 150 kV, yaitu Bus 9 Karang Joang, Bus 10 Senipah, dan Bus 12 Industri, dengan kapasitas masing-masing sebesar 3,6562 MVar, 8,7670 MVar, dan 6,9199 MVar, sehingga total kapasitas kapasitor yang terpasang mencapai 19,3431 MVar sebagaimana ditunjukkan pada [Tabel 2](#). Ketiga bus tersebut dipilih algoritma karena berperan signifikan dalam menyuntikkan daya reaktif pada titik-titik yang mengalami tegangan rendah.

TABEL 2.
PENEMPATAN KAPASITOR BANK HASIL OPTIMASI
MPSO

Bus	Nama GI	Kapasitas (MVar)
9	Karang Joang	3,6562
10	Senipah	8,7670
12	Industri	6,9199
Total		19,3431

Setelah kapasitor bank diterapkan dan diverifikasi melalui simulasi ulang aliran daya, profil tegangan seluruh bus meningkat menjadi rentang 0,9986–1,0127 pu, dengan tegangan terendah pada Bus 12 Industri (0,9986 pu) dan tertinggi pada Bus 2 Embalut+CFK (1,0127 pu) seluruhnya telah memenuhi standar operasional 0,95–1,05 pu. Adapun total rugi-rugi daya aktif sistem turun menjadi 0,9578 MW, dengan rugi terbesar tersisa pada saluran Senipah–Manggar Sari (0,134 MW) dan Karang Joang–Senipah (0,061 MW).

D. Perbandingan dan Analisis Hasil

Perbandingan kondisi Sistem Mahakam 150 kV sebelum dan sesudah penambahan kapasitor bank menunjukkan perbaikan pada dua aspek utama, yaitu profil tegangan dan rugi-rugi daya, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.

TABEL 3
PERBANDINGAN KONDISI SISTEM SEBELUM DAN
SESUDAH OPTIMASI

Parameter	Sebelum Optimasi	Sesudah Optimasi	Penurunan
Rentang tegangan (pu)	0,9337–0,9600	0,9986–1,0127	-
Rugi daya aktif (MW)	1,2874	0,9578	0,3296 (25,60%)
Rugi daya reaktif (MVar)	5,700	4,219	1,481

Dari sisi tegangan, seluruh bus mengalami kenaikan sehingga seluruhnya memenuhi batas standar operasional 0,95–1,05 pu, di mana sebelum optimasi hampir seluruh bus masih berada di bawah batas minimum tersebut. Kenaikan tegangan terbesar terjadi pada Bus 1 Bukit Biru (+0,0661 pu) karena posisinya yang berdekatan dengan bus pembangkit, sedangkan kenaikan terkecil pada Bus 10 Senipah (+0,0489 pu) karena bus tersebut merupakan *slack bus* yang tegangannya sudah relatif tinggi sejak sebelum optimasi.

Dari sisi rugi-rugi daya, algoritma MPSO berhasil menekan total rugi-rugi daya aktif sistem dari 1,2874 MW menjadi 0,9578 MW, atau setara penurunan sebesar 25,60%. Penurunan ini dicapai melalui penempatan kapasitor bank secara optimal, yang mampu menyuplai kebutuhan daya reaktif secara lokal sehingga aliran daya reaktif pada saluran transmisi berkurang. Hasil ini membuktikan bahwa algoritma MPSO efektif digunakan untuk menentukan lokasi dan kapasitas

kapasitor bank yang optimal pada sistem transmisi 150 kV berskala menengah seperti Sistem Mahakam.

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan terhadap Sistem Mahakam 150 kV menggunakan metode *Modified Particle Swarm Optimization* (MPSO), dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem sebelum penambahan kapasitor bank belum memenuhi standar operasional, dengan rentang tegangan 0,9337–0,9600 pu dan total rugi-rugi daya aktif sebesar 1,2874 MW. Algoritma MPSO berhasil menentukan lokasi optimal penempatan kapasitor bank pada Bus 9 Karang Joang (3,6562 MVar), Bus 10 Senipah (8,7670 MVar), dan Bus 12 Industri (6,9199 MVar), dengan total kapasitas 19,3431 MVar. Setelah penambahan kapasitor bank, profil tegangan seluruh bus meningkat ke rentang 0,9986–1,0127 pu sehingga memenuhi batas standar operasional 0,95–1,05 pu, sementara total rugi-rugi daya aktif sistem berhasil ditekan menjadi 0,9578 MW, atau turun sebesar 25,60% dari kondisi awal.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan penambahan jumlah iterasi MPSO untuk hasil yang lebih akurat, menggunakan data *real-time* terbaru dari sistem kelistrikan yang ditinjau, serta membandingkan MPSO dengan metode optimasi lain seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Artificial Bee Colony* (ABC) sebagai evaluasi lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda, atas dukungan fasilitas dan bimbingan akademik selama penelitian ini berlangsung. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada PT PLN (Persero) Wilayah Kalimantan Timur dan Utara atas ketersediaan data teknis Sistem Mahakam 150 kV yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. F. Haq JR, "Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan dengan Penambahan PLTS pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia," Skripsi, Univ. Hasanuddin, 2024.
- [2] A. Supriyanto, "Studi Analisis Profil Tegangan dan Rugi-Rugi Daya serta Energi Tidak Tersalurkan pada Penyulang OGF 15 Bangau Sakti," Sakti di PT. PLN (Persero) Rayon Panam," Skripsi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2017.
- [3] A. Abadi and Syafii, "Analisa Perbaikan Profil Tegangan Sistem Tenaga Listrik Sumbar Menggunakan Kapasitor Bank dan Tap Transformator," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 4, no. 2, pp. 158–164, Sep. 2015.
- [4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, Nov. 27 – Dec 1.
- [5] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources," in *Proc. Congress on Evolutionary Computation. (CEC 2001)*, Seoul, South Korea, May 27–30, 2001, vol. 1, pp. 81–86.
- [6] F. A. Anggara, O. Zebua, and K. Hasan, "Optimasi Penempatan dan Kapasitas Bank Capacitor Untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya Menggunakan Kombinasi Metode Loss Sensitivity Factors dan

Particle Swarm Optimization (PSO)," Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro, vol. 10, no. 2, pp. 47–56.

- [7] Z. Zulfahri, A. Arlenny, U. Situmeang, and D. Setiawan, "Aplikasi Metode Newton Raphson untuk Menghitung Aliran Daya Menggunakan Program Matlab R2016a," *Jurnal Teknik*, vol. 16, no. 1, 2022.