

Optimasi Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Algoritma *Particle Swarm Optimization* Pada Sistem Distribusi

Adriyan Eka Saputra¹, Hari Subagyo², Arief Fajariandi Dintika³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda
harisubagyo@polnes.ac.id

Abstrak- Sistem distribusi tenaga listrik sering menghadapi permasalahan rugi-rugi daya yang tinggi dan profil tegangan yang belum optimal akibat kebutuhan daya reaktif yang tidak terkompensasi secara efisien. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan lokasi dan ukuran kapasitor bank pada sistem distribusi feeder NST.3/OG Gaharu milik PLN UP3 Nusantara menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Simulasi aliran daya kondisi awal dilakukan menggunakan ETAP, sedangkan algoritma PSO diimplementasikan pada MATLAB R2023b untuk menentukan kombinasi lokasi dan kapasitas kapasitor yang meminimalkan rugi-rugi daya aktif. Untuk memastikan validitas hasil simulasi, dilakukan pula perhitungan manual aliran daya pada bus kritis menggunakan metode pendekatan drop tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi optimal berada pada Bus 6 (OG Gaharu) dengan kapasitas kapasitor 700 kVAR, yang meningkatkan tegangan Bus 6 dari 88,83% menjadi 92,07% dan menurunkan rugi-rugi daya aktif total sistem dari 145,127 kW menjadi 140,641 kW, atau sebesar 3,09%. Perhitungan manual pada Bus 6 menghasilkan tegangan 88,04%, hanya berselisih 0,79 poin persentase dari hasil ETAP/MATLAB, sehingga membuktikan validitas simulasi. Hasil ini menunjukkan bahwa PSO efektif dan lebih akurat dibandingkan pendekatan *trial-and-error* dalam menentukan penempatan kapasitor bank pada sistem distribusi radial.

Kata kunci: Kapasitor Bank, *Particle Swarm Optimization*, Profil Tegangan, Rugi-Rugi Daya, Sistem Distribusi.

I. PENDAHULUAN

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian penting dalam penyaluran energi dari gardu induk ke konsumen akhir. Dalam praktiknya, jaringan distribusi sering menghadapi persoalan berupa rugi-rugi daya yang relatif tinggi, penurunan profil tegangan, serta rendahnya faktor daya akibat dominasi beban induktif, terutama pada penyulang dengan saluran panjang [1], [2]. Beban induktif memerlukan daya reaktif dalam jumlah besar sehingga arus saluran meningkat dan berkontribusi terhadap jatuh tegangan pada bus-bus di ujung feeder. Pemasangan kapasitor bank merupakan solusi umum untuk mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan, namun efektivitasnya sangat bergantung pada ketepatan lokasi dan kapasitas yang dipasang [1], [3].

Berbagai metode heuristik dan kecerdasan komputasional telah dikembangkan untuk menyelesaikan masalah optimasi penempatan kapasitor yang bersifat nonlinier dan multivariabel [2]. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Particle*

Swarm Optimization (PSO), yang diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart sebagai metode optimasi berbasis populasi yang meniru perilaku sosial kawanan [4]. Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan berbasis PSO mampu menekan rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan pada berbagai sistem distribusi radial [5]–[7].

Penelitian mengenai optimasi penempatan kapasitor pada sistem distribusi terus berkembang dengan memanfaatkan metode heuristik dan metaheuristik. Premrudeepreechacharn et al. menerapkan PSO pada jaringan distribusi tegangan menengah dengan mempertimbangkan *distributed generation*, dengan *loss sensitivity factor* digunakan untuk menentukan kandidat bus dan PSO untuk menentukan lokasi serta ukuran kapasitor. Studi tersebut menggunakan kombinasi DlgSILENT PowerFactory dan MATLAB dan menunjukkan bahwa kompensasi kapasitor dapat mengurangi rugi-rugi daya serta memperbaiki tegangan bus [12].

Tahir et al. mengembangkan *enhanced modified* PSO untuk penempatan kapasitor pada radial distribution grids dengan mempertimbangkan kondisi beban konstan dan berubah terhadap waktu, sedangkan kandidat bus ditentukan menggunakan *loss sensitivity factor* [13]. Perkembangan berikutnya menunjukkan penggunaan algoritma metaheuristik alternatif. Pamuk dan Uzun, misalnya, menggunakan *Arithmetic Optimization Algorithm* (AOA) untuk optimasi penempatan *distributed generation* dan *capacitor banks* pada sistem distribusi radial, sedangkan Mathenge et al. menggunakan *Crow Search Algorithm* (CSA) dan membandingkannya dengan PSO, ABC, GA, TLBO, dan IWO pada sistem distribusi radial [14], [15].

Studi yang lebih mutakhir juga menunjukkan kecenderungan optimasi yang semakin kompleks, baik melalui modifikasi PSO maupun penggunaan fungsi tujuan multiobjektif. Arunjothi dan Meena menerapkan PSO dan *Real Coded Genetic Algorithm* untuk optimasi lokasi dan ukuran kapasitor pada sistem distribusi radial dengan mempertimbangkan pengurangan rugi daya dan aspek ekonomi [16]. Adegoke et al. mengembangkan *improved* PSO untuk optimasi ukuran dan lokasi kapasitor dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya, deviasi tegangan, dan indeks keandalan pada beberapa kondisi pembebanan [17].

Sementara itu, Kamarposhti et al. mengembangkan multi-objective PSO untuk mengoptimalkan penempatan kapasitor dengan mempertimbangkan pengurangan rugi energi, stabilitas

tegangan, dan penghematan biaya, serta membandingkannya dengan beberapa pendekatan optimasi lainnya [18]. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa PSO tetap relevan dalam permasalahan penempatan kapasitor, namun implementasinya dapat dikembangkan melalui modifikasi parameter, multiobjektif, maupun integrasi dengan metode lainnya.

Dalam penelitian ini, PSO dipilih karena permasalahan penempatan kapasitor merupakan permasalahan optimasi nonlinier yang melibatkan variabel lokasi dan ukuran kapasitor. PSO memiliki struktur berbasis populasi dan tidak memerlukan informasi turunan fungsi objektif, sehingga dapat digunakan untuk mencari kombinasi lokasi dan kapasitas kapasitor berdasarkan fungsi objektif rugi-rugi daya. Selain itu, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa PSO telah berhasil diterapkan pada berbagai permasalahan penempatan kapasitor dan dapat dikembangkan untuk sistem dengan variasi kondisi pembebanan maupun fungsi tujuan yang berbeda [12], [13], [17], [18]. Pemilihan PSO dalam penelitian ini bukan dimaksudkan untuk menyatakan bahwa PSO secara umum lebih unggul daripada seluruh metode metaheuristik lainnya, tetapi karena karakteristik algoritmanya sesuai dengan ruang pencarian penelitian yang relatif terbatas, yaitu kandidat lokasi Bus 4, Bus 5, dan Bus 6 serta kapasitas kapasitor 200–1000 kVAR.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini berfokus pada optimasi penempatan dan ukuran kapasitor bank menggunakan PSO pada feeder NST.3/OG Gaharu milik PLN UP3 Nusantara. Berbeda dari penelitian yang banyak menggunakan sistem uji standar, penelitian ini menggunakan data teknis feeder 20 kV dan beban puncak dari kondisi jaringan yang diteliti. Optimasi dilakukan untuk menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor yang meminimalkan rugi-rugi daya aktif, kemudian hasil optimasi diverifikasi melalui simulasi *load flow* ETAP. Validasi tambahan dilakukan melalui perhitungan manual pendekatan drop tegangan pada bus kritis. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi penerapan PSO pada feeder distribusi 20 kV dengan data lapangan, integrasi proses optimasi MATLAB dengan pemodelan ETAP, serta verifikasi hasil simulasi melalui perhitungan manual dan analisis sensitivitas lokasi.

Penelitian ini difokuskan pada optimasi penempatan dan ukuran kapasitor bank menggunakan PSO pada feeder NST.3/OG Gaharu milik PLN UP3 Nusantara, dengan hasil optimasi yang divalidasi melalui simulasi *load flow* ETAP dan diverifikasi lebih lanjut melalui perhitungan manual aliran daya pada bus kritis. Artikel ini disusun dengan urutan: kajian teori pada Bab II, metode penelitian pada Bab III, hasil dan pembahasan pada Bab IV, serta kesimpulan pada Bab V.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Distribusi dan Kompensasi Daya Reaktif

Sistem distribusi tenaga listrik berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke konsumen akhir dan berhubungan langsung dengan kontinuitas, efisiensi, serta kestabilan tegangan pelayanan [2], [8]. Sistem distribusi radial memiliki karakteristik beban yang tersebar dan rasio resistansi

terhadap reaktansi yang relatif tinggi, sehingga rentan terhadap rugi-rugi daya dan penurunan tegangan, terutama ketika kebutuhan daya reaktif meningkat [2], [8].

Kapasitor bank adalah sekumpulan unit kapasitor yang dipasang secara shunt pada bus distribusi untuk menyediakan daya reaktif kapasitif secara lokal. Penyediaan daya reaktif lokal ini mengurangi aliran daya reaktif dari sumber, sehingga arus saluran berkurang, rugi-rugi daya menurun, dan profil tegangan membaik [9], [10]. Namun demikian, penempatan kapasitor yang tidak tepat dapat menyebabkan hasil kompensasi tidak optimal, sehingga diperlukan metode optimasi untuk menentukan lokasi dan kapasitas yang paling sesuai dengan karakteristik sistem [9], [10].

B. Rugi-Rugi Daya dan Profil Tegangan

Rugi-rugi daya aktif pada saluran distribusi didominasi oleh rugi-rugi I^2R akibat resistansi penghantar, yang dinyatakan sebagai

$$P_{loss} = \sum I_i^2 R_i \quad (1)$$

dengan P_{loss} adalah rugi-rugi daya aktif total, I_i arus pada saluran ke- i , R_i resistansi saluran ke- i , dan n jumlah saluran. Fungsi objektif optimasi dirumuskan sebagai

$$\text{Minimalkan } f(x) = P_{loss} \quad (2)$$

dengan variabel keputusan

$$x = (L_k, Q_k) \quad (3)$$

dengan L_k lokasi kapasitor pada bus ke- k dan Q_k ukuran kapasitor pada bus tersebut. Besarnya jatuh tegangan pada saluran distribusi radial dihitung melalui arus beban

$$I = S / (\sqrt{3} \times V) \quad (4)$$

dan drop tegangan tiga fasa

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times (R \cos \phi + X \sin \phi) \quad (5)$$

dengan S daya semu beban, V tegangan nominal, R dan X resistansi serta reaktansi saluran, dan ϕ sudut faktor daya beban. Faktor daya sistem dinyatakan sebagai

$$PF = P / S = \cos \phi \quad (6)$$

Nilai faktor daya yang rendah menunjukkan besarnya kebutuhan daya reaktif sistem, yang meningkatkan arus saluran serta rugi-rugi daya dan jatuh tegangan [10], [11].

C. Algoritma Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan algoritma optimasi berbasis populasi yang meniru perilaku sosial kawanan burung dalam mencari sumber makanan [4], [12]. Setiap partikel merepresentasikan sebuah solusi yang bergerak dalam ruang pencarian berdasarkan pengalaman terbaik individu ($pbest$) dan pengalaman terbaik populasi ($gbest$). Kecepatan dan posisi partikel diperbarui menggunakan

$$vit+1 = w \cdot vit + c1r1(pbest_i - xit) + c2r2(gbest - xit) \quad (7)$$

$$xit+1 = xit + vit+1 \quad (8)$$

dengan vit dan xit kecepatan dan posisi partikel ke- i pada iterasi ke- t , w inertia weight, $c1$ dan $c2$ koefisien kognitif dan sosial, serta $r1$, $r2$ bilangan acak antara 0 dan 1 [12]. PSO tidak memerlukan informasi turunan fungsi objektif sehingga sesuai

untuk permasalahan optimasi nonlinier seperti penempatan kapasitor bank.

III. METODE PENELITIAN

A. Objek dan Data Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada sistem distribusi feeder NST.3/OG Gaharu milik PLN UP3 Nusantara, yang merupakan sistem distribusi radial 20 kV dengan topologi Bus 2 → Bus 4 (GH IKN) → Bus 5 → Bus 6 (OG Gaharu). Feeder ini dipilih karena topologinya yang radial representatif terhadap jaringan distribusi PLN pada umumnya, dengan Bus 6 sebagai bus kritis akibat impedansi saluran yang besar pada segmen Bus 4–Bus 5 dan Bus 5–Bus 6. Feeder ini juga melayani beberapa pelanggan penting dengan kebutuhan keandalan pasokan yang tinggi, di antaranya RSUD Sepaku, PT. JAPFA, dan LBS Luna, sehingga perbaikan profil tegangan pada feeder ini memiliki dampak operasional yang signifikan. Data teknis saluran dan beban puncak diperoleh dari data lapangan PLN UP3 Nusantara dan digunakan sebagai input simulasi ETAP maupun proses optimasi PSO pada MATLAB. Data saluran dan impedansi feeder ditunjukkan pada Tabel 1, sedangkan data beban puncak pada Bus 6 ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL 1
DATA SALURAN DAN IMPEDANSI FEEDER NST.3

Segmen	Kabel	Panjang	R (Ω)	X (Ω)
Bus 2–Bus 4	SKTM+MVTIC 240mm ²	±3,6 km	0,450	0,3492
Bus 4–Bus 5	MVTIC 240mm ²	20 km	3,922	6,610
Bus 5–Bus 6	A3C 240mm ²	50 km	10,810	16,525

TABEL 2
DATA BEBAN PUNCAK BUS 6 (OG GAHARU)

I (A)	P (MW)	Q (MVAR)	S (kVA)	PF
108,1	2,09	0,687	2.200	0,95

Beban puncak pada OG Gaharu tercatat berdasarkan monitoring PLN UP3 Nusantara 26 April 2026, dan digunakan sebagai kondisi operasi terberat (worst-case) untuk simulasi aliran daya.

B. Parameter dan Tahapan Algoritma PSO

Penelitian ini dilakukan melalui dua tahap simulasi: (1) simulasi load flow pada ETAP untuk memperoleh kondisi awal sistem, dan (2) implementasi algoritma PSO pada MATLAB R2023b untuk menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor bank yang optimal, yang selanjutnya diverifikasi kembali melalui simulasi ETAP. Parameter PSO yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.

TABEL 3
PARAMETER ALGORITMA PSO

Parameter	Nilai
Jumlah partikel	30
Iterasi maksimum	50
Inertia weight (wmax – wmin)	0,9 – 0,4

Koefisien kognitif (c1)	2,0
Koefisien sosial (c2)	2,0
Batas kapasitor	200 – 1000 kVAR
Kandidat lokasi	Bus 4, Bus 5, Bus 6

Tahapan algoritma PSO meliputi: inisialisasi parameter dan posisi/kecepatan partikel secara acak; evaluasi fungsi objektif berupa rugi-rugi daya untuk setiap kombinasi lokasi dan kapasitas kapasitor; penentuan pbest dan gbest; pembaruan kecepatan dan posisi partikel menggunakan (7)–(8); iterasi berulang hingga konvergen atau mencapai iterasi maksimum; dan penentuan solusi optimal berdasarkan gbest terakhir. Hasil optimasi dari MATLAB selanjutnya diterapkan kembali pada model ETAP untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan dan rugi-rugi daya.

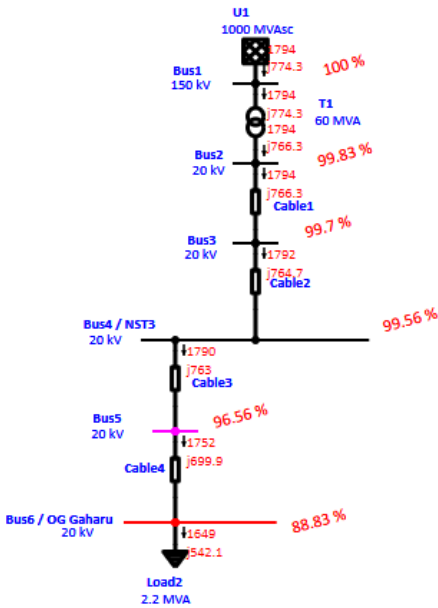
C. Verifikasi Manual Aliran Daya

Untuk memvalidasi hasil aliran daya program dan memastikan tidak terjadi manipulasi data pada hasil simulasi, dilakukan perhitungan manual menggunakan metode pendekatan drop tegangan (voltage drop approximation) pada satu bus kritis, yaitu Bus 6 (OG Gaharu), pada kondisi sebelum pemasangan kapasitor. Perhitungan dilakukan secara bertahap menyusuri jalur radial Bus 2–Bus 4–Bus 5–Bus 6 menggunakan (4) dan (5), dengan impedansi saluran dari Tabel 1 dan data beban dari Tabel 2. Hasil perhitungan manual kemudian dibandingkan terhadap hasil simulasi ETAP/MATLAB pada bus yang sama.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Awal Sistem Sebelum Optimasi

Simulasi load flow pada kondisi base case (tanpa kapasitor) menunjukkan bahwa tegangan menurun secara bertahap dari sisi sumber menuju ujung feeder, dengan tegangan terendah terjadi pada Bus 6 (OG Gaharu) sebesar 88,83%, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 4.



Gambar 1. Kondisi awal sistem (single line diagram, tanpa kapasitor)

TABEL 4
PROFIL TEGANGAN AWAL

Bus	Nama Bus	Tegangan (%)
1	Sumber GIS 4	100,00
2	Sisi Sekunder Trafo	99,83
3	—	99,70
4	GH IKN / NST.3	99,56
5	—	96,56
6	OG Gaharu	88,83

Rugi-rugi daya terbesar terjadi pada saluran Cable 4 (Bus 5–Bus 6), yaitu 103,2 kW rugi daya aktif dan 157,8 kVAR rugi daya reaktif, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5, karena saluran ini merupakan bagian akhir feeder yang paling jauh dari sumber dan memiliki impedansi terbesar.

TABEL 5
RUGI-RUGI DAYA AWAL

Elemen	kW Loss	kVAR Loss
Cable 1	2,15	1,67
Cable 2	2,15	1,67
Cable 3	37,45	63,12
Cable 4	103,2	157,8
T1	0,177	7,96

B. Verifikasi Perhitungan Manual Pada Bus 6

Perhitungan manual mengikuti (4) dan (5). Arus beban pada tegangan nominal 20 kV dengan $S = 2.200$ kVA dan $\cos \phi = 0,95$ ($\sin \phi = 0,3123$) diperoleh $I = 63,50$ A. Drop tegangan dihitung bertahap pada tiap segmen: Bus 2–Bus 4 sebesar 59,0 V ($V_4 = 99,71\%$), Bus 4–Bus 5 sebesar 636,6 V ($V_5 = 96,52\%$), dan Bus 5–Bus 6 sebesar 1.696,7 V ($V_6 = 88,04\%$). Perbandingan hasil perhitungan manual dengan hasil simulasi ETAP/MATLAB ditunjukkan pada Tabel 6.

TABEL 6
PERBANDINGAN PERHITUNGAN MANUAL DENGAN ETAP/MATLAB

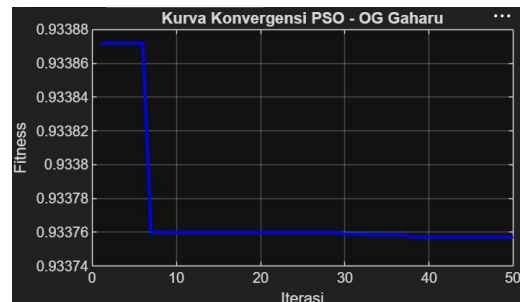
Bus	Manual (%)	ETAP/MATLAB (%)	Selisih
4	99,71	99,56	0,15
5	96,52	96,56	0,04
6	88,04	88,83	0,79

Selisih tegangan pada Bus 6 hanya 0,79 poin persentase. Perbedaan kecil ini wajar terjadi karena perhitungan manual menggunakan pendekatan satu langkah (single-pass) dengan arus dihitung pada tegangan nominal, sedangkan ETAP dan MATLAB menyelesaikan aliran daya secara iteratif sehingga tegangan aktual pada setiap bus turut memengaruhi perhitungan arus pada iterasi berikutnya.

C. Hasil Optimasi Kapasitor Bank Menggunakan PSO

Algoritma PSO mengevaluasi kombinasi lokasi dan kapasitas kapasitor pada bus-bus kandidat, dan konsisten mengarah pada Bus 6 (OG Gaharu) sebagai lokasi optimum dengan kapasitas 700 kVAR, sesuai dengan bus tersebut yang memiliki tegangan terendah pada kondisi awal. Kurva konvergensi fungsi objektif pada Gambar 2 menunjukkan

bahwa nilai fitness menurun tajam pada iterasi awal dan stabil sebelum iterasi ke-10, mengindikasikan algoritma berhasil menemukan solusi optimum secara efektif. Ringkasan hasil optimasi ditunjukkan pada Tabel 7.



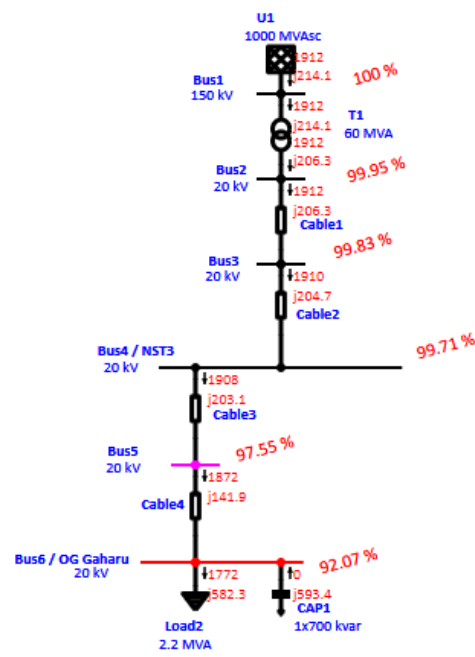
Gambar 2. Kurva konvergensi fungsi objektif PSO

TABEL 7
HASIL OPTIMASI PSO

Parameter	Nilai
Lokasi optimum	Bus 6 (OG Gaharu)
Kapasitas kapasitor	700 kVAR
Jumlah iterasi	50
Hasil konvergensi	Stabil
Tujuan optimasi	Minimasi rugi daya & perbaikan tegangan

D. Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah Optimasi

Setelah kapasitor bank 700 kVAR dipasang pada Bus 6, simulasi ulang ETAP (Gambar 3) menunjukkan perbaikan profil tegangan pada seluruh bus, terutama pada Bus 6 yang meningkat dari 88,83% menjadi 92,07% (Tabel 8). Rugi-rugi daya aktif total sistem menurun dari 145,127 kW menjadi 140,641 kW, atau sebesar 3,09% (Tabel 9).



Gambar 3. Kondisi sistem setelah pemasangan kapasitor 700 kVAR pada Bus 6

TABEL 8
PERBANDINGAN PROFIL TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH

Bus	Sebelum (%)	Sesudah (%)	Δ (%)
1	100,00	100,00	0,00
2	99,83	99,95	0,12
3	99,70	99,83	0,13
4	99,56	99,71	0,15
5	96,56	97,50	0,94
6	88,83	92,07	3,24

TABEL 9
PERBANDINGAN RUGI-RUGI DAYA SEBELUM DAN SESUDAH

Elemen	P Loss Awal (kW)	P Loss Akhir (kW)
Cable 1	2,15	2,08
Cable 2	2,15	2,08
Cable 3	37,45	36,31
Cable 4	103,2	100,0
T1	0,177	0,171
Total	145,127	140,641

E. Analisis Sensitivitas Lokasi Penempatan Kapasitor

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi lokasi pemasangan kapasitor terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya sistem. Dengan membandingkan beberapa lokasi pemasangan menggunakan kapasitas yang sama, dapat dinilai efektivitas hasil optimasi yang diperoleh algoritma PSO. Untuk membuktikan keunggulan lokasi hasil optimasi PSO secara kuantitatif, dilakukan pengujian tambahan dengan menempatkan kapasitor 700 kVAR secara manual pada Bus 4 dan Bus 5. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 10.

TABEL 10
SENSITIVITAS LOKASI PENEMPATAN KAPASITOR 700 KVAR

Lokasi	V Bus 6 (%)	P Loss Cable3+4 (kW)
Bus 4	89,02	141,2
Bus 5	90,00	139,07
Bus 6 (PSO)	92,07	136,31

Pemasangan kapasitor pada Bus 4 maupun Bus 5 memperbaiki tegangan Bus 6, namun keduanya masih berada di bawah kondisi yang dicapai pada Bus 6, karena kapasitor belum ditempatkan langsung pada pusat beban yang membutuhkan kompensasi terbesar. Hasil ini mengonfirmasi bahwa lokasi Bus 6 yang direkomendasikan PSO memberikan perbaikan tegangan dan penurunan rugi-rugi daya terbaik dibandingkan lokasi alternatif.

F. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma PSO mampu menentukan lokasi dan ukuran kapasitor bank secara efektif tanpa perlu mencoba seluruh kombinasi bus secara manual. Dibandingkan metode trial-and-error, PSO dapat mengevaluasi banyak kombinasi solusi dalam waktu relatif singkat sehingga solusi optimum diperoleh lebih efisien, sejalan

dengan temuan penelitian terdahulu [5]–[7]. Verifikasi melalui perhitungan manual pada Bus 6 juga membuktikan bahwa hasil simulasi ETAP/MATLAB konsisten dengan prinsip aliran daya dasar, dengan selisih di bawah 1%, sehingga keandalan hasil optimasi dapat dipertanggungjawabkan secara teknis.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, yaitu optimasi hanya mempertimbangkan satu kondisi pembebanan (beban puncak), menggunakan satu unit kapasitor sebagai variabel optimasi, serta belum mempertimbangkan aspek ekonomi maupun perbandingan dengan metode metaheuristik lain seperti *Genetic Algorithm* atau *Grey Wolf Optimizer*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Algoritma Particle Swarm Optimization berhasil menentukan lokasi dan ukuran kapasitor bank yang optimal pada sistem distribusi feeder NST.3/OG Gaharu, yaitu Bus 6 (OG Gaharu) dengan kapasitas 700 kVAR. Pemasangan kapasitor hasil optimasi meningkatkan tegangan Bus 6 dari 88,83% menjadi 92,07% dan menurunkan rugi-rugi daya aktif total sistem dari 145,127 kW menjadi 140,641 kW (3,09%). Perhitungan manual aliran daya pada Bus 6 menghasilkan tegangan 88,04%, hanya berselisih 0,79 poin persentase dari hasil ETAP/MATLAB, yang membuktikan validitas hasil simulasi. Analisis sensitivitas lokasi juga menunjukkan bahwa Bus 6 memberikan perbaikan tegangan dan penurunan rugi-rugi daya terbaik dibandingkan Bus 4 dan Bus 5. Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan variasi beban dinamis, optimasi multi-kapasitor, aspek ekonomi, serta perbandingan dengan metode metaheuristik lain.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PLN (Persero) UP3 Nusantara atas dukungan data teknis jaringan feeder NST.3/OG Gaharu yang digunakan dalam penelitian ini, serta kepada dosen pembimbing atas bimbingan yang diberikan selama proses penelitian.

REFERENSI

- [1] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 1, pp. 725–734, Jan. 1989.
- [2] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, and M. Karimi, "Optimum shunt capacitor placement in distribution system – A review and comparative study," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.10.002.
- [3] A. Askarzadeh, "Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: A new methodology," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 14, pp. 3631–3638, Nov. 2016.
- [4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, 1995.
- [5] M. J. Tahir, M. B. Rasheed, and M. K. Rahmat, "Optimal placement of capacitors in radial distribution grids via enhanced modified particle swarm optimization," *Energies*, vol. 15, no. 7, Apr. 2022.
- [6] M. Sedighzadeh, M. Dakhem, M. Sarvi, and H. H. Kordkheili, "Optimal reconfiguration and capacitor placement for power loss reduction of distribution system using improved binary particle swarm optimization," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, Apr. 2014.

- [7] C. S. Lee, H. V. H. Ayala, and L. D. S. Coelho, "Capacitor placement of distribution systems using particle swarm optimization approaches," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 839–851, 2015.
- [8] T. Gonen, *Electric Power Distribution Engineering*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [9] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1999.
- [10] M. Clerc, *Particle Swarm Optimization*. London, UK: ISTE Ltd., 2006.
- [11] Operation Technology, Inc., "ETAP 24.0 User Guide," Irvine, CA, USA, 2024.
- [12] S. Premrudeepreechacharn, P. Vongvilasack, and K. Ngamsanroj, "Capacitor Placement in Power Distribution Networks Using Particle Swarm Optimization: Case Study Savannakhet Province," *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 46–55, 2022, doi: 10.14456/nuej.2022.6.
- [13] M. J. Tahir, M. B. Rasheed, and M. K. Rahmat, "Optimal Placement of Capacitors in Radial Distribution Grids via Enhanced Modified Particle Swarm Optimization," *Energies*, vol. 15, no. 7, Art. no. 2452, 2022, doi: 10.3390/en15072452.
- [14] N. Pamuk and U. E. Uzun, "Optimal Allocation of Distributed Generations and Capacitor Banks in Distribution Systems Using Arithmetic Optimization Algorithm," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 2, Art. no. 831, 2024, doi: 10.3390/app14020831.
- [15] S. W. Mathenge, E. T. Mharakurwa, and L. Mogaka, "Voltage Enhancement and Loss Minimization in a Radial Network Through Optimal Capacitor Sizing and Placement Based on Crow Search Algorithm," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 4953–4965, 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.10.062.
- [16] R. Arunjothi and K. P. Meena, "Optimizing Capacitor Size and Placement in Radial Distribution Networks for Maximum Efficiency," *Systems and Soft Computing*, vol. 6, Art. no. 200111, 2024, doi: 10.1016/j.sasc.2024.200111.
- [17] S. A. Adegoke, "Optimal Sizing and Placement of Capacitors Using an Improved Particle Swarm Optimization to Enhance Networks Reliability and Voltage Profile in Distribution Systems," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 28, Art. no. 101294, 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101294.
- [18] M. Ahmadi Kamarposhti, R. Ghandour, M. Abdel-Aty, M. Hafez, M. Alfiras, S. Alkhazaleh, I. Colak, and A. Solyman, "Optimizing Capacitor Bank Placement in Distribution Networks Using a Multi-Objective Particle Swarm Optimization Approach for Energy Efficiency and Cost Reduction," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 12332, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-96341-8.