

Optimasi Kapasitas dan Penempatan Bank Kapasitor pada Penyulang Al-Hilal dan Persih 20 kV untuk Perbaikan Profil Tegangan Menggunakan Algoritma Hibrida PSO-GWO

Brian Fari Firmansyah^{1*}, Susatyo Handoko¹, dan Darjat¹

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

* E-mail: brianfarifirmansyah@gmail.com

Abstrak

Penyulang Al-Hilal dan Persih 20 kV di wilayah ULP Tembilahan memiliki karakteristik jaringan panjang sehingga rentan mengalami jatuh tegangan. Setelah rekonfigurasi jaringan, tegangan minimum sistem masih berada pada 15,802 kV atau 0,7901 p.u., sehingga belum memenuhi batas minimum 18 kV sesuai SPLN T6.001:2013. Penelitian ini mengoptimalkan lokasi dan kapasitas bank kapasitor menggunakan algoritma hibrida Particle Swarm Optimization-Grey Wolf Optimizer (PSO-GWO). Model sistem dibangun menggunakan perangkat lunak simulasi sistem tenaga dan program komputasi numerik, sedangkan evaluasi solusi dilakukan menggunakan aliran daya Newton-Raphson dengan model beban ZIP 100% impedansi konstan. Hasil validasi awal menunjukkan galat tegangan minimum antara model komputasi dan model pembanding sebesar 0,0696%. Optimasi merekomendasikan pemasangan 5 unit bank kapasitor berkapasitas nominal 600 kVAr pada lima titik jaringan, dengan total kapasitas nominal 3000 kVAr. Setelah optimasi, tegangan minimum meningkat menjadi 18,850 kV atau 0,9425 p.u., jumlah bus di bawah 0,90 p.u. turun dari 108 bus menjadi 0 bus, dan faktor daya sistem meningkat dari 0,9268 menjadi 0,9859 lagging. Hasil ini menunjukkan bahwa PSO-GWO efektif menentukan konfigurasi bank kapasitor untuk memperbaiki profil tegangan sistem distribusi 20 kV.

Kata kunci: bank kapasitor, jaringan distribusi 20 kV, Newton-Raphson, profil tegangan, PSO-GWO

Abstract

The Al-Hilal and Persih 20 kV feeders in the ULP Tembilahan area have long distribution lines and are therefore vulnerable to voltage drop. After network reconfiguration, the minimum system voltage remained at 15.802 kV or 0.7901 p.u., which did not satisfy the 18 kV minimum limit required by SPLN T6.001:2013. This study optimizes the placement and capacity of capacitor banks using a hybrid Particle Swarm Optimization-Grey Wolf Optimizer (PSO-GWO) algorithm. The system was modeled using power-system simulation software and a numerical computing program, while candidate solutions were evaluated using Newton-Raphson load flow with a 100% constant-impedance ZIP load model. Initial validation showed that the minimum-voltage error between the computational model and the reference model was 0.0696%. The optimization recommended five 600 kVAr capacitor bank units at five network locations, with a total nominal capacity of 3000 kVAr. After optimization, the minimum voltage increased to 18.850 kV or 0.9425 p.u., the number of buses below 0.90 p.u. decreased from 108 buses to zero, and the system power factor improved from 0.9268 to 0.9859 lagging. These results indicate that PSO-GWO effectively determines capacitor bank configurations for improving the voltage profile of a 20 kV distribution system.

Keywords: capacitor bank, 20 kV distribution network, Newton-Raphson, voltage profile, PSO-GWO

1. Pendahuluan

Sistem distribusi tenaga listrik berperan penting dalam menjaga kontinuitas dan mutu penyaluran energi listrik kepada pelanggan. Pada jaringan distribusi tegangan menengah, permasalahan yang sering muncul adalah jatuh tegangan akibat panjang saluran, akumulasi impedansi penghantar, dan kebutuhan daya reaktif beban. Kondisi

tersebut dapat menurunkan kualitas tegangan pada titik-titik yang jauh dari sumber dan berpotensi menyebabkan tegangan pelayanan berada di luar batas operasi yang diizinkan [1][2].

Permasalahan tersebut terjadi pada Penyulang Al-Hilal dan Penyulang Persih 20 kV di wilayah kerja PLN ULP Tembilahan. Penyulang Al-Hilal memiliki lintasan

jaringan yang sangat panjang dan kompleks. Rekonfigurasi jaringan melalui pelimpahan sebagian beban ke Penyulang Persih telah dilakukan sebagai upaya awal untuk memperbaiki tegangan. Akan tetapi, hasil simulasi pasca rekonfigurasi menunjukkan bahwa tegangan minimum sistem gabungan masih berada pada 15,802 kV atau 0,7901 p.u., sehingga belum memenuhi batas minimum 18 kV berdasarkan SPLN T6.001:2013 untuk sistem distribusi 20 kV [3].

Salah satu metode teknis yang banyak digunakan untuk memperbaiki profil tegangan adalah pemasangan bank kapasitor. Bank kapasitor menyediakan daya reaktif secara lokal sehingga aliran daya reaktif dari sumber dapat berkurang, faktor daya meningkat, dan jatuh tegangan pada saluran dapat ditekan [4]-[6]. Namun, efektivitas bank kapasitor sangat dipengaruhi oleh lokasi pemasangan dan kapasitas injeksi daya reaktif. Penempatan yang tidak tepat dapat menghasilkan perbaikan tegangan yang tidak signifikan, sedangkan kapasitas berlebih dapat menyebabkan kompensasi daya reaktif yang terlalu besar dan potensi tegangan berlebih [7][8].

Penentuan lokasi dan kapasitas bank kapasitor merupakan persoalan optimasi nonlinier karena perubahan injeksi daya reaktif pada suatu bus dapat memengaruhi profil tegangan seluruh jaringan. Berbagai pendekatan metaheuristik telah digunakan untuk persoalan optimasi daya reaktif, termasuk *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Grey Wolf Optimizer* (GWO), dan algoritma hibrida [9]-[11]. PSO memiliki kemampuan eksploitasi melalui pengalaman terbaik individu dan global, sedangkan GWO memiliki kemampuan eksplorasi melalui hierarki *alpha*, *beta*, dan *delta*. Penggabungan PSO dan GWO berpotensi menghasilkan keseimbangan pencarian yang lebih baik untuk persoalan sistem tenaga [12]-[14].

Penelitian ini bertujuan menentukan lokasi dan kapasitas bank kapasitor yang optimal pada Penyulang Al-Hilal dan Persih menggunakan algoritma hibrida PSO-GWO. Kontribusi utama penelitian ini adalah penerapan optimasi diskrit bank kapasitor berbasis hasil validasi ETAP dan MATLAB pada jaringan distribusi riil yang panjang, dengan fungsi objektif yang difokuskan pada penghilangan *under voltage* dan perbaikan profil tegangan 20 kV.

2. Metode

2.1 Objek dan Data Sistem

Objek penelitian adalah sistem distribusi 20 kV Penyulang Al-Hilal dan Penyulang Persih yang disuplai dari Gardu Induk 150 kV Tembilahan. Data yang digunakan meliputi *single line diagram*, data bus, data saluran, data beban, data transformator, dan data kapasitor eksisting. Transformator daya utama memiliki kapasitas 60 MVA dengan tegangan 150/20 kV, impedansi 12,5, frekuensi 50 Hz, dan sistem pendingin ONAN/ONAF.

Data pembebanan menunjukkan bahwa Penyulang Al-Hilal memiliki 129 titik beban dengan total beban aktif 5247,060 kW dan total beban reaktif 2390,631 kVAr. Penyulang Persih memiliki 81 titik beban dengan total beban aktif 4491,760 kW dan total beban reaktif 2046,506 kVAr. Beban dimodelkan menggunakan *ZIP load model* dengan konfigurasi 100% impedansi konstan untuk menjaga stabilitas konvergensi aliran daya pada kondisi jaringan yang panjang dan mengalami defisit tegangan [15].

2.2. Pemodelan dan Validasi Aliran Daya

Pemodelan sistem dilakukan pada ETAP 24.0.1 dan MATLAB R2026a. ETAP digunakan sebagai perangkat pembanding, sedangkan MATLAB digunakan sebagai mesin komputasi aliran daya dan optimasi [16][17]. Metode aliran daya yang digunakan adalah Newton-Raphson karena mampu menyelesaikan persamaan nonlinier sistem tenaga secara iteratif dan umum digunakan dalam studi aliran daya [18][19]. Toleransi konvergensi pada MATLAB dan ETAP ditetapkan sebesar 0,00001 agar hasil perhitungan dapat dibandingkan secara konsisten.

Pada MATLAB, topologi jaringan diproses dengan menggabungkan bus yang terhubung melalui *switch* atau *fuse* tertutup, memangkas jaringan terisolasi, dan membentuk matriks admitansi bus (Ybus) berbasis *sparse matrix*. Proses ini mempercepat evaluasi aliran daya karena optimasi PSO-GWO membutuhkan pemanggilan aliran daya secara berulang pada setiap kandidat solusi.

2.3 Representasi Solusi Optimasi

Setiap kandidat solusi PSO-GWO direpresentasikan sebagai vektor kapasitas bank kapasitor pada bus kandidat 20 kV. Secara matematis, solusi ke-*i* dinyatakan sebagai:

$$X_i = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N] \quad (1)$$

dengan *N* adalah jumlah bus kandidat dan *x_j* adalah kapasitas daya reaktif pada bus kandidat ke-*j*. Nilai solusi dibuat diskrit dengan pilihan 0 kVAr atau 600 kVAr. Nilai 0 kVAr berarti tidak ada kapasitor tambahan pada bus tersebut, sedangkan nilai 600 kVAr menunjukkan pemasangan satu unit bank kapasitor 3 × 200 kVAr.

Bus kandidat dibatasi hanya pada bus PQ 20 kV yang aktif, memiliki penanda kandidat, dan belum memiliki kapasitor eksisting. *Slack bus*, bus non-PQ, bus tegangan selain 20 kV, bus non-kandidat, dan bus dengan kapasitor *existing* tidak diperbolehkan menjadi lokasi pemasangan kapasitor tambahan. Jumlah maksimum bank kapasitor tambahan dibatasi tujuh unit sesuai batasan teknis yang digunakan pada penelitian.

2.4 Fungsi Objektif dan Batasan

Fungsi objektif dirancang untuk meminimalkan pelanggaran tegangan di bawah batas minimum dan mendorong tegangan mendekati target nominal. Batas minimum tegangan ditetapkan sebesar $V_{min} = 0,90$ p.u., target tegangan sebesar $V_{target} = 1,00$ p.u., dan batas maksimum tegangan sebesar $V_{max} = 1,10$ p.u. sesuai rentang operasi sistem 20 kV. Fungsi objektif total dituliskan sebagai:

$$F = w_{under}f_{under} + w_{target}f_{target} + P_{source} + P_{static} \tag{2}$$

dengan F adalah nilai fitness, w_{under} adalah bobot penalti *under voltage*, f_{under} adalah komponen pelanggaran terhadap batas minimum, w_{target} adalah bobot penalti terhadap target tegangan, f_{target} adalah komponen deviasi terhadap tegangan target, sedangkan P_{source} dan P_{static} adalah penalti untuk mencegah kondisi leading akibat kompensasi daya reaktif berlebih. Komponen pelanggaran terhadap batas minimum dihitung berdasarkan:

$$\Delta V_{under,j} = \max(0, V_{min} - V_j) \tag{3}$$

$$f_{under} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta V_{under,j})^2} + \max(\Delta V_{under,j}) \tag{4}$$

Komponen deviasi terhadap target tegangan dihitung dengan:

$$\Delta V_{target,j} = \max(0, V_{target} - V_j) \tag{5}$$

Batasan optimasi yang digunakan meliputi batas lokasi pemasangan kapasitor, batas ukuran kapasitor diskrit, batas jumlah maksimum unit kapasitor, batas tegangan operasi, batas total kompensasi daya reaktif, serta penalti apabila daya reaktif sumber atau total beban reaktif bersih menjadi *leading*. Dengan demikian, solusi yang diperoleh tidak hanya memiliki *fitness* rendah, tetapi juga memenuhi batasan operasi sistem distribusi.

2.5 Algoritma Hibrida PSO-GWO

Algoritma hibrida PSO-GWO menggabungkan pembaruan kecepatan PSO dengan mekanisme kepemimpinan GWO. Pada setiap iterasi, tiga solusi terbaik dalam populasi ditetapkan sebagai Alpha, Beta, dan Delta. Ketiga solusi tersebut digunakan sebagai acuan pembaruan arah pencarian. Pembaruan kecepatan partikel dituliskan sebagai:

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(X_1 - X_i^t) + c_2r_2(X_2 - X_i^t) + c_3r_3(X_3 - X_i^t) \tag{6}$$

dengan v_i^{t+1} adalah kecepatan baru partikel ke- i , w adalah bobot inersia, c_1 , c_2 , dan c_3 adalah koefisien akselerasi, r_1 , r_2 , dan r_3 adalah bilangan acak, sedangkan X_1 , X_2 , dan X_3 merupakan posisi kandidat yang dibentuk dari mekanisme alpha, beta, dan delta GWO.

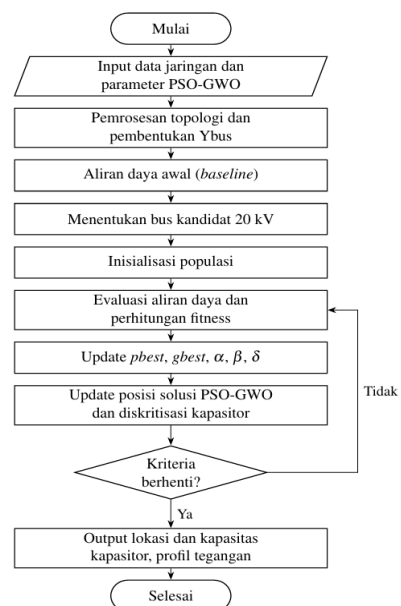
Parameter akhir algoritma yang digunakan pada proses optimasi ditunjukkan pada Tabel 1. Parameter tersebut dipilih berdasarkan pengujian iterasi maksimum, ukuran populasi, pembobotan fungsi objektif, dan parameter pergerakan algoritma.

Tabel 1. Parameter akhir algoritma PSO-GWO

Parameter	Nilai
Iterasi maksimum	10
Ukuran populasi	50
Bobot <i>under voltage</i> , w_{under}	5000
Bobot target tegangan, w_{target}	200
Bobot PSO maksimum, w_{pso_hi}	0,8
Bobot PSO minimum, w_{pso_lo}	0,4
Nilai	0,1
Koefisien c_1, c_2, c_3	1,5;1,5;1,5

Berdasarkan Tabel 1, algoritma PSO-GWO dijalankan dengan 10 iterasi dan 50 partikel, dengan bobot *undervoltage* sebesar 5000 sebagai penalti utama pelanggaran tegangan minimum serta bobot target tegangan sebesar 200.

Alur umum optimasi dimulai dari pembacaan data sistem, pemilihan bus kandidat, inialisasi populasi acak, evaluasi aliran daya Newton-Raphson, perhitungan *fitness*, pembaruan posisi menggunakan PSO-GWO, diskritisasi kapasitas kapasitor, dan pemilihan solusi terbaik. Diagram alir proses optimasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir program optimasi PSO-GWO

Gambar 1 menunjukkan bahwa proses optimasi berlangsung secara iteratif, dimulai dari pembacaan data jaringan hingga diperoleh konfigurasi kapasitor optimal dengan nilai *fitness* terbaik.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kondisi Awal Pasca Rekonfigurasi

Simulasi awal dilakukan pada sistem gabungan Penyulang Al-Hilal dan Penyulang Persih pasca rekonfigurasi. Hasil simulasi ETAP menunjukkan bahwa sistem masih mengalami *under voltage*. Ringkasan kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil aliran daya penyulang Al-Hilal dan Persih sebelum Optimasi

Parameter	Nilai
P total kirim (kW)	9306,6
Q total kirim (kVAr)	3770,3
P Diterima pelanggan (kW)	8123,0
Q diterima pelanggan (kVAr)	2941,3
Rugi-rugi daya aktif (kW)	1183,6
Rugi-rugi daya reaktif (kVAr)	828,9
Tegangan maksimum (kV)	21,871
Tegangan minimum (kV)	15,802
Titik tegangan minimum	Bus546
Jumlah bus di bawah 0,90 p.u.	107

Berdasarkan Tabel 2, tegangan minimum sebesar 15,802 kV atau 0,7901 p.u. terjadi pada Bus546. Nilai ini berada di bawah batas minimum 18 kV atau 0,90 p.u. untuk sistem 20 kV. Deviasi tegangan minimum terhadap nominal 20 kV mencapai 20,990%, sehingga melebihi toleransi penurunan tegangan 10%. Kondisi ini menunjukkan bahwa rekonfigurasi jaringan belum cukup untuk mengatasi jatuh tegangan pada sistem, sehingga diperlukan kompensasi daya reaktif tambahan. Sebelum optimasi, model MATLAB divalidasi terhadap hasil ETAP. Hasil validasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Validasi hasil aliran daya ETAP dan MATLAB

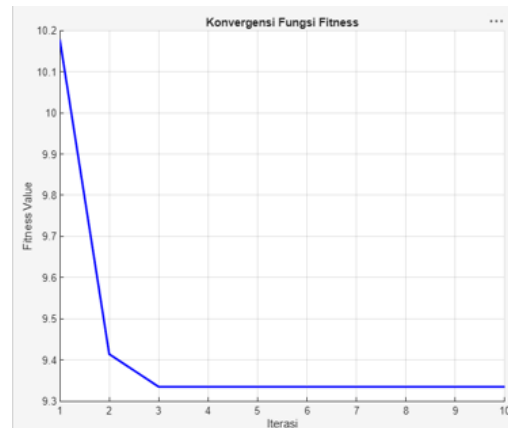
Parameter	ETAP	MATLAB	Galat (%)
P total kirim (kW)	9306,6	9304,7	0,0204
Q total kirim (kVAr)	3770,3	3774,5	0,1114
P Diterima pelanggan (kW)	3770,3	8121,2	0,0221
Q diterima pelanggan (kVAr)	2941,3	2941,0	0,0102
Rugi-rugi daya aktif (kW)	1183,6	1183,7	0,0084
Rugi-rugi daya reaktif (kVAr)	828,9	833,5	0,5549
Tegangan minimum (kV)	15,802	15,791	0,0696

Berdasarkan Tabel 3, galat seluruh parameter berada di bawah 1%, dengan galat tegangan minimum MATLAB terhadap ETAP hanya sebesar 0,0696%. Hasil ini menunjukkan bahwa model MATLAB layak digunakan sebagai mesin evaluasi aliran daya dalam proses optimasi.

3.2 Hasil Optimasi Bank Kapasitor

Proses optimasi dilakukan pada penyulang Al-Hilal dan Persih dengan pilihan kapasitas diskrit 0 kVAr dan 600 kVAr. Algoritma PSO-GWO menghasilkan nilai *fitness*

terbaik sebesar 18,34. Perkembangan nilai *fitness* selama proses optimasi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva konvergensi nilai *fitness*

Berdasarkan Gambar 2, nilai *fitness* mengalami penurunan signifikan pada iterasi awal. Kondisi ini menunjukkan bahwa populasi masih berada pada tahap pencarian solusi dan algoritma mulai memperbaiki kombinasi lokasi serta kapasitas bank kapasitor. Setelah iterasi ke-3, nilai *fitness* cenderung stabil hingga akhir iterasi. Pola tersebut mengindikasikan bahwa algoritma telah mencapai kondisi konvergen dan tidak lagi menghasilkan perbaikan *fitness* yang berarti pada iterasi berikutnya.

Hasil optimasi merekomendasikan pemasangan 5 unit bank kapasitor, masing-masing sebesar 600 kVAr. Total kapasitas nominal yang dipasang adalah 3000 kVAr, masih di bawah batas maksimum tujuh unit kapasitor. Rincian lokasi pemasangan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Lokasi dan kapasitas nominal bank kapasitor

Bus	Penyulang	Kapasitas (kVAr)
BUSTD 364	Al-Hilal	600
FCOPLTD	Al-Hilal	600
FCO_MRTpra	Al-Hilal	600
FCO_TJ PNDK	Al-Hilal	600
PTS TLK NMBUNG	Persih	600
Total		3000

Berdasarkan Tabel 4, lokasi kapasitor hasil optimasi tersebar pada beberapa titik jaringan. Hal ini menunjukkan bahwa perbaikan tegangan tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya kapasitas kapasitor, tetapi juga oleh posisi injeksi daya reaktif. Penempatan yang tersebar memungkinkan daya reaktif disuplai lebih dekat ke area beban sehingga dapat mengurangi jatuh tegangan pada bagian jaringan yang kritis.

Daya reaktif aktual kapasitor tidak selalu sama dengan kapasitas nominal karena keluaran daya reaktif kapasitor dipengaruhi oleh kuadrat tegangan pada bus pemasangan. Hubungan tersebut dinyatakan sebagai:

$$Q_{aktual} = Q_{nominal} \times V_{pu}^2 \quad (7)$$

Berdasarkan (7), total kapasitas aktual kapasitor hasil optimasi sebesar 2746,581 kVAr. Rincian kapasitas aktual ditunjukkan pada Tabel 5.

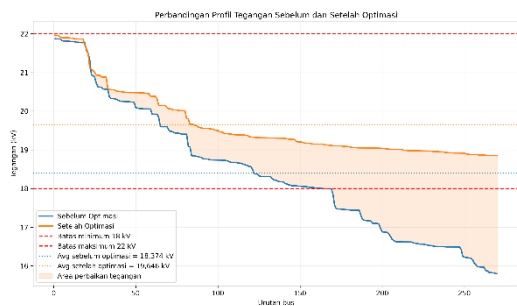
Tabel 5. Kapasitas aktual bank kapasitor

Bus	V (p.u.)	Nominal (kVAr)	Aktual (kVAr)
BUSTD 364	0,9496	600	541,044
FCOPLTD	0,9495	600	537,517
FCO_MRTPra	0,9663	600	560,241
FCO_TJ PNDK	0,9644	600	558,040
PTS TLK NMBUNG	0,9572	600	549,739
Total		3000	2746,581

Berdasarkan Tabel 5, total kapasitas aktual kapasitor yang terpasang adalah 2746,581 kVAr, lebih rendah dari total nominal 3000 kVAr karena pengaruh tegangan bus pemasangan yang berada di bawah 1,00 p.u. sesuai persamaan (7).

3.3 Profil Tegangan Setelah Optimasi

Setelah 5 unit bank kapasitor dipasang pada lokasi hasil optimasi, simulasi aliran daya kembali dilakukan pada sistem gabungan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan minimum meningkat menjadi 18,850 kV atau 0,9425 p.u. pada Bus28. Jumlah bus dengan tegangan di bawah 0,90 p.u. berkurang dari 107 bus menjadi 0 bus. Perubahan ini menunjukkan bahwa seluruh bus 20 kV telah memenuhi batas minimum operasi berdasarkan SPLN T6.001:2013. Perbandingan profil tegangan sebelum dan sesudah optimasi disajikan pada Gambar 3.



Gambar 2. Kurva konvergensi nilai fitness

Berdasarkan Gambar 2, profil tegangan setelah optimasi mengalami peningkatan di seluruh bus yang sebelumnya mengalami *under voltage*, dengan tegangan minimum naik dari 15,802 kV menjadi 18,850 kV.

Ringkasan perubahan profil tegangan ditunjukkan pada Tabel 6. Tegangan minimum meningkat sebesar 3,048 kV atau 19,288%, sedangkan tegangan rata-rata meningkat dari 0,9187 p.u. menjadi 0,9823 p.u. Kenaikan ini mengindikasikan bahwa pemasangan kapasitor tidak hanya memperbaiki titik tegangan terendah, tetapi juga meningkatkan profil tegangan sistem secara keseluruhan. Ringkasan profil tegangan sebelum dan sesudah ditunjukkan pada Tabel 6

Tabel 6. Ringkasan profil tegangan sebelum dan sesudah optimasi

Parameter	Sebelum	Sesudah
Tegangan minimum (kV)	15,802	18,850
Tegangan minimum (p.u.)	0,7901	0,9425
Deviasi dari 20 kV (%)	20,990	5,750
Lokasi tegangan terendah	Bus546	Bus28
Tegangan rata-rata (p.u.)	0,9187	0,9823
Jumlah bus < 0,90 p.u.	107	0

Berdasarkan Tabel 6, perpindahan titik tegangan minimum dari Bus546 ke Bus28 menunjukkan bahwa area yang sebelumnya paling kritis telah mengalami perbaikan. Tegangan minimum setelah optimasi tetap berada di bawah 1,00 p.u., tetapi sudah melewati batas minimum 0,90 p.u. sehingga tujuan utama optimasi, yaitu penghilangan *under voltage*, telah tercapai.

3.4 Analisis Daya Reaktif dan Faktor Setelah Optimasi

Pemasangan bank kapasitor pada sistem distribusi berpengaruh langsung terhadap aliran daya reaktif dan faktor daya sistem. Sebelum optimasi, kebutuhan daya reaktif beban sepenuhnya disuplai dari sisi sumber melalui saluran distribusi. Pada jaringan distribusi yang panjang, aliran daya reaktif tersebut meningkatkan arus saluran dan berkontribusi terhadap jatuh tegangan. Setelah bank kapasitor dipasang pada lokasi hasil optimasi, sebagian kebutuhan daya reaktif dapat disuplai secara lokal sehingga kebutuhan daya reaktif dari sumber berkurang. Perbandingan daya reaktif dan faktor daya sistem sebelum dan sesudah optimasi ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan daya reaktif dan faktor daya sebelum dan sesudah optimasi

Parameter	Sebelum	Sesudah
Q total kirim (kVAr)	3770,3	1808,1
Q diterima pelanggan (kVAr)	2941,3	576,1
Faktor daya sistem	0,9268	0,9859

Berdasarkan Tabel 7, pemasangan bank kapasitor menyebabkan kebutuhan daya reaktif dari sumber menurun secara signifikan. Nilai Q total kirim berkurang dari 3770,3 kVAr menjadi 1808,1 kVAr sesudah optimasi. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa sebagian kebutuhan daya reaktif beban telah dikompensasi secara lokal oleh bank kapasitor sehingga aliran daya reaktif dari sumber menuju jaringan menjadi lebih kecil.

Penurunan daya reaktif dari sumber juga memengaruhi faktor daya sistem. Sebelum optimasi, faktor daya sistem sebesar 0,9268, sedangkan sesudah optimasi meningkat menjadi 0,9859. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi operasi sistem menjadi lebih baik karena faktor daya mendekati *unity* tanpa menyebabkan sistem berada pada kondisi *leading*. Selain itu, nilai Q total kirim yang masih bernilai positif menunjukkan bahwa sistem tetap berada pada kondisi *lagging*. Kondisi tersebut menandakan bahwa sumber masih menyuplai daya reaktif ke sistem meskipun jumlahnya telah berkurang akibat kompensasi dari bank kapasitor. Dengan demikian, pemasangan kapasitor berhasil memperbaiki faktor daya sistem tanpa menyebabkan kompensasi daya reaktif berlebih.

3.5 Analisis Rugi-Rugi Daya Sesudah Optimasi

Selain profil tegangan dan faktor daya, rugi-rugi daya juga dianalisis untuk mengetahui dampak teknis pemasangan bank kapasitor terhadap kondisi operasi sistem. Pada penelitian ini, rugi-rugi daya tidak dijadikan komponen utama dalam fungsi objektif optimasi. Fungsi objektif difokuskan pada perbaikan profil tegangan bus 20 kV, sedangkan rugi-rugi daya aktif dan reaktif digunakan sebagai parameter evaluasi tambahan. Perbandingan rugi-rugi daya sistem sebelum dan sesudah optimasi ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan daya reaktif dan faktor daya sebelum dan sesudah optimasi

Parameter	Sebelum	Sesudah
Rugi-rugi daya aktif (kW)	1183,6	1537,0
Rugi-rugi daya reaktif (kVAr)	828,9	1231,0
P diterima pelanggan (kW)	8123,0	9109,9
Q diterima pelanggan (kVAr)	2941,3	576,7

Berdasarkan Tabel 8, rugi-rugi daya aktif meningkat dari 1183,6 kW menjadi 1537,0 kW, sedangkan rugi-rugi daya reaktif meningkat dari 828,9 kVAr menjadi 1231,0 kVAr sesudah optimasi. Kondisi tersebut terjadi meskipun profil tegangan sistem mengalami perbaikan setelah pemasangan bank kapasitor.

Peningkatan rugi-rugi daya pada penelitian ini dipengaruhi oleh model beban yang digunakan, yaitu ZIP 100% impedansi konstan. Pada model impedansi konstan, daya aktif dan daya reaktif yang diserap beban bergantung pada kuadrat tegangan bus. Ketika tegangan bus meningkat akibat pemasangan kapasitor, daya yang diserap beban juga ikut meningkat. Sebagai contoh, beban L_TD 392 memiliki daya nominal sebesar 27,3 kW. Sebelum optimasi, tegangan pada bus beban sebesar 0,816 p.u. sehingga daya aktual yang diserap adalah $27,3 \times 0,816^2 = 18,177$ kW. Setelah optimasi, tegangan bus meningkat menjadi 0,955 p.u. sehingga daya aktual yang diserap berubah menjadi $27,3 \times 0,955^2 = 24,898$ kW.

Perhitungan tersebut menunjukkan bahwa kenaikan tegangan menyebabkan daya yang diserap beban meningkat. Sebelum optimasi, beberapa bus berada pada kondisi *under voltage* sehingga beban impedansi konstan menyerap daya lebih kecil dari nilai nominalnya. Setelah profil tegangan membaik, daya yang terserap oleh beban meningkat mendekati nilai nominal. Akibatnya, arus pada beberapa bagian jaringan juga dapat meningkat dan menyebabkan rugi-rugi daya bertambah.

Fenomena tersebut menunjukkan bahwa pada model beban impedansi konstan, perbaikan profil tegangan tidak selalu diikuti oleh penurunan rugi-rugi daya. Meskipun pemasangan bank kapasitor berhasil mengurangi kebutuhan daya reaktif dari sumber dan memperbaiki faktor daya sistem, kenaikan tegangan menyebabkan daya

beban yang terserap meningkat sehingga rugi-rugi daya aktif dan reaktif juga dapat bertambah. Dengan demikian, hasil optimasi pada penelitian ini lebih difokuskan pada keberhasilan memperbaiki profil tegangan dan menghilangkan kondisi *under voltage* pada sistem distribusi 20 kV.

4. Kesimpulan

Optimasi kapasitas dan penempatan bank kapasitor pada Penyulang Al-Hilal dan Persih 20 kV menggunakan algoritma hibrida PSO-GWO berhasil memperbaiki profil tegangan sistem. Kondisi awal pasca rekonfigurasi masih menunjukkan *under voltage* dengan tegangan minimum 15,802 kV atau 0,7901 p.u. dan 107 bus berada di bawah 0,90 p.u. Model MATLAB yang digunakan sebagai mesin evaluasi optimasi telah tervalidasi terhadap ETAP dengan galat tegangan minimum 0,0696%. Hasil optimasi merekomendasikan pemasangan lima unit bank kapasitor masing-masing 600 kVAr pada BUSTD 364, FCOPLTD, FCO_MRTPra, FCO_TJ PNDK, dan PTS TLK NMBUNG, dengan total kapasitas nominal 3000 kVAr dan kapasitas aktual 2746,581 kVAr. Setelah optimasi, tegangan minimum meningkat menjadi 18,850 kV atau 0,9425 p.u., tegangan rata-rata meningkat menjadi 0,9823 p.u., seluruh bus memenuhi batas minimum SPLN T6.001:2013, dan faktor daya sistem meningkat dari 0,9268 menjadi 0,9859 *lagging*. Peningkatan rugi-rugi daya aktif dan reaktif setelah optimasi dipengaruhi oleh penggunaan model beban 100% impedansi konstan, sehingga pengembangan penelitian selanjutnya disarankan menambahkan komponen rugi-rugi daya pada fungsi objektif, mempertimbangkan variasi kondisi beban, serta menganalisis aspek harmonisa, *switching transient*, dan koordinasi proteksi sebelum implementasi lapangan.

Referensi

- [1]. N. R. Alham, R. M. Utomo, H. Hilmansyah, M. Muslimin, A. W. Aditya, dan A. Mubarak. Studi tentang perbaikan jatuh tegangan di tiang ujung jaringan tegangan rendah pada PT PLN UP3 Area Samarinda. *JTEUNIBA*. 2022; 6(2): 212-216. doi: 10.36277/jteuniba.v6i2.140.
- [2]. M. Harbi Rai Pangestu. Rekonfigurasi jaringan distribusi untuk meminimalisasi rugi-rugi daya dengan menggunakan metode Grey Wolf Optimizer (GWO). *Electrician*. 2022; 16(3): 238-246. doi: 10.23960/elc.v16n3.2262.
- [3]. PT PLN (Persero). SPLN T6.001:2013. *Tegangan-Tegangan Standar*. Jakarta Selatan: PT PLN (Persero); 2013.
- [4]. M. Ilham. Analisis pemasangan kapasitor bank untuk mengurangi drop tegangan pada jaringan distribusi 20 kV di Penyulang Singapura ULP Pasir Pangaraian PT PLN (Persero). 2025; 9(2).
- [5]. P. Amelia. Studi optimasi penempatan kapasitor bank pada Penyulang SS4 PT PLN ULP Tondano untuk memperbaiki kualitas tegangan.
- [6]. A. Azis, Y. F. Sidik, dan A. N. Widiastuti. Optimal capacitor placement for voltage profile improvement using PSO: A case study in PLN UP3 Tanah Bumbu. *2025 12th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*. Semarang. 2025: 337-342. doi: 10.1109/EECSI67060.2025.11290587.
- [7]. M. Ahmadi Kamarposhti dkk. Optimizing capacitor bank placement in distribution networks using a multi-objective particle swarm optimization approach for energy efficiency and cost reduction. *Scientific Reports*. 2025; 15(1): 12332. doi: 10.1038/s41598-025-96341-8.
- [8]. S. R. Salkuti. Optimal location and sizing of shunt capacitors with distributed generation in distribution systems. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. 2021; 19(1): 34-42. doi: 10.37936/ecti-ec.2021191.222295.
- [9]. I. H. Smaili, D. R. Almalawi, A. M. Shaheen, dan H. S. E. Mansour. Optimizing PV sources and shunt capacitors for energy efficiency improvement in distribution systems using Subtraction-Average Algorithm. *Mathematics*. 2024; 12(5): 625. doi: 10.3390/math12050625.
- [10]. G. Srinivasan, V. Mahesh Kumar Reddy, P. Venkatesh, dan E. Parimalasundar. Reactive power optimization in distribution systems considering load levels for economic benefit maximization. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023; (3): 83-89. doi: 10.20998/2074-272X.2023.3.12.
- [11]. A. M. Nassef, M. A. Abdelkareem, H. M. Maghrabie, dan A. Baroutaji. Review of metaheuristic optimization algorithms for power systems problems. *Sustainability*. 2023; 15(12): 9434. doi: 10.3390/su15129434.
- [12]. M. Sanaei, H. Akbari, Z. Beheshtipour, dan S. Mousavi. New PSO-GWO-based model for enhancing power quality in electrical networks interconnected with photovoltaic sources. *Frontiers in Energy Research*. 2024; 12: 1476638. doi: 10.3389/fenrg.2024.1476638.
- [13]. A. B. Alyu, A. O. Salau, B. Khan, dan J. N. Eneh. Hybrid GWO-PSO based optimal placement and sizing of multiple PV-DG units for power loss reduction and voltage profile improvement. *Scientific Reports*. 2023; 13(1): 6903. doi: 10.1038/s41598-023-34057-3.
- [14]. A. Pawar, R. K. Viral, dan M. Bansal. Capacitor allocation in radial distribution system using modified Grey Wolf Optimization. *2024 International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS)*. Raichur. 2024: 1-7. doi: 10.1109/ICICACS60521.2024.10498885.
- [15]. S. Maleki, S. Pan, E. V. Belmega, C. Konstantinou, dan S. Lakshminarayana. The impact of load altering attacks on distribution systems with ZIP loads. *2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. Seattle. 2024: 1-5. doi: 10.1109/PESGM51994.2024.10688940.
- [16]. R. A. Nugraha. Simulasi pengoperasian over current relay jaringan distribusi 20 kV menggunakan software ETAP di PT Medco Energy Grati. *Jurnal Media Infotama*. 2024; 20(2): 653-659. doi: 10.37676/jmi.v20i2.6574.
- [17]. N. P. Dongoran, A. C. S. Pane, dan S. A. Wardani. Pemanfaatan MATLAB dalam analisis turunan parsial: visualisasi dan implementasi fungsi multivariat. *JPMSAINTEK*. 2024; 3(4): 92-97. doi: 10.58169/jpmsaintek.v3i4.638.
- [18]. E. H. Harun, M. T. Adam, dan J. Ilham. Perbaikan kualitas tegangan distribusi 20 kV di Gardu Hubung Lemito melalui studi aliran daya. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2022; 4(2): 143-147. doi: 10.37905/jjee.v4i2.13825.
- [19]. W. O. Sulaimon, I. O. Habiballah, M. Khalid, dan F. S. Al-Ismaail. Achieving accurate and efficient load flow model in distribution networks using hybrid linearization approach. *IEEE Access*. 2024; 12: 174193-174203. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3502118.