

PENERAPAN SIMULASI PEMBELAJARAN ALGORITMA FIREFLY DALAM MENENTUKAN LOKASI DAN KAPASITAS KAPASITOR PADA MATA KULIAH DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Roy Ananda Putra Siahaan¹, Yoakim Simamora²

^{1,2} Universitas Negeri Medan

Email Penulis: ¹yoakimsimamora@unimed.ac.id

Abstrak: Permasalahan rugi-rugi daya dan penurunan profil tegangan merupakan isu penting dalam sistem distribusi tenaga listrik. Salah satu solusi efektif untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan melakukan penempatan dan penentuan kapasitas kapasitor secara optimal. Penelitian ini membahas penerapan algoritma Firefly untuk menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor pada jaringan distribusi IEEE 33 bus sebagai bagian dari studi pada mata kuliah Distribusi Tenaga Listrik. Algoritma Firefly dipilih karena memiliki keunggulan dalam pencarian solusi global dan efisiensi dalam proses konvergensi pada permasalahan optimasi nonlinier. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan batasan teknis sistem seperti batas tegangan, kapasitas maksimum kapasitor, dan karakteristik beban. Tujuan utama dari optimasi ini adalah untuk meminimalkan rugi-rugi daya aktif dan memperbaiki profil tegangan sistem distribusi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma Firefly mampu secara efektif menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor yang optimal, sehingga terjadi penurunan signifikan pada rugi-rugi daya dan peningkatan tegangan pada seluruh bus. Selain itu, algoritma ini menunjukkan kinerja komputasi yang baik dengan waktu konvergensi yang cepat dan hasil yang stabil. Penerapan metode ini dapat menjadi referensi praktis dan akademik dalam pembelajaran serta pengembangan sistem distribusi tenaga listrik yang efisien dan handal di masa depan.

Kata Kunci: Capacitor, Rugi Daya, Profil Tegangan, Algoritma Firefly

Abstract: Abstract

The issues of power losses and voltage profile degradation are critical challenges in electrical distribution systems. One effective solution to address these problems is the optimal placement and sizing of capacitors. This study discusses the application of the Firefly Algorithm to determine the optimal location and capacity of capacitors in the IEEE 33-bus distribution network as part of the Distribution Power Systems course. The Firefly Algorithm is selected due to its advantages in global solution searching and efficiency in convergence for nonlinear optimization problems. The simulation is carried out by considering system technical constraints such as voltage limits, maximum capacitor capacity, and load characteristics. The main objective of this optimization is to minimize active power losses and improve the voltage profile of the distribution system. Simulation results show that the Firefly Algorithm can effectively determine the optimal capacitor placement and sizing, resulting in a significant reduction of power losses and an overall voltage improvement across all buses. In addition, the algorithm demonstrates good computational performance with fast convergence time and stable results. The implementation of this method can serve as both a practical and academic reference in learning and developing more efficient and reliable electrical distribution systems in the future.

Keywords: Capacitor, Power Losses, Voltage Profil, Direfly Algorithm

PENDAHULUAN

Permasalahan utama dalam sistem distribusi tenaga listrik adalah tingginya rugi-rugi daya dan menurunnya profil tegangan yang berdampak pada efisiensi dan keandalan sistem. Salah satu solusi yang umum digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan melakukan penempatan dan penentuan kapasitas kapasitor secara optimal pada jaringan distribusi. Berbagai metode optimasi telah dikembangkan, salah satunya adalah algoritma Firefly yang dikenal mampu menangani permasalahan optimasi nonlinier dan kompleksitas pencarian solusi global. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan algoritma Firefly dalam menentukan lokasi dan

kapasitas kapasitor optimal pada jaringan IEEE 33 bus guna meningkatkan kinerja sistem distribusi tenaga listrik.

Rosihan membahas optimasi penempatan kapasitor pada jaringan distribusi 20 kV Penyulang Lambitu, Kalampa, dan Karumbu menggunakan metode Optimal Capacitor Placement (OCP) berbasis algoritma genetika dalam perangkat lunak ETAP. Tujuannya adalah untuk meningkatkan profil tegangan dan mereduksi rugi-rugi daya aktif maupun reaktif pada sistem distribusi PT PLN (Persero) Area Bima. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penempatan kapasitor secara optimal pada bus 100 dan 106 dengan kapasitas masing-masing 722,58 kVar dan 361,28 kVar berhasil

meningkatkan tegangan pada bus-bus yang mengalami critical. Setelah penempatan kapasitor, rugi daya aktif berkurang dari 209,3 kW menjadi 185,9 kW dan daya reaktif dari 263,6 kVar menjadi 253,0 kVar. Selain itu, tegangan bus yang semula berada di bawah batas standar (0,95 p.u.) meningkat hingga berada dalam rentang yang diizinkan. Dengan demikian, metode OCP terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi dan menjaga kualitas tegangan sesuai standar IEEE (Rosihan, 2023).

Ariwata membahas optimasi penempatan kapasitor untuk meningkatkan profil tegangan pada jaringan distribusi 20 kV di PT PLN (Persero) Rayon Cakranegara. Masalah utama yang dihadapi adalah penurunan tegangan dan rugi-rugi daya akibat tingginya beban induktif dalam sistem distribusi. Dengan menggunakan perangkat lunak ETAP Power Station dan metode Optimal Capacitor Placement (OCP) berbasis algoritma genetika, dilakukan simulasi untuk menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor yang optimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setelah pemasangan kapasitor sebesar 2835 kVar pada Bus GI Jeranjang, tegangan pada bus-bus yang sebelumnya berada pada kondisi marginal dan kritis meningkat menjadi dalam batas standar IEEE ($0,95 \leq V_b \leq 1,05$ p.u.). Penempatan kapasitor ini tidak hanya memperbaiki tegangan pada bus-bus bermasalah, tetapi juga meningkatkan keseluruhan efisiensi sistem distribusi. Dengan demikian, pendekatan ini terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas daya dan stabilitas tegangan sistem tenaga listrik (Ariwata et al., n.d.).

Awan menganalisis pengaruh pemasangan kapasitor bank terhadap penurunan jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada Penyulang Nila, PT PLN Area Metro. Simulasi dilakukan menggunakan metode Newton-Raphson pada perangkat lunak MATLAB untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor. Hasilnya menunjukkan bahwa setelah pemasangan kapasitor bank 500 kVAR pada Bus 72 dan Bus 111, terjadi peningkatan tegangan minimum dari 0,8710 pu menjadi 0,9017 pu. Selain itu, rugi-rugi daya aktif turun sebesar 20,20% dan daya reaktif sebesar 20,29%. Dengan demikian, pemasangan kapasitor bank tidak hanya memperbaiki profil tegangan sistem distribusi tetapi juga memberikan manfaat ekonomi melalui pengurangan rugi-rugi daya (Sah, 2021).

Al-Firdausi menganalisis kebutuhan dan penempatan optimal bank kapasitor di PT Beras Rajawali untuk meningkatkan faktor daya sistem kelistrikan industri. Simulasi dilakukan

menggunakan perangkat lunak ETAP 19 dengan metode Optimal Capacitor Placement (OCP) dan analisis aliran daya berbasis Newton-Raphson. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penempatan lima step kapasitor 100 kVAR pada bus penggiling dan enam step pada bus pengemas berhasil meningkatkan faktor daya dari 0,67 menjadi 0,85. Selain itu, arus listrik menurun signifikan dari 101,4 A dan 111,4 A menjadi 67,9 A dan 78,5 A, menandakan pengurangan rugi-rugi daya dalam sistem. Perbandingan hasil simulasi dan perhitungan manual menunjukkan tingkat error yang rendah, memperkuat validitas pendekatan yang digunakan. Dengan demikian, pemasangan bank kapasitor terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas sistem tenaga listrik industri (Al Firdausi et al., 2024).

Akto membahas penempatan optimal kapasitor bank pada jaringan distribusi radial 13,8 kV South Balam Feeder 1 milik PT Chevron Pacific Indonesia menggunakan metode Genetic Algorithm (GA). Dengan total beban 4470 kVA dan panjang jaringan 44,7 km, sistem mengalami drop tegangan dan rugi-rugi daya yang signifikan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank sebesar 3000 kVAR pada lima titik strategis mampu menaikkan tegangan ke level standar dan mengurangi rugi daya aktif dari 138,4 kW menjadi 79,8 kW. Total daya reaktif juga menurun dari 319,2 kVAR menjadi 168,8 kVAR. Dengan demikian, metode GA terbukti efektif dalam menentukan lokasi dan ukuran kapasitor yang optimal untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas daya pada sistem distribusi (Akto et al., 2014).

Wiwin mengevaluasi penempatan kapasitor paralel pada Penyulang Pajajaran di GI Jakabaring untuk meningkatkan profil tegangan dan mengurangi rugi daya menggunakan metode perhitungan daya reaktif dan Optimal Capacitor Placement (OCP) pada perangkat lunak ETAP 19.0. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode OCP mampu meningkatkan tegangan ujung penyulang dari 93,26% menjadi 100,1% dari tegangan nominal, lebih baik dibandingkan metode perhitungan daya reaktif yang hanya mencapai 98,98%. Kapasitansi kapasitor yang dihasilkan OCP juga lebih konsisten di kisaran 930 kVAR dibandingkan hasil perhitungan manual yang bervariasi. Selain itu, OCP menghasilkan jumlah kapasitor yang lebih banyak yaitu 20 unit, dibandingkan dengan metode manual sebanyak 14 unit, yang memungkinkan distribusi daya yang lebih merata. Dengan demikian, metode OCP terbukti lebih optimal secara teknis dan ekonomis

dalam penempatan kapasitor pada sistem distribusi (Wiwin A Oktaviani et al., 2023).

Penelitian ini membahas penempatan optimal kapasitor pada penyulang Mantuil 20 kV menggunakan metode Genetic Algorithm (GA) yang diimplementasikan melalui fitur Optimal Capacitor Placement (OCP) pada perangkat lunak ETAP. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum pemasangan kapasitor, terdapat banyak bus dengan tegangan di bawah standar (0,95 p.u), yang dapat mengganggu keandalan sistem. Setelah kapasitor bank ditempatkan secara optimal, seluruh nilai tegangan bus meningkat dan berada dalam rentang standar operasional (0,95–1,05 p.u). Metode OCP terbukti efektif dalam memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem distribusi (Saragih et al., 2018).

Simamora mengkaji penempatan dan penentuan kapasitas optimal kapasitor pada jaringan distribusi tegangan menengah kota Medan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum penempatan kapasitor, rugi daya aktif sebesar 256,1 kW dan tegangan minimum mencapai 0,90 p.u. Setelah penempatan kapasitor sebesar 600 kVAR pada bus 18 dan 34, rugi daya aktif menurun menjadi 194,9 kW (penurunan 23,9%) dan tegangan minimum meningkat menjadi 0,94 p.u (kenaikan 4,2%). Dengan demikian, metode ini terbukti efektif dalam meningkatkan profil tegangan dan efisiensi distribusi daya (Simamora et al., 2023).

Dermawan mengkaji optimasi penempatan dan ukuran kapasitor bank pada sistem distribusi radial 20 kV Hotel Starlet Gading Serpong menggunakan metode Genetic Algorithm (GA) dan perangkat lunak ETAP Powerstation 12.6.0. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dua bus, yaitu bus1-DB.ATP dan bus4-PD.PMP, mengalami tegangan di bawah batas kritis, dan setelah penempatan kapasitor masing-masing 50 kVAR, tegangan sistem meningkat hingga memenuhi standar SPLN $\geq 95\%$ dari tegangan nominal. Penempatan kapasitor juga menurunkan daya reaktif sistem dari 101 kVAR menjadi 93 kVAR, serta menghasilkan fungsi objektif biaya minimum sebesar Rp57.880.057,28. Dengan demikian, metode GA terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas tegangan, menurunkan rugi-rugi daya, dan memberikan efisiensi biaya dalam sistem distribusi (Dermawan et al., 2019).

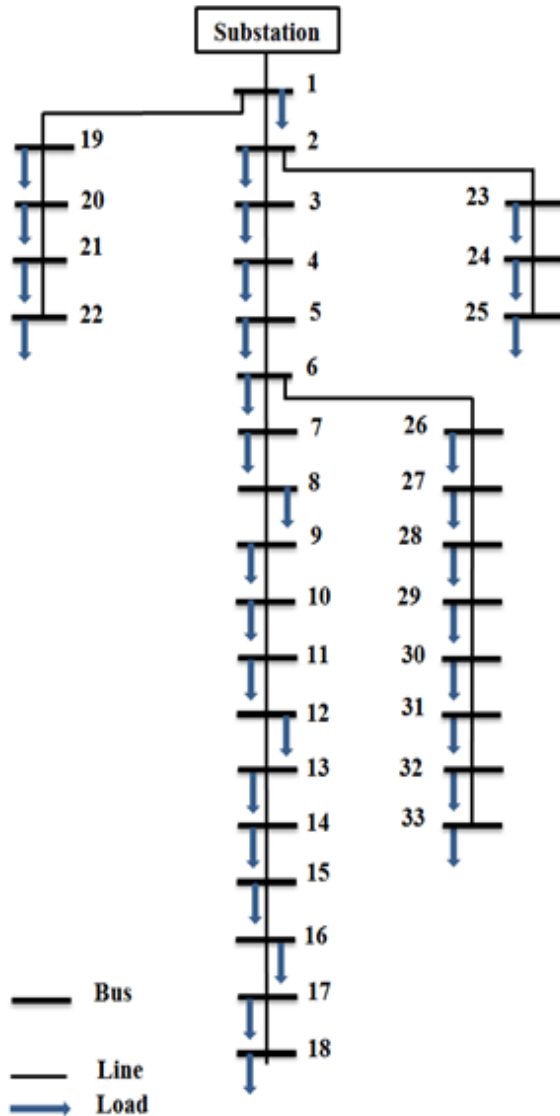
Meiriyanti menganalisis pengaruh penempatan kapasitor bank pada trafo distribusi jaringan 20 kV untuk memperbaiki faktor daya pada Penyulang KH-08, Jl. Pelabuhan, Pusong.

Menggunakan metode group compensation dan simulasi dengan perangkat lunak ETAP, kapasitor bank sebesar 35,33 kVAR ditempatkan pada bus 4. Hasil simulasi menunjukkan penurunan daya reaktif dari 149 kVAR menjadi 114 kVAR pada bus 1 dan dari 52 kVAR menjadi 16 kVAR pada bus 4, serta penurunan arus sebesar 5,68% dan 9,37% secara berturut-turut. Dengan demikian, pemasangan kapasitor bank terbukti efektif dalam mengurangi konsumsi daya reaktif dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi (Meiriyanti & Salahuddin, 2018).

Penelitian ini akan membahas tentang penerapan algoritma firefly pada penentuan lokasi dan kapasitas kapasitor untuk mengurangi rugi daya dan meningkatkan profil tegangan, metode ini akan di ujicoba pada sistem distribusi IEEE 33 Bus

METODE

Penelitian ini menerapkan algoritma Firefly untuk menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor optimal pada jaringan distribusi IEEE 33 bus. Langkah awal yang dilakukan adalah pemodelan sistem jaringan IEEE 33 bus menggunakan perangkat lunak MATLAB, yang mencakup data impedansi saluran, data beban, serta batasan teknis sistem seperti batas tegangan dan kapasitas maksimum kapasitor. Selanjutnya, algoritma Firefly digunakan sebagai metode optimasi, di mana setiap firefly merepresentasikan solusi potensial berupa kombinasi lokasi dan ukuran kapasitor. Fungsi objektif yang digunakan adalah minimisasi rugi-rugi daya aktif dalam sistem, dengan mempertimbangkan pembatasan teknis dan batasan operasional. Proses iterasi dilakukan dengan mengatur parameter algoritma seperti jumlah populasi, koefisien daya tarik, dan faktor peredupan cahaya untuk memperoleh hasil konvergen yang optimal. Evaluasi hasil dilakukan dengan membandingkan profil tegangan dan rugi-rugi daya sistem sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor. Gambar 1 menjelaskan tentang diagram satu garis IEEE 33 bus.



Gambar 1. Diagram Satu Garis IEEE 33 Bus

Batasan - Batasan

Dalam penerapan algoritma Firefly untuk penentuan lokasi dan kapasitas kapasitor, diperlukan pemenuhan sejumlah constraint teknis agar solusi yang dihasilkan layak secara operasional. Constraint utama meliputi batas tegangan pada setiap bus yang harus dijaga dalam rentang 0,95 hingga 1,05 p.u., serta kapasitas minimum dan maksimum kapasitor yang dapat dipasang sesuai spesifikasi sistem. Selain itu, jumlah kapasitor yang dipasang dibatasi untuk mencegah pemasangan berlebih yang dapat menimbulkan overcompensation. Semua solusi juga harus memenuhi keseimbangan daya, memastikan bahwa aliran daya aktif dan reaktif sesuai dengan hukum konservasi energi dalam sistem distribusi.

1. Batas Tegangan

Setiap bus dalam sistem distribusi harus mempertahankan tegangan dalam batas yang diizinkan agar kualitas daya tetap terjaga:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

2. Batas Kapasitas Kapasitor

Kapasitas kapasitor yang dapat dipasang dibatasi berdasarkan standar perangkat dan kemampuan sistem:

$$Q_{\text{cap},\min} \leq Q_{\text{cap},i} \leq Q_{\text{cap},\max}$$

3. Jumlah Maksimum Kapasitor yang Dipasang

Jumlah lokasi penempatan kapasitor dibatasi untuk menghindari pemasangan yang berlebihan dan tidak ekonomis:

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq N_{\max}$$

4. Keseimbangan Daya

Aliran daya dalam sistem harus memenuhi hukum konservasi daya sesuai dengan persamaan aliran daya :

$$P_i^{\text{inj}} = P_i^{\text{load}} - P_i^{\text{loss}}, \quad Q_i^{\text{inj}} = Q_i^{\text{load}} - Q_i^{\text{loss}} + Q_i^{\text{cap}}$$

Dengan mempertimbangkan pengaruh kapasitor terhadap daya reaktif pada tiap bus.

5. Fungsi Objektif

Tujuan utama adalah meminimalkan rugi-rugi daya aktif total dalam sistem:

$$\min \sum P_{\text{loss},\text{total}}$$

Constraint-constraint ini diintegrasikan ke dalam proses iteratif algoritma Firefly untuk mengevaluasi dan memperbaiki solusi selama proses optimasi berlangsung.

Kapasitor

Kombinasi antara lokasi kapasitor dan ukuran kapasitasnya berfungsi sebagai input bagi Algoritma Firefly Biner. Baik variabel lokasi maupun ukuran kapasitor dikodekan dalam format biner. Data input biner untuk penempatan kapasitor dijelaskan pada Tabel I, di mana panjang string biner bergantung pada jumlah total bus dalam jaringan distribusi. Sementara itu, Tabel 1 menyajikan representasi biner dari input ukuran kapasitor.

Tabel 1. Representasi Kode Biner Tiap Bus

No Bus	Kode Biner					
2	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	1	1	0
8	0	0	0	1	1	1
9	0	0	1	0	0	0
10	0	0	1	0	0	1
11	0	0	1	0	1	0
12	0	0	1	0	1	1
13	0	0	1	1	0	0
14	0	0	1	1	0	1
15	0	0	1	1	1	0
16	0	0	1	1	1	1
17	0	1	0	0	0	0
18	0	1	0	0	0	1
19	0	1	0	0	1	0
20	0	1	0	0	1	1
21	0	1	0	1	0	0
22	0	1	0	1	0	1
23	0	1	0	1	1	0
24	0	1	0	1	1	1
25	0	1	1	0	0	0
26	0	1	1	0	0	1
27	0	1	1	0	1	0
28	0	1	1	0	1	1
29	0	1	1	1	0	0
30	0	1	1	1	0	1
31	0	1	1	1	1	0
32	0	1	1	1	1	1
33	1	0	0	0	0	0

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan alokasi kapasitor dengan mengoptimalkan posisi dan kapasitasnya dalam jaringan distribusi. Penentuan lokasi yang tepat dipengaruhi oleh jumlah bus yang terdapat dalam sistem. Ukuran kapasitor yang dipertimbangkan berkisar antara 150 kVAR hingga 2100 kVAR, sebagaimana disajikan pada Tabel 2

Tabel 2. Kode Biner Kapasitas Kapasitor

Kapasitas Kapasitor	Kode Biner					
150	0	0	0	0	0	1
350	0	0	0	0	1	0
450	0	0	0	0	1	1
600	0	0	0	1	0	0
800	0	0	0	1	0	1
900	0	0	0	1	1	0

1050	0	0	0	1	1	1
1200	0	0	1	0	0	0
1350	0	0	1	0	0	1
1500	0	0	1	0	1	0
1650	0	0	1	0	1	1
1800	0	0	1	1	0	0
1950	0	0	1	1	0	1
2100	0	0	1	1	1	0

Binary Firefly Algorithm

Algoritma Firefly merupakan algoritma metaheuristik yang dikembangkan oleh Xin-She Yang pada tahun 2008, yang terinspirasi dari perilaku biologis kunang-kunang dalam menarik satu sama lain melalui intensitas cahaya. Dalam konteks optimasi, intensitas cahaya merepresentasikan kualitas solusi, sedangkan jarak antara kunang-kunang menentukan seberapa besar daya tarik satu individu terhadap individu lainnya. Secara umum, firefly dengan tingkat kecerahan (fitness) yang lebih baik akan menarik firefly lain dengan tingkat kecerahan lebih rendah.

Untuk masalah optimasi diskrit seperti penempatan kapasitor, digunakan modifikasi berupa Binary Firefly Algorithm (BFA). Dalam BFA, posisi solusi direpresentasikan dalam bentuk vektor biner

$$S(x_i) = \frac{1}{1 + \exp(-x_i)}$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if } S(x_i) > r \\ 0, & - \end{cases}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

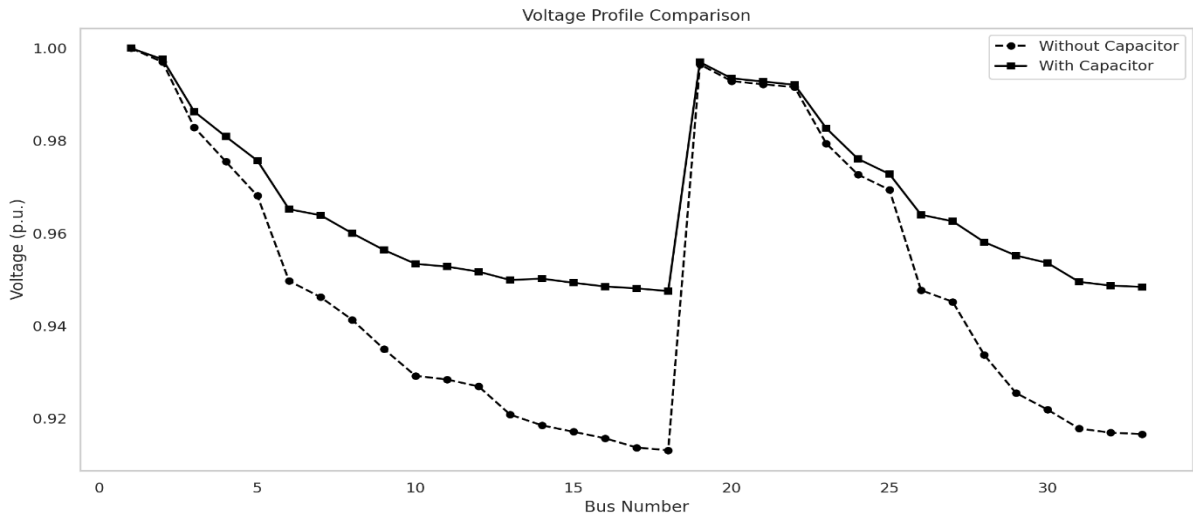
Bagian ini menyajikan hasil simulasi penerapan algoritma Firefly untuk penentuan lokasi dan kapasitas optimal kapasitor pada sistem distribusi radial IEEE 33 bus. Proses simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan parameter teknis sistem, seperti batas tegangan, kapasitas maksimum kapasitor, serta karakteristik beban pada setiap bus. Tujuan utama dari proses optimasi ini adalah untuk meminimalkan rugi-rugi daya aktif dan meningkatkan profil tegangan sistem distribusi. Hasil yang diperoleh dianalisis berdasarkan perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor, serta dievaluasi berdasarkan efektivitas algoritma dalam mencapai solusi yang optimal dan stabil.

Tabel 3. Hasil Analisis

Parameter	Kondisi Awal	BFA
Lokasi Kapasitor	-	6, 8, 30, 13
Ukuran Kapasitor (kVAR)	-	137, 359, 1035, 430
Total kVAR	-	1961
Vminimum (p.u)	0,9136	0,9412
Rugi Daya Aktif (kW)	202,7	142,70
Rugi Daya Reaktif (kVAR)	135.15	97,56
Reduksi Rugi Daya Aktif(%)	-	29,60
Reduksi Rugi Daya Reaktif (%)	-	27,81
(A)Biaya Rugi Daya Aktif (\$)	34.053,6	23.973,6
(B)Biaya Kapasitor (\$/kVAR-year)	-	580,63
Jumlah Biaya (C = A + B)	34.053,6	24.554,23
Biaya Tersimpan (\$) (34.053,6 – C)	0	9.499,37
% Biaya Tersimpan	0 %	27,89%

Tabel 3 menyajikan perbandingan antara kondisi awal sistem tenaga listrik dan kondisi setelah dilakukan optimasi menggunakan metode BF. Dalam kondisi awal, sistem tidak menggunakan kapasitor sehingga tidak ada lokasi atau ukuran kapasitor yang ditentukan. Setelah dioptimasi dengan BFA, kapasitor dipasang pada bus nomor 6, 8, 30, dan 13. Ukuran kapasitor yang dipasang di masing-masing lokasi adalah 137 kVAR, 359 kVAR, 1035 kVAR, dan 430 kVAR, dengan total kapasitas sebesar 1961 kVAR. Tegangan minimum pada kondisi awal adalah 0,9136 p.u, yang meningkat menjadi 0,9412 p.u setelah pemasangan kapasitor. Peningkatan tegangan ini menunjukkan perbaikan profil tegangan sistem. Kehilangan daya aktif (Power Loss) pada sistem berkurang signifikan dari 202,7 kW menjadi 142,70 kW setelah optimasi. Selain

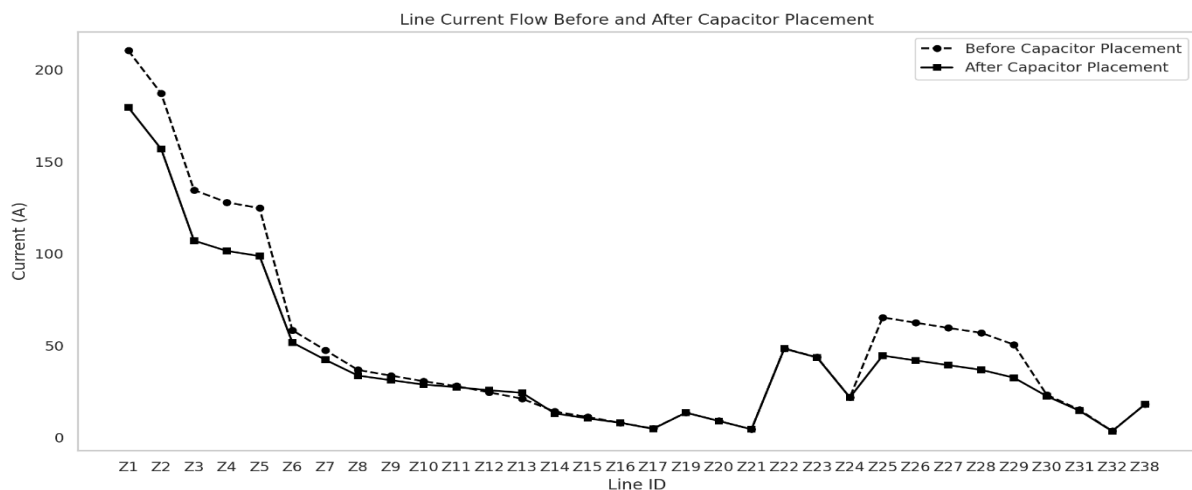
itu, daya reaktif yang hilang juga menurun dari 135,15 kVAR menjadi 97,56 kVAR. Penurunan kehilangan daya aktif mencapai 29,60%, sementara penurunan kehilangan daya reaktif sebesar 27,81%. Biaya tahunan akibat kehilangan daya juga mengalami pengurangan, dari \$34.053,6 menjadi \$23.973,6 setelah optimasi. Biaya tambahan yang timbul akibat investasi kapasitor sebesar \$580,63 per tahun. Total biaya keseluruhan setelah optimasi menjadi \$24.554,23 per tahun, jauh lebih rendah dibandingkan kondisi awal. Optimasi ini memberikan penghematan bersih sebesar \$9.499,37 per tahun. Persentase penghematan biaya yang dicapai adalah 27,89% dari biaya awal. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan BFA efektif dalam mengurangi kehilangan daya dan biaya operasional sistem tenaga listrik.



Gambar 2. Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Penempatan Kapasitor

Gambar 2 menunjukkan perbandingan profil tegangan pada sistem distribusi listrik sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor. Garis putus-putus menggambarkan profil tegangan tanpa kapasitor, sementara garis penuh menunjukkan profil tegangan setelah pemasangan kapasitor. Terlihat bahwa profil tegangan pada seluruh bus meningkat secara signifikan setelah pemasangan kapasitor. Pada kondisi tanpa kapasitor, tegangan mengalami penurunan yang cukup tajam seiring bertambahnya nomor bus. Penurunan tegangan ini dapat menyebabkan kualitas daya yang buruk dan berpotensi menimbulkan gangguan pada peralatan listrik. Setelah optimasi dan pemasangan kapasitor, tegangan pada setiap bus meningkat

mendekati batas ideal, menunjukkan perbaikan yang substansial. Peningkatan tegangan yang merata pada seluruh bus membuktikan bahwa metode optimasi yang digunakan efektif dalam meningkatkan stabilitas sistem. Peningkatan profil tegangan ini juga berkorelasi dengan penurunan kehilangan daya aktif dan reaktif yang sebelumnya telah ditunjukkan. Hasil ini menegaskan bahwa penggunaan kapasitor terdistribusi memberikan dampak positif terhadap efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Secara keseluruhan, pemasangan kapasitor berdasarkan hasil optimasi memberikan solusi yang signifikan dalam meningkatkan kualitas tegangan pada sistem.



Gambar 3. Perbandingan Arus Mengalir Menuju Bus Sebelum dan Sesudah Penempatan Kapasitor

Gambar 3 memperlihatkan perbandingan aliran arus pada setiap saluran sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor dalam sistem distribusi tenaga listrik. Garis putus-putus mewakili kondisi sebelum pemasangan kapasitor, sedangkan garis penuh menunjukkan kondisi setelah pemasangan kapasitor. Secara umum, terjadi penurunan arus secara signifikan pada hampir seluruh saluran setelah kapasitor dipasang. Penurunan arus terbesar terjadi pada saluran-saluran awal seperti Z1 hingga Z5 yang sebelumnya memiliki arus lebih dari 200 A. Setelah pemasangan kapasitor, arus pada saluran-saluran tersebut berkurang menjadi sekitar 150 A. Penurunan arus ini mengindikasikan bahwa pemasangan kapasitor berhasil mengurangi beban aliran arus pada saluran distribusi. Selain itu, pada saluran Z20 hingga Z32, aliran arus juga mengalami pengurangan meskipun nilainya tidak sebesar pada saluran-saluran awal. Penurunan arus di sepanjang saluran distribusi ini

menunjukkan bahwa daya reaktif yang sebelumnya dibutuhkan dari sumber telah digantikan oleh kapasitor yang dipasang di jaringan. Hal ini berkontribusi langsung terhadap pengurangan rugi-rugi daya dan peningkatan efisiensi sistem. Penurunan arus juga berpotensi memperpanjang umur peralatan distribusi karena mengurangi stress termal pada kabel dan peralatan lainnya. Pemasangan kapasitor tidak hanya meningkatkan profil tegangan tetapi juga mengoptimalkan aliran arus pada sistem. Hasil ini membuktikan bahwa metode optimasi penempatan kapasitor yang digunakan efektif dalam meningkatkan kinerja operasional sistem distribusi. Grafik juga menunjukkan bahwa setelah kapasitor terpasang, aliran arus menjadi lebih stabil dan terdistribusi dengan baik pada seluruh saluran. Efisiensi distribusi daya menjadi lebih baik karena arus yang mengalir ke setiap beban tidak lagi memuat beban reaktif yang besar. Secara keseluruhan, pemasangan kapasitor

memberikan dampak positif dalam mengurangi aliran arus berlebih dan meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

PENUTUP

Berdasarkan data pada tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode Binary Firefly Algorithm (BFA) dalam optimasi penempatan dan ukuran kapasitor memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kinerja sistem distribusi tenaga listrik. Hasil optimasi menunjukkan bahwa dengan penempatan kapasitor pada bus 6, 8, 30, dan 13 dengan total kapasitas 1961 kVAR, terjadi peningkatan tegangan minimum dari 0,9136 p.u menjadi 0,9412 p.u. Selain itu, kehilangan daya aktif berkurang dari 202,7 kW menjadi 142,70 kW, yang berarti terjadi pengurangan kehilangan daya sebesar 29,60%. Kehilangan daya reaktif juga mengalami penurunan dari 135,15 kVAR menjadi 97,56 kVAR dengan persentase pengurangan sebesar 27,81%. Pengurangan kehilangan daya ini berdampak langsung pada penurunan biaya tahunan dari \$34.053,6 menjadi \$24.554,23 setelah memperhitungkan biaya investasi kapasitor. Net saving yang diperoleh dari hasil optimasi ini mencapai \$9.499,37 per tahun atau setara dengan penghematan biaya sebesar 27,89%. Hasil ini membuktikan bahwa penerapan metode BFA efektif dalam menurunkan rugi-rugi daya dan biaya operasional sistem distribusi. Dengan demikian, metode optimasi ini dapat direkomendasikan sebagai salah satu solusi dalam peningkatan efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akto, S., Ervianto, E., & Sukma, D. Y. (2014). Kajian Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Metode Genetik Algoritma pada South Balam Feeder 1 PT. Chevron Pacific Indonesia. *Jurnal Online Mahasiswa FTEKNIK*, 2(1), 1–8.
- Al Firdausi, B. I., Auliy, M. A., & Fitriana, F. (2024). Analisis Kebutuhan Bank Kapasitor Untuk Perbaikan Faktor Daya di PT Beras Rajawali Menggunakan Optimal Capacitor Placement ETAP 19. *Jurnal Listrik, Instrumentasi, Dan Elektronika Terapan*, 5(1), 39.
- <https://doi.org/10.22146/juliet.v5i1.89376>
- Ariwata, H., Agustini, N. P., & Setiawan, R. (n.d.). *MENINGKATKAN PROFIL TEGANGAN PADA JARINGAN*. 52–58.
- Dermawan, E., Samsinar, R., & Nurudin. (2019). Studi Optimasi Penempatan dan Ukuran Kapasitor Dengan Metode Genetik Algoritma Pada Distribusi Hotel Starlet. *Jurnal UMJ Semnastek*, 1–8.
- Meiriyanti, & Salahuddin. (2018). Pengaruh Penempatan Kapasitor Bank Pada Trafo Distribusi Jaringan 20 kV Dalam Perbaikan Faktor Daya (Studi Kasus Pada Penyulang Kh-08 Jl . Pelabuhan , Pusong Rayon Krueng Geukueh). *Jurnal Energi Elektrik*, 7(1), 25–30.
- Rosihan, A. N. (2023). Optimasi Penempatan Kapasitor Untuk Memperbaiki Profil Tegangan dan Mereduksi Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi 20kV Penyulang Lambitu , Kalampa , dan. *Skripsi Thesis, Institut Teknologi Nasional Malang*. <http://eprints.itn.ac.id/id/eprint/13238>
- Sah, A. (2021). Analisa Jatuh Tegangan Dan Rugi – Rugi Daya Dengan Penempatan Kapasitor Bank Pada Penyulang Nila Pt. Pln Area Metro. *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, 4(2), 116. <https://doi.org/10.32493/epic.v4i2.14340>
- Saragih, N. I., Lomi, A., & Sulistiawati, I. B. (2018). Penempatan Optimal Kapasitor Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Menggunakan Algoritma Genetika Pada Penyulang Mantuil. *Institut Teknologi Malang*.
- Simamora, Y., Silfia Dewy, M., Irene Silitonga, A., & Isnaini, M. (2023). Penerapan Penempatan dan Penentuan Kapasitas Kapasitor Pada Jaringan Distribusi Tegangan Menengah Kota Medan Menggunakan Electrical Transient Analysis Program. *ELECTRON Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 4(2), 97–103. <https://doi.org/10.33019/electron.v4i2.57>
- Wiwini A Oktaviani, Suhendra, S., Barlian, T., & Apriani, Y. (2023). Penempatan Kapasitor Paralel pada Penyulang Pajajaran GI Jakabaring. *Jurnal Rekayasa Elektro Sriwijaya*, 4(1), 32–37. <https://doi.org/10.36706/jres.v4i1.79>