

STRATEGI PENJADWALAN BATERAI CHARGING DAN DISCHARGING PADA SISTEM SMART GRID BERDASARKAN VARIASI BEBAN MENGGUNAKAN SIMULASI MATLAB

M. Hidayatullah ¹, Efedi S Wirateruna ², Ngatmari ³

^{1,2,3} Universitas Islam Malang

Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Islam

Malang Jl. MT Haryono 193 Malang

Email : hidayat101@unisma.ac.id, efendisw@unisma.ac.id, ngatmari@unisma.ac.id

Abstract

This study discusses the optimization of battery charging and discharging scheduling in a renewable energy-based smart grid system using the Particle Swarm Optimization (PSO) method with MATLAB simulation. The developed system consists of a solar power plant (PLTS), Battery Energy Storage System (BESS), electrical loads, and Energy Management System (EMS). The PSO algorithm is used to determine the optimal battery operation schedule based on the load profile and energy availability. The results show that the implementation of PSO is able to reduce electrical energy costs by 20.41%, reduce peak loads by 21.43%, and reduce energy consumption from the grid by 15.22%. In addition, the battery State of Charge (SOC) profile remains within safe operating limits. Thus, the PSO method is proven effective in improving the efficiency and performance of the smart grid system.

Keywords: Smart grid, PSO, BESS, EMS, MATLAB, battery optimization.

Abstraksi

Penelitian ini membahas optimasi penjadwalan harging dan discharging baterai pada sistem smart grid berbasis energi terbarukan menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO) dengan simulasi MATLAB. Sistem yang dikembangkan terdiri dari PLTS, Battery Energy Storage System (BESS), beban listrik, dan Energy Management System (EMS). Algoritma PSO digunakan untuk menentukan jadwal operasi baterai yang optimal berdasarkan profil beban dan ketersediaan energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan PSO mampu menurunkan biaya energi listrik sebesar 20,41%, mengurangi beban puncak sebesar 21,43%, serta menurunkan konsumsi energi dari grid sebesar 15,22%. Selain itu, profil State of Charge (SOC) baterai tetap berada pada batas operasi yang aman. Dengan demikian, metode PSO terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem smart grid

Kata kunci: Smart grid, PSO, BESS, EMS, MATLAB, optimasi baterai.

I. Pendahuluan

Perkembangan sistem tenaga listrik modern mengalami pergeseran dari jaringan konvensional menuju smart grid yang lebih adaptif, efisien, dan terintegrasi. Smart grid memungkinkan pengelolaan energi secara dinamis melalui integrasi teknologi komunikasi, pemantauan real-time, dan sistem kendali otomatis sehingga operasi sistem tenaga menjadi lebih responsif terhadap perubahan kondisi jaringan (Alyami & Almutairi, 2023).

Peningkatan penggunaan energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), menjadi salah satu solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menekan emisi karbon. Namun, energi surya memiliki karakteristik intermiten karena daya keluaran dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas radiasi matahari. Ketidakstabilan daya tersebut

dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan kebutuhan beban sehingga

berpotensi menimbulkan fluktuasi tegangan, peningkatan rugi-rugi daya, dan beban puncak pada sistem distribusi listrik (Zhang et al., 2022).

Untuk menjaga stabilitas dan efisiensi operasi smart grid, diperlukan sistem pengelolaan energi yang mampu mengatur aliran daya secara optimal. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah Battery Energy Storage System (BESS), yang berfungsi menyimpan energi saat produksi berlebih dan menyalurkannya kembali ketika kebutuhan daya meningkat (Abdelaziz et al., 2021). Efektivitas penggunaan baterai sangat dipengaruhi oleh strategi penjadwalan charging dan discharging agar operasi baterai tetap optimal dan tidak mempercepat degradasi kapasitas penyimpanan.

Energy Management System (EMS) dikembangkan untuk mengatur distribusi energi antara sumber pembangkitan, baterai, dan beban listrik secara terintegrasi. Dalam implementasinya, berbagai metode optimasi

digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem, salah satunya adalah Particle Swarm Optimization (PSO). Metode PSO memiliki kemampuan konvergensi yang baik dan proses komputasi yang relatif sederhana dalam menyelesaikan permasalahan optimasi nonlinier pada sistem tenaga (Alyami & Almutairi, 2023).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan model penjadwalan baterai berbasis algoritma PSO pada sistem smart grid menggunakan simulasi MATLAB. Penelitian dilakukan untuk menganalisis pengaruh optimasi terhadap efisiensi energi, profil state of charge (SOC) baterai, dan pengurangan beban puncak pada sistem tenaga listrik berbasis energi terbarukan.

II Metode penelitian

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi untuk menganalisis performa sistem smart grid melalui pemodelan matematis dan komputasi numerik (Creswell & Creswell, 2021). Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian rekayasa sistem (*engineering research*) yang berfokus pada perancangan, implementasi, dan evaluasi model optimasi penjadwalan baterai menggunakan algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) (Sommerville, 2020). Metode simulasi dipilih karena sistem smart grid memiliki kompleksitas tinggi dan melibatkan banyak variabel operasional sehingga lebih aman dan fleksibel untuk diuji dalam lingkungan simulasi (Gellings, 2022).

Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, perancangan model sistem, formulasi matematis, implementasi algoritma optimasi, simulasi sistem, serta analisis hasil optimasi.

3.2 Arsitektur Sistem Penelitian

Arsitektur sistem penelitian menggambarkan integrasi komponen smart grid yang digunakan dalam simulasi. Sistem dirancang untuk menghubungkan pembangkit energi, penyimpanan energi, dan beban listrik dalam satu sistem yang dikendalikan oleh *Energy Management System* (EMS)

Komponen utama sistem terdiri dari:

- Sumber pembangkit energi utama
- Pembangkit energi terbarukan (PLTS)
- *Battery Energy Storage System* (BESS)
- Beban listrik
- *Energy Management System* (EMS)
- Algoritma Particle Swarm Optimization (PSO)

EMS berfungsi melakukan monitoring kondisi sistem dan menentukan distribusi daya secara optimal berdasarkan kondisi beban dan ketersediaan energi terbarukan. Model sistem

dirancang secara modular agar setiap komponen dapat dianalisis secara independen maupun terintegrasi selama simulasi berlangsung.

3.3 Model Smart Grid yang Digunakan

Model smart grid yang digunakan merepresentasikan sistem tenaga listrik skala mikro (*microgrid*) yang mengintegrasikan sumber energi konvensional dan energi terbarukan. Sistem dirancang dengan profil beban harian yang berubah terhadap waktu serta dilengkapi sistem penyimpanan energi berbasis baterai.

Karakteristik model smart grid meliputi:

- Profil beban listrik bersifat dinamis
- Output energi terbarukan bersifat variabel
- Sistem dilengkapi penyimpanan energi baterai
- EMS mengatur operasi sistem
- Optimasi dilakukan menggunakan algoritma PSO

Model sistem dibangun menggunakan persamaan keseimbangan daya antara pembangkitan, penyimpanan energi, dan konsumsi beban. Simulasi dilakukan secara *time-series* untuk merepresentasikan perubahan kondisi operasi sistem secara periodik.

3.4 Variabel dan Parameter Penelitian

Penelitian ini menggunakan variabel keputusan, variabel keadaan, dan parameter sistem untuk mendukung proses optimasi. Variabel keputusan berupa jadwal *charging* dan *discharging* baterai pada setiap interval waktu simulasi.

Variabel keadaan meliputi:

- *State of Charge* (SOC) baterai
- Daya beban listrik
- Daya pembangkitan energi terbarukan
- Aliran daya sistem

Parameter sistem yang digunakan meliputi kapasitas baterai, batas minimum dan maksimum SOC, efisiensi *charging–discharging*, serta interval waktu simulasi. Parameter tersebut digunakan untuk menjaga operasi baterai tetap berada pada kondisi aman dan optimal.

3.5 Perangkat Lunak dan Lingkungan Simulasi

Simulasi penelitian dilakukan menggunakan MATLAB dan Simulink sebagai lingkungan pemodelan sistem dinamis. MATLAB digunakan karena memiliki kemampuan komputasi numerik dan toolbox optimasi yang mendukung analisis sistem tenaga listrik modern.

Algoritma PSO diimplementasikan menggunakan skrip MATLAB untuk menentukan jadwal operasi baterai yang optimal. Simulasi dijalankan secara *time-series* sehingga perubahan kondisi beban dan pembangkitan energi terbarukan dapat dianalisis secara periodik selama operasi sistem berlangsung.

3.6 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis untuk memastikan model yang dikembangkan dapat dianalisis dan dievaluasi dengan baik. Tahapan penelitian terdiri dari:

1. Studi Literatur

Mengkaji penelitian terkait smart grid, BESS, EMS, dan algoritma PSO.

2. Perancangan Model Smart Grid

Membuat model sistem yang terdiri dari sumber energi, baterai, dan beban listrik pada MATLAB/Simulink.

3. Perumusan Model Matematis

Menyusun persamaan keseimbangan daya dan batas operasi baterai sebagai dasar optimasi.

4. Implementasi Algoritma PSO

Mengintegrasikan algoritma PSO untuk menentukan jadwal operasi baterai secara optimal.

5. Simulasi Sistem

Menjalankan simulasi dengan beberapa skenario operasi untuk memperoleh data performa sistem.

6. Analisis dan Evaluasi Hasil

Menganalisis hasil simulasi berdasarkan efisiensi energi, profil SOC, dan pengurangan beban puncak sistem.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Pada bab ini disajikan hasil simulasi sistem smart grid yang telah dimodelkan, serta analisis terhadap pengaruh penjadwalan baterai menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Hasil penelitian ditunjukkan dalam bentuk grafik dan tabel yang menggambarkan hubungan antara variabel waktu sebagai variabel bebas terhadap parameter sistem seperti daya grid, beban, dan State of Charge (SOC) sebagai variabel terikat.

Setiap hasil simulasi dianalisis dengan mengacu pada konsep manajemen energi, strategi peak shaving, serta efisiensi biaya energi listrik berdasarkan skema time-of-use. Dengan demikian, pembahasan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga menjelaskan keterkaitan antara teori dan hasil simulasi yang diperoleh.

4.1.1 Data dan Parameter Sistem

Sistem Bagian ini menyajikan data input dan parameter yang digunakan dalam simulasi sistem smart grid. Sistem yang dimodelkan terdiri dari beban listrik, sumber energi terbarukan berupa pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), sistem penyimpanan energi baterai (BESS), serta suplai dari jaringan listrik (grid). Data yang digunakan meliputi profil beban harian, profil daya PLTS, harga listrik berbasis waktu (time-of-use),

parameter baterai, dan parameter algoritma Particle Swarm Optimization (PSO).

a. Profil Beban Harian

Profil beban harian digunakan untuk merepresentasikan variasi konsumsi energi listrik selama 24 jam. Beban cenderung rendah pada malam hari dan meningkat pada siang hingga malam hari, dengan puncak beban terjadi pada periode malam

Table 1 Profil Beban Harian

Jam	Beban (kW)
0	50
1	48
2	45
3	43
4	42
5	45
6	55
7	65
8	75
9	85
10	95
11	105
12	110
13	108
14	105
15	110
16	115
17	120
18	130
19	135
20	140
21	130
22	110
23	80

Pola ini menunjukkan karakteristik umum sistem kelistrikan, di mana konsumsi energi meningkat seiring aktivitas pengguna pada siang hingga malam hari. Profil beban tersebut digunakan sebagai data input dalam proses simulasi dan optimasi sistem smart grid.

b. Profil Daya PLTS (PV)

Profil daya PLTS menggambarkan karakteristik produksi energi dari sistem photovoltaic yang bergantung pada intensitas radiasi matahari.

Table 4.2 Profil Daya PLTS (PV)

Jam	Daya PV (kW)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	10
7	25
8	40
9	60
10	75
11	85
12	90
13	85
14	75
15	60
16	40
17	20
18	5
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0

Berdasarkan Tabel 4.1.1, beban cenderung rendah pada dini hari (42–50 kW pada pukul 00.00–05.00), kemudian meningkat secara bertahap dan mencapai puncak sebesar 140 kW pada pukul 20.00, sebelum kembali menurun pada malam hari.

Pola ini menunjukkan karakteristik umum sistem kelistrikan, di mana konsumsi energi meningkat seiring aktivitas pengguna, khususnya pada periode sore hingga malam hari sebagai waktu terjadinya beban puncak. Perbedaan antara beban minimum dan maksimum menunjukkan adanya fluktuasi beban yang signifikan. Dalam penelitian ini, profil beban digunakan sebagai data input dalam proses simulasi dan optimasi untuk merepresentasikan kebutuhan energi sepanjang waktu.

c. Harga Listrik (Time-of-Use)

Harga listrik dalam simulasi ini menggunakan skema Time-of-Use (TOU), yaitu tarif listrik yang berbeda berdasarkan waktu pemakaian energi.

Table 4.3 Harga Listrik (Time-of-Use)

Jam	Harga (Rp/kWh)
00–05	1000
06–16	1500
17–21	2000
22–23	1200

Berdasarkan Tabel 4.1.3, tarif listrik dibagi menjadi beberapa periode waktu, yaitu periode beban rendah (00.00–05.00) sebesar 1000 Rp/kWh, periode beban sedang (06.00–16.00) sebesar 1500 Rp/kWh, periode beban puncak (17.00–21.00) sebesar 2000 Rp/kWh, serta periode transisi malam (22.00–23.00) sebesar 1200 Rp/kWh. Dapat diamati bahwa tarif tertinggi terjadi pada periode 17.00–21.00, sedangkan tarif terendah terjadi pada periode dini hari. Dalam penelitian ini, skema TOU digunakan sebagai data input dalam simulasi untuk merepresentasikan variasi biaya energi listrik sepanjang waktu.

d. Parameter Baterai (Battery Energy Storage System)

Parameter baterai digunakan untuk mendefinisikan batas operasional sistem penyimpanan energi (*Battery Energy Storage System*/BESS) dalam simulasi. Parameter ini berfungsi sebagai kendala (*constraints*) dalam proses optimasi agar operasi baterai tetap berada dalam kondisi aman, efisien, dan tidak merusak umur baterai.

Table 4.4 Parameter Baterai (Battery Energy Storage System)

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas baterai	100	kWh
SOC minimum	20	%
SOC maksimum	90	%
Efisiensi charging (η_{ch})	0.95	-
Efisiensi discharging (η_{dis})	0.95	-
Daya maksimum charging	50	kW
Daya maksimum discharging	50	kW

Berdasarkan Tabel diatas, kapasitas baterai ditetapkan sebesar 100 kWh. Batas *State of Charge* (SOC) ditentukan antara 20% sebagai batas minimum dan 90% sebagai batas maksimum. Pembatasan ini bertujuan untuk menghindari kondisi *over-discharge* dan *over-charge* yang dapat mempercepat degradasi baterai. Efisiensi proses *charging* (η_{ch}) dan *discharging* (η_{dis}) masing-masing sebesar 0,95.

Hal ini menunjukkan bahwa terdapat rugi-rugi energi sebesar 5% dalam setiap proses

pengisian maupun pengosongan baterai. Selain itu, daya maksimum untuk proses *charging* dan *discharging* masing-masing dibatasi sebesar 50 kW. Batas ini menentukan laju maksimum energi yang dapat masuk dan keluar dari baterai dalam setiap interval waktu. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai batasan dalam proses optimasi, sehingga algoritma tidak hanya berfokus pada minimisasi biaya, tetapi juga mempertimbangkan aspek teknis dan keamanan sistem baterai. Dengan demikian, strategi penjadwalan yang dihasilkan menjadi lebih realistis dan dapat diterapkan pada sistem *smart grid*.

e. Parameter Particle Swarm Optimization (PSO)

Parameter *Particle Swarm Optimization* (PSO) digunakan untuk mengatur proses pencarian solusi optimal dalam penjadwalan charging dan discharging baterai pada sistem *smart grid*.

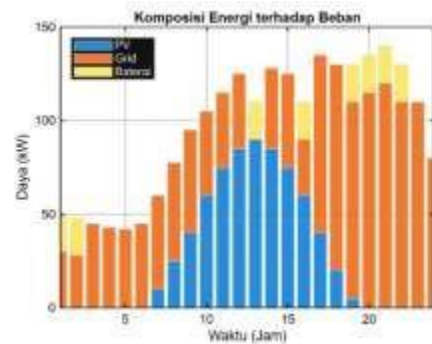
Parameter	Nilai
Jumlah partikel	30
Iterasi maksimum	100
Inertia weight (w)	0.7
Koefisien kognitif (c1)	1.5
Koefisien sosial (c2)	1.5

Berdasarkan tabel, jumlah partikel sebanyak 30 digunakan untuk merepresentasikan kandidat solusi dalam proses pencarian. Iterasi maksimum sebesar 100 menunjukkan batas pengulangan algoritma dalam mencapai solusi optimal. Nilai inertia weight (w), koefisien kognitif (c1), dan koefisien sosial (c2) digunakan untuk mengontrol pergerakan partikel dalam ruang pencarian solusi. Dalam penelitian ini, parameter PSO digunakan sebagai pengaturan dalam proses simulasi optimasi untuk memperoleh solusi penjadwalan baterai yang optimal.

4.1.2 Hasil Simulasi Tanpa Optimasi

Pada bagian ini disajikan hasil simulasi sistem *smart grid* tanpa penerapan metode optimasi. Simulasi dilakukan selama periode 24 jam untuk melihat karakteristik operasi sistem berdasarkan variasi beban dan pembangkitan energi terbarukan. Hasil simulasi ditampilkan dalam beberapa grafik yang merepresentasikan kondisi aliran daya, pemanfaatan energi, serta kinerja baterai dalam sistem:

a. Grafik Komposisi Sumber Energi terhadap Beban

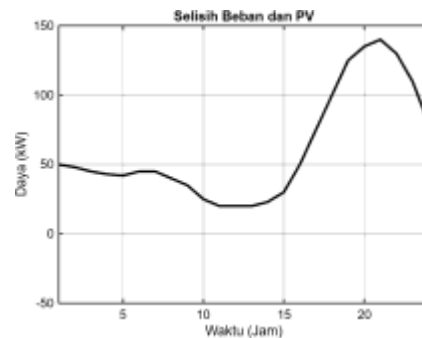


Gambar 1 Komposisi Sumber Energi terhadap Beban

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontribusi daya dari PV meningkat mulai pukul 07.00 dan mencapai maksimum sekitar 90 kW pada pukul 12.00–13.00, sebelum akhirnya menurun hingga mendekati nol pada malam hari. Sebaliknya, daya dari grid berada pada rentang 30 kW hingga 120 kW dan menjadi sumber utama dalam memenuhi kebutuhan beban, terutama pada saat tidak terdapat produksi energi dari PV.

Kontribusi baterai relatif kecil, yaitu sekitar 0 hingga 20 kW, sehingga belum mampu memberikan pengaruh signifikan terhadap pemenuhan beban. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem belum mampu mengoptimalkan pemanfaatan energi lokal, sehingga ketergantungan terhadap grid masih tinggi. Hal ini juga mengindikasikan belum adanya strategi koordinasi energi antar komponen sistem.

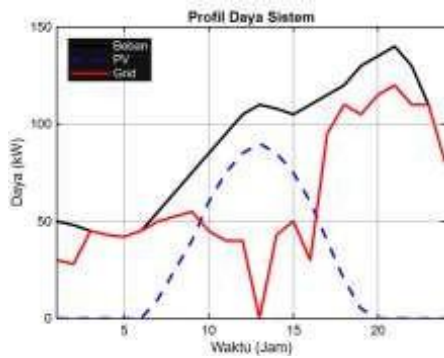
b. Grafik Selisih Beban dan Daya PV



Gambar 2 Grafik Selisih Beban dan Daya PV

Selisih antara beban dan daya PV menunjukkan nilai minimum sekitar 20 kW pada siang hari dan meningkat hingga sekitar 140 kW pada malam hari. Nilai selisih yang selalu positif menunjukkan bahwa daya PV tidak pernah sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhan beban. Kondisi defisit energi ini menyebabkan sistem harus terus bergantung pada grid. Semakin besar selisih ini, maka semakin besar pula beban yang harus ditanggung oleh grid, yang berpotensi meningkatkan biaya energi dan beban puncak sistem.

c. Grafik Profil Daya Sistem Tanpa Optimasi

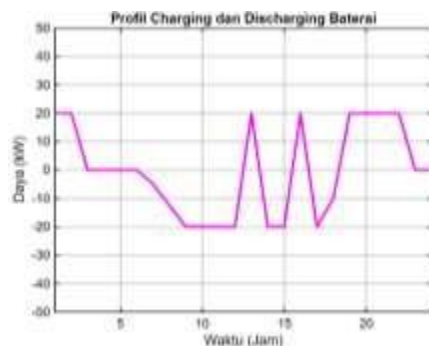


Gambar 3 Profil Daya Sistem Tanpa Optimasi

Profil daya menunjukkan bahwa beban sistem berada pada rentang 50 kW hingga 140 kW, dengan puncak beban terjadi pada malam hari. Daya PV mencapai maksimum sekitar 90 kW, sedangkan daya grid berfluktuasi antara 30 kW hingga 120 kW mengikuti perubahan beban.

Terlihat bahwa saat daya PV menurun, daya grid meningkat secara signifikan tanpa adanya mekanisme pengendalian. Hal ini menunjukkan bahwa sistem belum memiliki strategi load leveling atau peak shaving. Akibatnya, beban puncak tidak dapat ditekan dan sistem cenderung beroperasi secara reaktif, bukan optimal.

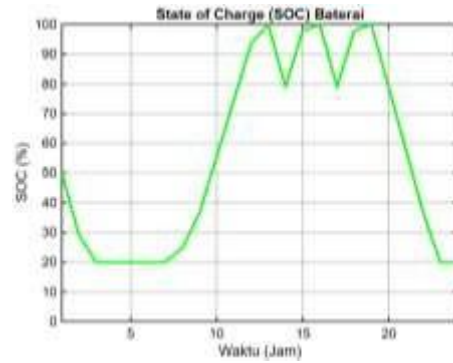
d. Grafik Profil Charging dan Discharging Baterai



Gambar 4 Profil Charging dan Discharging Baterai

Baterai beroperasi pada rentang daya sekitar -20 kW hingga +20 kW, dengan pola charging dan discharging yang tidak konsisten. Charging tidak selalu terjadi saat tersedia energi berlebih dari PV, dan discharging tidak selalu dilakukan saat beban tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa operasi baterai belum berbasis strategi, melainkan hanya mengikuti kondisi sistem secara pasif. Akibatnya, potensi baterai sebagai alat untuk mereduksi beban puncak dan meningkatkan efisiensi energi belum dimanfaatkan secara optimal.

e. Grafik State of Charge (SOC) Baterai



Gambar 5 State of Charge (SOC) Baterai

Nilai SOC baterai berada pada rentang 20% hingga 100%, dengan fluktuasi yang cukup signifikan sepanjang waktu simulasi. SOC mencapai nilai maksimum pada siang hari akibat proses charging, dan menurun hingga sekitar 20% pada periode tertentu. Namun, perubahan SOC tidak menunjukkan pola pengelolaan yang terarah, sehingga baterai tidak dimanfaatkan secara strategis untuk mendukung operasi sistem.

4.1.3 Hasil Simulasi Dengan PSO

Pada bagian ini disajikan hasil simulasi sistem smart grid setelah diterapkan metode optimasi menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO). Optimasi dilakukan untuk mengatur penjadwalan charging dan discharging baterai sehingga dapat meningkatkan efisiensi sistem, mengurangi ketergantungan terhadap grid, serta menekan beban puncak.

a. Grafik Profil Daya Grid Hasil Optimasi PSO



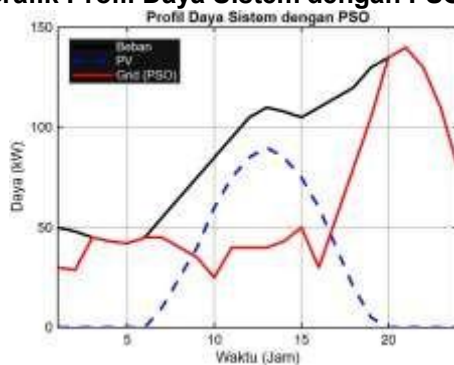
Gambar 6 Profil Daya Grid Hasil Optimasi PSO

Berdasarkan grafik, daya grid setelah optimasi berada pada rentang sekitar 30 kW hingga 140 kW. Pada periode beban rendah hingga menengah (pukul 01.00–15.00), daya grid relatif stabil pada kisaran 30–50 kW, yang menunjukkan adanya pengurangan fluktuasi dibandingkan kondisi tanpa optimasi.

Namun, pada periode beban puncak (sekitar pukul 18.00–21.00), daya grid meningkat hingga sekitar 140 kW. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun optimasi dilakukan, grid tetap digunakan untuk memenuhi kebutuhan saat beban sangat tinggi. Secara umum, PSO mampu membuat penggunaan daya grid menjadi lebih

terkendali pada periode non-puncak.

b. Grafik Profil Daya Sistem dengan PSO

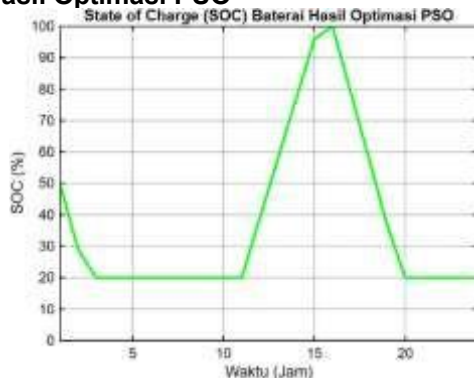


Gambar 7 Profil Daya Sistem dengan PSO

Profil daya sistem menunjukkan bahwa beban tetap berada pada rentang sekitar 50 kW hingga 140 kW, sedangkan daya PV mencapai maksimum sekitar 90 kW pada siang hari. Perbedaan utama dibandingkan tanpa optimasi terletak pada penggunaan daya grid, di mana pada siang hari (pukul 10.00–14.00), daya grid dapat ditekan hingga sekitar 25–40 kW, lebih rendah dibandingkan sebelumnya.

Hal ini menunjukkan bahwa energi dari PV dan baterai mulai dimanfaatkan untuk mengurangi penggunaan grid. Dengan demikian, terjadi peningkatan efisiensi pemanfaatan energi lokal dalam sistem.

c. Grafik Profil State of Charge SOC Baterai Hasil Optimasi PSO



Gambar 8 Profil State of Charge SOC Baterai Hasil Optimasi PSO

Nilai SOC baterai berada pada rentang sekitar 20% hingga 100%, namun dengan pola yang lebih terarah dibandingkan tanpa optimasi. Pada periode awal hingga siang hari (pukul 03.00–10.00), SOC dijaga pada level minimum sekitar 20%, kemudian meningkat secara signifikan hingga mencapai 100% pada pukul 15.00–16.00 akibat proses charging.

Setelah itu, SOC menurun kembali hingga sekitar 20% pada malam hari, yang menunjukkan bahwa baterai digunakan untuk membantu memenuhi beban saat energi dari PV tidak tersedia. Pola ini menunjukkan bahwa PSO berhasil mengatur operasi baterai secara lebih

strategis, yaitu mengisi saat energi tersedia dan mengosongkan saat dibutuhkan.

d. Grafik Perbandingan Penggunaan Daya Grid



Gambar 9 Perbandingan Penggunaan Daya Grid

Grafik perbandingan menunjukkan perbedaan penggunaan daya grid antara kondisi tanpa optimasi dan dengan optimasi PSO. Pada periode siang hari, daya grid dengan PSO terlihat lebih rendah dibandingkan tanpa optimasi, yang menunjukkan adanya pengurangan penggunaan energi dari grid.

Sebaliknya, pada periode malam hari, nilai daya grid relatif mendekati atau sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa optimasi, karena sistem memprioritaskan pemanfaatan energi tersimpan terlebih dahulu.

4.1.4 Rekapitulasi Hasil

Pada bagian ini disajikan rekapitulasi hasil simulasi sistem sebelum dan sesudah optimasi menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Perbandingan dilakukan terhadap beberapa parameter utama sistem.

a. Grafik Perbandingan Kinerja Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi

Grafik ini menunjukkan perbandingan kinerja sistem antara kondisi tanpa optimasi dan dengan optimasi PSO berdasarkan beberapa parameter utama.



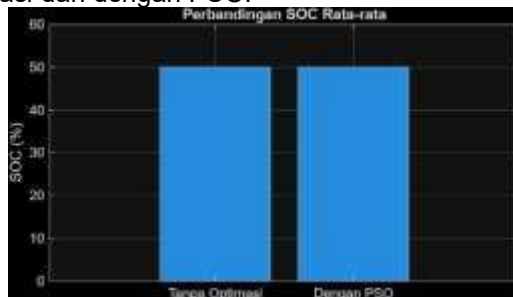
Gambar 10 Perbandingan Kinerja Sistem Sebelum dan Sesudah Optimasi

Berdasarkan hasil simulasi, penerapan PSO memberikan peningkatan kinerja sistem yang signifikan. Biaya energi menurun dari Rp 2.335.500 menjadi Rp 1.858.800, atau sebesar 20,41%. Selain itu, nilai peak load mengalami

penurunan dari 140 kW menjadi 110 kW atau sebesar 21,43%, yang merupakan penurunan terbesar di antara parameter lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa PSO efektif dalam melakukan peak shaving melalui pengaturan operasi baterai pada saat beban tinggi. Energi yang diambil dari grid juga menurun dari 1476,00 kWh menjadi 1251,30 kWh atau sebesar 15,22%, yang mengindikasikan peningkatan pemanfaatan energi lokal dari PV dan baterai.

b. Grafik Perbandingan SOC Rata-rata

Grafik ini menunjukkan perbandingan nilai SOC rata-rata baterai antara kondisi tanpa optimasi dan dengan PSO.

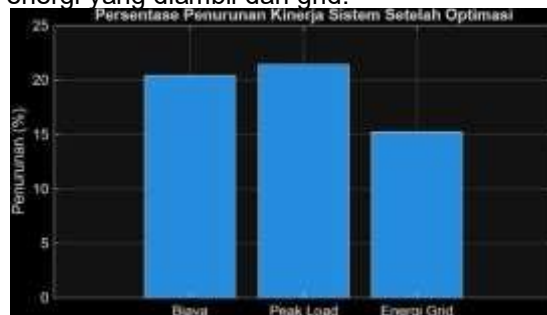


Gambar 11 Perbandingan SOC Rata-rata

Nilai SOC rata-rata pada kedua kondisi berada pada kisaran 50%, yang menunjukkan bahwa jumlah energi tersimpan dalam baterai relatif tidak berubah. Namun demikian, perbedaan utama terletak pada pola operasional baterai. Pada kondisi tanpa optimasi, baterai cenderung tidak dimanfaatkan secara optimal. Sebaliknya, dengan PSO, baterai beroperasi secara lebih dinamis sesuai kebutuhan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi tidak bertujuan meningkatkan kapasitas energi, melainkan mengoptimalkan waktu penggunaan energi.

c. Grafik Persentase Penurunan Kinerja Sistem Setelah Optimasi

Grafik ini menunjukkan persentase penurunan beberapa parameter utama sistem setelah diterapkannya metode *Particle Swarm Optimization* (PSO), yaitu biaya energi, *peak load*, dan energi yang diambil dari grid.



Gambar 12 Persentase Penurunan Kinerja Sistem Setelah Optimasi

Persentase penurunan parameter menunjukkan bahwa:

- Peak load: 21,43%
- Biaya energi: 20,41%
- Energi grid: 15,22%

Penurunan terbesar pada peak load menunjukkan bahwa PSO lebih efektif dalam meratakan beban dibandingkan mengurangi konsumsi energi total. Strategi ini berkaitan dengan pemanfaatan baterai untuk mengurangi beban pada periode puncak serta memanfaatkan energi saat tarif rendah (time-of-use).

d. Tabel Rekapitulasi Hasil Simulasi

Tabel ini menyajikan perbandingan hasil simulasi sistem *smart grid* sebelum dan sesudah penerapan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) berdasarkan beberapa parameter utama:

Table 5 Rekapitulasi Hasil Simulasi

Parameter	Tanpa Optimasi	Dengan PSO	Perubahan
Biaya Energi (Rp)	2.335.500	1.858.800	20,41 %
Peak Load (kW)	140	110	21,43 %
Energi Grid (kWh)	1476,00	1251,30	15,22 %
SOC Rata-rata (%)	50,00	50,00	-

Berdasarkan tabel, biaya energi mengalami penurunan dari Rp 2.335.500 menjadi Rp 1.858.800 atau sebesar 20,41%, yang menunjukkan bahwa penerapan PSO mampu meningkatkan efisiensi biaya melalui pengaturan penggunaan energi yang lebih optimal. Selain itu, nilai peak load menurun dari 140 kW menjadi 110 kW atau sebesar 21,43%, yang merupakan penurunan terbesar di antara parameter lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa metode PSO sangat efektif dalam mereduksi beban puncak melalui strategi pemanfaatan baterai pada saat beban tinggi.

Selanjutnya, energi yang diambil dari grid juga mengalami penurunan dari 1476,00 kWh menjadi 1251,30 kWh atau sebesar 15,22%, yang mengindikasikan adanya peningkatan pemanfaatan energi lokal dari PLTS dan baterai. Sementara itu, nilai SOC rata-rata tetap berada pada angka 50%, yang menunjukkan bahwa secara keseluruhan jumlah energi yang tersimpan dalam baterai tidak mengalami perubahan signifikan. Namun demikian, kondisi ini tidak menunjukkan bahwa optimasi tidak berpengaruh, melainkan menegaskan bahwa PSO lebih berfokus pada pengaturan waktu penggunaan energi (charging dan discharging) daripada meningkatkan jumlah energi yang disimpan.

Secara keseluruhan, hasil rekapitulasi ini menunjukkan bahwa penerapan metode PSO mampu meningkatkan kinerja sistem smart grid secara signifikan, terutama dalam menurunkan biaya energi, mereduksi beban puncak, serta mengurangi ketergantungan terhadap grid melalui pengelolaan energi yang lebih efisien dan adaptif.



Gambar 13 Perbandingan Total Biaya Energi

Gambar diatas menunjukkan perbandingan total biaya energi antara kondisi tanpa optimasi dan dengan optimasi menggunakan metode PSO. Terlihat bahwa total biaya energi pada kondisi dengan PSO lebih rendah dibandingkan tanpa optimasi, yaitu dari sekitar Rp 2.335.500 menjadi Rp 1.858.800. Hal ini memperkuat hasil pada tabel bahwa optimasi PSO efektif dalam menekan biaya energi melalui pengaturan penggunaan energi yang lebih efisien.

4.2 Pembahasan

Pada bagian ini dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang telah diperoleh pada Subbab 4.1 Pembahasan difokuskan pada pengaruh penerapan metode Particle Swarm Optimization (PSO) terhadap penjadwalan charging dan discharging baterai serta kinerja sistem smart grid.

4.2.1 Analisis Penjadwalan Baterai

Penjadwalan baterai dalam sistem smart grid pada penelitian ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik data input yang digunakan, sebagaimana dijelaskan pada Subbab 4.1.1. Data tersebut meliputi profil beban harian, profil daya PLTS, harga listrik berbasis time-of-use, serta parameter teknis baterai. Kombinasi dari keempat aspek ini membentuk dasar pengambilan keputusan dalam menentukan kapan baterai harus melakukan charging dan discharging. Oleh karena itu, analisis penjadwalan baterai tidak dapat dipisahkan dari pola variasi beban, ketersediaan energi, serta fluktuasi harga listrik sepanjang waktu.

Berdasarkan profil beban harian, diketahui bahwa konsumsi energi listrik cenderung rendah pada dini hari dan meningkat secara bertahap hingga mencapai puncak pada malam hari. Pola ini memberikan indikasi bahwa kebutuhan energi tertinggi terjadi pada periode ketika aktivitas pengguna meningkat. Dalam konteks

penjadwalan baterai, kondisi ini seharusnya mendorong baterai untuk melakukan discharging pada periode beban puncak, sehingga dapat membantu mengurangi ketergantungan terhadap grid dan menurunkan beban maksimum sistem.

Selanjutnya, profil daya PLTS menunjukkan bahwa produksi energi hanya tersedia pada siang hari dengan puncak sekitar tengah hari. Hal ini menciptakan peluang terjadinya surplus energi pada saat beban belum mencapai puncaknya. Dalam strategi penjadwalan yang optimal, energi berlebih dari PLTS seharusnya dimanfaatkan untuk melakukan charging baterai. Dengan demikian, energi yang tersimpan dapat digunakan kembali pada periode malam hari saat pembangkitan PLTS tidak tersedia.

Dari sisi harga listrik berbasis time-of-use, terlihat bahwa tarif listrik tertinggi terjadi pada periode malam hari, yang juga bertepatan dengan beban puncak. Sebaliknya, tarif listrik terendah berada pada dini hari. Kondisi ini memperkuat strategi penjadwalan baterai, di mana pengisian energi sebaiknya dilakukan pada saat tarif rendah, sedangkan penggunaan energi baterai (discharging) dilakukan saat tarif tinggi. Dengan pendekatan ini, sistem tidak hanya mengoptimalkan aliran energi, tetapi juga mampu menekan biaya operasional secara keseluruhan.

Parameter teknis baterai juga memberikan batasan penting dalam proses penjadwalan. Kapasitas baterai sebesar 100 kWh, dengan batas SOC antara 20% hingga 90%, mengharuskan sistem untuk menjaga operasi baterai tetap dalam rentang aman. Selain itu, efisiensi charging dan discharging sebesar 95% menunjukkan adanya rugi-rugi energi yang perlu diperhitungkan dalam proses optimasi. Batas daya maksimum charging dan discharging sebesar 50 kW juga membatasi laju pertukaran energi, sehingga penjadwalan harus dilakukan secara bertahap dan tidak dapat bersifat instan.

Jika dikaitkan dengan kondisi tanpa optimasi pada Subbab 4.1.2, penjadwalan baterai belum menunjukkan pola yang terarah. Baterai cenderung beroperasi secara pasif tanpa mempertimbangkan waktu terbaik untuk charging maupun discharging. Akibatnya, potensi energi dari PLTS tidak dimanfaatkan secara maksimal, dan baterai tidak berkontribusi signifikan dalam mereduksi beban puncak maupun biaya energi.

Sebaliknya, dengan adanya optimasi menggunakan metode PSO pada Subbab 4.1.3, penjadwalan baterai menjadi lebih strategis. Baterai cenderung melakukan charging pada periode siang hari saat energi PLTS tersedia, dan melakukan discharging pada malam hari saat beban dan tarif listrik tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa algoritma PSO mampu mengintegrasikan informasi dari profil beban, produksi energi, dan

harga listrik untuk menghasilkan keputusan penjadwalan yang lebih optimal.

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa keberhasilan penjadwalan baterai sangat bergantung pada kesesuaian antara data input sistem dan strategi optimasi yang digunakan. Dengan memanfaatkan variasi beban, ketersediaan energi terbarukan, serta skema tarif listrik, baterai dapat berfungsi tidak hanya sebagai penyimpan energi, tetapi juga sebagai alat untuk meningkatkan efisiensi sistem, mengurangi beban puncak, dan menekan biaya energi dalam sistem smart grid.

4.2.2 Analisis Kinerja Sistem (Grid, Peak Load, Biaya)

Analisis kinerja sistem pada kondisi tanpa optimasi dilakukan berdasarkan hasil simulasi yang telah disajikan pada Subbab 4.1.2. Parameter yang dianalisis meliputi penggunaan daya grid, karakteristik beban puncak (peak load), serta implikasi terhadap biaya energi listrik. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi kelemahan sistem sebelum diterapkannya metode optimasi.

Berdasarkan grafik komposisi sumber energi, terlihat bahwa grid menjadi sumber utama dalam memenuhi kebutuhan beban. Hal ini terjadi karena kontribusi energi dari PLTS bersifat terbatas pada siang hari, sedangkan baterai belum dimanfaatkan secara optimal. Akibatnya, setiap kekurangan daya secara langsung dipenuhi oleh grid, sehingga ketergantungan sistem terhadap jaringan listrik menjadi sangat tinggi.

Pada grafik selisih antara beban dan daya PV, terlihat bahwa nilai selisih selalu berada pada kondisi positif. Hal ini menunjukkan bahwa daya dari PLTS tidak pernah mampu sepenuhnya memenuhi kebutuhan beban. Kondisi defisit energi ini menyebabkan grid harus terus bekerja untuk menutupi kekurangan daya, baik pada siang maupun malam hari. Semakin besar selisih ini, maka semakin besar pula kontribusi grid dalam sistem.

Dari grafik profil daya sistem tanpa optimasi, terlihat bahwa daya grid berfluktuasi mengikuti perubahan beban. Pada saat daya PV menurun, khususnya pada sore hingga malam hari, daya grid meningkat secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem belum memiliki mekanisme pengendalian seperti load leveling atau peak shaving, sehingga grid harus menanggung beban secara langsung tanpa adanya peredaman dari sistem penyimpanan energi.

Kondisi ini berdampak langsung pada nilai peak load, di mana beban maksimum mencapai sekitar 140 kW pada malam hari. Tingginya nilai peak load menunjukkan adanya lonjakan beban yang tidak terkendali. Tanpa adanya strategi

pengelolaan energi, sistem tidak mampu meratakan beban, sehingga berpotensi menimbulkan tekanan pada jaringan serta meningkatkan biaya operasional.

Dari sisi operasional baterai, grafik charging dan discharging menunjukkan bahwa baterai belum berperan secara signifikan dalam mendukung kinerja sistem. Pola pengisian dan pengosongan energi tidak terarah, sehingga baterai tidak digunakan pada waktu yang tepat. Akibatnya, baterai gagal menjalankan fungsi utamanya sebagai penyimpan energi yang dapat digunakan untuk mengurangi beban puncak.

Implikasi dari kondisi tersebut adalah tingginya penggunaan energi dari grid, terutama pada periode beban tinggi. Karena sistem tidak mempertimbangkan variasi harga listrik berbasis waktu, maka konsumsi energi cenderung terjadi tanpa strategi, termasuk pada saat tarif listrik berada pada kondisi tinggi. Hal ini berpotensi menyebabkan biaya energi menjadi tidak efisien.

Secara keseluruhan, kinerja sistem pada kondisi tanpa optimasi menunjukkan bahwa sistem masih bersifat reaktif dan belum terkoordinasi dengan baik. Ketergantungan tinggi terhadap grid, nilai peak load yang besar, serta tidak optimalnya pemanfaatan baterai menjadi indikator utama rendahnya efisiensi sistem. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode optimasi seperti PSO untuk memperbaiki strategi pengelolaan energi agar sistem dapat beroperasi secara lebih efisien dan ekonomis.

4.2.3 Analisis Kinerja Sistem Dengan PSO

Analisis kinerja sistem setelah penerapan metode Particle Swarm Optimization (PSO) dilakukan berdasarkan hasil simulasi yang disajikan pada Subbab 4.1.3. Penerapan PSO bertujuan untuk mengoptimalkan penjadwalan charging dan discharging baterai sehingga sistem dapat beroperasi secara lebih efisien, baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Perubahan kinerja sistem dapat diamati dari pola penggunaan daya grid, karakteristik beban puncak, serta pemanfaatan baterai.

Berdasarkan grafik profil daya grid hasil optimasi, terlihat bahwa penggunaan daya grid menjadi lebih terkendali, khususnya pada periode beban rendah hingga menengah. Daya grid cenderung berada pada rentang yang lebih stabil dibandingkan kondisi tanpa optimasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak lagi sepenuhnya bergantung pada grid, karena sebagian kebutuhan energi telah dialihkan ke sumber lain seperti baterai dan PLTS.

Pada grafik profil daya sistem dengan PSO, terlihat bahwa pada periode siang hari, penggunaan daya grid mengalami penurunan yang cukup signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan oleh PLTS serta

energi yang disimpan dalam baterai dimanfaatkan secara optimal untuk memenuhi kebutuhan beban. Dengan demikian, terjadi peningkatan pemanfaatan energi lokal dalam sistem, yang berdampak pada pengurangan penggunaan energi dari grid.

Selain itu, penerapan PSO juga memberikan dampak terhadap penurunan beban puncak (peak load). Meskipun nilai beban maksimum sistem secara alami tetap tinggi pada malam hari, kontribusi baterai dalam menyuplai energi pada periode tersebut mampu mengurangi beban yang harus ditanggung oleh grid. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme peak shaving telah berjalan, di mana beban puncak dapat ditekan melalui pemanfaatan energi tersimpan.

Dari sisi operasional baterai, terlihat bahwa baterai mulai berperan aktif dalam sistem setelah optimasi diterapkan. Hal ini dapat diamati dari pola charging dan discharging yang lebih terarah. Baterai melakukan pengisian energi pada saat tersedia kelebihan daya, terutama pada siang hari, dan melakukan pengosongan energi pada saat beban tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa baterai tidak lagi beroperasi secara pasif, melainkan telah menjadi komponen penting dalam pengelolaan energi.

Dampak dari perubahan pola operasi tersebut juga berpengaruh terhadap efisiensi biaya energi. Dengan berkurangnya penggunaan daya grid pada periode tertentu, khususnya saat tarif listrik tinggi, maka total biaya energi dapat ditekan. Selain itu, pemanfaatan energi dari PLTS dan baterai membantu mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi berbiaya tinggi, sehingga sistem menjadi lebih ekonomis.

Jika dibandingkan dengan kondisi tanpa optimasi, kinerja sistem setelah penerapan PSO menunjukkan peningkatan yang signifikan. Sistem menjadi lebih adaptif terhadap perubahan beban dan ketersediaan energi, serta mampu mengatur aliran energi secara lebih optimal. Hal ini menunjukkan bahwa PSO berhasil mengintegrasikan berbagai parameter sistem dalam menghasilkan strategi operasi yang lebih efisien.

Secara keseluruhan, penerapan metode PSO memberikan dampak positif terhadap kinerja sistem smart grid, yaitu penggunaan daya grid yang lebih terkendali, terjadinya peak shaving, penurunan biaya energi, serta meningkatnya peran baterai dalam sistem. Dengan demikian, optimasi yang dilakukan terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas operasi sistem secara menyeluruh.

4.2.4 Analisis State of Charge (SOC)

Analisis State of Charge (SOC) baterai dilakukan berdasarkan hasil simulasi setelah penerapan metode Particle Swarm Optimization

(PSO) pada Subbab 4.1.3. Grafik Profil State of Charge SOC Baterai Hasil Optimasi PSO S merepresentasikan tingkat energi yang tersimpan dalam baterai dan menjadi indikator utama dalam menilai efektivitas strategi penjadwalan charging dan discharging. Melalui analisis ini, dapat diketahui apakah baterai telah dimanfaatkan secara optimal dalam mendukung operasi sistem smart grid.

Berdasarkan grafik SOC hasil optimasi, terlihat bahwa nilai SOC berada dalam rentang sekitar 20% hingga 100%. Rentang ini menunjukkan bahwa operasi baterai tetap berada dalam batas aman sesuai dengan parameter sistem yang telah ditetapkan. Dengan demikian, strategi optimasi tidak hanya berfokus pada kinerja sistem, tetapi juga mempertimbangkan aspek keamanan dan umur baterai.

Pola SOC menunjukkan kecenderungan yang jelas, yaitu pengisian energi (charging) terjadi pada periode siang hari, sedangkan pengosongan energi (discharging) terjadi pada periode malam hari. Pada siang hari, SOC meningkat secara signifikan hingga mencapai nilai maksimum, yang menandakan bahwa baterai menyimpan energi secara intensif. Kondisi ini selaras dengan tingginya produksi energi dari PLTS pada periode tersebut.

Sebaliknya, pada periode sore hingga malam hari, SOC mengalami penurunan secara bertahap. Penurunan ini menunjukkan bahwa baterai digunakan untuk menyuplai energi guna memenuhi kebutuhan beban saat produksi PLTS menurun hingga nol. Pola ini menunjukkan bahwa energi yang sebelumnya disimpan pada siang hari dimanfaatkan kembali pada saat sistem membutuhkan, sehingga terjadi pergeseran energi antar waktu.

Dari sisi efisiensi pemanfaatan energi, pola SOC ini menunjukkan bahwa energi dari sumber terbarukan tidak terbuang percuma, melainkan disimpan dan digunakan secara optimal. Dengan adanya baterai, kelebihan energi pada siang hari dapat dimanfaatkan kembali pada malam hari, sehingga mengurangi kebutuhan energi dari grid. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi dalam pengelolaan energi sistem.

Selain itu, pola SOC yang terarah juga menunjukkan bahwa baterai telah berperan aktif dalam mendukung strategi peak shaving. Dengan melakukan discharging pada saat beban tinggi, baterai membantu mengurangi beban yang harus ditanggung oleh grid. Hal ini berkontribusi terhadap penurunan beban puncak serta peningkatan stabilitas sistem secara keseluruhan.

Jika dibandingkan dengan kondisi tanpa optimasi, perubahan pola SOC setelah penerapan PSO terlihat sangat signifikan. Pada kondisi awal, SOC berfluktuasi tanpa pola yang jelas dan tidak mengikuti kebutuhan sistem.

Namun setelah optimasi, SOC menunjukkan siklus harian yang konsisten dan terencana, yang mencerminkan adanya strategi pengelolaan energi yang lebih baik.

Secara keseluruhan, analisis SOC ini menunjukkan bahwa baterai telah dimanfaatkan secara optimal dalam sistem smart grid setelah penerapan PSO. Baterai tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan energi, tetapi juga sebagai komponen strategis dalam mengatur aliran energi, meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan, serta mendukung pengurangan beban puncak dan penggunaan daya grid.

4.2.4 Keterkaitan dengan Tujuan Penelitian

Subbab ini membahas keterkaitan antara hasil simulasi dan analisis yang telah diperoleh pada Subbab 4.1 dan 4.2 dengan tujuan penelitian yang dirumuskan pada Bab I. Evaluasi dilakukan untuk memastikan bahwa setiap tujuan penelitian telah tercapai secara kuantitatif maupun kualitatif.

Tujuan pertama adalah mengoptimalkan penjadwalan *charging* dan *discharging* baterai pada sistem *smart grid*. Berdasarkan hasil pada Subbab 4.2.1 dan 4.2.4, pola operasi baterai setelah penerapan PSO menunjukkan perubahan yang signifikan dibandingkan kondisi tanpa optimasi. Baterai secara konsisten melakukan *charging* pada periode siang hari saat daya PLTS tinggi dan melakukan *discharging* pada periode malam saat beban meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa penjadwalan baterai telah berjalan secara strategis dan adaptif terhadap kondisi sistem.

Tujuan kedua adalah menurunkan biaya energi listrik. Berdasarkan hasil rekapitulasi pada Subbab 4.1.4, biaya energi berhasil diturunkan sebesar 20,41%, dari Rp 2.335.500 menjadi Rp 1.858.800. Penurunan ini secara langsung menunjukkan efektivitas optimasi dalam mengurangi ketergantungan terhadap grid, khususnya pada periode dengan tarif listrik tinggi (*time-of-use*), serta meningkatkan pemanfaatan energi dari PLTS dan baterai.

Tujuan ketiga adalah mengurangi beban puncak (*peak load*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa *peak load* menurun sebesar 21,43%, dari 140 kW menjadi 110 kW. Penurunan ini merupakan dampak dari implementasi strategi *peak shaving*, di mana baterai berperan aktif dalam menyuplai energi pada saat beban tinggi, sehingga beban pada grid dapat ditekan.

Tujuan keempat adalah meningkatkan efisiensi energi sistem. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan penggunaan energi dari grid sebesar 15,22%, dari 1476,00 kWh menjadi 1251,30 kWh. Selain itu, pola SOC baterai menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan pada siang hari disimpan

dan dimanfaatkan kembali pada malam hari. Kondisi ini mengindikasikan bahwa energi dalam sistem telah dikelola secara lebih optimal tanpa pemborosan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh tujuan yang telah ditetapkan berhasil dicapai. Setiap indikator kinerja utama, yaitu biaya energi, *peak load*, dan penggunaan energi grid, mengalami penurunan yang signifikan setelah penerapan metode PSO. Hal ini menegaskan bahwa optimasi penjadwalan baterai memiliki peran utama dalam meningkatkan kinerja sistem *smart grid*.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa metode PSO efektif dalam menghasilkan strategi penjadwalan baterai yang optimal, serta mampu meningkatkan efisiensi operasional sistem secara menyeluruh. Hasil ini sekaligus memperkuat bahwa pendekatan optimasi berbasis algoritma dapat menjadi solusi yang relevan dalam pengembangan sistem manajemen energi pada *smart grid*.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada sistem *smart grid* dengan penerapan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk penjadwalan *charging* dan *discharging* baterai, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penerapan metode PSO berhasil mengoptimalkan penjadwalan operasi baterai. Hal ini ditunjukkan oleh pola operasi baterai yang lebih terarah, di mana proses *charging* terjadi pada periode siang hari saat energi dari PLTS tersedia, sedangkan proses *discharging* dilakukan pada periode malam hari saat beban meningkat. Pola ini menunjukkan bahwa baterai telah dimanfaatkan secara strategis sesuai kondisi sistem.
2. Optimasi yang dilakukan mampu menurunkan biaya energi listrik secara signifikan, yaitu sebesar 20,41% dari Rp 2.335.500 menjadi Rp 1.858.800. Penurunan ini terjadi karena berkurangnya penggunaan energi dari grid pada periode tarif tinggi serta meningkatnya pemanfaatan energi dari PLTS dan baterai.
3. Nilai beban puncak (*peak load*) sistem berhasil dikurangi sebesar 21,43%, dari 140 kW menjadi 110 kW. Penurunan ini menunjukkan bahwa baterai berperan efektif dalam menerapkan strategi *peak shaving* dengan menyuplai energi pada saat beban tinggi.
4. Efisiensi penggunaan energi dalam sistem meningkat, yang ditunjukkan oleh penurunan konsumsi energi dari grid sebesar 15,22%,

dari 1476,00 kWh menjadi 1251,30 kWh. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem lebih optimal dalam memanfaatkan energi lokal dari PLTS dan baterai.

5. Secara keseluruhan, penerapan metode PSO terbukti mampu meningkatkan kinerja sistem *smart grid* baik dari aspek teknis maupun ekonomis, sehingga efektif digunakan sebagai strategi dalam pengelolaan energi berbasis *Energy Management System*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelaziz, A., Ali, E. S., & Elazim, S. M. A. (2021). Optimal energy storage management using particle swarm optimization for smart grids. *IEEE Access*, 9, 114222–114233. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103502>
- Abdelaziz, A., et al. (2021). Optimal energy storage management using PSO for smart grids. *IEEE Access*, 9, 114222–114233.
- Alyami, F., & Almutairi, N. (2023). MATLAB-based simulation of energy management systems for microgrids. *Energy Reports*, 9, 1517–1529. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.089>
- Alyami, F., & Almutairi, N. (2023). MATLAB-based simulation of energy management systems for microgrids. *Energy Reports*, 9, 1517–1529.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2021). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Gellings, C. W. (2022). *The smart grid: Enabling energy efficiency and demand response* (2nd ed.). CRC Press.
- Hatziaargyriou, N. (2020). *Microgrids: Architectures and control*. Wiley-IEEE Press.
- International Energy Agency. (2023). *Global energy efficiency report 2023*. Paris: IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-energy-efficiency-2023>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Global Energy Efficiency Report*. Paris: IEA Publications.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (2021). Particle swarm optimization: Developments, applications and resources. *Swarm Intelligence Review*, 15(2), 1–12.
- Khezri, R., Mahmoudi, A., & Haque, M. H. (2021). Optimal energy management of microgrids considering battery storage systems. *Renewable Energy*, 179, 1198–1210. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.086>
- Kumar, R., & Singh, B. (2023). Energy management strategies for smart grid integrated renewable energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103084. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103084>
- Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2021). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121564>
- MathWorks. (2024). *Microgrid energy management system using optimization*. MATLAB Central File Exchange. <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73139>
- MathWorks. (2024). *Microgrid energy management system using optimization*. MATLAB Central File Exchange. <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73139>
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-ivatloo, B., & Yousefi, H. (2021). Energy hub: From a model to a concept—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1512–1527.
- Sommerville, I. (2020). *Software engineering* (10th ed.). Pearson Education Limited.
- Wang, Y., Li, X., & Chen, Z. (2023). Time-series optimization for battery scheduling in renewable integrated microgrids. *Applied Energy*, 335, 120712. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120712>
- Zhang, L., Wang, J., & Zhao, Y. (2022). Battery scheduling for renewable-integrated microgrids using optimization techniques. *Renewable Energy*, 191, 984–995. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.087>
- Zhang, L., et al. (2022). Battery scheduling for renewable-integrated microgrids. *Renewable Energy*, 191, 984–995.