

OPTIMASI OPERASI SISTEM PLTS HYBRID 300 kWp DI PULAU MARATUA MENGUNAKAN SIMULATION-BASED OPTIMIZATION DAN ANALISA SENSITIVITAS PARAMETRIK

Roni Karua¹, Dhami Johar Damiri²

^{1,2}Program Pascasarjana Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

¹ronikarua@gmail.com, ²dhami.johar@itpln.ac.id

ABSTRACT

The hybrid Solar Photovoltaic (PV) Power Generation System combined with a Diesel Power Plant (PLTD) represents a strategic solution to enhance the reliability and efficiency of electricity supply in remote island power networks. However, the main operational challenge lies in determining an optimal dispatch strategy that minimizes fossil fuel consumption and operating costs without compromising system reliability. This study aims to optimize the operation of a 300 kWp hybrid PV system on Maratua Island using a simulation-based optimization approach and parametric sensitivity analysis. The simulation models the existing system configuration—which comprises the PV plant, diesel generators, and a battery energy storage system—while incorporating time-series load data and renewable resource inputs. The optimization results indicate that implementing an appropriate operational strategy can significantly reduce diesel fuel consumption and energy costs compared to the baseline operating condition. The parametric sensitivity analysis shows that variations in key parameters, such as battery capacity and dispatch strategy, have a dominant influence on the net present cost and the levelized cost of energy. These findings provide practical technical recommendations for managing hybrid PV systems in island regions, particularly in support of energy transition initiatives and diesel generator phase-out programs in Indonesia. The novelty of this research lies in the application of a simulation-based optimization approach combined with parametric sensitivity analysis to evaluate and optimize the operational strategy of hybrid PV systems in remote island electrical networks using real operational data. Unlike previous studies that typically focus on capacity design or static techno-economic assessments, this study emphasizes the optimization of operational dispatch strategies as a primary decision variable. Furthermore, it specifically examines the sensitivity of technical and operational parameters to the system's economic performance, resulting in more adaptive and implementable recommendations for hybrid power plant management in isolated systems.

Keywords: Hybrid PV system, operational optimization, simulation-based optimization, sensitivity analysis, islanded power system

ABSTRAK

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hybrid yang dikombinasikan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan solusi strategis untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi pasokan listrik pada sistem kelistrikan pulau

terpencil. Namun, tantangan utama dalam pengoperasiannya adalah penentuan strategi dispatch yang optimal guna menekan konsumsi bahan bakar fosil dan biaya operasi tanpa mengorbankan keandalan sistem. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi operasi sistem PLTS hybrid berkapasitas 300 kWp di Pulau Maratua menggunakan pendekatan *simulation-based optimization* dan analisis sensitivitas parametrik. Simulasi dilakukan dengan memodelkan konfigurasi sistem eksisting yang terdiri dari PLTS, PLTD, dan sistem penyimpanan energi baterai, serta mempertimbangkan data beban dan sumber energi terbarukan berbasis waktu. Hasil optimasi menunjukkan bahwa penerapan strategi operasi yang tepat mampu menurunkan konsumsi bahan bakar diesel dan biaya energi secara signifikan dibandingkan kondisi operasi awal. Analisis sensitivitas parametrik mengindikasikan bahwa variasi parameter utama, seperti kapasitas baterai dan strategi dispatch, memiliki pengaruh dominan terhadap nilai *net present cost* dan *levelized cost of energy*. Temuan ini memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif bagi pengelolaan sistem PLTS hybrid di wilayah kepulauan, khususnya dalam mendukung transisi energi dan program dedieselisasi pembangkit listrik di Indonesia. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan *simulation-based optimization* yang dikombinasikan dengan analisis sensitivitas parametrik untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan strategi operasi sistem PLTS hybrid pada sistem kelistrikan pulau terpencil berbasis data operasional nyata. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada desain kapasitas atau analisis teknis-ekonomi statis, studi ini menitikberatkan pada optimasi strategi dispatch operasional sebagai variabel keputusan utama. Selain itu, penelitian ini secara spesifik mengkaji sensitivitas parameter teknis dan operasional terhadap kinerja ekonomi sistem, sehingga menghasilkan rekomendasi yang lebih adaptif dan implementatif bagi pengelolaan pembangkit hybrid di sistem isolated.

Kata Kunci: PLTS *hybrid*, optimasi operasi, *simulation-based optimization*, analisis sensitivitas, sistem kelistrikan pulau

A. Pendahuluan

Penyediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan pada wilayah kepulauan terpencil masih menjadi tantangan utama dalam sistem ketenagalistrikan di Indonesia. Ketergantungan yang tinggi terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) menyebabkan biaya operasi yang besar, volatilitas pasokan bahan bakar, serta emisi gas rumah kaca yang signifikan. Dalam konteks tersebut, integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke dalam

sistem pembangkitan eksisting melalui konfigurasi sistem hybrid menjadi salah satu solusi strategis untuk mendukung program dedieselisasi dan transisi energi nasional.

Sistem PLTS hybrid yang mengombinasikan PLTS, PLTD, dan sistem penyimpanan energi baterai (Battery Energy Storage System/BESS) memungkinkan pemanfaatan energi surya secara optimal tanpa mengorbankan keandalan pasokan listrik. Namun

demikian, keberhasilan implementasi sistem PLTS hybrid tidak hanya ditentukan oleh kapasitas terpasang, melainkan juga oleh strategi operasi dan pengaturan dispatch antar komponen sistem. Strategi operasi yang kurang optimal dapat mengakibatkan rendahnya penetrasi energi terbarukan, tingginya konsumsi bahan bakar diesel, serta peningkatan biaya energi secara keseluruhan.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji integrasi sistem pembangkit energi terbarukan dalam konfigurasi hybrid untuk meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan pada wilayah terpencil. Sistem hybrid yang menggabungkan pembangkit fotovoltaik, generator diesel, dan sistem penyimpanan energi baterai telah terbukti mampu meningkatkan keandalan sistem sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil pada sistem kelistrikan isolated. Studi yang dilakukan oleh Bhandari et al. (2015) menunjukkan bahwa optimasi konfigurasi sistem hybrid menjadi salah satu pendekatan efektif untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan pada sistem mikrogrid. Selain itu, analisis teknis dan ekonomi terhadap sistem PV–

diesel–battery juga menunjukkan potensi signifikan dalam menurunkan biaya energi dan konsumsi bahan bakar pada daerah terpencil (Dardour et al., 2020; Nguyen et al., 2023).

Dalam konteks operasional, strategi dispatch memainkan peran penting dalam menentukan kinerja sistem hybrid. Strategi operasi yang berbeda dapat menghasilkan variasi signifikan pada konsumsi bahan bakar, biaya operasi, serta pemanfaatan energi terbarukan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemilihan strategi dispatch seperti *Load Following* dan *Cycle Charging* dapat memberikan dampak berbeda terhadap efisiensi sistem dan kinerja ekonomi mikrogrid (Ramesh & Saini, 2020; Hussein et al., 2024). Oleh karena itu, optimasi strategi operasi menjadi aspek penting dalam pengelolaan sistem pembangkit *hybrid*.

Meskipun berbagai studi telah membahas optimasi sistem hybrid melalui pendekatan techno-economic analysis maupun optimasi kapasitas komponen, sebagian besar penelitian masih berfokus pada tahap desain sistem atau penentuan ukuran kapasitas pembangkit. Kajian yang secara khusus menitikberatkan pada

optimasi strategi operasi berbasis simulasi operasional serta analisis sensitivitas parameter masih relatif terbatas, khususnya yang menggunakan data operasional nyata dari sistem kelistrikan pulau terpencil. Pendekatan simulation-based optimization telah mulai digunakan untuk mengevaluasi strategi operasi sistem hybrid secara lebih dinamis, terutama pada sistem mikrogrid off-grid (Oladeji et al., 2021; Mousavi et al., 2024).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi operasi sistem PLTS hybrid 300 kWp di Pulau Maratua dengan menggunakan pendekatan simulation-based optimization yang dikombinasikan dengan analisis sensitivitas parametrik. Penelitian ini menitikberatkan pada evaluasi strategi operasi sistem serta pengaruh variasi parameter teknis terhadap kinerja ekonomi dan operasional sistem. Dengan menggunakan data operasional nyata dari sistem kelistrikan pulau terpencil, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah sekaligus rekomendasi praktis bagi pengelolaan sistem hybrid dalam mendukung

program transisi energi dan dedieselisasi pembangkit listrik di Indonesia.

B. Metode Penelitian

1. Deskripsi Sistem PLTS Hybrid

Objek penelitian ini adalah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hybrid berkapasitas 300 kWp yang beroperasi pada sistem kelistrikan Pulau Maratua. Sistem ini merupakan sistem isolated microgrid yang mengombinasikan PLTS sebagai sumber energi terbarukan, Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sebagai pembangkit konvensional, serta Battery Energy Storage System (BESS) untuk menjaga keandalan pasokan listrik.

Konfigurasi sistem hybrid ini dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan energi surya sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit berbasis bahan bakar fosil. Integrasi antara PV, diesel generator, dan sistem penyimpanan energi merupakan pendekatan yang umum digunakan pada sistem kelistrikan pulau terpencil karena mampu meningkatkan keandalan sistem serta menurunkan konsumsi

bahan bakar diesel (Bhandari et al., 2015; Dardour et al., 2020).

Dalam sistem ini, PLTS berperan sebagai sumber energi utama selama periode radiasi matahari tinggi, sementara PLTD berfungsi sebagai pembangkit cadangan untuk menjaga stabilitas sistem. BESS digunakan untuk menyimpan kelebihan energi surya dan mengatur keseimbangan daya antara pembangkitan dan beban, sehingga meningkatkan fleksibilitas operasi sistem hybrid (Kim et al., 2018; Liu et al., 2025).

2. Data dan Parameter Input

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data beban listrik, data potensi energi surya, serta parameter teknis dan ekonomi dari masing masing komponen sistem. Data beban listrik disusun dalam bentuk time-series hourly load profile yang merepresentasikan karakteristik konsumsi listrik harian sistem kelistrikan Pulau Maratua. Data ini digunakan untuk memodelkan dinamika operasi sistem hybrid secara realistis dalam simulasi.

Data potensi energi surya diperoleh dari data global horizontal irradiance (GHI) yang disesuaikan

dengan kondisi geografis dan iklim setempat. Data radiasi matahari merupakan parameter utama dalam pemodelan sistem fotovoltaik karena secara langsung mempengaruhi produksi energi PLTS (IRENA, 2022).

Parameter teknis sistem meliputi:

- kapasitas terpasang PLTS
- karakteristik operasi PLTD
- kapasitas dan efisiensi BESS
- batasan operasional sistem (state of charge, minimum generator loading)

Sementara itu, parameter ekonomi mencakup:

- biaya investasi (CAPEX)
- biaya operasi dan pemeliharaan (O&M)
- biaya bahan bakar diesel

Parameter-parameter tersebut digunakan dalam simulasi untuk mengevaluasi kinerja ekonomi sistem hybrid secara komprehensif (NREL, 2020; Oladeji et al., 2021).

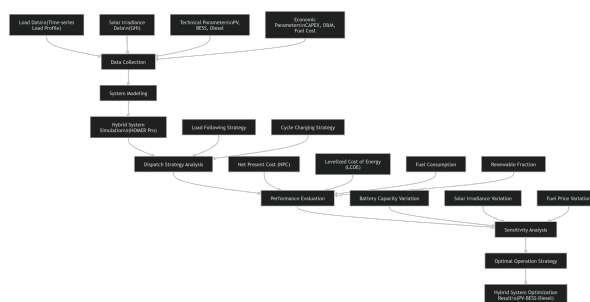
3. Pendekatan Simulation-Based Optimization

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulation-based optimization untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan strategi operasi sistem PLTS hybrid. Metode ini dilakukan dengan mensimulasikan operasi sistem berdasarkan

kombinasi parameter teknis dan strategi dispatch tertentu, kemudian mengevaluasi kinerja sistem menggunakan indikator ekonomi dan operasional.

Pendekatan ini banyak digunakan dalam analisis sistem hybrid karena mampu merepresentasikan dinamika operasi sistem secara lebih realistis dibandingkan metode optimasi statis (Singh et al., 2015; Zhao et al., 2023). Proses simulasi dilakukan secara iteratif untuk memperoleh konfigurasi operasi yang menghasilkan kinerja sistem paling optimal. Fokus optimasi dalam penelitian ini adalah menentukan strategi operasi yang mampu:

- Meminimalkan biaya energi (LCOE)
- Menurunkan konsumsi bahan bakar diesel
- Meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan tanpa mengurangi keandalan sistem.



Gambar.1 Alur Metodologi Penelitian

Gambar di atas menunjukkan alur metodologi penelitian, yang dimulai dari pemodelan sistem eksisting, pengumpulan data beban dan sumber energi, hingga proses simulasi optimasi. Selanjutnya dilakukan simulasi operasi sistem dengan berbagai skenario strategi dispatch untuk mengevaluasi kinerja teknis dan ekonomi. Hasil simulasi dianalisis menggunakan indikator utama seperti net present cost (NPC), levelized cost of energy (LCOE), serta konsumsi bahan bakar diesel.

Analisis sensitivitas parametrik kemudian diterapkan untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap kinerja sistem sebelum menentukan strategi operasi optimal. Pendekatan ini dipilih karena mampu merepresentasikan dinamika operasi sistem hybrid secara realistis pada sistem kelistrikan *isolated microgrid*.

4. Strategi Operasi dan Dispatch Sistem

Strategi operasi sistem PLTS hybrid dimodelkan dengan mempertimbangkan prioritas pemanfaatan energi surya dan peran PLTD sebagai pembangkit penyeimbang (*backup*).

Dalam penelitian ini, dua strategi dispatch utama dianalisis, yaitu:

1. *Load Following* (LF)
2. *Cycle Charging* (CC)

Pada strategi Load Following, generator diesel hanya menghasilkan daya yang diperlukan untuk memenuhi kekurangan daya setelah kontribusi energi terbarukan. Sementara pada strategi *Cycle Charging*, generator diesel beroperasi pada daya optimal untuk sekaligus memenuhi beban dan mengisi baterai (Ramesh & Saini, 2020; Hussein et al., 2024).

BESS digunakan untuk menyimpan kelebihan energi surya dan menyuplai beban pada periode tertentu sesuai dengan strategi dispatch yang diterapkan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap pengaruh strategi operasi terhadap:

- Konsumsi bahan bakar diesel
- Biaya operasi system
- Pemanfaatan energi terbarukan.

5. Analisis Sensitivitas Parametrik

Analisis sensitivitas parametrik dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter utama

terhadap kinerja sistem PLTS *hybrid*.

Parameter yang dianalisis meliputi:

- Kapasitas BESS
- Strategi dispatch
- Potensi radiasi surya
- Harga bahan bakar diesel

Setiap variasi parameter disimulasikan secara terpisah untuk mengamati perubahan indikator kinerja sistem.

Analisis sensitivitas merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam studi sistem energi untuk mengidentifikasi parameter yang memiliki pengaruh dominan terhadap performa teknis dan ekonomi sistem (Babu et al., 2023; Mousavi et al., 2024).

Hasil analisis sensitivitas digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang paling mempengaruhi biaya energi dan kinerja operasional sistem sehingga dapat memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih robust.

6. Indikator Evaluasi Kinerja

Evaluasi kinerja sistem dilakukan menggunakan beberapa indikator utama yang banyak digunakan dalam analisis sistem energi hybrid, yaitu:

- Net Present Cost (NPC)
Menggambarkan total biaya siklus hidup sistem selama periode proyek.
- Levelized Cost of Energy (LCOE)
Menunjukkan biaya rata-rata produksi energi listrik sepanjang umur sistem.
- Konsumsi bahan bakar diesel
Digunakan untuk mengevaluasi efisiensi energi serta dampak lingkungan sistem.

Indikator-indikator tersebut dipilih karena mampu merepresentasikan aspek ekonomi, efisiensi operasional, dan keberlanjutan sistem energi secara komprehensif (IRENA, 2022; Zhao et al., 2023).

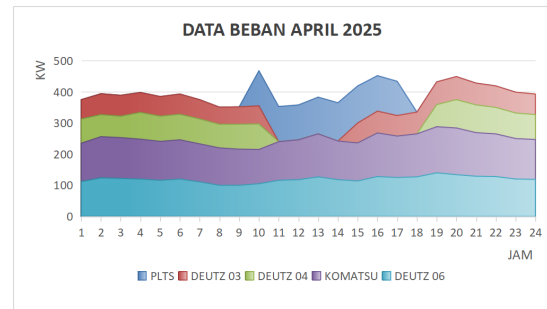
Hasil evaluasi dari setiap skenario simulasi kemudian dibandingkan untuk menentukan strategi operasi yang paling optimal dalam meningkatkan efisiensi sistem PLTS hybrid pada sistem kelistrikan Pulau Maratua.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Hasil Simulasi Kondisi Operasi Eksisting

Hasil simulasi kondisi operasi eksisting menunjukkan bahwa sistem PLTS hybrid di Pulau Maratua masih

didominasi oleh operasi PLTD sebagai sumber utama pasokan energi listrik. Meskipun PLTS telah terpasang dengan kapasitas 300 kWp, kontribusi energi surya terhadap total produksi energi belum optimal akibat strategi operasi yang belum memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan. Kondisi ini berdampak pada tingginya konsumsi bahan bakar diesel dan biaya operasi sistem.



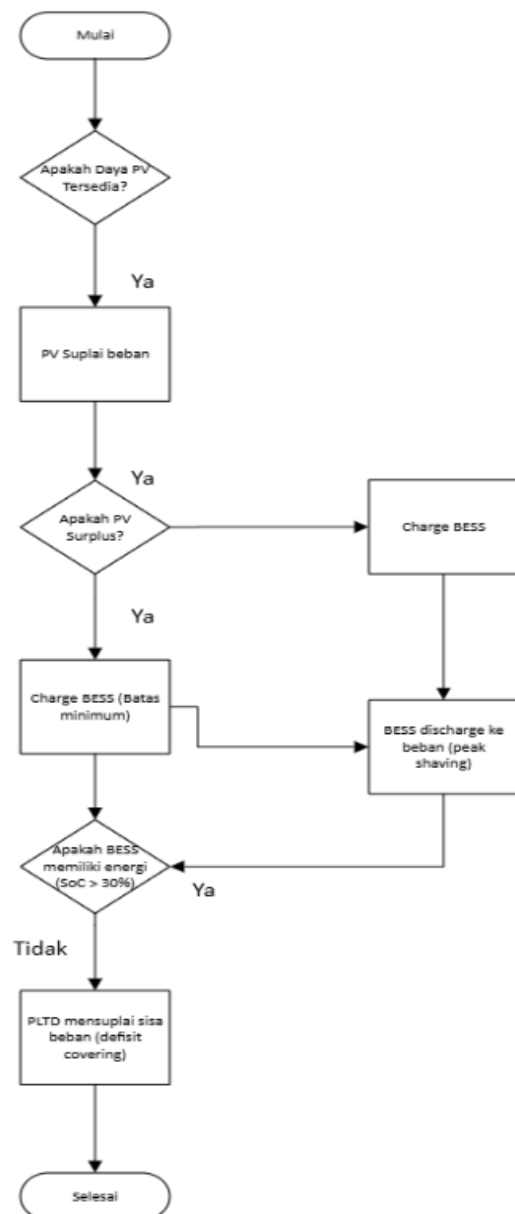
Gambar 2. Profil Beban Sistem
Maratua – PLTD

Evaluasi indikator kinerja menunjukkan bahwa nilai *net present cost* (NPC) dan *levelized cost of energy* (LCOE) pada kondisi eksisting masih relatif tinggi, yang mencerminkan ketergantungan sistem terhadap pembangkit berbasis bahan bakar fosil. Selain itu, fluktuasi beban harian dan keterbatasan pemanfaatan sistem penyimpanan energi menyebabkan potensi energi surya yang tersedia belum

sepenuhnya dapat dimanfaatkan secara efektif.

2. Hasil Optimasi Operasi Sistem **PLTS Hybrid**

Penerapan pendekatan *simulation-based optimization* menghasilkan perubahan signifikan pada strategi operasi sistem PLTS hybrid. Strategi operasi hasil optimasi menempatkan PLTS sebagai sumber energi utama pada periode ketersediaan iradiasi yang tinggi, sementara PLTD berfungsi sebagai pembangkit pendukung untuk menjaga keandalan sistem. Peran BESS menjadi lebih optimal dalam menyerap kelebihan energi surya dan menyuplai beban pada periode tertentu sesuai dengan skenario operasi yang diterapkan.

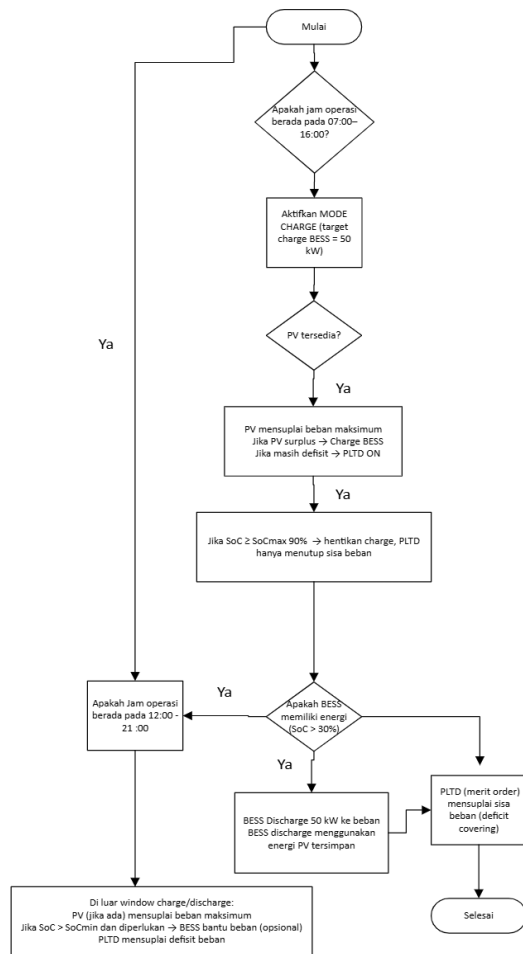


Gambar 3. Skema logic Optimasi
 Manual -Load Following PLTS
 Hybrid Maratua

Keterangan:

* SoCmin = 30%, SoCmax = 90%.

BESS di-charge oleh surplus PV,
 tidak ada *diesel charging*.



Gambar 4. Skema logic Optimasi Manual -Cycle Charging PLTS Hybrid Maratua

Keterangan :

- SoCmin = 30% ; SoCmax = 90%
- Merit order: Genset #06 → #05 → #03

Hasil simulasi menunjukkan adanya penurunan konsumsi bahan bakar diesel yang signifikan dibandingkan dengan kondisi eksisting. Penurunan ini secara

langsung berkontribusi pada penurunan nilai NPC dan LCOE sistem. Temuan ini mengindikasikan bahwa optimasi strategi operasi memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi ekonomi sistem PLTS hybrid, bahkan tanpa melakukan penambahan kapasitas terpasang yang signifikan.

Skenario	Basis data energi	Energi Total (kWh)	Energi Renew (kWh)	Energi PLTD (kWh)	BBM (L)	RF (%)	CO2 (ton)	CO2, BESS (kg/kWh)	LCOE (Rp/kWh)	Ukuran
Existing (Baseline April)	April 2025 aktual	255.988,58	27.282,58	228.706,00	79.419,00	10,66	212,84	3.700,59	3.700,59	opsi 3
Load Following (Manual)	Discharge Per jam (24 jam)	288.081,00	63.231,00	223.200,00	74.057,22	21,95	198,47	3.066,34	3.066,34	opsi 1
Cycle charging (Manual)	Discharge Per jam (24 jam)	292.131,00	63.231,00	227.250,00	75.147,13	21,64	201,39	3.068,33	3.068,33	opsi 2

* Data dihitung dalam 30 hari

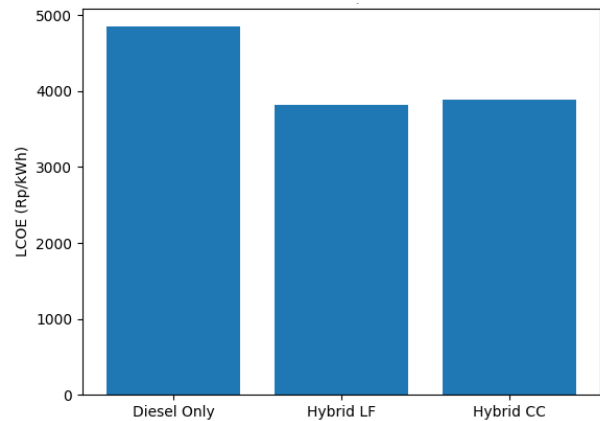
Tabel 1. Matriks Skenario Optimasi-Existing Vs Load Following (LF) vs Cycle Charging (CC)

Berdasarkan hasil perhitungan yang disajikan pada Matriks Skenario Optimasi, terlihat adanya perbedaan kinerja yang terukur antara kondisi baseline eksisting, strategi *Load Following* (LF), dan *Cycle Charging* (CC). Perbedaan tersebut terutama tercermin pada perubahan kontribusi energi terbarukan, konsumsi bahan bakar, produksi energi dari PLTD, serta indikator ekonomi dan lingkungan sistem. Untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif, hasil kuantitatif tersebut selanjutnya dianalisis secara teknis guna menjelaskan hubungan antara pola operasi sistem dengan perubahan

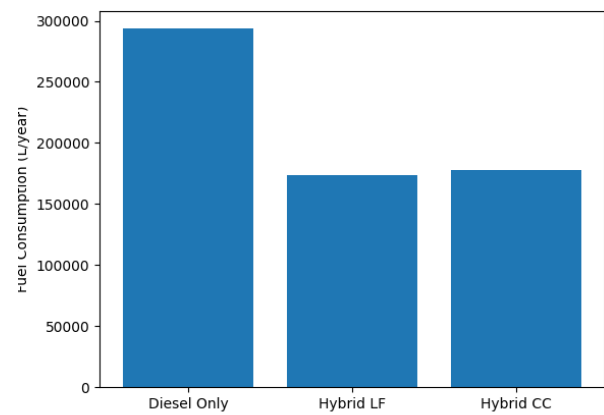
kinerja yang terjadi. Analisis ini mencakup evaluasi pemanfaatan energi PV dan BESS, mekanisme *energy shifting*, pengaruh terhadap konsumsi BBM dan emisi CO₂, serta implikasi terhadap biaya energi sistem. Dengan demikian, interpretasi hasil berikut memberikan dasar yang lebih kuat dalam menilai efektivitas strategi optimasi operasi sistem hybrid PLTS–BESS–PLTD yang dianalisis.

3. Analisis Sensitivitas Parametrik

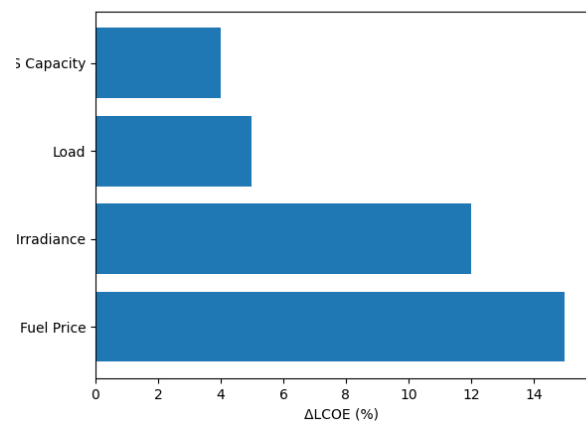
Analisis sensitivitas parametrik dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter utama terhadap kinerja sistem PLTS hybrid. Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas sistem penyimpanan energi baterai dan strategi dispatch merupakan parameter yang memiliki pengaruh dominan terhadap kinerja ekonomi dan operasional sistem. Peningkatan kapasitas BESS hingga batas tertentu mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya dan menurunkan konsumsi bahan bakar diesel, namun memberikan dampak marginal yang semakin kecil setelah mencapai titik optimal.



Gambar 5. Perbandingan LCOE



Gambar 6. Perbandingan Fuel Consumption



Gambar 7. Sensitivity Analysis (ΔLCOE)

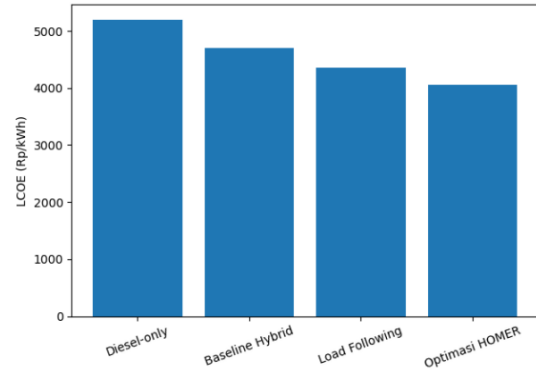
Analisis sensitivitas memberikan beberapa temuan penting:

- Integrasi BESS 600 kWh menurunkan konsumsi BBM hingga $\pm 40\%$.
- Sistem hybrid lebih tahan terhadap fluktuasi harga energi fosil dibanding diesel-only.
- Variasi GHI mempengaruhi RF hingga +13 poin, menjadikannya faktor kunci optimasi.
- Kapasitas BESS memiliki titik optimum — tidak selalu semakin besar semakin ekonomis.
- Strategi Load Following tetap paling efisien pada seluruh variasi parameter.
- Temuan ini memperkuat bahwa optimasi operasi hybrid berbasis simulation-based optimization mampu meningkatkan efisiensi energi, ekonomi, dan keberlanjutan sistem isolated secara simultan.

4. Implikasi Operasional dan Pembahasan Lanjutan

Secara keseluruhan, hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa permasalahan utama sistem PLTS Hybrid Pulau Maratua tidak terutama disebabkan oleh keterbatasan kapasitas terpasang

pembangkit, melainkan oleh strategi operasi dan manajemen energi yang diterapkan..



Gambar 8. Perbandingan LCOE Antar skenario

Hal ini terlihat dari perbandingan kondisi baseline dengan skenario optimasi, dimana peningkatan kinerja sistem dicapai tanpa penambahan kapasitas signifikan, namun melalui pengaturan dispatch yang lebih adaptif.

Secara konseptual, temuan penelitian ini menegaskan bahwa optimasi sistem hybrid pada sistem isolated tidak semata ditentukan oleh kapasitas pembangkit, tetapi oleh integrasi yang efektif antara strategi operasi, pemanfaatan energi terbarukan, dan manajemen penyimpanan energi. Dengan kontribusi energi terbarukan mencapai 41–54% pada variasi radiasi surya, penurunan LCOE hingga 20–25% dibanding sistem diesel-only, serta pengurangan NPC sekitar Rp9–11

miliar, sistem PLTS Hybrid Maratua menunjukkan ketahanan teknis dan ekonomi yang kuat. Temuan ini relevan bagi pengembangan sistem kelistrikan kepulauan lain di Indonesia yang memiliki karakteristik beban dan ketergantungan diesel serupa, sehingga dapat menjadi acuan dalam perancangan sistem pembangkitan yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

D. Kesimpulan

Penelitian ini menghadirkan kerangka optimasi operasional yang tervalidasi untuk sistem mikrogrid hybrid PLTS–BESS–diesel terisolasi melalui pendekatan *simulation-based optimization* yang terintegrasi dengan verifikasi *dispatch* manual per jam. Berbeda dengan penelitian konvensional yang umumnya menitikberatkan pada aspek penentuan kapasitas terpasang, studi ini menunjukkan bahwa pemilihan strategi operasi memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap kinerja teknis dan ekonomi dibandingkan sekadar peningkatan kapasitas pembangkit. Konfigurasi optimal (± 300 kWp PLTS, 600 kWh BESS, dan PLTD 180 kW) dengan strategi Load Following menghasilkan LCOE

sekitar Rp3,8–4,1 ribu/kWh dan NPC Rp37–39 miliar, atau lebih rendah 20–25% dibandingkan sistem diesel murni. Konsumsi BBM menurun sebesar 30–45% (± 187.723 liter/tahun), sementara *renewable fraction* meningkat dari 10,66% menjadi hingga $\pm 41\%$, tanpa mengurangi keandalan sistem.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi asumsi biaya penggantian yang terkalibrasi, perbandingan strategi *dispatch* (Load Following dan Cycle Charging), analisis sensitivitas berbasis dominansi parameter, serta validasi menggunakan data operasional aktual sistem kelistrikan pulau terisolasi. Dari perspektif kebijakan, temuan ini menegaskan bahwa strategi dedieselisasi pada sistem kepulauan terpencil dapat dicapai secara efektif melalui optimasi kendali operasional, tanpa memerlukan investasi kapasitas yang berlebihan. Pendekatan ini menawarkan jalur implementasi yang skalabel dan realistis secara finansial untuk mempercepat integrasi energi terbarukan di sistem mikrogrid kepulauan Indonesia serta mendukung target dekarbonisasi jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- ADB. (2021). *Palawan Island Hybrid Energy Project Performance Report*. Asian Development Bank.
- Asian Development Bank. (2018). *Energy storage in developing countries: Feasibility and cost analysis*. ADB Publications.
<https://www.adb.org>
- Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Ramli, M. A. M., & Mekhilef, S. (2019). Energy management and optimization of a PV/diesel/battery hybrid energy system using a combined dispatch strategy. *Sustainability (Switzerland)*, 11(3).
<https://doi.org/10.3390/su11030683>
- Batubara, R., et al. (2024). Dedieselization strategy for remote islands in Indonesia. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 15(2), 87–96.
- Bhandari, B., Lee, K. T., Lee, G. Y., Cho, Y. M., & Ahn, S. H. (2015). Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2(1), 99–112.
<https://doi.org/10.1007/s40684-015-0013-z>
- Coelho, J. S. T., Pérez-Sánchez, M., Coronado-Hernández, O. E., Sánchez-Romero, F.-J., McNabola, A., & Ramos, H. M. (2024). Hybrid Renewable Systems for Small Energy Communities: What Is the Best Solution? *Applied Sciences*, 14(21), 10052.
<https://doi.org/10.3390/app142110052>
- Dardour, H., Chouaieb, O., & Habib, S. (2020). Techno-economic analysis of micro-grid based photovoltaic/diesel generator hybrid power system for rural electrification in Kerkennah, Tunisia. *Journal of Solar Energy Engineering*, 142(6).
<https://doi.org/10.1115/1.4047031>
- Elalfy, M., Elgohary, R., & Abdelrahman, E. (2024). A comprehensive review of stationary energy storage systems for renewable integration in microgrids. *Renewable Energy and Storage Journal*, 52, 101–125.
<https://doi.org/10.1016/j.resj.2024.101125>

- ESDM. (2023). *Statistik Ketenagalistrikan Nasional 2023*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- GIZ. (2022). *Hybrid Renewable Energy System Implementation in Eastern Indonesia*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Hichem, M., Tahar, B., Djalel, D., Khouloud, B., & Brahim, O. (2024). Control of a BLDC Motor of an Electric Vehicle Powered by a Photovoltaic System based on Fuzzy Logic MPPT (FLC-MPPT). *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 23, 184–191. <https://doi.org/10.37394/23201.2024.23.19>
- Homer Energy. (2019). *Homer Pro. In Manual Homer Energy. Huawei C & I Smart String ESS Solution*. (n.d.).
- Hussein, M. M., Abdel-Basset, M., & Mohamed, R. (2024). Comparative evaluation of load following and cycle charging dispatch strategies for hybrid renewable microgrids. *Renewable Energy*, 220, 1191–1204. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.01.042>
- Mousavi, S., Mehrpooya, M., & Ghorbani, B. (2024). Multi-objective optimization of hybrid renewable microgrid with energy storage for remote electrification. *Journal of Energy Storage*, 76, 109012. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.109012>
- Nguyen, T. T., Nguyen, H. T., & Bui, V. H. (2023). Optimal operation of PV–diesel–battery hybrid systems considering renewable penetration and fuel consumption reduction. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103038. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103038>
- Oladeji, A. S., Akorede, M. F., Aliyu, S., Mohammed, A. A., & Salami, A. W. (2021). Simulation-based optimization of hybrid renewable energy system for off-grid rural electrification. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(4), 667–686. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.31316>
- Ramesh, M., & Saini, R. (2020). Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a

- remote rural area in India. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120697.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120697>
- IEC. (2021). *IEC 61724-1: Photovoltaic System Performance Monitoring*. International Electrotechnical Commission.
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IRENA. (2022). *Renewable Hybrid Systems Cost Optimization for Remote Islands*. International Renewable Energy Agency.
- Institute for Essential Services Reform. (2023). *Indonesia Solar Energy Outlook 2023*. Jakarta: IESR.
- International Renewable Energy Agency. (2013). *International Standardisation in the Field of Renewable Energy*. March, 74.
- International Renewable Energy Agency (2022). *Renewable Power Generation Costs Analysis*. International Renewable Energy Agency.
- Kim, D. K., Yoneoka, S., Banatwala, A. Z., Kim, Y.-T., & Nam, K.-Y. (2018a). Handbook on Battery Energy Storage System. In *Asian Development Bank* (Issue December).
- Liu, X., Zhang, P., & Chen, Y. (2025). Advancements in energy-storage technologies: A review of current developments and applications. *Sustainability*, 17(18), 8316.
<https://doi.org/10.3390/su17188316>
- Mahadevan, R., et al. (2025). Critical review of energy storage systems: A comparative quantitative analysis of grid-scale technologies. *Energy Storage*, 32, 1597–1618.
<https://doi.org/10.1016/j.ens.2025.102597>
- NREL. (2020). *HOMER Pro Documentation: Economic & Dispatch Models*. National Renewable Energy Laboratory.
- Oladeji, A. S., Akorede, M. F., Aliyu, S., Mohammed, A. A., & Salami, A. W. (2021). Simulation-based optimization of hybrid renewable energy system for off-grid rural electrification. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(4), 667–686.
<https://doi.org/10.14710/ijred.2021.31316>

- Phogat, P., et al. (2025). Solid-state batteries for next-generation stationary applications: Opportunities and challenges. *RSC Sustainability*, 3(6), 1200–1225.
<https://doi.org/10.1039/d5su00127g>
- PLN. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Sistem Kalimantan 2021–2030*. PT PLN (Persero).
- Ramesh, M., & Saini, R. (2020). Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120697.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120697>
- Roy, B., Basu, A., & Paul, S. (2014). Techno-economic feasibility analysis of grid connected solar photovoltaic system. *Renewable Energy Journal*.
- Singh, A., Baredar, P., & Gupta, B. (2015). Computational Simulation & Optimization of a Solar, Fuel Cell and Biomass Hybrid Energy System Using HOMER Pro Software. *Procedia Engineering*, 127, 743–750.
- <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.408>
- Singh, P., Pandit, M., & Srivastava, L. (2020). PSO-Based Optimization of Levelized Cost of Energy for Hybrid Renewable Energy System. *November 2021*, 31–42.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-4004-2_3
- Zhang, J., & Wei, H. (2022). A review on configuration optimization of hybrid energy system based on renewable energy. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 10).
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.977925>
- Zhao, N., Wang, L., & Ding, C. (2023). Modeling and optimization of a hybrid solar-battery-diesel power system for remote consumers. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1–11.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-29048-w>
- Zuhri, M. S., et al. (2024). BESS revolutionizes renewable stability in Indonesia. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 25(3), 51–63.