

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki lebih dari 17.000 pulau (Ramelan, 2021) yang tersebar luas, dengan sebagian besar wilayahnya tergolong sebagai daerah 3T (terdepan, terluar, dan tertinggal). Salah satu tantangan utama dalam penyediaan energi listrik di wilayah-wilayah ini adalah keterbatasan infrastruktur transmisi dan distribusi, yang menyebabkan ketergantungan tinggi pada sistem kelistrikan lokal berbasis bahan bakar fosil, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang memiliki biaya tinggi dan pasokan BBM yang terbatas (Kanata, 2021).

Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM, 2024), Indonesia telah mencapai rasio elektrifikasi sebesar 99,93% per Mei 2024. Namun, masih terdapat disparitas signifikan di wilayah 3T (Terdepan, Terluar, dan Tertinggal), terutama di daerah seperti Kalimantan Timur, Papua, Nusa Tenggara Timur, dan Sulawesi bagian utara, yang sebagian besar belum memiliki akses energi andal dan bersih. Di wilayah ini, sistem kelistrikan umumnya bersifat isolated dan masih sangat bergantung pada PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel) yang boros bahan bakar dan beremisi tinggi.

Meskipun Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat melimpah, tingkat pemanfaatannya masih berada pada level yang sangat rendah. Berdasarkan laporan Institute for Essential Services Reform, potensi teknis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) nasional diperkirakan melebihi 2.000 GWp (IESR, 2023). Namun, hingga akhir tahun 2023 kapasitas terpasang PLTS baru mencapai sekitar 0,2 GWp, atau kurang dari 0,01% dari total potensi tersebut. Selain itu, sebagian besar sistem yang telah terbangun belum mengadopsi konsep sistem hybrid cerdas yang mengintegrasikan PLTS dengan sumber energi lainnya serta sistem penyimpanan energi, sehingga utilisasi potensi energi surya masih jauh dari optimal.

Beberapa negara di Asia Tenggara telah menunjukkan keberhasilan implementasi sistem PLTS hybrid. Misalnya, di Filipina, proyek hybrid PV–Diesel–BESS di wilayah Palawan mampu menurunkan biaya produksi listrik dari USD 0,36/kWh menjadi USD

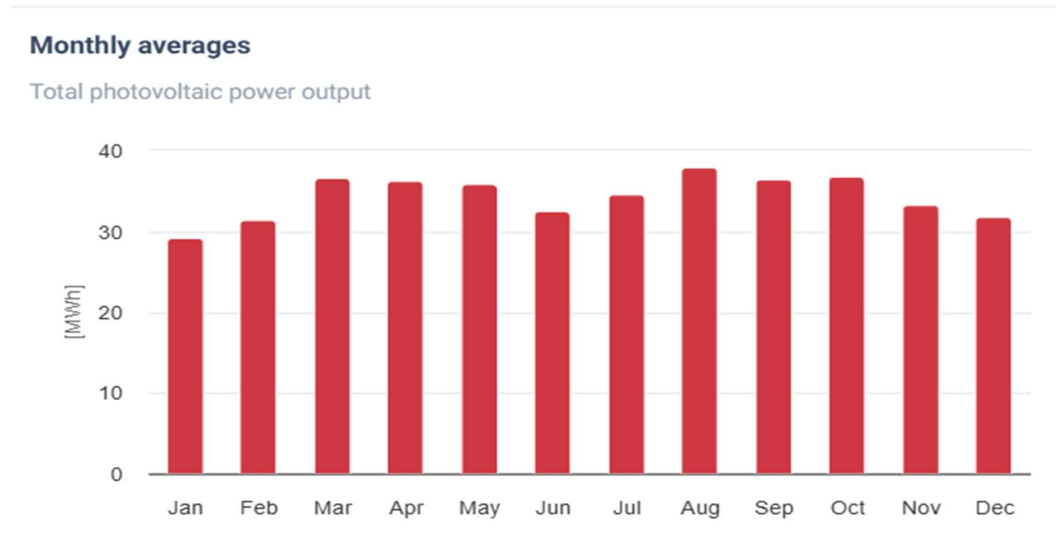
0,22/kWh (Asian Development Bank (ADB, 2021). Di Indonesia sendiri, implementasi PLTS hybrid di Sumba Timur dan Pulau Selayar menunjukkan peningkatan efisiensi sistem dan pengurangan konsumsi bahan bakar minyak hingga 40% (GIZ, 2022). Temuan ini memperkuat bahwa PLTS hybrid merupakan solusi yang tepat dalam mendukung akselerasi transisi energi berkelanjutan di wilayah terdepan, terluar, dan tertinggal (3T).

Pulau Maratua, yang terletak di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, merupakan salah satu wilayah terluar Indonesia yang masuk dalam Kawasan Strategis Pariwisata Nasional (KSPN) namun masih menghadapi keterbatasan pasokan energi listrik yang andal dan efisien (PLN, 2021). Meskipun memiliki potensi pariwisata yang tinggi, kebutuhan listrik di kawasan tersebut belum terpenuhi secara optimal. Sebelum adanya infrastruktur energi terbarukan, sistem kelistrikan Pulau Maratua hanya bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) berkapasitas ± 400 kW, yang dalam operasionalnya menimbulkan berbagai tantangan, seperti biaya bahan bakar yang tinggi, distribusi BBM yang tidak selalu lancar, serta emisi karbon yang signifikan. Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik di wilayah ini tercatat mencapai Rp 4.000–5.000/kWh, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah Jawa–Bali yang rata-rata hanya sekitar Rp 1.200/kWh (ESDM, 2023).

Menjawab tantangan keandalan pasokan listrik di Pulau Maratua, pada awal tahun 2024 telah dibangun dan dioperasikan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Hybrid berkapasitas 300 kWp yang dilengkapi dengan Battery Energy Storage System (BESS) sebesar 600 kWh serta tetap mempertahankan PLTD sebagai pembangkit cadangan. Sistem ini dibangun oleh PT PLN (Persero) melalui anak perusahaannya, PLN Nusa Daya, dengan tujuan menekan konsumsi BBM, mengurangi emisi karbon, dan meningkatkan keandalan listrik. Namun, hingga saat ini runtime PLTD masih dominan sekitar ± 14 jam per hari, utilisasi PLTS baru mencapai 42% (PVGIS, 2024), dan kinerja BESS belum optimal (Kim, 2018). Untuk itu, strategi optimasi berbasis Simulation-Based Optimization dan analisis sensitivitas sangat diperlukan (Oladeji, 2021) (Rahmat, 2024).

Data produksi energi dari sistem PLTS Hybrid di Pulau Maratua menunjukkan adanya gap performa antara estimasi energi berbasis irradiance global dengan realisasi lapangan,

terutama pada fase awal 2025. Hal ini memperkuat urgensi penelitian ini dalam mengembangkan strategi optimasi dispatch dan analisis sensitivitas untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem, berdasarkan validasi data nyata



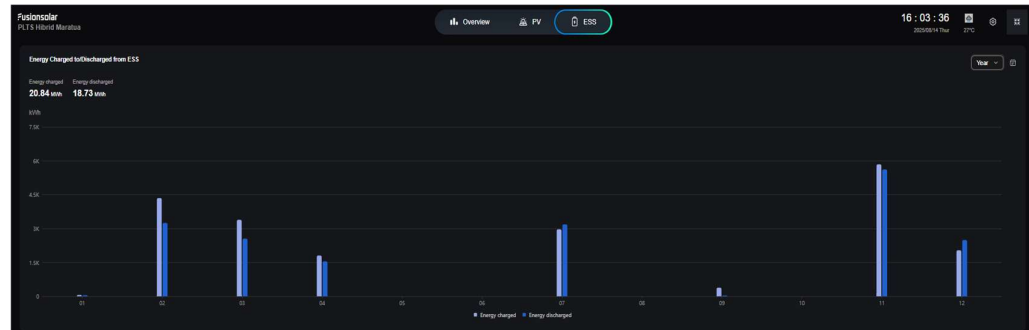
Gambar 1-1 Estimasi Produksi Energy PLTS Maratua 2025
Sumber : Global atlas



Gambar 1-2. Produksi Energy PLTS Maratua 2025
Sumber : Fusion Solar Huawei

Berdasarkan data operasional sistem hingga pertengahan tahun 2025, masih terdapat sejumlah permasalahan dalam operasional sistem hybrid tersebut. Runtime PLTD masih cukup tinggi, mencapai sekitar 14 jam per hari, sedangkan pemanfaatan energi surya hanya sebesar 42% dari potensi iradiasi yang tersedia. Berdasarkan data monitoring

sistem PLTS Hybrid Maratua sejak beroperasi pada Februari 2024, masih ditemukan ketidakaturan dalam produksi energi dan penggunaan PLTD yang tinggi. Hal ini mengindikasikan belum optimalnya sistem dispatch energi dan fungsi kontrol hybrid, sehingga diperlukan penelitian berbasis simulasi untuk merancang strategi operasi yang adaptif dan efisien.



*Gambar 1-3 Energy charging/Discharging From BESS Tahun 2024
Sumber : Fusion Solar Huawei*

Kapasitas BESS juga belum termanfaatkan secara optimal karena belum adanya strategi dispatch yang adaptif terhadap fluktuasi beban harian. Selain itu, belum diterapkannya sistem manajemen energi (Energy Management System/EMS) yang efektif menyebabkan koordinasi antara PLTS, baterai, dan PLTD belum maksimal.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa operasi sistem PLTS Hybrid di Pulau Maratua belum mencapai titik optimal. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengkajian dan pengembangan strategi operasi yang mampu mengoptimalkan kinerja sistem, baik dari sisi teknis, ekonomi, maupun lingkungan. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini mengombinasikan metode simulation-based optimization dengan analisis sensitivitas parametrik, yang mampu mengevaluasi berbagai skenario konfigurasi sistem dan strategi dispatch untuk mendapatkan solusi terbaik. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem energi terbarukan di wilayah terpencil, serta mendukung program nasional transisi energi menuju target Net Zero Emission 2060.

Penelitian ini dilatarbelakangi pula oleh kerangka kebijakan nasional yang mendukung transisi energi. RUEN menetapkan target bauran EBT sebesar 23 % pada 2025 sebagai pedoman perencanaan energi nasional (Perpres No. 22/2017). Sementara itu, dalam dokumen RUPTL PLN 2025–2034, PLN menargetkan bahwa 61 % kapasitas baru pembangkit diturunkan ke energi terbarukan dan sistem penyimpanan guna mendukung jaringan listrik rendah karbon. Dengan demikian, penelitian tentang optimasi sistem PLTS Hybrid dengan BESS di Pulau Maratua memiliki relevansi strategis dan dapat berkontribusi pada pencapaian target nasional tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana pengaruh variasi beban dan kondisi iradiasi matahari terhadap performa teknis dan ekonomi sistem PLTS Hybrid 300 kWp di Pulau Maratua?
- b. Sejauh mana sensitivitas sistem terhadap perubahan parameter teknis dan ekonomi—seperti kapasitas baterai, harga bahan bakar minyak (BBM), dan intensitas iradiasi matahari—dalam memengaruhi keandalan pasokan, biaya pembangkitan, serta kontribusi energi terbarukan?
- c. Bagaimana strategi konfigurasi dan operasi (dispatch) optimal dapat ditentukan menggunakan pendekatan simulation-based optimization untuk meningkatkan kinerja teknis dan menurunkan biaya ekonomi sistem PLTS Hybrid di Pulau Maratua?

1.3 Tujuan Penelitian

- a. Menganalisis performa teknis dan ekonomi sistem PLTS Hybrid terhadap variasi beban dan kondisi iradiasi matahari. Melakukan analisis sensitivitas terhadap parameter teknis kunci seperti kapasitas baterai, harga BBM, dan intensitas iradiasi
- b. Melakukan analisis sensitivitas terhadap parameter teknis dan ekonomi kunci (kapasitas baterai, harga BBM, dan GHI) dalam kaitannya dengan fuel saving, LCOE, dan Renewable Fraction.
- c. Menyusun strategi konfigurasi dan operasi optimal menggunakan metode simulation-based optimization untuk menurunkan runtime PLTD minimal 30% dari kondisi eksisting dan meningkatkan Renewable Fraction hingga sekurang-kurangnya 30%.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan keilmuan di bidang teknik elektro, khususnya dalam penerapan metode simulation-based optimization dan analisis sensitivitas parametrik pada sistem energi terbarukan. Kajian ini juga dapat menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan optimalisasi sistem pembangkit hybrid di wilayah terpencil.

2. Manfaat Teknis

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi konfigurasi dan strategi operasi yang optimal bagi sistem PLTS Hybrid, sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi, mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, serta memaksimalkan pemanfaatan energi surya dan baterai dalam kondisi nyata di lapangan.

3. Manfaat Praktis

Penelitian ini dapat menjadi acuan bagi instansi terkait, seperti PT PLN (Persero) dan pihak pengelola sistem energi daerah terpencil, dalam mengembangkan kebijakan dan strategi manajemen energi yang lebih adaptif dan ekonomis, khususnya untuk sistem kelistrikan off-grid atau isolated seperti di Pulau Maratua.

4. Manfaat Lingkungan

Dengan menurunnya penggunaan PLTD dan meningkatnya pemanfaatan energi surya, diharapkan dapat terjadi pengurangan emisi karbon (CO_2) yang signifikan. Hal ini mendukung agenda nasional dalam mencapai target bauran energi baru terbarukan (EBT) dan Net Zero Emission pada tahun 2060.

1.5 Ruang lingkup penelitian

1. Penelitian difokuskan pada sistem PLTS Hybrid di Pulau Maratua, Kalimantan Timur, yang terdiri dari tiga komponen utama:

- PLTS dengan kapasitas 300 kWp,
- Battery Energy Storage System (BESS) sebesar 600 kWh,
- PLTD sebagai pembangkit cadangan.

2. Simulasi dilakukan menggunakan software HOMER Pro sebagai alat bantu utama dalam evaluasi dan optimasi sistem.
3. Fokus analisis mencakup aspek teknis dan ekonomi, dengan memperhatikan parameter berikut:
 - Levelized Cost of Energy (LCOE),
 - Emisi karbon (CO₂),
 - Renewable Fraction (RF),
 - Unmet load.
4. Penelitian menggunakan pendekatan simulation-based optimization dengan pengujian berbagai konfigurasi sistem dan strategi operasi.
5. Termasuk juga analisis sensitivitas parametrik terhadap:
 - Kapasitas baterai,
 - Harga BBM,
 - Intensitas iradiasi matahari,untuk mengetahui dampak perubahan parameter terhadap performa sistem.
6. Penelitian tidak mencakup analisis kestabilan sistem kelistrikan dalam aspek tegangan dan frekuensi secara dinamis.
7. Seluruh simulasi didasarkan pada data sekunder dari sistem aktual dan asumsi teknis yang disesuaikan dengan standar industri dan referensi terpercaya.

1.6 Hipoteses

1. Hipotesis 1 (H1):

Penerapan SBO dapat menurunkan LCOE minimal 15% dan meningkatkan RF minimal 30% dibandingkan kondisi eksisting.

2. Hipotesis 2 (H2):

Kapasitas BESS memiliki pengaruh paling signifikan ($p < 0.05$) terhadap penurunan runtime PLTD

3. Hipotesis 3 (H3):

Strategi Load Following lebih efisien 20% dalam utilisasi BESS dibandingkan Cycle charging pada kondisi beban Pulau Maratua

1.7 Kebaruan Penelitian

Pengembangan sistem pembangkitan hybrid berbasis energi terbarukan, khususnya kombinasi PLTS–BESS–PLTD pada sistem kelistrikan isolated, telah banyak dikaji dalam literatur. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada optimasi desain kapasitas (*capacity optimization*), seperti penentuan ukuran optimal pembangkit dan penyimpanan energi untuk meminimalkan biaya sistem. Meskipun pendekatan tersebut memberikan kontribusi penting dalam perencanaan sistem, masih terdapat keterbatasan dalam merepresentasikan dinamika operasi sistem nyata, terutama terkait strategi operasi pembangkitan, interaksi antara PV, BESS, dan PLTD, serta perilaku sistem terhadap variasi beban dan sumber energi lokal. Selain itu, integrasi antara optimasi numerik dan simulasi operasi berbasis data aktual masih relatif terbatas, sehingga validitas operasional model optimasi belum sepenuhnya teruji pada kondisi sistem nyata.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan *simulation-based operational optimization* yang mengintegrasikan optimasi numerik menggunakan perangkat lunak HOMER Pro dengan simulasi dispatch manual per jam berbasis data operasi aktual sistem PLTS Hybrid Pulau Maratua. Pendekatan ini memungkinkan representasi yang lebih realistis terhadap perilaku operasi sistem, sekaligus memberikan validasi silang antara model simulasi dan kondisi operasi aktual. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini tidak hanya menentukan konfigurasi sistem yang optimal, tetapi juga mengidentifikasi strategi operasi yang paling efisien dalam meningkatkan kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan secara simultan.

Kontribusi utama penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kinerja sistem hybrid tidak semata ditentukan oleh kapasitas terpasang pembangkit, melainkan oleh strategi operasi dan manajemen energi yang adaptif terhadap karakteristik beban dan ketersediaan sumber energi lokal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi operasi Load Following mampu meningkatkan *renewable fraction* hingga sekitar $\pm 41\%$, menurunkan konsumsi bahan bakar hingga $\pm 30\text{--}45\%$, serta menurunkan biaya energi sistem sekitar $\pm 20\text{--}25\%$ dibandingkan sistem diesel-only, tanpa mengorbankan keandalan suplai. Selain itu, penelitian ini mengidentifikasi peran strategis Battery Energy Storage System (BESS) dalam fungsi *energy shifting* dan stabilisasi operasi, serta

menunjukkan adanya kapasitas optimum BESS yang meminimalkan biaya sistem secara keseluruhan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara optimasi numerik dan simulasi operasi berbasis data aktual, yang memungkinkan evaluasi strategi operasi sistem hybrid secara lebih realistis dibandingkan pendekatan optimasi berbasis asumsi statis. Penelitian ini juga memberikan kontribusi empiris melalui penerapan model optimasi pada sistem nyata di Pulau Maratua, sehingga menghasilkan temuan yang relevan bagi pengembangan sistem kelistrikan hybrid pada wilayah kepulauan terpencil dengan karakteristik beban dan ketergantungan diesel yang serupa. Dengan demikian, penelitian ini memperluas pendekatan optimasi sistem hybrid dari fokus pada desain kapasitas menuju optimasi strategi operasi sistem nyata, sekaligus memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan sistem pembangkitan berbasis energi terbarukan yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

Tabel 1.1 Pemetaan Research Gap – Contribution – Novelty

No	Research Gap (Kesenjangan Penelitian)	Kontribusi Penelitian	Kebaruan (Novelty)
1	Penelitian sistem hybrid sebelumnya umumnya berfokus pada optimasi kapasitas (capacity optimization), belum menitikberatkan pada optimasi strategi operasi sistem sebagai faktor dominan kinerja.	Penelitian ini mengembangkan pendekatan optimasi operasi berbasis simulation-based optimization untuk menentukan strategi operasi paling efisien pada sistem PLTS-BESS-PLTD.	Menunjukkan bahwa strategi operasi (Load Following) memiliki pengaruh lebih signifikan dibanding perubahan kapasitas dalam meningkatkan efisiensi sistem hybrid.
2	Model optimasi sebelumnya banyak menggunakan asumsi operasi agregatif/ideal, tanpa representasi operasi sistem nyata berbasis data aktual.	Penelitian mengintegrasikan optimasi numerik HOMER dengan simulasi dispatch manual per jam berbasis data operasi aktual, sehingga model lebih realistis.	Pendekatan dual validation (numerical + operational dispatch) yang jarang digunakan dalam studi hybrid sebelumnya.
3	Hubungan antara kapasitas BESS, strategi dispatch, dan titik optimum ekonomi sistem belum dianalisis secara mendalam pada studi sebelumnya.	Penelitian mengidentifikasi kapasitas optimum BESS (600 kWh) yang meminimalkan LCOE dan konsumsi BBM tanpa meningkatkan NPC secara berlebihan.	Pembuktian adanya titik optimum ekonomi BESS dalam sistem PLTS Hybrid isolated, bukan sekadar “semakin besar semakin baik”.
4	Studi hybrid PV-BESS-Diesel berbasis data operasi sistem isolated nyata masih terbatas.	Penelitian menggunakan data operasi aktual PLTS Hybrid Pulau Maratua untuk simulasi, validasi, dan analisis sensitivitas sistem.	Memberikan kontribusi empiris berbasis sistem nyata pada pengembangan model optimasi hybrid di wilayah kepulauan.
5	Penelitian sebelumnya belum banyak mengevaluasi dampak strategi operasi terhadap efisiensi BBM, LCOE, dan Renewable Fraction secara simultan.	Penelitian menunjukkan bahwa optimasi operasi meningkatkan RF hingga $\pm 41\%$, menurunkan BBM 30–45%, dan menurunkan LCOE $\pm 20\text{--}25\%$ dibanding diesel-only.	Demonstrasi optimasi operasi sebagai kunci peningkatan kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan secara simultan.
6	Belum banyak studi yang mengaitkan optimasi hybrid dengan implikasi operasional dan pengelolaan aset pembangkitan diesel.	Penelitian menunjukkan bahwa optimasi operasi menurunkan runtime PLTD (≈ 5.900 jam/tahun), berpotensi menurunkan O&M dan memperpanjang umur mesin.	Integrasi perspektif sistem tenaga dan manajemen aset pembangkitan dalam studi optimasi hybrid.