

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Penelitian mengenai sistem pembangkit listrik tenaga surya hybrid (PLTS Hybrid) dengan dukungan BESS dan PLTD telah banyak dilakukan di berbagai wilayah terpencil. Studi-studi tersebut umumnya difokuskan pada pencarian konfigurasi optimal sistem hybrid untuk menekan konsumsi bahan bakar fosil, meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, serta menurunkan biaya operasional dan emisi karbon.

Optimasi sistem hybrid dilakukan pada komunitas off-grid di Nigeria dengan metode multi-objective optimization berbasis *ϵ -constraint technique*. Hasil penelitian menunjukkan penurunan nilai Levelized Cost of Energy (LCOE) sebesar 6,27% dan peningkatan efisiensi penggunaan baterai dalam sistem hybrid berbasis PLTS-BESS-PLTD (Oladeji, 2021).

Strategi *dispatch* berbasis metode Particle Swarm Optimization (PSO) untuk meningkatkan efisiensi sistem hybrid PV-Battery-Diesel dilakukan dalam studi dimana strategi ini menghasilkan umur baterai yang lebih panjang dan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional (Zhang, 2022)

Dalam studi di Pulau Menui, Sulawesi, dengan menggunakan pendekatan techno-economic analysis untuk sistem hybrid PLTS-Wind-BESS-PLTD. Hasilnya menunjukkan bahwa sizing komponen yang tepat serta penggunaan strategi operasi berbasis EMS mampu meningkatkan Renewable Fraction (RF) hingga 82% (Rahmat, 2024)

Selain studi-studi di atas, beberapa penelitian lain juga memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan sistem hybrid, khususnya di wilayah-wilayah dengan keterbatasan akses energi. (Irshad, 2023) menekankan pentingnya penentuan ukuran optimal (hybrid sizing) untuk sistem microgrid mandiri. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan sizing sangat krusial dalam memastikan efisiensi dan keandalan sistem microgrid, meskipun masih terbatas pada jaringan otonom tanpa integrasi sistem utilitas.

(Cherif, 2021) melakukan studi integrasi sistem desalinasi Reverse Osmosis (RO) dengan sistem pembangkit hybrid. Fokusnya pada analisis sensitivitas menunjukkan

bahwa kombinasi RO dan energi terbarukan memiliki potensi besar, terutama untuk wilayah seperti Aljazair, meskipun penelitian serupa masih terbatas di kawasan tersebut.

(Oladeji, 2021) menggunakan pendekatan multi-objektif dalam optimasi sistem energi terbarukan hybrid. Penelitian ini menyoroti pentingnya efisiensi tinggi dari berbagai parameter, namun masih terbatas pada konteks studi wilayah Brazil dan belum secara luas diaplikasikan di negara berkembang lainnya.

(Singh, 2020) melakukan dua jenis studi berbeda. Yang pertama adalah tinjauan literatur terhadap metode sistem hybrid secara global yang menunjukkan kurangnya review komprehensif yang mencakup berbagai pendekatan dan wilayah studi. Yang kedua berfokus pada optimasi microgrid terisolasi menggunakan metode seperti GA, PSO, dan HOMER. Namun, penelitian ini belum mengeksplorasi sensitivitas terhadap berbagai parameter secara menyeluruh.

Penelitian oleh (Zhao, 2023) mengembangkan dan mengoptimalkan model sistem hybrid PLTS–Baterai–PLTD untuk komunitas terpencil yang tidak terhubung ke jaringan listrik. Dengan memanfaatkan simulasi HOMER Pro dan pendekatan matematis berbasis optimasi biaya dan emisi, studi ini menunjukkan bahwa sistem hybrid secara signifikan lebih unggul daripada sistem diesel-only, baik dari segi biaya maupun dampak lingkungan. ¹(Dardour, Chouaieb, & Habib, 2020) meneliti sistem PV/Diesel hybrid di Tunisia dengan pendekatan techno-economic menggunakan HOMER. Studi ini masih terbatas pada perhitungan dasar LCOE tanpa skenario adaptif terhadap variasi beban dan pasokan BBM (Dardour, Chouaieb, & Habib, 2020) meneliti sistem PV/Diesel hybrid di Tunisia dengan pendekatan techno-economic menggunakan HOMER. Studi ini masih terbatas pada perhitungan dasar LCOE tanpa skenario adaptif terhadap variasi beban dan pasokan BBM.

(Dardour, 2020) meneliti sistem PV/Diesel hybrid di Tunisia dengan pendekatan techno-economic menggunakan HOMER. Studi ini masih terbatas pada perhitungan dasar LCOE tanpa skenario adaptif terhadap variasi beban dan pasokan BBM.

Sebagai pembeda dari studi sebelumnya, penelitian ini mengusung pendekatan *simulation-based optimization* yang dikombinasikan dengan analisis sensitivitas parameter menggunakan data nyata dari sistem PLTS Hybrid 300 kWp di Pulau Maratua. Keunggulan penelitian ini terletak pada validasi profil runtime PLTD dan BESS, serta penyusunan strategi operasi yang mempertimbangkan kebaruan parameter IRENA, kombinasi pendekatan SBO, dan sensitivitas untuk menghasilkan sistem yang optimal, adaptif, dan andal di konteks lokal Indonesia.

2.2 Kajian Teori (Landasan Teori)

2.2.1 Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) hybrid

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Hybrid merupakan solusi energi terbarukan yang mengintegrasikan antara Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sistem penyimpanan energi berbasis baterai atau Battery Energy Storage System (BESS), dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sebagai cadangan. Kombinasi ini dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan energi surya sebagai sumber utama, sementara BESS berperan dalam menyimpan kelebihan energi untuk digunakan saat beban puncak atau ketika intensitas matahari rendah. PLTD tetap disertakan dalam sistem sebagai back-up untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik, terutama pada kondisi cuaca ekstrem atau saat kapasitas PLTS dan BESS tidak mencukupi.

Sistem PLTS Hybrid sangat cocok diterapkan di daerah terpencil atau wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik utama (off-grid). Keunggulan utama dari sistem ini adalah kemampuannya untuk menekan konsumsi bahan bakar fosil secara signifikan, mengurangi emisi karbon, dan meningkatkan kontribusi Energi Baru Terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional. Dengan pengelolaan yang tepat, sistem ini tidak hanya lebih ramah lingkungan, tetapi juga lebih ekonomis dalam jangka panjang dibandingkan dengan sistem berbasis diesel murni (Chauhan & Saini, 2013)

2.2.2 Pembangkit Listrik Tenaga diesel (PLTD) dan BESS

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) masih banyak digunakan sebagai sumber utama pembangkitan listrik, khususnya di wilayah-wilayah dengan sistem kelistrikan terisolasi (*isolated grid*), seperti pulau-pulau terpencil. Keunggulan PLTD terletak pada kemampuannya menyediakan daya secara andal dan fleksibel, tanpa tergantung pada kondisi cuaca. Namun demikian, PLTD memiliki keterbatasan yang signifikan, terutama dalam hal biaya operasional yang tinggi akibat ketergantungan pada bahan bakar minyak (BBM). Selain itu, pasokan BBM ke daerah terpencil sering kali mengalami keterlambatan atau kendala distribusi, yang berdampak pada keandalan sistem secara keseluruhan (Kim et al., 2018b).

Untuk mengatasi keterbatasan PLTD, integrasi dengan sistem penyimpanan energi berbasis baterai atau *Battery Energy Storage System* (BESS) menjadi strategi yang efektif. BESS memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem kelistrikan hybrid. Fungsi utama BESS adalah menyimpan kelebihan energi dari PLTS saat produksi melebihi beban, dan kemudian melepaskannya kembali saat terjadi defisit energi, terutama pada waktu beban puncak. Selain itu, BESS juga membantu meredam fluktuasi daya dari sumber terbarukan dan mengurangi beban kerja PLTD, sehingga memperpanjang umur operasional dan menurunkan konsumsi BBM secara keseluruhan (Hichem et al., 2024).

2.2.3 Rumus Dasar Operasi Sistem PLTS Hybrid

Operasi sistem PLTS hybrid melibatkan interaksi antara komponen utama seperti panel surya (PV), baterai (BESS), dan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD). Dalam rangka melakukan pemodelan dan simulasi, sejumlah rumus dasar digunakan untuk menggambarkan karakteristik teknis, kinerja, biaya, serta efisiensi dari sistem hybrid secara keseluruhan.

1. Daya Output Panel Surya

$$PPV = A \times G \times \eta_{PV} \quad (2.1)$$

- A = luas panel surya (m^2)
- G = intensitas radiasi matahari (W/m^2)
- η_{PV} = efisiensi panel surya

(Roy, 2014)

Contoh perhitungan:

Luas panel surya (A) = $1,6 \text{ m}^2$

Intensitas radiasi (G) = $1000 \text{ W}/\text{m}^2$

Efisiensi panel (η_{PV}) = $18\% = 0,18$

$$PPV = A \times G \times \eta_{PV}$$

$$PPV = 1,6 \times 1000 \times 0,18$$

$$= 288 \text{ WP}$$

* Satu modul panel dengan luas $1,6 \text{ m}^2$ menghasilkan daya maksimum 288 Wp saat iradiasi $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

2. Energi Harian dari PLTS

$$EPV = PPV \times H_t \quad (2.2)$$

- E_{pv} = Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam satu hari (kWh/hari)
- P_{pv} = Daya puncak (peak power) dari panel surya (kWp)
- H_t = durasi penyinaran matahari efektif (jam)

(Roy, 2014)

Contoh perhitungan:

Daya puncak panel (PPV) = 5 kWp

Durasi penyinaran efektif (H_t) = $4,5 \text{ jam}/\text{hari}$

$$EPV = 5 \times 4,5$$

$$= 22,5 \text{ kWh/hari}$$

* PLTS berkapasitas 5 kWp menghasilkan rata-rata 22,5 kWh energi per hari.

3. State of Charge (SOC) Baterai

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \left(\frac{I_{charge} - I_{discharge}}{C_{nominal}} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

- SOC(t) = State of Charge (SOC) baterai pada waktu ke-t (% kapasitas)
- I_{charge} = Arus pengisian baterai (A)
- I_{discharge} = Arus pengosongan (pemakaian) baterai (A)
- C_{nominal} = Kapasitas nominal baterai (Ah)

(Kim, 2018)(Singh, 2020)

Contoh perhitungan:

Kapasitas nominal baterai (C_{nominal}) = 200 Ah

Arus pengisian (I_{charge}) = 10 A

Arus pengosongan (I_{discharge}) = 5 A

Durasi waktu (Δt) = 1 jam

SOC(t-1) = 60%

SOC(t) = 60 + (10 - 5) × 1200 × 100

$$= 60 + 2,5$$

$$= 62,5\%$$

*Setelah 1 jam operasi, SOC naik dari 60% menjadi 62,5%.

4. Depth of Discharge (DoD)

$$DoD(\%) = \left(\frac{E_{\{used\}}}{E_{\{total\}}} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

- $E_{\{used\}}$ = Energi yang sudah digunakan (dikeluarkan dari baterai)
- $E_{\{total\}}$ = Kapasitas total baterai (biasanya dalam Wh atau kWh)

(Kim, 2018)

Contoh perhitungan:

Energi yang digunakan (E_{used}) = 2,0 kWh

Kapasitas total baterai (E_{total}) = 5,0 kWh

DoD = $2,05,0 \times 100$
= 40%

*Baterai telah digunakan sebesar 40% dari kapasitas totalnya, dan masih tersisa 60% SOC.

5. Levelized Cost of Energy (LCOE)

$$LCOE = \frac{\sum \left[\frac{It + Mt + Ft}{(1 + r)^t} \right]}{\sum \left[Et \frac{Et}{(1 + r)^t} \right]} \quad (2.5)$$

- It: Investasi awal maupun tambahan pada tahun ke-t
- Mt: Biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) pada tahun ke-t
- Ft: Biaya bahan bakar (misalnya diesel) pada tahun ke-t
- r: Tingkat diskonto atau discount rate
- t: Tahun ke-t (misalnya dari 0 sampai 20)

(Dardour, 2020)

Asumsi:

Investasi awal (I_0) = \$10.000

Biaya O&M per tahun (M_t) = \$200

Tidak ada biaya bahan bakar ($F_t = 0$)

Energi tahunan (E_t) = 7.000 kWh

Umur proyek (T) = 20 tahun

Discount rate (r) = 8%

Langkah 1 – Hitung nilai sekarang (Present Value):

Total biaya (PVcost):

$$\begin{aligned}\text{PVcost} &= 10.000 + 200 \times 1 - (1 + 0,08)^{-200,08} \\ &= 10.000 + 200 \times 9,818 \\ &= 10.000 + 1.963,6 \\ &= 11.963,6\end{aligned}$$

Total energi (PVenergy):

$$\begin{aligned}\text{PVenergy} &= 7.000 \times 1 - (1 + 0,08)^{-200,08} \\ &= 7.000 \times 9,818 \\ &= 68.726\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{LCOE} &= 11.963,6 / 68.726 \\ &= 0,174 \text{ \$/kWh}\end{aligned}$$

*Biaya listrik setara dari sistem tersebut adalah 0,174 USD/kWh.

6. Net Present Cost (NPC)

$$NPC = \sum_{t=0}^T \left(\frac{C_t}{(1+r)^t} \right) \quad (2.6)$$

- C_t : Total biaya pada tahun ke- t , terdiri dari biaya investasi, O&M (operasi dan pemeliharaan), dan bahan bakar.
- r : Tingkat diskonto (discount rate), biasanya 6–10% tergantung studi.
- t : Tahun ke- t , dimulai dari tahun 0 hingga tahun ke- T (umur proyek).
- $\sum$: Penjumlahan dari tahun ke-0 sampai ke- T (misalnya 20 tahun).

(Standar umum techno-economic dalam HOMER Pro / NREL)
((NREL, 2020) ((Roy, 2014)

7. Cost of Energy Savings (CES)

$$CES = (C_{PLTD} - C_{Hybrid}) \quad (2.7)$$

- CES: Penghematan biaya energi (dalam rupiah atau dolar)
- C_{PLTD} : Total biaya sistem PLTD saja (biasanya mencakup bahan bakar, O&M, dan investasi PLTD)
- C_{Hybrid} : Total biaya sistem Hybrid (PLTS + PLTD + BESS)

Rumus ini bukan internasional standard, tetapi diadopsi secara ilmiah dari model perbandingan biaya produksi energi hybrid.
(IRENA, 2013) (Zhao, 2023)

8. Fungsi Objektif Optimasi Sistem Hybrid

$$\min Z(x) = NPC + OPEX + FUEL \quad (2.8)$$

- $Z(x)$: Total biaya proyek yang ingin diminimalkan
- NPC: Net Present Cost — total biaya proyek yang didiskontokan
- OPEX: Operating Expenditure — biaya operasi dan pemeliharaan sistem
- FUEL: Biaya bahan bakar, biasanya dari PLTD

9. Persamaan Keseimbangan daya

$$P_{PV} + P_{BESS} + P_{PLTD} = P_{Load} \quad (2.9)$$

- P_{PV} : Daya yang dihasilkan PLTS
- P_{BESS} : Daya dari baterai (bisa discharge/charge)
- P_{PLTD} : Daya dari genset/diesel
- P_{Load} : Beban listrik yang harus dipenuhi

Batasan soc Pada BESS

$$SOC_{min} \leq SOC_{BESS} \leq SOC_{max} \quad (2.10)$$

(IRENA, 2013)

10. Performance Ratio (PR)

$$PR = \frac{(E_{AC})}{(G_{ref} \times P_{rated})} \quad (2.11)$$

- E_{AC} : Energi listrik AC yang dihasilkan oleh sistem PLTS (biasanya dalam kWh)
- G_{ref} : Irradiasi surya total selama periode tertentu (dalam kWh/m²)
- P_{rated} : Daya terpasang dari sistem (biasanya dalam kWp)

KPI Resmi Internasional untuk PLTS

(IEC, 2021)

(Roy, 2014)

11. Emisi CO₂ yang Dihemat

$$CO_2 \text{ Saved} = E_{PLTS} \times EF_{Diesel} \quad (2.12)$$

- E_{PLTS} : Energi listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS (dalam kWh) selama periode tertentu (misalnya per tahun)
- EF_{Diesel} : Emission Factor dari PLTD, yaitu jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan per satuan energi yang dihasilkan oleh PLTD (umumnya dalam kg CO₂/kWh)

(Zhao, 2023)

2.2.4 Simulations-based-of-Timization (SBO)

Sistem hybrid merupakan integrasi dari dua atau lebih sumber energi (terbarukan dan konvensional) dengan tujuan meningkatkan keandalan dan efisiensi energi. Pada sistem PLTS Hybrid, kombinasi antara PLTS, BESS, dan PLTD memungkinkan pembangkitan listrik yang lebih stabil dan berkelanjutan.

Keuntungan sistem hybrid:

- Mengurangi konsumsi bahan bakar fosil

- Menekan biaya pokok penyediaan (BPP)
- Meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan
- Menjamin kontinuitas pasokan listrik

Pengoperasian sistem ini membutuhkan strategi *dispatch* energi yang adaptif terhadap variasi beban dan iradiasi matahari. Oleh karena itu, integrasi sistem manajemen energi atau *Energy Management System (EMS)* menjadi sangat penting. EMS mengoordinasikan alokasi daya secara real-time antara PLTS, BESS, dan PLTD agar operasi sistem selalu dalam kondisi optimal. Studi IRENA (2023) menyebutkan bahwa sistem hybrid yang dilengkapi dengan EMS dapat menurunkan LCOE hingga 30–50% dibandingkan sistem diesel murni

Optimalisasi operasi sistem ini menggunakan pendekatan *Simulation-Based Optimization* dan analisis sensitivitas parametrik menjadi penting untuk mencari konfigurasi kapasitas dan strategi dispatch terbaik, yang mampu menekan runtime PLTD, memaksimalkan energi surya, serta menurunkan LCOE secara signifikan (Zhang, 2022)

2.2.5 Analisis Sensitivitas Parametrik

Analisis sensitivitas parametrik merupakan pendekatan penting dalam evaluasi sistem energi terbarukan, khususnya pada sistem hybrid seperti PLTS-BESS-PLTD. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mengetahui sejauh mana perubahan suatu parameter input—seperti harga bahan bakar minyak (BBM), kapasitas baterai, tingkat iradiasi surya, atau profil beban—dapat memengaruhi performa teknis maupun ekonomi sistem secara keseluruhan. Metode ini sangat berguna dalam pengambilan keputusan, terutama untuk sistem di daerah terpencil yang menghadapi ketidakpastian tinggi terhadap faktor-faktor eksternal.

variasi harga BBM memiliki dampak signifikan terhadap biaya operasional sistem hybrid. Semakin tinggi harga BBM, maka kontribusi energi terbarukan menjadi semakin ekonomis dibandingkan PLTD. kapasitas baterai yang tepat dapat mengurangi ketergantungan pada pembangkit berbasis diesel dan memaksimalkan pemanfaatan energi surya. Namun demikian, peningkatan

kapasitas baterai secara berlebihan juga dapat meningkatkan investasi awal tanpa memberikan penghematan yang sebanding. Sementara itu, fluktuasi iradiasi surya memengaruhi kestabilan suplai energi PLTS dan perlu dikaji melalui simulasi berbasis data iklim lokal.

Dengan menggunakan perangkat lunak seperti HOMER Pro, analisis sensitivitas dapat dilakukan secara sistematis untuk berbagai parameter dan skenario. Hasil analisis ini memungkinkan perancang sistem untuk mengidentifikasi titik kritis dalam desain dan menyusun strategi adaptif terhadap perubahan kondisi di lapangan. (Homer Energy, 2019) (Oladeji, 2021)

2.2.6 Optimasi Sistem dengan HOMER Pro

Dalam perencanaan sistem energi hybrid, pemilihan kapasitas optimal dari setiap komponen—seperti pembangkit PV, baterai, dan genset diesel—menjadi faktor krusial untuk memastikan sistem beroperasi secara ekonomis dan andal. Salah satu perangkat lunak yang paling banyak digunakan dalam proses ini adalah HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources).

HOMER Pro merupakan platform simulasi yang dirancang untuk menganalisis kelayakan teknis dan keekonomian berbagai konfigurasi sistem energi terbarukan. Perangkat lunak ini bekerja dengan pendekatan optimasi berbasis siklus hidup biaya (*life cycle cost minimization*), yang mempertimbangkan parameter teknis, ekonomi, dan lingkungan secara simultan. Model optimasi dalam HOMER mampu mengkalkulasi ribuan kombinasi konfigurasi secara iteratif untuk menemukan solusi dengan biaya terendah selama umur proyek. (Oladeji et al., 2021)

Proses optimasi dalam HOMER Pro menggunakan algoritma pencarian iteratif untuk mengevaluasi berbagai kombinasi kapasitas pembangkit, kapasitas penyimpanan energi, dan strategi *dispatch* daya. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk meminimalkan nilai Levelized Cost of Energy (LCOE), yang secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$\min LCOE = \left\{ \frac{\sum_{\{t=1\}}^{\{N\}} \frac{(I_t + M_t + F_t)}{(1+r)^t}}{\sum_{\{t=1\}}^{\{N\}} \frac{Et}{(1+r)^t}} \right\} \quad (2.13)$$

dengan batasan sebagai berikut:

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \quad (2.14)$$

$$0 \leq P_{PV} \leq P_{PV\max} \quad (2.15)$$

$$0 \leq P_{Diesel} \leq P_{Diesel\max} \quad (2.16)$$

Keterangan:

- I_t : Biaya investasi pada tahun ke- t
- M_t : Biaya operasi dan pemeliharaan pada tahun ke- t
- F_t : Biaya bahan bakar (fuel cost) pada tahun ke- t
- E_t : Energi listrik yang dihasilkan pada tahun ke- t
- R : Suku bunga diskonto
- SOC_t : State of Charge baterai pada waktu t
- PPV, P_{diesel} : Daya output dari PV dan genset diesel

Simulasi dalam HOMER Pro umumnya dilakukan dalam beberapa skenario untuk menggambarkan kondisi riil dan kemungkinan variasi ke depan. Tiga skenario umum yang digunakan meliputi:

- Base Case: menggunakan data aktual beban dan iradiasi,
- Optimal Case: menampilkan konfigurasi dengan LCOE terendah,
- Sensitivity Case: mengevaluasi dampak dari perubahan harga bahan bakar, variasi cuaca, serta pola permintaan beban terhadap performa sistem.

Output dari proses ini berupa rekomendasi konfigurasi kapasitas pembangkit (kWp), kapasitas penyimpanan energi (kWh), waktu operasi genset diesel, nilai LCOE, Net Present Cost (NPC), dan emisi CO₂. Dengan demikian, HOMER Pro tidak hanya memberikan solusi teknis yang layak, tetapi juga dasar pengambilan keputusan berbasis biaya dan kelestarian lingkungan.

2.2.7 LCOE, NPV, IRR, dan Renewable Fraction

Evaluasi teknis dan ekonomi dalam sistem energi hybrid memerlukan indikator kuantitatif yang dapat menggambarkan kinerja jangka panjang secara komprehensif. Beberapa indikator utama yang digunakan adalah Levelized Cost of Energy (LCOE), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Renewable Fraction (RF).

Levelized Cost of Energy (LCOE) adalah indikator ekonomi yang digunakan untuk menghitung rata-rata biaya produksi energi selama umur proyek, termasuk biaya investasi awal, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, serta penggantian komponen. LCOE dinyatakan dalam satuan \$/kWh dan memungkinkan perbandingan biaya antar berbagai teknologi pembangkit energi secara adil (Bhandari et al., 2015). Nilai LCOE yang rendah mengindikasikan sistem yang lebih ekonomis dan efisien secara biaya.

Net Present Value (NPV) digunakan untuk menilai kelayakan finansial proyek dengan menghitung selisih antara nilai sekarang dari aliran kas masuk (benefit) dan nilai sekarang dari biaya investasi serta pengeluaran operasional. Sementara itu, Internal Rate of Return (IRR) adalah tingkat diskonto yang membuat nilai NPV sama dengan nol. IRR digunakan untuk membandingkan profitabilitas relatif dari beberapa pilihan investasi. Proyek dengan IRR lebih tinggi dari tingkat bunga pasar umumnya dianggap layak secara finansial.

Renewable Fraction (RF) adalah indikator yang menunjukkan proporsi energi yang dihasilkan dari sumber terbarukan terhadap total energi yang disuplai oleh sistem. Semakin tinggi nilai RF, maka semakin besar kontribusi energi bersih dalam sistem tersebut. Indikator ini penting dalam menilai dampak lingkungan dan mendukung target transisi energi

Dengan mengombinasikan keempat indikator ini, perancang sistem dapat mengevaluasi tidak hanya kinerja teknis, tetapi juga kelayakan ekonomi dan kontribusi sistem terhadap bauran energi terbarukan secara menyeluruh. (A. Singh et al., 2015)

2.2.8 State of Charge (SOC), Depth of Discharge (DoD), dan Performance Ratio (PR)

Dalam sistem energi terbarukan berbasis penyimpanan, seperti PLTS Hybrid yang terintegrasi dengan Battery Energy Storage System (BESS), pemahaman terhadap parameter teknis baterai dan efisiensi konversi energi menjadi sangat krusial. Tiga indikator utama yang sering digunakan adalah State of Charge (SOC), Depth of Discharge (DoD), dan Performance Ratio (PR).

State of Charge (SOC) adalah indikator yang menunjukkan tingkat muatan baterai pada suatu waktu, dinyatakan dalam persentase kapasitas penuh. SOC yang tinggi menunjukkan baterai dalam kondisi terisi, sedangkan SOC rendah menunjukkan kapasitas yang hampir habis. Parameter ini penting dalam sistem kontrol untuk mencegah overcharging maupun overdischarging yang dapat memperpendek umur baterai. (A. Singh et al., 2015)

Depth of Discharge (DoD) mengindikasikan seberapa banyak energi yang telah dikeluarkan dari kapasitas total baterai. Misalnya, baterai yang telah mengeluarkan 60% energinya memiliki DoD sebesar 60%. Pemahaman terhadap DoD penting dalam menentukan strategi pengoperasian baterai yang optimal, karena semakin dalam siklus DoD yang terjadi, semakin cepat degradasi baterai berlangsung

Sementara itu, Performance Ratio (PR) adalah parameter evaluasi efisiensi sistem PLTS secara keseluruhan. PR dihitung dari rasio antara energi listrik aktual yang dihasilkan oleh sistem PLTS dengan energi teoritis berdasarkan radiasi matahari yang diterima. Nilai PR mencerminkan kualitas desain, efisiensi inverter, kerugian kabel, suhu, dan faktor teknis lainnya. PR yang tinggi menunjukkan bahwa sistem PLTS bekerja secara efisien dalam mengonversi energi surya menjadi listrik bersih (A. Singh et al., 2015)

Ketiga indikator ini penting untuk dijadikan acuan dalam pemantauan dan optimasi sistem energi berbasis PLTS dan BESS, terutama di wilayah terpencil yang mengandalkan keberlanjutan dan efisiensi dari sistem yang terbatas sumber dayanya.

2.2.9 *Komponen dan Arsitektur Sistem ESS*

Dalam implementasinya, sistem penyimpanan energi (ESS) skala utilitas tersusun atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk menunjang fungsi penyimpanan, pengolahan, dan pengamanan energi. Komponen-komponen ini umumnya terdiri dari *battery pack*, *smart rack controller*, *power conversion system* (PCS), sistem pendingin, serta sistem proteksi keselamatan seperti pemadam kebakaran otomatis.

Salah satu contoh sistem ESS yang banyak digunakan adalah Huawei LUNA2000-2.0MWh. Sistem ini menggunakan teknologi lithium iron phosphate (LFP) yang terbukti stabil dan aman untuk penyimpanan energi jangka panjang. Dalam satu *battery pack* terdiri dari 18 sel LFP berkapasitas 280 Ah yang disusun dalam konfigurasi 18S1P. Dengan tegangan nominal 57,6 volt, satu pack memiliki kapasitas energi sebesar:

$$E = V \times I = 57,6 \text{ V} \times 280 \text{ Ah} = 16,13 \text{ kWh} \quad (2.17)$$

Satu *battery rack* memuat hingga 21 *battery pack*, dan terdapat enam rack dalam satu unit kontainer, sehingga total kapasitas sistem mencapai lebih dari 2 MWh dalam satu kontainer ESS.

Untuk mengatur alur energi antar *battery rack* dan sistem kontrol pusat, ESS ini menggunakan perangkat yang disebut *Smart Rack Controller*. Komponen ini bertugas melakukan konversi DC-DC, mengelola distribusi energi antar modul, dan memonitor performa sistem secara lokal. Tegangan operasi pada sisi baterai mencapai 1209,6 volt, dengan efisiensi konversi hingga 99%, menjadikannya salah satu sistem paling efisien di kelasnya. Tegangan kerja dapat mencapai 1500 VDC di sisi bus, sementara arus nominal sekitar 275 ampere.

Selanjutnya, daya yang tersimpan dalam bentuk DC akan dikonversi menjadi AC oleh *Power Conversion System* (PCS). Model LUNA2000-200KTL milik Huawei, misalnya, mampu menghasilkan daya hingga 240 kW dengan efisiensi puncak sebesar 99,01%. PCS ini bersifat dua arah (bidirectional),

memungkinkan sistem untuk baik menyuplai maupun menyerap energi dari jaringan listrik sesuai kondisi operasional yang dibutuhkan.

Komponen penting lainnya adalah sistem pendingin dan sistem proteksi. Karena ESS bekerja pada kondisi tegangan dan arus tinggi, suhu operasional menjadi perhatian utama. Oleh karena itu, sistem ini dilengkapi dengan air conditioner terdistribusi yang dipasang di masing-masing kabinet baterai. Sistem pendingin ini memungkinkan ESS beroperasi pada suhu lingkungan antara -25°C hingga 60°C . Sementara itu, sistem proteksi dilengkapi dengan sensor asap, gas mudah terbakar, dan suhu. Bila dua atau lebih sensor mendeteksi kondisi bahaya, sistem akan memicu alarm dan memulai pemadaman otomatis dengan gas Perfluorohexanone dalam waktu 30 detik setelah sinyal diterima oleh Central Monitoring Unit (CMU).

Dari keseluruhan arsitektur tersebut, dapat dilihat bahwa sistem ESS modern seperti LUNA2000 tidak hanya mengandalkan kapasitas baterai besar, tetapi juga kecanggihan sistem manajemen dan keselamatan yang memungkinkan penggunaannya dalam aplikasi industri maupun integrasi energi terbarukan berskala besar. (Confidential, n.d.)(Huawei C & I Smart String ESS Solution, n.d.)

2.2.10 Teknologi dan Karakteristik Sistem Penyimpanan Energi (ESS)

Sistem penyimpanan energi (ESS) merupakan teknologi penting dalam sistem pembangkit hybrid modern, terutama dalam mendukung integrasi energi terbarukan dan pengelolaan beban puncak. Berdasarkan laporan Asian Development Bank (ADB, 2018), ESS dibagi menjadi beberapa kategori teknologi: mekanikal, elektrokimia, kimia, termal, dan listrik. Di antara berbagai teknologi tersebut, baterai elektrokimia—khususnya lithium-ion—menjadi pilihan utama dalam implementasi skala komersial dan industri.

1. Perbandingan Teknologi Baterai

Tabel 2.1 Perbedaan jenis baterai

Teknologi Baterai	Densitas Energi (Wh/kg)	Efisiensi (%)	Umur Pakai (siklus)	Keunggulan Utama	Kekurangan Utama	Referensi
Lithium-ion (LFP)	180–260	94–98	4,000–10,000	Aman, umur panjang, efisiensi tinggi, respons cepat	Biaya masih tinggi, sensitif suhu ekstrem	Elalfy et al. 2024; Liu et al. 2025
Lithium-ion (NMC/NCA)	200–300	90–96	2,000–5,000	Densitas energi tinggi, footprint kecil	Termal lebih berisiko dibanding LFP	Liu et al. 2025
Lead-Acid (PbA/VRLA)	30–50	65–80	300–1,200	Biaya terendah, teknologi matang	Berat, kedalaman DOD kecil, umur pendek	Elalfy et al. 2024
Sodium-Sulfur (Na-S)	100–150	85–90	3,000–5,000	Daya besar, cocok beban puncak	Operasi suhu tinggi (300–350°C)	Mahadevan et al. 2025
Sodium-ion (Na-ion) – Emerging	120–160	85–92	1,500–4,000	Material murah (tanpa Li), cocok iklim tropis	Masih fase pengembangan komersial	Elalfy et al. 2024; RSC 2025
Redox Flow (Vanadium)	20–50	70–80	>12,000	Skalabilitas tinggi, degradasi sangat rendah	Rendah energi spesifik, biaya awal tinggi	Mahadevan et al. 2025; Liu et al. 2025
Solid-State Battery – Future Tech	350–450	95–99	>8,000 (estimasi)	Densitas tertinggi, keamanan baik	Dalam tahap riset dan pilot	Phogat et al. 2025

Perbandingan teknologi penyimpanan energi pada Tabel 2 menunjukkan bahwa teknologi Lithium-ion (LFP) merupakan opsi paling ideal untuk sistem PLTS Hybrid di wilayah tropis seperti Pulau Maratua. Hal ini didukung oleh densitas energi yang tinggi (180–260 Wh/kg), efisiensi yang sangat baik (>95%), dan umur pakai yang panjang hingga lebih dari 4.000 siklus (Elalfy, 2024). Sementara PbA masih digunakan sebagai solusi ekonomis, umur siklus pendek dan efisiensi rendah membatasi penerapannya pada sistem yang membutuhkan depth of discharge (DoD) tinggi.

Teknologi emerging seperti Sodium-ion dan Solid-State Battery menjanjikan peningkatan keberlanjutan dan efisiensi jangka panjang, namun belum banyak tersedia secara komersial. Dengan demikian, pemilihan LFP dalam sistem PLTS Hybrid Maratua sejalan dengan tren global penyimpanan energi pada sistem isolated berbasis energi surya.

2. Efisiensi Energi Sistem Baterai

Efisiensi siklus energi (*round-trip efficiency*) sangat penting dalam menentukan kinerja keseluruhan sistem ESS. Untuk lithium-ion, efisiensinya bisa mencapai 95%. Efisiensi total sistem dapat dihitung dengan persamaan:

$$\eta_{total} = \eta_{baterai} \times \eta_{PCS} \times \eta_{sistem\ pendukung} \quad (2.18)$$

Sebagai contoh:

$$\eta_{total} = 0.95 \times 0.98 \times 0.97 = 0.902 \text{ (90.2\%)} \quad (2.19)$$

3. Umur Pakai Berdasarkan DoD

Umur baterai sangat dipengaruhi oleh kedalaman pengosongan (Depth of Discharge, DoD). ADB menunjukkan bahwa pengoperasian baterai dengan DoD lebih rendah secara signifikan meningkatkan jumlah siklus yang dapat dicapai.

Misalnya:

Tabel 2.2 perbedaan jenis baterai

DoD (%)	Jumlah Siklus	Lifetime Energy Throughput
100%	500	3.5 kWh
50%	5000	17.5 kWh
10%	>50.000	>35 kWh

Rumus energi total yang dapat dikirimkan selama masa hidup baterai:

$$E_{lifetime} = \text{Jumlah Siklus} \times \text{Energi per Siklus} \quad (2.20)$$

4. Penurunan Kinerja dan Harga Sistem ESS Berbasis Baterai

Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian sistem penyimpanan energi berbasis baterai, khususnya lithium-ion, adalah penurunan kinerja (*degradation*) seiring waktu. Penurunan ini terjadi akibat kombinasi dari berbagai faktor seperti suhu operasi yang tinggi, kedalaman siklus pengisian (*depth of discharge/DoD*), laju pengisian (*C-rate*), serta usia kalender (*calendar aging*).

Suhu tinggi merupakan faktor dominan yang mempercepat proses degradasi kimia internal dalam sel baterai. Ketika suhu meningkat di atas ambang batas yang direkomendasikan (biasanya sekitar 45°C), reaksi kimia yang tidak diinginkan dapat terjadi lebih cepat, seperti oksidasi elektrolit, peluruhan material katoda, dan pertumbuhan lapisan SEI (*solid electrolyte interface*). Reaksi ini akan menurunkan kapasitas efektif baterai, meningkatkan resistansi internal, dan mempercepat kegagalan sel.

Selain itu, pengoperasian baterai dengan DoD tinggi secara terus-menerus juga berdampak negatif terhadap umur pakai. Siklus pengisian penuh hingga hampir 100% DoD memang memberikan energi lebih besar per siklus, tetapi mengakibatkan tekanan mekanis dan degradasi elektroda yang lebih cepat. Sebaliknya, pengoperasian dengan DoD rendah dapat secara drastis meningkatkan jumlah siklus sebelum kapasitas menurun di bawah ambang batas yang dapat diterima (biasanya 80% dari kapasitas awal). Oleh karena itu, dalam banyak desain sistem ESS modern, strategi manajemen energi akan membatasi DoD ke rentang 20–80% untuk memperpanjang umur baterai secara keseluruhan.

Proses penurunan kinerja ini secara umum digambarkan melalui kurva kapasitas terhadap jumlah siklus. Sebagai contoh, sebuah baterai lithium-ion dapat mempertahankan kapasitas di atas 90% hingga sekitar 1000–2000 siklus, namun akan turun lebih tajam setelah titik infleksi tersebut. Oleh karena itu, perencanaan pemeliharaan dan penggantian sistem perlu mempertimbangkan penurunan kapasitas ini sebagai bagian dari total biaya kepemilikan (*Total Cost of Ownership/TCO*).

Meskipun terdapat isu degradasi, perkembangan teknologi lithium-ion telah mengalami kemajuan pesat dalam dekade terakhir. Inovasi pada material katoda seperti LFP (lithium iron phosphate), peningkatan sistem manajemen baterai (BMS), dan pendinginan aktif telah berhasil menurunkan laju degradasi secara signifikan. Hal ini berdampak langsung pada kestabilan performa ESS dalam jangka panjang.

Lebih jauh lagi, salah satu pendorong utama adopsi sistem ESS berbasis baterai adalah tren penurunan biaya yang sangat signifikan. mencatat bahwa harga

baterai lithium-ion telah mengalami penurunan drastis dari sekitar \$1000/kWh pada tahun 2010 menjadi kurang dari \$200/kWh pada 2018. Tren ini terus berlanjut hingga kini, dengan laporan terbaru menyebutkan bahwa harga telah mendekati \$100/kWh, bahkan lebih rendah untuk produksi massal. Penurunan harga ini disebabkan oleh skala produksi global yang meningkat pesat, terutama oleh produsen dari Tiongkok, Korea Selatan, dan Amerika Serikat, serta peningkatan efisiensi dalam rantai pasok dan pemrosesan bahan mentah seperti litium, kobalt, dan nikel.

Penurunan biaya ini memberikan dampak besar terhadap keekonomian proyek-proyek PLTS hybrid atau sistem off-grid, karena sistem ESS menjadi semakin terjangkau dan menarik secara finansial untuk penyimpanan energi jangka pendek maupun menengah. Hal ini juga berkontribusi terhadap peningkatan penetrasi energi terbarukan dalam sistem tenaga listrik global, dengan ESS berperan sebagai stabilisator beban (*load balancer*) dan penyedia daya cadangan (*backup power*).

Dengan demikian, meskipun baterai lithium-ion memiliki tantangan degradasi, kemajuan teknologi dan efisiensi biaya telah membuat sistem ini menjadi tulang punggung dari banyak solusi penyimpanan energi modern di berbagai belahan dunia. (Kim et al., 2018b)

2.2.11 Strategi Dispatch Sistem Hybrid

Dalam sistem pembangkit listrik hybrid seperti PLTS-BESS-PLTD, strategi *dispatch* sangat penting untuk memastikan operasi sistem yang optimal, baik dari segi teknis maupun ekonomi. Dispatch mengacu pada pengaturan atau algoritma kapan dan bagaimana masing-masing komponen pembangkit dan penyimpanan energi bekerja dalam merespons kebutuhan beban dan ketersediaan sumber daya.

Tujuan utama strategi dispatch adalah untuk meminimalkan biaya operasional, memaksimalkan efisiensi sistem, serta memperpanjang umur komponen utama seperti baterai dan genset. Dua strategi dispatch yang umum digunakan dalam perangkat lunak simulasi seperti HOMER Pro adalah Load

Following (LF) dan Cycle Charging (CC). (Ramesh & Saini, 2020)(Aziz et al., 2019)

- Load Following (LF): Dalam pendekatan ini, genset (PLTD) hanya menghasilkan daya yang cukup untuk memenuhi beban saat ini. Jika ada surplus dari energi terbarukan (misalnya dari PLTS), maka energi tersebut digunakan terlebih dahulu. Baterai akan diisi hanya jika ada energi berlebih setelah kebutuhan beban terpenuhi. Strategi ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar dan memaksimalkan kontribusi energi terbarukan.
- Cycle Charging (CC): Dalam strategi ini, jika genset dihidupkan, maka ia akan beroperasi pada kapasitas penuh atau mendekati maksimum untuk mengisi baterai sekaligus melayani beban. Pendekatan ini mengoptimalkan efisiensi bahan bakar PLTD karena genset bekerja pada titik operasi yang lebih efisien, tetapi bisa menghasilkan energi berlebih yang tidak selalu dibutuhkan secara langsung.

Pemilihan strategi dispatch yang tepat sangat bergantung pada karakteristik beban, kapasitas penyimpanan, harga bahan bakar, dan target pengurangan emisi. Dalam banyak kasus, kombinasi atau strategi adaptif dapat diterapkan untuk mencapai kinerja sistem yang lebih optimal secara menyeluruh.

2.2.12 Studi Terkait dan Tabel State of the Art

Berbagai penelitian mendukung pentingnya SBO dan sensitivitas dalam optimasi sistem hybrid. Tabel berikut Merangkum studi serupa sebagai pembandingan kebaruan.

Tabel 2.3 Studi Penelitian dan Novelty tesis

Peneliti	Lokasi Studi	Teknologi Utama	Metode/Pla tform	Kontribusi Kunci	Kelemah an/Gap	Pembeda terhadap Tesis
Oladeji et al. (2021)	Nigeria	PLTS- BESS- PLTD	ϵ -constraint Optimizatio n	Penurunan LCOE 6.27%, peningkatan	Tidak eksplorasi strategi dispatch	Integrasi strategi dispatch cycle charging & load following

				efisiensi baterai		berbasis data aktual.
Zhang & Wei (2022)	Tidak spesifik	PV- Battery- Diesel	PSO	Umur baterai lebih panjang, konsumsi BBM lebih rendah	Fokus terbatas pada strategi dispatch	Evaluasi strategi dispatch realistis berbasis runtime PLTD dan profil beban aktual.
Rahmat et al. (2024)	Pulau Menui, Indones ia	PLTS- Wind- BESS- PLTD	Techno- Economic & EMS	RF mencapai 82%, strategi EMS efektif	Tidak bahas biaya LCOE secara rinci	Gabungan LCOE, NPC, IRR, dan sensitivitas multi-parameter dalam satu sistem.
ADB (2020)	Umum/ Global	BESS	Manual/Han dbook	Menekanka n sizing, kontrol, strategi operasi	Bukan studi kasus, lebih sebagai panduan	Studi kasus nyata sistem PLTS Hybrid di Pulau Maratua dengan data operasional.
Kraj et al. (2010)	Tidak spesifik	PLTS- BESS- PLTD	Hybrid Sizing Analysis	Pentingnya sizing untuk efisiensi microgrid	Tidak integrasi ke utilitas/gr id	Penelitian pada sistem off-grid aktual di wilayah 3T Indonesia.
Cherif & Belhadj (2021)	Aljazair	PLTS- Diesel-RO	Analisis sensitivitas	Integrasi RO dengan sistem hybrid di	Konteks spesifik Aljazair, belum	Penerapan konfigurasi hybrid di konteks lokal Indonesia

				wilayah kering	diadopsi luas	berbasis data lapangan.
Roberts et al. (2018)	Brazil	Hybrid Energi Terbaruka n	Multi- objective Optimizatio n	Optimasi multi parameter, namun terbatas pada Brazil	Keterbata san konteks geografis	Fokus pada wilayah strategis Indonesia (Maratua) dan data operasional 2024–2025.
Arefin (2020)	Global	Hybrid Microgrid	GA, PSO, HOMER	Tinjauan global, belum eksplorasi sensitivitas mendalam	Kurang review paramete r sensitivit as	Integrasi SBO dan sensitivitas terhadap beban, BBM, baterai, dan iradiasi.
Zhao et al. (2023)	Komun itas terpenci l	PLTS- Battery- PLTD	HOMER Pro	Hybrid lebih unggul dari diesel-only (biaya & emisi)	Konteks global, perlu validasi lokal	Validasi simulasi dengan data riil PLTS Hybrid 300 kWp Pulau Maratua.
Dardou r et al. (2020)	Tunisia	PV-Diesel	HOMER	Analisis LCOE tanpa adaptasi terhadap beban & pasokan	Tidak adaptif terhadap variasi kondisi operasion al	Evaluasi sistem dengan multi- skenario berbasis SBO dan variasi beban aktual.
Chaich an et al. (2025)	Koh Hang, Thailan d	PV + BESS + Diesel	Sustainabilit y assessment	Evaluasi keberlanjuta n sistem	Belum fokus pada optimasi	Tesis menggunakan pendekatan

				hybrid pulau	konfigurasi teknis	optimasi konfigurasi
Ali et al. (2025)	Maluku, Indonesia	PV + BESS	HOMER Pro + Sensitivitas beban	Optimasi kapasitas BESS dan analisis sensitivitas	Belum mempertimbangkan strategi dispatch PLTD	Tesis menggabungkan strategi optimasi dispatch
Khan et al. (2025)	Sri Lanka	PV + Diesel + BESS	Multi-objective optimization	Integrasi aspek teknis, ekonomi, lingkungan	Model umum, belum fokus pada kondisi aktual	Tesis berbasis data aktual Maratua dan simulasi HOMER
Sulaiman et al. (2025)	Pulau Sumba & Alor, Indonesia	PV + BESS	HOMER Pro + LCC + Aspek sosial	Peran komunitas penting, kombinasi teknis-sosial perlu	Tidak membahas simulasi sensitivitas dan konfigurasi kapasitas	Tesis berfokus pada aspek teknis dan optimasi sistem hybrid berbasis data
Rakhmawati et al. (2024)	Pulau Timor, Indonesia	PV + BESS + Diesel	HOMER Pro + Data Real Lapangan	RF naik jadi 65%, runtime diesel turun 70%	Belum mengoptimasi strategi dispatch spesifik PLTD	Tesis Maratua memasukkan load following, cycle charging dan evaluasi runtime PLTD

Berdasarkan kajian literatur pada Tabel 4, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada studi simulatif untuk menentukan konfigurasi optimal PLTS Hybrid, tanpa memanfaatkan data operasional aktual dari sistem yang telah beroperasi. Penelitian ini memiliki kebaruan dalam penggunaan real operational dataset PLTS Hybrid 300 kWp di Pulau Maratua (SoC baterai, curtailment, dispatch PLTD) serta penerapan simulation-based optimization yang secara langsung mengarah pada pengurangan konsumsi BBM, peningkatan Renewable Fraction, dan efisiensi biaya sistem. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan kontribusi praktis bagi implementasi dedieselization PLN pada sistem isolated di Indonesia.

2.2.13 Metode Validasi Simulasi dengan Data Aktual

Validasi model simulasi merupakan tahap penting dalam proses perancangan dan evaluasi sistem PLTS Hybrid untuk memastikan bahwa hasil simulasi memiliki akurasi dan representasi yang baik terhadap kondisi lapangan. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari perangkat lunak HOMER Pro terhadap data aktual operasi sistem PLTS Hybrid 300 kWp + BESS 600 kWh + PLTD di Pulau Maratua periode Jan – Juni 2025.

a. Tujuan Validasi

Tujuan dari validasi ini adalah:

- Menilai kesesuaian hasil simulasi dispatch energi (PLTS, BESS, dan PLTD) dengan performa nyata di lapangan.
- Mengidentifikasi deviasi antara hasil simulasi dan realisasi aktual sebagai dasar kalibrasi model.
- Menentukan tingkat akurasi model untuk digunakan dalam simulasi skenario optimasi sistem (simulation-based optimization dan analisis sensitivitas).

2. Parameter yang Divalidasi

Beberapa parameter utama yang digunakan dalam proses validasi meliputi:

- Produksi energi PLTS harian/bulanan (kWh)
- Energi yang disimpan dan dikeluarkan dari BESS (kWh)
- Runtime dan konsumsi BBM PLTD (liter dan kWh)

- Renewable Fraction (RF) aktual vs hasil simulasi
- State of Charge (SOC) BESS
- Pola dispatch per jam (hourly dispatch)

3. Sumber Data Aktual

- Data aktual diperoleh dari sistem monitoring real-time PLTS Maratua melalui: Fusion Solar (Huawei Monitoring System) untuk PLTS dan BESS
- ComAp dan log sheet manual untuk runtime PLTD
- Data laporan operasi bulanan PLN ND (Januari – Juni 2025)

Contoh data yang digunakan antara lain:

- Produksi PV harian di bulan April 2025 (rata-rata 960–1.020 kWh/hari)
- SOC baterai yang fluktuatif antara 25–95%
- Runtime PLTD yang menurun drastis saat PLTS dan BESS berjalan optimal

4. Teknik Validasi

Validasi dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif dan visual:

a. Perbandingan Kuantitatif

- Menghitung selisih absolut dan persentase antara hasil simulasi dan data actual,

$$\text{Error (\%)} = |(\text{Hasil Simulasi} - \text{Data Aktual}) / \text{Data Aktual}| \times 100\%$$
- Kriteria keberhasilan validasi : error < 10% untuk energi harian dan runtime

b. Perbandingan Visual

- Overlay grafik dispatch simulasi HOMER dengan kurva aktual (SOC, produksi PV, runtime PLTD)
- Validasi bentuk kurva harian (typical day) dalam 4 skenario representatif

5. Hasil Validasi Sementara

- Hasil simulasi Homer Pro menunjukkan Renewable Fraction (RF) sebesar 40% - 42%, sedangkan data Simulasi Manual menunjukkan RF sebesar 21% -22%
- Runtime PLTD dalam simulasi lebih rendah 5–8% dibandingkan data aktual, namun berada dalam margin yang dapat diterima karena fluktuasi beban dan faktor cuaca ekstrem.
- Produksi PV dalam simulasi rata-rata 980 kWh/hari, sesuai dengan data aktual $\pm 5\%$.

6. Penyesuaian Model

Jika deviasi melebihi batas toleransi, dilakukan penyesuaian terhadap:

- Input radiasi matahari (GHI dan Sun Hours) berdasarkan data dari Global Solar Atlas dan Pvsyst
- Profil beban dari data operasi real-time
- Efisiensi inverter dan sistem BESS

2.2.14 Studi Kasus Sistem Hybrid di Indonesia

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki tantangan tersendiri dalam menyediakan listrik ke wilayah-wilayah terpencil (3T: Terdepan, Terluar, dan Tertinggal). Untuk mengatasi keterbatasan jaringan interkoneksi dan tingginya biaya operasi PLTD, berbagai proyek sistem hybrid PLTS-Baterai-Diesel telah mulai diterapkan di sejumlah lokasi sebagai langkah menuju transisi energi bersih.

1. PLTS Hybrid Maratua (Kalimantan Timur)

Lokasi: Pulau Maratua, Kab. Berau, Kalimantan Timur

Konfigurasi:

- PLTS: 300 kWp
- BESS: 600 kWh
- PLTD Eksisting: 700 kW

Sistem hybrid pertama di Kalimantan Timur yang mulai beroperasi efektif pada awal 2025. Tantangan awal meliputi stabilitas kontrol inverter dan pengaturan cycle BESS. Berdasarkan data aktual, RF (Renewable Fraction) telah mencapai lebih dari 50% pada kondisi optimal.

2. PLTS Hybrid Pulau Messah (NTT)

Lokasi: Kabupaten Manggarai Barat, Nusa Tenggara Timur

Konfigurasi:

- PLTS: 600 kWp
- BESS: 1.500 kWh
- PLTD eksisting ± 800 kW

Proyek ini menjadi contoh sukses pengurangan runtime PLTD lebih dari 70% dan meningkatkan efisiensi sistem. Studi oleh IESR (2022) menunjukkan LCOE sistem hybrid bisa ditekan di bawah Rp 2.500/kWh.

3. PLTS Hybrid Pulau Bunaken (Sulawesi Utara)

Lokasi: Pulau Bunaken, Sulawesi Utara

Konfigurasi:

- PLTS: 250 kWp
- BESS: 400 kWh
- PLTD: ± 500 kW

Fokus pada sistem modular untuk mendukung pariwisata ramah lingkungan. Hasil monitoring menunjukkan emisi CO₂ berkurang >60% sejak integrasi BESS tahun 2023.

4. PLTS Hybrid Pulau Sebir (DKI Jakarta)

Lokasi: Kepulauan Seribu

Konfigurasi:

- PLTS: 400 kWp
- BESS: 600 kWh
- PLTD: ± 600 kW

Salah satu studi oleh PLN EPI dan Universitas Indonesia (2021) menyebutkan bahwa sistem hybrid di Sebir memiliki payback period <7 tahun dan pengurangan biaya BBM hingga 40%.

2.2.15 Gap Penelitian Terdahulu dan Keterbatasan Platform Simulasi

▪ Kegagalan Optimasi Sistem Hybrid di Kondisi Riil

Meskipun banyak penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem hybrid berbasis PLTS–BESS–PLTD menggunakan pendekatan simulasi, realisasi di lapangan seringkali tidak menunjukkan hasil optimal yang diharapkan. Beberapa studi hanya berhenti pada fase desain berbasis data rata-rata tahunan, tanpa mempertimbangkan dinamika beban harian, kondisi cuaca ekstrem, atau faktor degradasi teknis komponen. Sebagai contoh, studi oleh Roy et al. (2014) dan Roberts et al. (2018) memberikan hasil Renewable Fraction tinggi (>70%) dalam simulasi, namun saat implementasi di lapangan, performa menurun drastis hingga <40% akibat perbedaan aktualisasi beban dan overestimasi kapasitas PLTS/BESS yang tidak memperhitungkan cloud shading, efisiensi inverter, serta thermal loss secara memadai.

▪ Keterbatasan Platform HOMER Pro

HOMER Pro, meskipun merupakan platform populer untuk optimasi sistem hybrid, memiliki beberapa keterbatasan utama yang memengaruhi akurasi dan kelengkapan hasil simulasi:

1. Asumsi Beban Statis per Jam

HOMER Pro mengasumsikan beban listrik konstan dalam setiap jamnya (hourly average), sehingga fluktuasi sesaat (real-time) seperti start-stop motor listrik, lonjakan AC, atau spike industri tidak terekam. Hal ini menyebabkan hasil dispatch PLTD atau response BESS kurang akurat.

2. Kurangnya Model Dinamis BESS

HOMER Pro tidak mensimulasikan faktor SoH (State of Health), cycle degradation, atau efisiensi non-linear pada berbagai Depth of Discharge (DoD). Hal ini membuat hasil LCOE dan umur ekonomis baterai menjadi bias terhadap kondisi ideal.

3. Dispatch Strategi Terbatas

Platform ini hanya menyediakan dua strategi utama (load following dan cycle charging), tanpa fleksibilitas untuk hybrid strategy atau predictive dispatch berbasis AI/IoT sebagaimana yang mulai diterapkan pada sistem hybrid terbaru.

4. Tidak Mendukung Input Real-Time atau IoT Integration

HOMER Pro tidak memungkinkan integrasi data real-time dari sistem SCADA, FusionSolar, atau ComAp, sehingga tidak bisa divalidasi langsung terhadap data aktual saat sistem beroperasi.

- Pendekatan Solutif dalam Tesis Ini

Dalam penelitian ini, pendekatan *simulation-based optimization (SBO)* dikombinasikan dengan *multi-scenario sensitivity analysis* digunakan untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Strategi mitigasi mencakup:

- Validasi Model dengan Data Aktual dari PLTS Hybrid Maratua selama Januari–Juni 2025, termasuk profil beban, runtime PLTD, dan output PLTS/BESS harian.
- Penggunaan 4 Typical Days per Bulan dalam simulasi, untuk mencerminkan dinamika load dan GHI yang lebih representatif daripada rata-rata bulanan.

- Analisis Sensitivitas Multi-Parameter mencakup variasi kapasitas BESS, variasi GHI harian, serta strategi dispatch untuk menilai robust-nya konfigurasi terhadap kondisi ekstrem.
- Koreksi LCOE pasca simulasi dengan memperhitungkan faktor efisiensi inverter, kehilangan kabel, faktor temperatur, serta derating modul PV berdasarkan kondisi real site.

Dengan strategi ini, diharapkan hasil simulasi tidak hanya optimal secara teoretis, tetapi juga relevan dan *applicable* untuk diimplementasikan di sistem-sistem hybrid serupa di pulau-pulau kecil lainnya di Indonesia

2.3 Kerangka Pemikiran / Konseptual

Permasalahan utama dalam sistem kelistrikan di wilayah terpencil seperti Pulau Maratua adalah tingginya biaya operasional akibat dominasi penggunaan PLTD, rendahnya pemanfaatan energi terbarukan dari PLTS, serta belum optimalnya sistem penyimpanan energi (BESS). Hal ini diperparah oleh belum adanya strategi pengoperasian (*dispatch*) yang adaptif serta sistem manajemen energi (EMS) yang mampu mengatur interaksi antara PLTS, BESS, dan PLTD secara efisien.

Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analitis berbasis simulasi untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan konfigurasi sistem PLTS Hybrid. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Simulation-Based Optimization (SBO) dengan bantuan perangkat lunak HOMER Pro. Pendekatan ini memungkinkan analisis terhadap berbagai skenario konfigurasi sistem berdasarkan variasi parameter teknis seperti kapasitas baterai, harga bahan bakar, pola beban, dan intensitas iradiasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem pembangkitan listrik hibrida berbasis energi surya (PLTS), baterai (BESS), dan PLTD di sistem kelistrikan isolated Pulau Maratua. Kerangka konseptual disusun untuk menggambarkan hubungan logis antara variabel-variabel utama dalam penelitian, serta menjelaskan proses transformasi dari input hingga output melalui pendekatan *simulation-based optimization* (SBO) dan *multi-parameter sensitivity analysis*.

2.3.1 Komponen Input

Komponen input utama dalam penelitian ini meliputi:

- Data Beban Aktual (Load Profile): Diambil dari pengukuran operasional sistem Maratua pada periode Jan–Juni 2025, dengan memakai data April sebagai referensi untuk optimasi dengan Homer dan Optimasi Manual.
- Data Radiasi Matahari (Solar Irradiance): Diperoleh dari *Global Solar Atlas* dan disesuaikan dengan kondisi lokal Maratua, menghasilkan estimasi *solar energy yield* dan *sun hours* bulanan.
- Spesifikasi Teknis Komponen:
 - Kapasitas dan efisiensi PLTS (300 kWp)
 - Kapasitas dan DoD BESS (600 kWh)
 - Kapasitas dan SFC PLTD (180 - 330 kW, 0,347 liter/kWh)
- Data Ekonomi: Harga bahan bakar diesel (Rp 11.932.000/liter), biaya investasi per komponen, serta asumsi discount rate untuk analisis finansial.
- Kebijakan dan Target: Rujukan terhadap bauran EBT minimum 50–60% sesuai roadmap dedieselisasi sistem isolated PLN dan Perpres 112/2022.

2.3.2 Proses: Simulation-Based Optimization (SBO)

Proses utama dalam kerangka ini adalah *Simulation-Based Optimization (SBO)* menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Proses ini melibatkan beberapa tahap:

1. Modeling Awal Sistem Eksisting:

Simulasi baseline berbasis kondisi aktual sistem PLTD-PLTS-BESS Maratua untuk mengukur LCOE, Renewable Fraction (RF), emisi CO₂, dan runtime PLTD saat ini.
2. Formulasi Konfigurasi Variatif:

Skema variasi kapasitas PLTS, BESS, dan strategi dispatch PLTD (Load Following vs Cycle Charging) diuji untuk menghasilkan kombinasi optimal.
3. Optimasi Tujuan Ganda (Multi-Objective Optimization):
 - a. Minimasi LCOE
 - b. Maksimasi RF
 - c. Reduksi runtime PLTD
 - d. Penurunan emisi CO₂

4. Analisis Sensitivitas:

Untuk melihat dampak perubahan input terhadap output, dilakukan *sensitivity analysis* terhadap:

- Harga BBM
- Lifetime dan efisiensi baterai
- Beban puncak dan load factor
- Performance Ratio (PR) PLTS

2.3.3 Output yang Dihasilkan

Dari proses di atas, output penelitian yang diharapkan meliputi:

- LCOE Sistem Hibrida Teroptimasi: (Rp/kWh)
- Renewable Fraction > 60%
- Pengurangan runtime PLTD $\geq 30\%$
- Payback Period sistem hybrid < 8 tahun
- Penurunan konsumsi BBM dan emisi CO₂ > 40% dibanding sistem diesel-only

Guna menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan penelitian, kerangka konseptual ini dirancang untuk merepresentasikan hubungan antara komponen masukan (input), proses analisis, dan luaran (output) yang diharapkan.

Input terdiri dari data aktual sistem kelistrikan Pulau Maratua, mencakup profil beban harian, potensi energi surya dalam bentuk Global Horizontal Irradiance (GHI), harga BBM lokal serta biaya investasi (CAPEX) teknologi, dan spesifikasi teknis dari masing-masing komponen sistem (PLTS, BESS, PLTD).

Seluruh input tersebut digunakan dalam proses optimasi berbasis simulasi menggunakan perangkat lunak *HOMER Pro*. Tahapan proses meliputi:

- Simulation-based Optimization (SBO): Menghasilkan konfigurasi optimal dari sistem hybrid melalui pendekatan numerik multi-skenario.
- Multi-Scenario Analysis: Memodelkan berbagai kondisi operasional dan konfigurasi kapasitas.
- Sensitivity Analysis: Mengkaji pengaruh variasi parameter kunci seperti kapasitas BESS, intensitas radiasi surya, dan fluktuasi beban terhadap output sistem.

Hasil dari proses tersebut berupa output teknis dan ekonomis, meliputi:

- Biaya energi terendah (LCOE minimal),
- Persentase kontribusi energi terbarukan (Renewable Fraction optimal),
- Penurunan waktu operasi PLTD (runtime PLTD minimal), dan
- Pengurangan emisi karbon (emisi CO₂ menurun).

Dengan demikian, kerangka konseptual ini menjadi landasan dalam mendesain dan mengevaluasi sistem PLTS Hybrid secara komprehensif untuk kondisi spesifik di Pulau Maratua.