

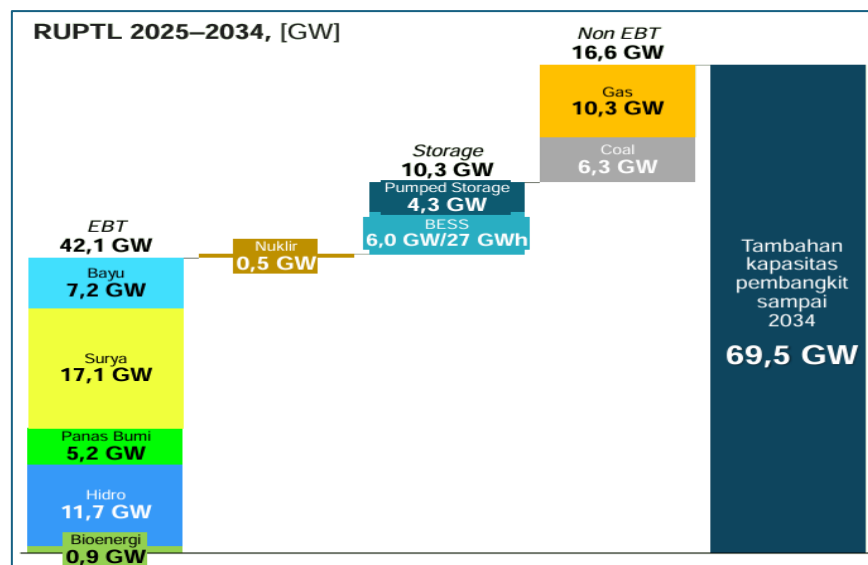
BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Upaya mitigasi perubahan iklim menjadi prioritas global, dan berbagai negara terus memperkuat komitmennya dalam menurunkan emisi gas rumah kaca. Indonesia, sebagai bagian dari komunitas internasional, telah menetapkan target *Net Zero Emission* (NZE) tahun 2060 sebagai wujud komitmen terhadap Perjanjian Paris (Ajie Aprilianto & Ariefianto, 2021). Pencapaian target ini mengharuskan percepatan transisi dari sumber energi berbasis fosil menuju energi terbarukan yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Komitmen ini dipertegas melalui RUPTL 2025–2034, yang mengarahkan pengembangan pembangkit listrik nasional. Dalam dokumen tersebut, pemerintah merencanakan penambahan sekitar 69,5 GW pembangkit baru hingga 2034, terdiri atas 42,1 GW (61%) EBT, 10,3 GW (15%) penyimpanan energi (*storage*), dan 16,6 GW (24%) pembangkit fosil (Kementerian ESDM, 2025). Proporsi ini menunjukkan arah kebijakan yang semakin menekankan pengembangan energi bersih dan peran teknologi penyimpanan energi dalam mendukung sistem tenaga berbasis EBT.



Gambar 1. 1 Rencana penambahan pembangkit berdasarkan RUPTL 2025-2034

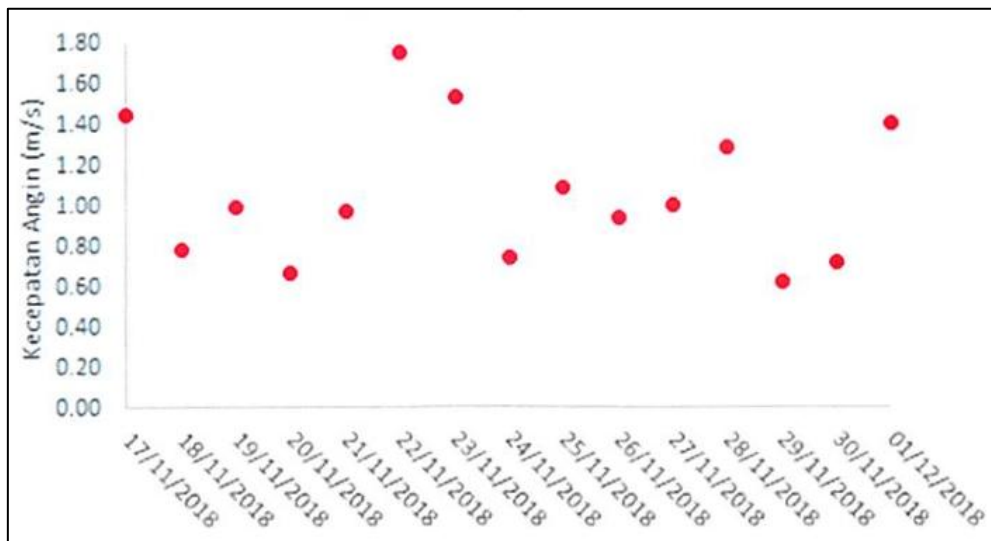
Sumber: (Kementerian ESDM, 2025)

Namun, implementasi transisi energi di Indonesia menghadapi tantangan besar, terutama pada wilayah kepulauan dan daerah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal). Keterbatasan infrastruktur, lokasi geografis, serta biaya logistik yang tinggi menjadikan penyediaan energi di wilayah terpencil jauh lebih menantang dibandingkan wilayah daratan utama. Salah satu wilayah yang mencerminkan kompleksitas tersebut adalah Pulau Sebira, yang terletak di bagian paling utara Kepulauan Seribu, DKI Jakarta. Hingga kini, sistem energinya masih sangat bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sebagai sumber energi utama. Ketergantungan ini menimbulkan sejumlah persoalan fundamental.

Pertama, Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik menjadi sangat tinggi akibat fluktuasi harga BBM dan biaya logistik yang mahal (Abed et al., 2020). Bahkan, dalam satu dekade terakhir, tren harga bahan bakar minyak global terus meningkat, dipengaruhi oleh dinamika geopolitik, pertumbuhan permintaan, serta tekanan pasokan. Kondisi ini membuat penggunaan diesel sebagai pembangkit utama semakin tidak ekonomis bagi daerah terpencil yang seluruh distribusinya bergantung pada transportasi laut. (Prabawa & Sidqi, 2025)

Kedua, dari aspek keandalan, PLTD sangat rentan terhadap keterlambatan pengiriman BBM, cuaca buruk, serta kebutuhan pemeliharaan mesin diesel. Ketiga, penggunaan diesel secara intensif berkontribusi besar terhadap emisi CO₂ dan berdampak negatif terhadap lingkungan (Muhammad Ridho Rohman Zuhri et al., 2025). Oleh karena itu, pengembangan sumber energi terbarukan menjadi kebutuhan mendesak.

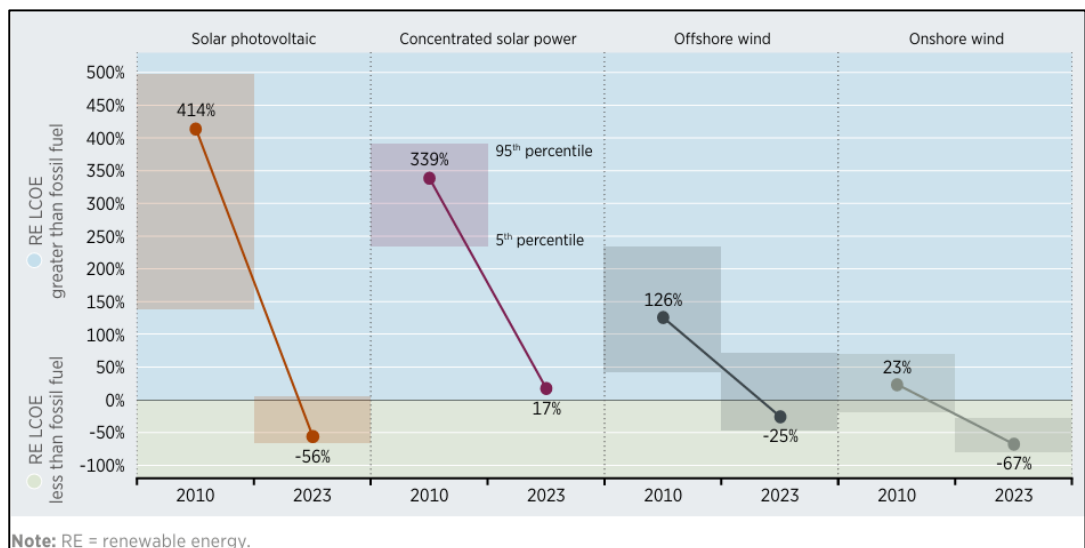
Pulau Sebira telah memiliki sistem hibrida yang terdiri dari PLTS, baterai, dan PLTD. Namun, kapasitas PLTS yang ada belum cukup besar untuk mengurangi dominasi operasi PLTD secara signifikan, sehingga potensi energi surya yang melimpah masih belum dimanfaatkan secara optimal. Di sisi lain, pengembangan PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) bukanlah pilihan yang efektif untuk Sebira, karena data potensi menunjukkan bahwa kecepatan angin di wilayah ini tergolong rendah ($< 5\text{m/s}$) (Aprilana et al., 2018). Dengan demikian, PLTS dan baterai menjadi opsi pengembangan energi terbarukan yang paling rasional di Sebira.



Gambar 1. 2 Kecepatan angin rata-rata per hari di ketinggian 10m

Sumber: (Aprilana et al., 2018)

Secara global, biaya pembangkitan listrik dari PLTS terus mengalami penurunan drastis dalam satu dekade terakhir. Penurunan ini didorong oleh inovasi teknologi, efisiensi industri manufaktur, serta dukungan kebijakan internasional. Hal ini menjadikan PLTS semakin kompetitif dibandingkan diesel, terutama di lokasi terpencil (Kittner et al., 2017). Laporan IRENA (2024) menunjukkan bahwa nilai LCOE PLTS terus menurun sejak 2010.



Gambar 1. 3 Perubahan rata-rata LCOE global untuk tenaga surya dan angin dibandingkan bahan bakar fosil, 2010-2023

Sumber: (IRENA, 2024)

Kondisi ini menjadikan pengembangan sistem hibrida PLTS–Baterai–PLTD di Pulau Sebira sebagai strategi yang sangat menjanjikan untuk menekan konsumsi bahan bakar diesel, meningkatkan bauran EBT, serta mengurangi biaya operasional secara keseluruhan (Zuhri et al., 2025). Namun, keberhasilan implementasi sistem ini sangat bergantung pada pemilihan konfigurasi kapasitas yang optimal. Penambahan komponen tanpa kajian tekno-ekonomi yang tepat berisiko menimbulkan *oversizing*, pemborosan investasi, atau manfaat ekonomi yang tidak maksimal.

Untuk menjawab kebutuhan tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan optimasi berbasis perangkat lunak. Produksi energi surya akan disimulasikan menggunakan PVsyst guna memperoleh estimasi yang akurat sesuai kondisi meteorologi lokal (Nurdiana et al., 2020). Hasil simulasi, bersama data beban, data teknis, dan data ekonomi, kemudian diolah menggunakan HOMER Pro, perangkat lunak yang banyak digunakan secara global untuk optimasi sistem energi hibrida (Hassan et al., 2021). Dengan kombinasi pendekatan tersebut, penelitian ini bertujuan merumuskan konfigurasi pengembangan sistem hibrida PLTS–Baterai–PLTD di Pulau Sebira yang paling layak secara teknis dan paling menguntungkan secara ekonomi.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini disusun sebagai berikut.

1. Bagaimana konfigurasi optimal dari penambahan PLTS dan baterai yang perlu ditambahkan untuk mencapai biaya energi (LCOE) terendah?
2. Bagaimana konfigurasi penambahan PLTS dan baterai yang perlu ditambahkan untuk mencapai bauran EBT 100%?
3. Bagaimana perbandingan kelayakan ekonomi antara konfigurasi sistem optimal dan sistem bauran EBT 100%, ditinjau dari parameter *Net Present Cost* (NPC), *Levelized Cost of Energy* (LCOE)?
4. Bagaimana dampak terhadap penurunan konsumsi bahan bakar dan pengurangan emisi CO₂?

1.3. Tujuan

Selaras dengan rumusan masalah yang telah dipaparkan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut.

1. Menentukan konfigurasi optimal PLTS dan baterai untuk mencapai LCOE terendah.
2. Merumuskan konfigurasi PLTS dan baterai untuk mencapai bauran EBT 100%
3. Menganalisis kelayakan ekonomi antara sistem optimal dan sistem bauran EBT 100%.
4. Mengukur dampak penurunan konsumsi bahan bakar dan pengurangan emisi CO₂.

1.4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang baik dari sisi akademis maupun praktis bagi para pemangku kepentingan. Manfaat yang diharapkan dari tercapainya tujuan-tujuan penelitian ini sebagai berikut.

1. Menyediakan model metodologi terintegrasi (PVsyst-HOMER Pro) yang dapat dirujuk oleh peneliti lain, serta menyajikan studi kasus yang komprehensif untuk Pulau Sebir.
2. Menyajikan referensi ilmiah mengenai optimasi pengembangan sistem pembangkit hibrida yang telah terpasang.
3. Menjadi dasar pengambilan keputusan untuk pengembangan pembangkit hibrida di Pulau Sebir, membantu meningkatkan efisiensi operasional, dan menekan biaya pokok penyediaan (BPP) listrik melalui penurunan konsumsi bahan bakar.
4. Memenuhi salah satu syarat kelulusan program Magister (S2) dan meningkatkan kompetensi penulis dalam bidang analisis tekno-ekonomi sistem energi terbarukan.

1.5. Ruang Lingkup Masalah

Ruang Lingkup Masalah pada penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Studi kasus penelitian ini difokuskan secara spesifik pada sistem kelistrikan hibrida terpasang (eksisting) klaster 1 di Pulau Sebir.

2. Objek penelitian adalah optimasi sistem pembangkitan energi listrik, yang mencakup komponen PLTD, PLTS, dan Baterai, baik yang sudah terpasang maupun rencana penambahannya.
3. Kapasitas dan jumlah PLTD diasumsikan tetap sesuai dengan kondisi terpasang.
4. Simulasi untuk estimasi produksi energi tahunan dari komponen PLTS (baik eksisting maupun rencana) akan dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst.
5. Analisis optimasi tekno-ekonomi untuk menentukan konfigurasi sistem terbaik akan dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro.
6. Data utama yang digunakan meliputi data radiasi matahari, temperatur, dan data profil beban listrik merupakan data primer yang diambil pada tahun 2024 di Pulau Sebir.
7. Profil beban listrik diasumsikan berdasarkan data pengukuran tahun 2024 dan tidak memproyeksikan pertumbuhan beban di masa depan.
8. Penelitian ini tidak melakukan analisis stabilitas sistem tenaga dinamis (seperti fluktuasi frekuensi dan tegangan sesaat) yang mungkin terjadi akibat intermitensi PLTS dan analisis pada sisi jaringan distribusi listrik, seperti analisis aliran daya dan rugi-rugi daya (*losses*) pada jaringan.
9. Biaya komponen dan harga bahan bakar diasumsikan konstan atau mengikuti tingkat inflasi yang telah ditentukan selama periode proyek, dan tidak memperhitungkan fluktuasi pasar.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika Penulisan pada penelitian ini terdiri dari beberapa Bab dengan judul dan ringkasan singkat sebagai berikut.

- Bab I : Pendahuluan

Pada bab ini, diberikan pengantar mengenai topik penelitian, latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan ruang lingkup masalah.

- Bab II : Tinjauan Pustaka

Pada bab ini, disajikan tinjauan pustaka yang melibatkan penjelasan mengenai teori-teori yang relevan, dan temuan-temuan yang telah ada terkait dengan topik penelitian. Tinjauan Pustaka yang dibahas meliputi potensi energi

surya, potensi energi angin, PV, Baterai, PLTD, dan Sistem Pembangkit Listrik Hibrid.

- Bab III : Metode Penelitian

Pada bab ini, dijelaskan rancangan penelitian dan pemilihan komponen-komponen yang digunakan pada perancangan pembangkit listrik hibrid. Bab ini mencakup objek penelitian, letak geografis, pengolahan data, pemodelan pada aplikasi HOMER Pro dan PVsyst.

- Bab IV : Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini, disajikan hasil simulasi dan analisa data. Hasil penelitian dipaparkan dengan menggunakan tabel, grafik dan narasi yang sesuai.

- Bab V : Penutup

Pada bab ini, disajikan kesimpulan dari penelitian serta saran untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

1.7. Kebaharuan

Penelitian ini menawarkan kebaharuan pada optimasi pengembangan sistem terpasang, yang masih jarang dieksplorasi dibandingkan dengan perancangan sistem baru. Berbeda dengan studi terdahulu yang sering mengabaikan kompleksitas aset lama, penelitian ini menerapkan prinsip ekonomi teknik mengenai biaya hangus (*sunk cost*) untuk mengevaluasi kelayakan integrasi antara aset PLTD dan PLTS eksisting dengan komponen baru. Pendekatan ini memberikan perspektif kelayakan investasi yang jauh lebih realistis dan akurat dalam merencanakan strategi pengembangan kapasitas di tengah siklus hidup proyek yang sedang berjalan.

Dari sisi metodologis, penelitian ini menggabungkan simulasi menggunakan PVsyst dengan optimasi tekno-ekonomi HOMER Pro, yang mana sumber data mengambil dari data lapangan (real), yang umumnya hanya mengandalkan fitur surya generik. Penggunaan PVsyst memungkinkan pemodelan faktor kerugian energi yang sangat spesifik, sebagai basis data masukan yang divalidasi ke dalam model optimasi (HOMER Pro). Integrasi kedua aplikasi ini diharapkan meningkatkan

validitas prediksi produksi energi dan memastikan bahwa konfigurasi optimal yang dihasilkan benar-benar merefleksikan kondisi aktual di lapangan.

Secara kontekstual, penelitian ini mengisi celah literatur mengenai tantangan spesifik transisi energi di wilayah kepulauan Indonesia. Dengan menyajikan data empiris terkait karakteristik kebutuhan listrik lokal dan tantangan logistik bahan bakar di pulau kecil, hasil penelitian ini memberikan kontribusi orisinal pada perumusan strategi de-dieselisasi yang efektif. Temuan ini tidak hanya relevan untuk kasus Pulau Sebira, tetapi juga berfungsi sebagai model rujukan yang dapat diaplikasikan untuk pengembangan sistem hibrida di pulau-pulau berpenghuni lainnya yang menghadapi kendala geografis, iklim, dan logistik serupa.