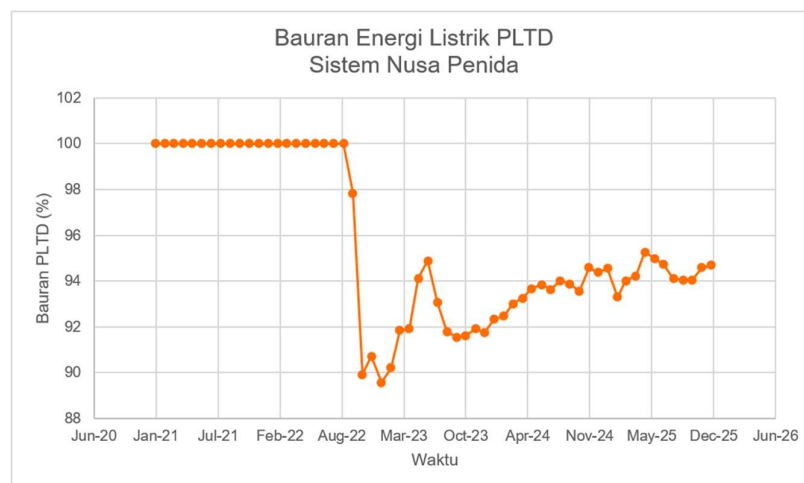


BAB I

PENDAHULUAN

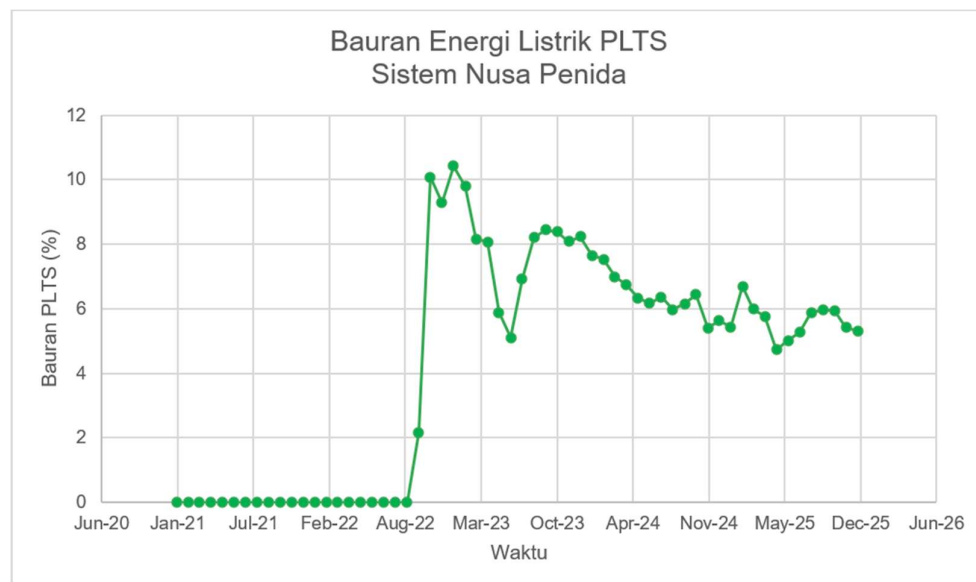
1.1 Latar Belakang

Transisi energi global dalam dua dekade terakhir menunjukkan pergeseran signifikan dari sistem ketenagalistrikan berbasis fosil menuju integrasi energi terbarukan yang lebih tinggi, terutama dalam sistem kelistrikan terisolasi dan wilayah kepulauan yang memiliki keterbatasan akses jaringan interkoneksi utama (Lund et al., 2017). Di sisi lain, integrasi sistem kelistrikan terisolasi energi baru terbarukan ke dalam sistem kelistrikan utama, memberikan sejumlah keuntungan, di antaranya peningkatan efisiensi energi, keandalan pasokan listrik, dan pengurangan emisi karbon. Namun, penggabungan *isolated grid* dalam skala besar juga membawa tantangan, seperti biaya dan kebijakan pendukung yang diperlukan (Suyanto et al., 2023). Sementara itu sistem kelistrikan di wilayah terpencil seperti Nusa Penida menghadapi tantangan berupa ketergantungan tinggi terhadap pembangkit diesel, yang secara teknis andal tetapi secara ekonomi dan lingkungan kurang efisien dalam jangka panjang (Weinand et al., 2023). PLTD masih sangat besar kontribusinya dalam bauran energi listrik lebih dari 90% di sistem Nusa Penida dari tahun 2021 sampai tahun 2025.



Gambar 1. 1 Bauran Energi Listrik PLTD di Sistem Nusa Penida

Kondisi ini mendorong pengembangan sistem pembangkit hibrida sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan sistem energi (López-Castrillón et al., 2021; Weinand et al., 2023). Konfigurasi pembangkit hibrida ini dikembangkan secara spesifik untuk mencari titik ekuilibrium antara pemenuhan fluktuasi beban harian yang dinamis dengan upaya optimalisasi portofolio bauran energi dalam perspektif manajemen energi modern (Halabi et al., 2017). Semenjak mulai beroperasinya PLTS Nusa Penida pada bulan Oktober 2022, tercatat bauran energi PLTS di sistem Nusa Penida mengalami penurunan dari 10% menjadi 5,3% pada Desember 2025. Tentu hal ini tidak sejalan dengan aspirasi dari pemerintah Bali untuk Net Zero Emission dan program PLN untuk de-dieselisasi.



Gambar 1. 2 Bauran Energi Listrik PLTS di Sistem Nusa Penida

Kualitas kinerja operasional dari setiap komponen penyusun PLT Hibrida berdampak langsung terhadap ketahanan sistem kelistrikan secara keseluruhan. Dalam sistem hibrida, kombinasi antara PLTD dan PLTS menciptakan interaksi dinamis antara sumber energi *dispatchable* dan *intermittent* yang memengaruhi stabilitas sistem ketenagalistrikan secara keseluruhan (Come Zebra et al., 2021; Das et al., 2017). PLTD berperan sebagai penyeimbang utama dalam menjaga frekuensi dan keandalan sistem ketika output PLTS mengalami fluktuasi akibat variabilitas radiasi matahari (Rezaei et

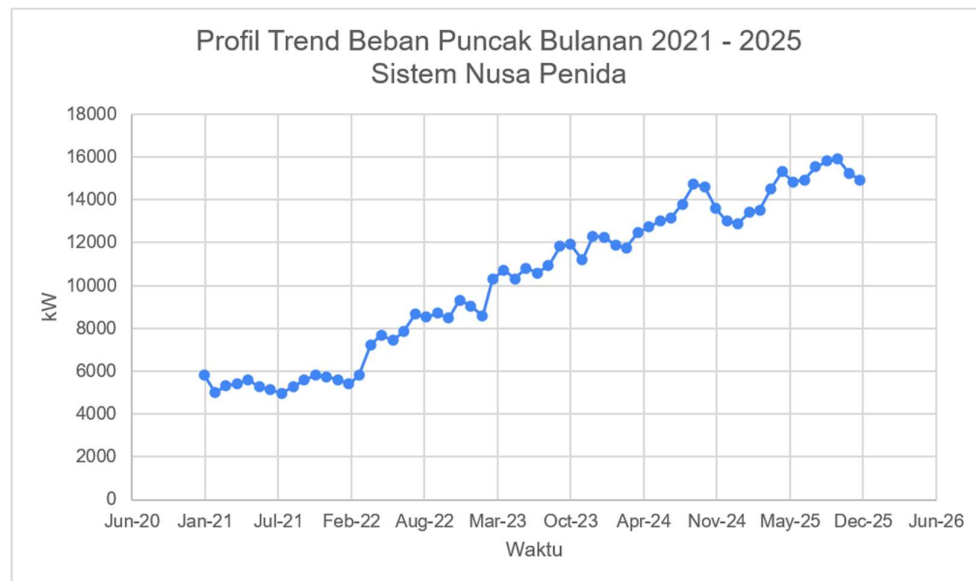
al., 2021). Namun, peningkatan operasi PLTD secara langsung berkorelasi dengan kenaikan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional pembangkitan (Goli et al., 2025; Wali et al., 2023). Kinerja PLTD yang konsisten, misalnya, memegang peranan krusial untuk memastikan pasokan daya putar cadangan (*spinning reserve*), yang secara teknis berfungsi menjaga stabilitas sistem ketenagalistrikan saat terjadi lonjakan beban listrik yang mendadak (Ramli et al., 2018). Meskipun demikian, pengoperasian PLTD secara kontinu pada kondisi beban rendah berpotensi memicu lonjakan pemakaian bahan bakar yang menurunkan efisiensi konsumsi bahan bakar (Damian et al., 2025).

Sebaliknya, integrasi PLTS dalam sistem hibrida terbukti mampu mengurangi konsumsi bahan bakar secara signifikan, terutama pada sistem *isolated grid* dengan profil beban yang relatif stabil (Adoum Abdoulaye et al., 2024; Alberizzi et al., 2020). Peningkatan kinerja PLTS tidak hanya berkontribusi terhadap penurunan penggunaan bahan bakar, tetapi juga meningkatkan total produksi energi listrik dari sumber energi bersih yang lebih berkelanjutan (Sinha & Chandel, 2014). Apabila pengaturan injeksi daya surya tersebut dikendalikan dengan skema penjadwalan operasi yang presisi, performa PLTS tersebut pada akhirnya turut memperbaiki keandalan durasi dan mutu layanan sistem ketenagalistrikan (Ghenai et al., 2020). Meskipun demikian, tingginya penetrasi PLTS juga dapat menimbulkan tantangan teknis seperti fluktuasi tegangan dan kebutuhan *balancing* yang lebih kompleks (Gandhi et al., 2020).

Selain faktor teknis, aspek ekonomi seperti harga satuan bahan bakar merupakan faktor kunci dalam menentukan strategi operasi pembangkit pada sistem hibrida (Adefarati & Bansal, 2016). Fluktuasi harga bahan bakar diesel dapat memengaruhi *dispatching* unit pembangkit dan mendorong perubahan pola operasi sistem menuju pemanfaatan energi terbarukan yang lebih dominan (Hosseini et al., 2025; Weinand et al., 2023). Namun demikian, dalam kondisi tertentu, kenaikan harga bahan bakar juga dapat meningkatkan total biaya operasi pembangkitan apabila sistem belum optimal dalam integrasi energi terbarukan (Goli et al., 2025; Wali et al., 2023).

Kondisi sistem kelistrikan yang mencakup parameter seperti beban puncak, *reserve margin*, dan stabilitas frekuensi memiliki hubungan erat dengan konsumsi bahan bakar dan biaya operasi pembangkitan (Lund et al., 2017). Sistem dengan tingkat keandalan

rendah cenderung membutuhkan lebih banyak pembangkit berbasis fosil sebagai cadangan, sehingga meningkatkan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional (Come Zebra et al., 2021; Das et al., 2017). Sebaliknya, sistem yang terintegrasi dengan baik memungkinkan optimalisasi penggunaan energi terbarukan serta efisiensi biaya pembangkitan (Sinha & Chandel, 2014).



Gambar 1. 3 Profil Beban Puncak Bulanan 2021 - 2025 di Sistem Nusa Penida

Peningkatan beban puncak di sistem Nusa Penida dari tahun 2022 sampai 2025 didorong oleh pertumbuhan kegiatan ekonomi, terutama di bidang pariwisata. Dengan meningkatnya popularitas pariwisata di Nusa Penida, kebutuhan energi listrik juga diperkirakan akan meningkat.

Perkembangan penelitian terkini dalam sistem pembangkit hibrida menunjukkan peningkatan fokus pada integrasi energi terbarukan dalam sistem *isolated grid*, khususnya melalui pendekatan optimasi teknis dan ekonomi yang bertujuan menurunkan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi sistem (Boucekara et al., 2021). Studi-studi terkini dalam jurnal bereputasi seperti *Applied Energy* dan *Renewable Energy* menekankan bahwa keberhasilan implementasi sistem hibrida sangat bergantung pada interaksi antara performa teknis pembangkit dan strategi operasional berbasis kondisi sistem secara *real-time* (Graça Gomes et al., 2021). Namun demikian, sebagian besar

penelitian masih berfokus pada aspek desain sistem dan optimasi kapasitas tanpa mengkaji hubungan kausal antar variabel operasional dalam kerangka manajemen energi yang komprehensif.

Dalam konteks kinerja pembangkit, studi terdahulu mengonfirmasi bahwa PLTD memiliki kontribusi signifikan dalam menjaga stabilitas sistem kelistrikan, terutama pada sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi (Graça Gomes et al., 2021). Indikator stabilitas sistem mencakup kemampuan mempertahankan frekuensi dan tegangan dalam batas operasional yang aman, yang sangat bergantung pada respons cepat dari pembangkit berbasis fosil (Shair et al., 2021). Namun, peningkatan operasi PLTD secara simultan juga meningkatkan konsumsi bahan bakar, yang berdampak langsung pada efisiensi energi dan biaya operasional (Semshchikov et al., 2020). Keterkaitan ganda ini menunjukkan adanya *trade-off* antara stabilitas sistem dan efisiensi konsumsi energi, yang belum banyak dikaji secara empiris dalam literatur sebelumnya.

Sementara itu, penelitian terkait PLTS menunjukkan bahwa peningkatan kinerja pembangkit surya memiliki dampak positif terhadap peningkatan keandalan sistem melalui diversifikasi sumber energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil (Shahsavari & Akbari, 2018). Selain itu, integrasi PLTS terbukti efektif dalam menurunkan konsumsi bahan bakar pada sistem hibrida, terutama ketika dikombinasikan dengan strategi manajemen energi yang optimal (Graça Gomes et al., 2021). Namun demikian, beberapa studi juga mencatat bahwa peningkatan produksi energi dari PLTS dapat memengaruhi dinamika operasi sistem, termasuk perubahan pola *dispatching* pembangkit konvensional (Ammari et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara kinerja PLTS dan produksi energi listrik tidak hanya bersifat langsung, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi sistem secara keseluruhan.

Di sisi lain, harga satuan bahan bakar merupakan variabel eksternal yang memiliki pengaruh signifikan terhadap strategi operasi pembangkit dalam sistem ketenagalistrikan (Adi, 2023). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kenaikan harga bahan bakar mendorong operator untuk mengurangi penggunaan pembangkit berbasis fosil dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan (Ren et al., 2022; Semshchikov et al., 2020). Namun, dalam sistem yang belum sepenuhnya optimal, kenaikan harga bahan

bakar dapat meningkatkan biaya operasi pembangkitan secara keseluruhan (Adi, 2023). Selain itu, hubungan antara harga bahan bakar dan produksi energi listrik masih menunjukkan hasil yang beragam dalam literatur, bergantung pada struktur sistem dan strategi operasi yang digunakan.

Kondisi sistem kelistrikan juga menjadi faktor penting yang memengaruhi kinerja keseluruhan sistem hibrida. Parameter seperti beban sistem, variabilitas permintaan, dan reserve margin menentukan kebutuhan operasi pembangkit serta tingkat konsumsi bahan bakar (Shair et al., 2021). Sistem dengan beban tinggi dan variabilitas yang besar cenderung membutuhkan fleksibilitas operasi yang lebih tinggi, yang sering kali dipenuhi oleh pembangkit berbasis fosil (Shahsavari & Akbari, 2018). Hal ini menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar dan biaya operasi, meskipun pada saat yang sama juga meningkatkan produksi energi listrik untuk memenuhi permintaan.

Lebih lanjut, hubungan antara pemakaian bahan bakar dan biaya operasi pembangkitan telah banyak dibahas dalam literatur, mengingat konsumsi bahan bakar merupakan komponen utama dalam struktur biaya operasional pembangkit berbasis fosil (Adi, 2023). Peningkatan konsumsi bahan bakar secara langsung meningkatkan biaya variabel pembangkitan, yang pada akhirnya memengaruhi biaya total sistem (Adi, 2023). Namun, hubungan antara produksi energi listrik dan biaya operasi menunjukkan karakteristik yang lebih kompleks, dengan peningkatan produksi energi dari sumber yang lebih efisien dapat menurunkan biaya rata-rata pembangkitan (Ren et al., 2022).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji hubungan antar variabel tersebut secara parsial, terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertama, sebagian besar studi masih menggunakan pendekatan simulasi atau optimasi tanpa menguji hubungan kausal antar variabel secara empiris dalam satu model terintegrasi. Kedua, penelitian yang menggabungkan variabel teknis (kinerja PLTD dan PLTS), variabel ekonomi (harga bahan bakar), dan variabel sistem (kondisi ketenagalistrikan) dalam perspektif manajemen energi masih sangat terbatas. Ketiga, studi berbasis data operasional nyata dari sistem *isolated grid* seperti Nusa Penida masih minim dieksplorasi dalam literatur internasional.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan model konseptual yang mengintegrasikan berbagai variabel kunci dalam sistem kelistrikan hibrida. Model ini bertujuan untuk menguji hubungan kausal antar variabel dalam kerangka manajemen energi, sehingga dapat memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai dinamika sistem hibrida.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi kesenjangan literatur terkait integrasi variabel teknis dan ekonomi dalam sistem hibrida, tetapi juga memberikan kontribusi empiris berbasis data nyata dalam konteks sistem *isolated grid*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Aspek Kinerja Operasi Pembangkit

1. Bagaimana pengaruh kinerja PLTD Nusa Penida terhadap sistem kelistrikan Nusa Penida?
2. Bagaimana pengaruh kinerja PLTD Nusa Penida terhadap pemakaian bahan bakar?
3. Bagaimana pengaruh kinerja PLTS Nusa Penida terhadap sistem kelistrikan Nusa Penida?
4. Bagaimana pengaruh kinerja PLTS Nusa Penida terhadap pemakaian bahan bakar?
5. Bagaimana pengaruh kinerja PLTS Nusa Penida terhadap produksi energi listrik?

Aspek Harga Bahan Bakar

6. Bagaimana pengaruh harga bahan bakar terhadap biaya operasi pembangkit?
7. Bagaimana pengaruh harga bahan bakar terhadap produksi energi listrik?

Aspek Sistem Kelistrikan

8. Bagaimana pengaruh sistem kelistrikan terhadap pemakaian bahan bakar?

9. Bagaimana pengaruh sistem kelistrikan terhadap biaya operasi pembangkit?

10. Bagaimana pengaruh sistem kelistrikan terhadap produksi energi listrik?

Aspek Pemakaian Bahan Bakar

11. Bagaimana pengaruh pemakaian bahan bakar terhadap biaya operasi pembangkitan?

Aspek Produksi Energi Listrik

12. Bagaimana pengaruh produksi energi listrik terhadap pemakaian bahan bakar?

13. Bagaimana pengaruh produksi energi listrik terhadap biaya operasi pembangkit?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini pada aspek kinerja operasi pembangkit, harga bahan bakar, sistem kelistrikan, pemakaian bahan bakar dan produksi energi listrik adalah:

1. Menganalisis pengaruh kinerja PLTD Nusa Penida terhadap sistem kelistrikan Nusa Penida.
2. Menganalisis pengaruh kinerja PLTD Nusa Penida terhadap pemakaian bahan bakar.
3. Menganalisis pengaruh kinerja PLTS Nusa Penida terhadap sistem kelistrikan Nusa Penida.
4. Menganalisis pengaruh kinerja PLTS Nusa Penida terhadap pemakaian bahan bakar.
5. Menganalisis pengaruh kinerja PLTS Nusa Penida terhadap produksi energi listrik.
6. Menganalisis pengaruh harga bahan bakar terhadap biaya operasi pembangkit.
7. Menganalisis pengaruh harga bahan bakar terhadap produksi energi listrik.
8. Menganalisis pengaruh sistem kelistrikan terhadap pemakaian bahan bakar.

9. Menganalisis pengaruh sistem kelistrikan terhadap biaya operasi pembangkit.
10. Menganalisis pengaruh sistem kelistrikan terhadap produksi energi listrik.
11. Menganalisis pengaruh pemakaian bahan bakar terhadap biaya operasi pembangkit.
12. Menganalisis pengaruh produksi energi listrik terhadap pemakaian bahan bakar.
13. Menganalisis pengaruh produksi energi listrik terhadap biaya operasi pembangkit.

1.4 Manfaat Penelitian

Diharapkan bahwa temuan penelitian ini akan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai dinamika sistem hibrida.
2. Memberikan kontribusi empiris berbasis data nyata dalam konteks sistem *isolated grid*.
3. Menghasilkan model manajemen energi yang lebih adaptif dan aplikatif dalam mendukung transisi energi di wilayah kepulauan.

1.5 Ruang Lingkup

1. Dalam melakukan pemodelan, penelitian ini menggunakan data historis dari tahun 2021 sampai dengan 2025. Pada rentang waktu tersebut PLTS mulai beroperasi dari bulan Oktober 2022.
2. Dalam melakukan pemodelan tidak memasukkan variabel pengurangan emisi karbon, meskipun berkorelasi dengan konsumsi bahan bakar.

1.6 Kebaharuan

1. Menguji hubungan kausal antara variabel teknis (kinerja PLTD dan PLTS), variabel ekonomi (harga bahan bakar), dan variabel sistem (kondisi kelistrikan) secara empiris dalam satu model terintegrasi.
2. Menganalisis pengaruh produksi energi listrik terhadap biaya operasi pembangkit. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menganalisis pengaruh biaya operasi pembangkit terhadap produksi energi listrik.