

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan energi listrik yang andal, efisien, dan ramah lingkungan merupakan prasyarat utama pembangunan ekonomi daerah dan nasional. Di Indonesia, kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, industrialisasi, serta pengembangan sektor pariwisata dan jasa. Berdasarkan Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) Kementerian ESDM tahun 2025, konsumsi listrik nasional tumbuh rata-rata sekitar 7,9% per tahun selama periode 2020–2024 (Kementerian ESDM RI, 2025). Pemerintah Indonesia telah merumuskan kebijakan energi nasional untuk mendorong transisi menuju energi bersih. RUKN Kementerian ESDM, 2025 menargetkan bauran EBT 23% pada 2025 dan Net Zero Emission (NZE) pada 2060. Sejalan dengan itu, program dedieselisasi PLN (2021–2030) menargetkan penghentian operasi PLTD dengan menggantinya menggunakan PLTS, PLTB, dan BESS (Kementerian ESDM RI, 2025).

Kondisi ideal yang diharapkan adalah sistem pembangkit yang andal, ekonomis, dan ramah lingkungan dengan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), mengingat potensi radiasi matahari Indonesia yang relatif tinggi dan merata sepanjang tahun (Hiron et al., 2021). Namun, karakteristik intermitensi PLTS menyebabkan keterbatasan dalam menjamin keandalan sistem apabila dioperasikan secara mandiri tanpa dukungan pembangkit lain atau sistem penyimpanan energi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa integrasi PLTS dengan PLTD dan *battery energy storage system* (BESS) melalui strategi operasi yang tepat mampu meningkatkan keandalan sistem, menurunkan biaya pembangkitan, serta mengurangi emisi karbon (Aziz et al., 2022). Oleh karena itu, masih terdapat kesenjangan antara kondisi sistem kelistrikan saat ini yang bergantung pada PLTD dan kondisi ideal sistem berbasis energi terbarukan yang andal, sehingga diperlukan pengembangan sistem pembangkit hibrida PLTD–PLTS–BESS untuk

menjembatani kesenjangan tersebut, khususnya pada sistem kelistrikan kepulauan di Indonesia.

Di Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB), khususnya Pulau Lombok, sektor pariwisata menjadi tulang punggung ekonomi daerah. Kehadiran infrastruktur listrik yang stabil sangat menentukan daya saing daerah sebagai destinasi wisata unggulan. Sistem kelistrikan masih bergantung pada PLTD dan PLTG. Kondisi ini memperlihatkan bahwa sistem kelistrikan Lombok masih rawan terhadap gangguan, sehingga integrasi PLTS sangat dibutuhkan untuk menambah cadangan daya dan meningkatkan keandalan (PLN UIW NTB, 2025).

Salah satu penopang pasokan listrik di Kota Mataram dan sekitarnya adalah PLTD Lombok Ampenan. Meskipun PLTD memiliki fleksibilitas operasi dan waktu pembangunan yang cepat, keandalannya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan bahan bakar minyak (BBM), biaya operasional yang tinggi, serta dampak lingkungan yang signifikan. Berdasarkan data dari PLN UIW NTB, PLTD di Ampenan memiliki specific fuel consumption (SFC) sebesar 0,27–0,285 L/kWh, angka yang mencerminkan intensitas konsumsi solar per energi listrik yang dihasilkan (PLN UIW NTB, 2025). Nilai ini berarti untuk menghasilkan 1 MWh listrik, PLTD membutuhkan sekitar 270–285 liter solar. Dengan jam operasi mendekati penuh setiap hari, kebutuhan BBM tahunan PLTD 5 MW Ampenan mencapai jutaan liter. Hal ini berdampak langsung pada biaya pokok penyediaan (BPP) listrik, yang sebagian besar terserap pada komponen bahan bakar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sihombing (2015), disebutkan bahwa biaya bahan bakar mencapai 75% dari biaya operasional pembangkit. Ketergantungan pada solar impor dan distribusi antar-pulau meningkatkan kerentanan terhadap fluktuasi harga minyak dunia serta menambah biaya logistik dan transportasi (Sihombing et al., 2015)

Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar, yakni $\pm 4,5\text{--}5,5$ kWh/m²/hari, termasuk di Pulau Lombok (Global Solar Atlas, 2025). Namun, kontribusi PLTS terhadap bauran energi nasional masih sangat rendah, kurang dari 1% pada tahun 2022 (Kementerian ESDM RI, 2025). Padahal, pemanfaatan PLTS dalam skema hybrid PLTD–PLTS dapat menjadi solusi strategis bagi daerah terpencil dan kepulauan yang selama ini masih bergantung

pada PLTD. Dengan integrasi PLTS, beban siang hari dapat dialihkan ke energi surya, sehingga jam operasi mesin diesel menurun, konsumsi BBM berkurang, dan umur teknis mesin lebih panjang.

Sementara itu, penelitian lain oleh Wibawanto et al. (2024) yang mengkaji kinerja PLTS di wilayah Mataram Lombok menunjukkan bahwa PLTS mampu menyuplai beban siang hari secara konsisten dan menurunkan konsumsi energi dari sistem utama, namun belum mampu meningkatkan keandalan sistem secara menyeluruh tanpa dukungan sistem penyimpanan energi. Temuan lokal ini sejalan dengan hasil penelitian nasional dan internasional yang menyatakan bahwa kinerja sistem hibrida akan semakin optimal ketika dilengkapi dengan Battery Energy Storage System (BESS).

Menurut Manual Perhitungan Jejak Karbon (*Carbon Footprint*) Organisasi Kementerian Kehutanan, 2025) bahan bakar solar/diesel memiliki nilai faktor emisi CO₂ sebesar 2,60502 kg CO₂ per liter solar. Pedoman tersebut merujuk pada IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, sehingga nilainya diakui sebagai standar nasional dalam penyusunan inventaris emisi sektor energi. Konsumsi BBM PLTD langsung berbanding lurus dengan besarnya emisi CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer. Dengan operasi penuh, PLTD Ampenan diproyeksikan menghasilkan ribuan ton CO₂ per tahun, yang berkontribusi terhadap pencemaran lokal dan pemanasan global. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 (2021) tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, menetapkan baku mutu emisi untuk kegiatan pembangkitan, sehingga PLTD murni sering berada pada kondisi kritis dalam memenuhi regulasi ini, khususnya bila beroperasi lama pada beban parsial.

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan sistem pembangkit listrik hibrida berbasis integrasi PLTD dan PLTS terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem serta menurunkan biaya operasional pembangkitan. Studi pada sistem kelistrikan kepulauan di Indonesia menunjukkan bahwa kontribusi energi surya yang relatif moderat sudah mampu memberikan dampak ekonomi yang signifikan, ditunjukkan dengan penurunan biaya energi listrik (LCOE) setelah integrasi PLTS pada sistem PLTD (Simanjuntak & Alvianingsih, 2021). Temuan tersebut mengindikasikan bahwa PLTS berperan sebagai *energy*

displacement yang efektif dalam menekan konsumsi bahan bakar diesel tanpa harus menggantikan peran PLTD sebagai pembangkit utama.

Selain manfaat ekonomi, integrasi PLTS juga memberikan dampak lingkungan yang nyata melalui penurunan emisi gas rumah kaca. Beberapa penelitian melaporkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS pada sistem PLTD mampu menurunkan emisi CO₂ secara terukur, bahkan pada sistem kelistrikan terisolasi dengan cadangan daya terbatas (Rianto & Adi, 2024). Dari sisi teknis, kajian stabilitas sistem menunjukkan bahwa penetrasi energi surya hingga tingkat menengah tidak mengganggu keandalan sistem, yang ditandai dengan stabilitas frekuensi tetap berada dalam batas operasi yang aman (Hiron et al., 2021). Hal ini menegaskan bahwa integrasi PLTS dapat dilakukan tanpa mengorbankan kualitas dan kontinuitas pasokan listrik.

Pada skala yang lebih luas, baik di tingkat nasional maupun internasional, kinerja sistem hibrida semakin optimal ketika dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi. Studi internasional dan nasional menunjukkan bahwa kombinasi PLTS, PLTD, dan Battery Energy Storage System (BESS) mampu secara signifikan menurunkan konsumsi bahan bakar diesel, meningkatkan fraksi energi terbarukan, serta memperbaiki fleksibilitas operasi sistem (Ghufron, 2025). Kehadiran BESS memungkinkan penyimpanan energi surplus pada siang hari dan pemanfaatannya kembali saat produksi PLTS menurun atau beban meningkat, sehingga operasi parsial PLTD dapat dikurangi. Secara keseluruhan, hasil-hasil penelitian tersebut menegaskan bahwa integrasi PLTS terutama ketika dikombinasikan dengan BESS merupakan solusi yang konsisten dan efektif untuk menurunkan konsumsi bahan bakar, biaya operasional, serta emisi, sekaligus menjaga keandalan sistem kelistrikan berbasis PLTD di wilayah kepulauan dan daerah terpencil.

Simulasi sistem pembangkit PLTD–PLTS–BESS dalam penelitian ini dilakukan dengan konfigurasi off-grid, yaitu sistem kelistrikan terisolasi yang tidak terhubung dengan jaringan listrik eksternal, sehingga seluruh kebutuhan energi listrik harus dipenuhi secara mandiri oleh pembangkit lokal. Pendekatan off-grid dipilih karena merepresentasikan kondisi nyata sistem kelistrikan kepulauan yang masih bergantung pada PLTD sebagai pembangkit utama. Dalam simulasi ini,

PLTD berfungsi sebagai sumber daya dispatchable untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik, PLTS dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan guna menurunkan konsumsi bahan bakar diesel, dan Battery Energy Storage System (BESS) berperan sebagai penyangga energi yang menyerap surplus energi PLTS serta menyuplai daya saat produksi surya menurun. Pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER, yang memungkinkan analisis aliran energi, strategi operasi, serta evaluasi kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan sistem hybrid secara komprehensif. Pendekatan simulasi off-grid ini umum digunakan dalam studi sistem hybrid pada pulau kecil dan daerah terpencil, karena mampu menggambarkan interaksi antar pembangkit secara realistis serta mengevaluasi efektivitas integrasi PLTS dan BESS dalam meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan sistem kelistrikan berbasis PLTD (Hiron et al., 2021)

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada Studi Tekno-Ekonomi dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti efisiensi energi, keandalan, dampak lingkungan hidup dan kebijakan Energi Sistem Hybrid PLTD–PLTS di PLTD 5 MW Ampenan, Lombok. Penelitian ini mengintegrasikan analisis:

1. Teknis: kinerja energi dan efisiensi energi (SFC)
2. Ekonomi: biaya operasional (NPC, LCOE, LCC).
3. Keandalan: Excess Electricity, Unmet Load, dan Capacity Shortage.
4. Lingkungan Hidup: reduksi emisi CO₂.
5. Kebijakan energi: kontribusi pada RUKN 2025, program dedieselisasi PLN, dan roadmap NZE 2060.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam:

1. Hasil analisis efisiensi energi dan ekonomi pada sistem PLTD Murni dibandingkan dengan sistem hybrid PLTD–PLTS di Lombok .
2. Memberikan pembuktian empiris bahwa sistem hybrid dapat meningkatkan keandalan.
3. Menunjukkan kontribusi strategis hybrid PLTD–PLTS terhadap penurunan emisi CO₂.

1.3 Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang menjadi fokus penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana tingkat efisiensi energi dan aspek ekonomis pada sistem PLTD murni dibandingkan dengan sistem hybrid PLTD–PLTS di Lombok?
2. Bagaimana keandalan sistem hidup jika PLTS diintegrasikan dengan PLTD?
3. Bagaimana dampak lingkungan jika PLTS diintegrasikan dengan PLTD?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis efisiensi energi sistem PLTD murni dan membandingkannya dengan sistem hybrid PLTD–PLTS pada PLTD Sewa Batam Ampenan 5 MW Lombok.
2. Mengevaluasi biaya operasional (NPC, LCOE, dan *operating cost*) antara sistem PLTD murni dengan hybrid PLTD–PLTS, serta mengestimasi besarnya potensi penghematan biaya yang dapat diperoleh.
3. Menilai keandalan sistem melalui perhitungan parameter keandalan, seperti Excess Electricity, Unmet Load, dan Capacity Shortage. untuk mengetahui dampak integrasi PLTS terhadap kontinuitas pasokan listrik.
4. Menganalisis dampak lingkungan berupa penurunan emisi CO₂ dan pengurangan jejak karbon akibat penerapan sistem hybrid dibandingkan PLTD murni.
5. Mengidentifikasi kontribusi sistem hybrid PLTD–PLTS pada PLTD Ampenan 5 MW dalam mendukung kebijakan nasional, khususnya program *dedieselisasi* PLN, pencapaian bauran energi baru terbarukan (23% pada 2025), serta target Net Zero Emission 2060.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis

- a. Memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang teknik elektro, khususnya terkait analisis tekno-ekonomi dan keandalan sistem hybrid PLTD–PLTS.
 - b. Menjadi referensi akademik bagi penelitian selanjutnya mengenai integrasi energi terbarukan dalam sistem kelistrikan di daerah terpencil atau sistem kepulauan.
2. Manfaat Praktis/Industri
- a. Memberikan gambaran nyata kepada PLN dan penyedia pembangkit swasta (IPP) tentang potensi efisiensi energi, penghematan biaya operasional, dan pengurangan konsumsi BBM melalui penerapan sistem hybrid PLTD–PLTS.
 - b. Menjadi bahan evaluasi operasional untuk unit PLTD Sewa Batam Ampenan 5 MW Lombok, sehingga dapat dioptimalkan dalam mendukung cadangan operasi sistem Lombok.
 - c. Menyediakan rekomendasi teknis bagi program dedieselisasi PLN dalam menurunkan biaya pokok penyediaan (BPP) dan meningkatkan penetrasi energi terbarukan.
3. Manfaat Lingkungan & Kebijakan
- a. Menunjukkan kontribusi sistem hybrid PLTD–PLTS dalam mengurangi emisi CO₂ dan mendukung upaya mitigasi perubahan iklim.
 - b. Mendukung pencapaian target bauran energi baru terbarukan 23% pada 2025 dan Net Zero Emission 2060 sebagaimana tercantum dalam Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN).
 - c. Memberikan masukan kepada pemangku kebijakan terkait urgensi transisi energi di daerah kepulauan, khususnya dalam pengembangan sistem hybrid PLTD–PLTS.

1.6 Batasan masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Objek Penelitian
Penelitian difokuskan pada PLTD Sewa Batam Ampenan dengan kapasitas 5 MW di Sistem Kelistrikan Lombok, khususnya dalam konteks integrasi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).
2. Skenario Sistem yang Dianalisis
 - a. Sistem PLTD murni sebagai kondisi eksisting.
 - b. Sistem Hybrid PLTD–PLTS,
 - c. Sistem Hybrid PLTD–PLTS–BESS.
3. Aspek yang Dikaji
 - a. Efisiensi Energi: perbandingan konsumsi bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption/SFC*) antara PLTD murni dan hybrid.
 - b. Biaya Operasional: analisis *Net Present Cost (NPC)*, *Cost of Energy (COE)*, *Operating Cost* dan *Payback Period* dengan asumsi umur proyek 20 tahun sesuai standar analisis pembangkit.
 - c. Keandalan Sistem: perhitungan Excess Ele
 - d. Dampak Lingkungan: estimasi pengurangan emisi CO₂ akibat integrasi PLTS.
 - e. Kontribusi Kebijakan: kesesuaian dengan program dedieselisasi dan RUKN 2025–2060.
4. Data Penelitian
 - a. Data operasi PLTD diperoleh dari logsheet dan laporan operasional PLN.
 - b. Data radiasi surya dan potensi PLTS menggunakan data klimatologi (NASA/ESDM).
 - c. Data biaya mengacu pada asumsi harga BBM, investasi PLTS, dan standar biaya pembangkit yang berlaku.
5. Batasan Teknis
 - a. Penelitian tidak membahas detail teknis kelistrikan seperti desain sistem proteksi, desain mekanis PLTD, atau detail konstruksi PLTS.
 - b. Aspek bahan bakar dibatasi hanya pada konsumsi solar (HSD/IDO) sesuai kondisi eksisting, tanpa mempertimbangkan variasi biofuel.

- c. Analisis PLTS difokuskan pada off grid hybrid atau sistem mikrogrid mandiri.
6. Waktu Penelitian dimulai
 - a. Penelitian ini dilaksanakan dalam kurun waktu 6 bulan (Juli 2025 Desember 2025), yang mencakup seluruh tahapan penelitian mulai dari persiapan hingga penyusunan laporan akhir. Tahap persiapan meliputi studi literatur dan pengumpulan data teknis serta data operasional pembangkit. Selanjutnya dilakukan pengolahan data, pemodelan, dan simulasi sistem PLTD, PLTD–PLTS, serta PLTD–PLTS–BESS menggunakan perangkat lunak HOMER Pro.
 - b. Tahap berikutnya adalah analisis hasil simulasi yang mencakup aspek teknis (kinerja dan efisiensi energi), ekonomi, keandalan, dan lingkungan. Penelitian diakhiri dengan penyusunan kesimpulan dan saran sebagai hasil akhir dari seluruh rangkaian kegiatan penelitian.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis ini disusun sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN
2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA
3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN
4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN