

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor maritim merupakan tulang punggung rantai pasok energi nasional, khususnya dalam distribusi batubara sebagai bahan baku utama pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pertumbuhan volume pengangkutan batubara meningkatkan intensitas aktivitas kapal di jetty industri, sementara transportasi laut diproyeksikan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang terus meningkat tanpa intervensi teknologi (Bouman et al., 2017) (Styhre et al., 2017), sehingga mendorong IMO, operator pelabuhan, dan regulator untuk mengimplementasikan solusi dekarbonisasi yang layak secara ekonomi (Daniel et al., 2022). Salah satu tahapan yang menjadi perhatian utama adalah fase sandar atau hoteling, di mana kapal tetap membutuhkan listrik untuk penerangan, pompa, ventilasi, komunikasi, dan peralatan bongkar muat. Kebutuhan ini umumnya dipenuhi dengan mengoperasikan *auxiliary engine* berbahan bakar minyak (HSD dan MFO) secara terus-menerus, yang menimbulkan dua dampak negatif.

Dari aspek lingkungan dan kesehatan, pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan emisi NO_x, SO_x, partikulat halus (PM), dan CO₂ yang dilepaskan dekat dengan kawasan padat penduduk (Winkel et al., 2016;) (McArthur & Osland, 2013), dengan hampir 70% emisi pelayaran terjadi di kawasan pesisir (Innes & Monios, 2018). Studi di Pelabuhan Kaohsiung menunjukkan konsentrasi NO_x kapal sandar mencapai 147 µg/m³ (Nguyen et al., 2021), sementara di Amerika Serikat penerapan *shore power* terbukti menurunkan NO_x hingga 98% dan partikulat hingga 55% (Vaishnav et al., 2016). Dari aspek ekonomi, rata-rata konsumsi BBM delapan kapal di Jetty PLTU Tanjung Jati B mencapai 3.350,59 liter/hari/kapal (MFO 3.158,95 dan HSD 191,64 liter/hari); dengan harga HSD/Biosolar B40 Rp28.150/liter dan

MFO Rp18.900/liter (Muhammad Robith Adani, 2026), biaya bahan bakar per call (sandar 50 jam) mencapai Rp135.622.422 per kapal.

Onshore Power Supply (OPS), dikenal pula sebagai *cold ironing*, *shore-side electricity*, atau *Alternative Marine Power*, memungkinkan kapal mematikan *auxiliary engine* saat sandar dan menggantinya dengan listrik dari jaringan darat (Abu Bakar et al., 2023). Sistem ini memerlukan konversi frekuensi 50 Hz ke 60 Hz serta kesesuaian tegangan dan standar antarmuka (Sciberras et al., 2015) (Tarnapowicz & German-Galkin, 2018) (Kumar et al., 2019). Berbagai studi membuktikan OPS menurunkan emisi polutan lokal dan berpotensi mengurangi CO₂ bergantung intensitas karbon jaringan (Dai et al., 2020) (Stolz et al., 2021) (Sun et al., 2022). Ballini & Bozzo (2015) menemukan biaya investasi OPS dapat kembali melalui manfaat kesehatan dalam 12-13 tahun, sementara Zis (2019) membuktikan adanya motivasi ekonomi bagi operator pada skenario harga bahan bakar menengah-tinggi. Secara kebijakan, IMO melalui Resolusi MEPC.323(74) tahun 2019 dan Uni Eropa (kewajiban *shore power* mulai 2030) mendorong adopsi OPS (Daniel et al., 2022).

Implementasi OPS menghadapi tantangan teknis dan ekonomi. Secara teknis, isu utama mencakup kompatibilitas tegangan-frekuensi, kualitas daya, dan kemampuan proteksi terhadap gangguan (Sciberras et al., 2015), di mana konfigurasi *Static Frequency Converter* dan transformator isolasi sangat memengaruhi biaya dan kinerja proyek (Colarossi & Principi, 2020), ditambah tantangan harmonisasi standar IEC/ISO/IEEE 80005 (Kumar et al., 2019). Le (2024) mengidentifikasi hambatan berupa biaya investasi tinggi, kurangnya standarisasi, dan rendahnya utilisasi. Secara ekonomi, kelayakan OPS ditentukan oleh tingkat utilisasi karena struktur CAPEX besar dan O&M tetap, sementara pendapatan bersifat variabel (Innes & Monios, 2018) (Zis, 2019). Kelayakan finansial pengelola sering tidak selaras dengan kelayakan sosial, sehingga desain insentif dan tarif menjadi kunci (Martínez-López et al., 2021) (Spengler & Tovar, 2021) (Bullock et al., 2023) dengan indikator NPV, IRR, DPP, dan B/C Ratio sebagai pendekatan standar evaluasi (Sokolov, 2024) (Pasqual et al., 2013).

Konteks tersebut relevan bagi Jetty PLTU Tanjung Jati B, Jepara, salah satu pembangkit batubara terbesar di Indonesia (4x 660 MW). *Coal Jetty* ini menerima 134 *call* per tahun dengan rata-rata sandar 50 jam, melayani *dedicated vessel* dan *additional vessel* dengan kebutuhan daya *shore connection* 440 V berkisar 228-457 kVA. Sistem OPS di jetty ini telah memasuki tahap komisioning dengan CAPEX Rp33,18 miliar, mencakup SFC 750 kVA, transformator isolasi 750 kVA, transformator distribusi 1.250 kVA, *capacitor bank* 300 kVAR, serta jaringan kabel dan panel tegangan menengah-rendah.

Meskipun banyak studi OPS telah dilakukan, terdapat sejumlah *research gap*. Pertama, mayoritas studi berfokus pada terminal peti kemas, kapal pesiar, atau ferry, sementara segmen *bulk carrier jetty* industri dengan heterogenitas profil dan ketidakpastian utilisasi tinggi masih jarang dikaji (Innes & Monios, 2018) (Tang et al., 2023) (Kizielewicz, 2024). Kedua, studi kelayakan kerap deterministik tanpa mengaitkan tarif layanan dengan kriteria investasi terukur pada konteks negara berkembang (Nikolaidis & Maniati, 2024) (Colarossi & Principi, 2020)(Molavi et al., 2020) (Wang et al., 2021)(Nigro et al., 2024). Ketiga, aspek *avoided fuel cost* belum banyak dimodelkan eksplisit dalam kelayakan finansial jetty batubara (Bullock et al., 2023). (Hamzah Hamzah & Tri Wahyu Adi (2026) merumuskan skema bisnis OPS dengan *Business Model Canvas* namun tanpa kaitan eksplisit ke indikator kelayakan, sedangkan (Pamungkas & Prabowo (2026) mengkaji penurunan biaya BBM dan emisi CO₂ OPS kapal batu bara di PLTU Suralaya namun belum mengembangkan analisis ETAP. Studi tekno-ekonomi elektrifikasi lain (Adi & Prihata, 2026)(Nugraha & Prabowo, 2026) menggunakan kerangka serupa pada objek berbeda, sementara pada tataran makro harga BBM fosil, bauran energi, dan emisi CO₂ terbukti saling berkaitan di Asia Pasifik termasuk Indonesia (Adi et al., 2023)(Adi et al., 2022).

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat urgensi untuk melakukan analisis kelayakan OPS pada kapal batubara di Jetty PLTU Tanjung Jati B secara komprehensif melalui pendekatan integratif yang menggabungkan: (1) evaluasi teknis berbasis simulasi ETAP (*load flow* dan *short circuit*); (2) analisis

kelayakan finansial multiskenario (NPV, IRR, DPP, B/C Ratio); (3) kuantifikasi *avoided fuel cost*; (4) analisis sensitivitas *multivariabel*; dan (5) perumusan model bisnis dan manfaat ekosistem PLN secara dual benefit. Hasil penelitian diharapkan menjadi rekomendasi aplikatif bagi pengelola fasilitas, operator kapal, penyedia layanan listrik, dan pembuat kebijakan dalam mewujudkan implementasi OPS yang layak secara teknis, finansial, dan strategis di sektor energi maritim Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana kelayakan teknis sistem *Onshore Power Supply* (OPS) di Jetty PLTU Tanjung Jati B berdasarkan hasil simulasi *load flow* dan *short circuit* menggunakan perangkat lunak ETAP?
2. Bagaimana kelayakan finansial investasi OPS berdasarkan indikator NPV, IRR, *Discounted Payback Period* (DPP), dan *Benefit Cost Ratio* (B/C Ratio) pada berbagai skenario tingkat pemanfaatan?
3. Berapa besar nilai *avoided fuel cost* per kWh yang dapat direalisasikan melalui substitusi BBM auxiliary engine dengan pasokan listrik OPS, dan berapa tingkat utilisasi minimum yang diperlukan agar proyek mencapai kelayakan finansial?
4. Variabel input mana yang paling berpengaruh terhadap kelayakan finansial investasi OPS berdasarkan analisis sensitivitas?
5. Bagaimana manfaat ekosistem PLN secara dual benefit dari implementasi OPS di Jetty PLTU Tanjung Jati B, baik bagi PLN UIK Tanjung Jati B sebagai pengelola maupun PLN UP3 Kudus sebagai pemasok energi?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang telah disusun, tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengevaluasi kelayakan teknis sistem OPS di Jetty PLTU Tanjung Jati B melalui simulasi *load flow* dan *short circuit* menggunakan perangkat lunak ETAP, mencakup profil tegangan, faktor daya, rugi-rugi daya, pembebanan

transformator, dan kemampuan peralatan proteksi terhadap arus hubung singkat.

2. Menganalisis kelayakan finansial investasi OPS berdasarkan indikator NPV, IRR, DPP, dan B/C Ratio pada empat skenario tingkat pemanfaatan, yaitu 10%, 50%, 80%, dan 100%.
3. Mengkuantifikasi nilai avoided fuel cost per kWh dari substitusi BBM auxiliary engine dengan listrik OPS, serta menentukan titik impas utilisasi minimum (breakeven utilization) agar proyek mencapai kelayakan finansial.
4. Mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap kelayakan finansial proyek melalui analisis sensitivitas univariat dan multivariabel, serta memetakan kombinasi parameter kritis yang menentukan ambang kelayakan.
5. Menganalisis manfaat ekosistem PLN secara dual benefit dari implementasi OPS, mencakup penghematan biaya dari perspektif PLN UIK Tanjung Jati B dan tambahan pendapatan penjualan energi dari perspektif PLN UP3 Kudus.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Akademik

1. Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu teknik elektro, khususnya dalam studi kelayakan infrastruktur kelistrikan maritim dan analisis techno-economic sistem *Onshore Power Supply* pada jetty industri berbasis batubara.
2. Menawarkan kerangka analisis integratif yang menggabungkan evaluasi teknis berbasis simulasi ETAP, model kelayakan finansial multiskenario, strategi penentuan tarif feasible, kuantifikasi *avoided fuel cost*, dan analisis sensitivitas, sehingga dapat menjadi referensi metodologis bagi penelitian sejenis.
3. Mengisi kesenjangan literatur (*research gap*) pada segmen *bulk carrier* dan jetty industri yang selama ini kurang mendapat perhatian dibandingkan segmen kapal pesiar, *ferry*, atau terminal peti kemas dalam studi OPS internasional maupun nasional.

1.4.2 Manfaat Praktis

1. Bagi pengelola Jetty dan PLTU Tanjung Jati B selaku penyedia layanan OPS, menyediakan hasil analisis kelayakan finansial yang komprehensif dan strategi operasional untuk mencapai tingkat utilisasi yang layak secara finansial.
2. Bagi operator kapal pengangkut batubara, memberikan gambaran kuantitatif mengenai manfaat ekonomi *avoided fuel cost* yang dapat diperoleh dari peralihan penggunaan *auxiliary engine* ke OPS sebagai dasar pertimbangan adopsi teknologi.
3. Bagi PLN, memberikan gambaran manfaat ekosistem dual benefit yang memperkuat justifikasi investasi OPS tidak hanya dari perspektif unit pembangkit sebagai pengelola, tetapi juga dari perspektif unit distribusi yang mendapatkan tambahan penjualan energi
4. Bagi regulator dan pembuat kebijakan, memberikan masukan mengenai kebutuhan desain insentif, mekanisme biaya lingkungan, dan skema regulasi tarif layanan OPS.
5. Dapat menjadi model replikasi bagi implementasi OPS pada jetty dan pelabuhan industri lain di Indonesia yang memiliki karakteristik operasional serupa.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Objek penelitian adalah implementasi OPS untuk kapal pengangkut batubara yang sandar di *Coal Jetty* PLTU Tanjung Jati B Unit 1–2 dan Unit 3–4, dengan fokus pada fase *hoteling* saat kapal berada di dermaga.
2. Analisis teknis kelistrikan dilakukan melalui simulasi *load flow* dan *short circuit* menggunakan perangkat lunak ETAP, dengan acuan standar SPLN No. 1 Tahun 1995 untuk evaluasi profil tegangan dan standar IEC untuk evaluasi arus hubung singkat.
3. Analisis emisi dibahas secara konseptual berdasarkan konsumsi BBM dan spesifikasi kapal; tidak dilakukan pengukuran emisi secara langsung di lapangan.

4. Kajian berfokus pada parameter teknis kunci untuk keputusan kapasitas dan kelayakan, bukan pada desain rinci engineering per komponen instalasi.
5. Analisis kelayakan finansial dilakukan berdasarkan umur proyek 25 tahun dengan tingkat diskonto WACC sebesar 12%, menggunakan tarif beli listrik golongan I-3/TM berdasarkan Permen ESDM No. 7 Tahun 2024.
6. Analisis skenario pemanfaatan OPS dibatasi pada empat tingkat, yaitu 10%, 50%, 80%, dan 100%, untuk merepresentasikan kondisi adopsi bertahap hingga penuh.
7. Perhitungan *avoided fuel cost* menggunakan rata-rata konsumsi BBM dari delapan kapal yang beroperasi di Jetty PLTU Tanjung Jati B, dengan harga acuan HSD/Biosolar B40 dan MFO pada periode April 2026.
8. Analisis sensitivitas dilakukan dengan metode *one-at-a-time* (OAT), yaitu mengubah satu variabel pada satu waktu dengan mempertahankan variabel lain pada nilai dasarnya.
9. Penelitian ini tidak membahas aspek desain sistem mekanikal, *civil work*, atau *marine engineering* terkait instalasi konektor kapal dan infrastruktur fisik dermaga.

1.6 Kebaruan Penelitian (Novelty)

Kebaruan penelitian ini dibangun atas dasar kesenjangan (research gap) yang telah diuraikan pada latar belakang, baik terhadap literatur OPS internasional maupun kajian OPS terdahulu di lingkungan Institut Teknologi PLN. Kebaruan tersebut mencakup aspek objek, pendekatan metodologis, dan kontribusi keilmuan sebagai berikut:

1. Kebaruan objek penelitian

Penelitian ini mengkaji implementasi OPS pada segmen *bulk carrier* batubara di jetty industri PLTU yaitu objek yang masih jarang diteliti dibandingkan dominasi studi OPS pada terminal peti kemas, kapal pesiar, dan *ferry*. Karakteristik jetty batubara dengan heterogenitas profil kapal, variasi durasi sandar, dan ketidakpastian utilisasi menjadikan konteks ini khas dan belum terwakili dalam literatur.

2. Kebaruan pendekatan integratif

Penelitian ini memadukan dalam satu kerangka analisis yang utuh: (a) evaluasi teknis berbasis simulasi ETAP (*load flow* dan *short circuit*), (b) analisis kelayakan finansial multiskenario (NPV, IRR, DPP, B/C Ratio), (c) kuantifikasi *avoided fuel cost*, dan (d) analisis sensitivitas multivariabel. Integrasi keempat aspek ini belum ditemukan secara simultan pada studi OPS sebelumnya, yang umumnya hanya menyoroti salah satu atau sebagian aspek.

3. Kebaruan pendekatan kelayakan berbasis *avoided fuel cost* sebagai sumber manfaat utama

Berbeda dari studi OPS pada umumnya yang menempatkan pendapatan dari tarif jual layanan listrik sebagai sumber manfaat proyek, penelitian ini memodelkan kelayakan finansial OPS dengan penghematan biaya bahan bakar (*avoided fuel cost*) sebagai sumber manfaat utama. Pendekatan ini mencerminkan kondisi riil jetty batubara milik PLN, di mana OPS tidak diorientasikan untuk menghasilkan pendapatan komersial dari penjualan listrik, melainkan untuk menggantikan konsumsi BBM kapal yang mahal. Manfaat bersih dihitung dari selisih antara nilai BBM yang dihindari dengan biaya listrik pengganti.

4. Kebaruan kontekstual

Penelitian ini menerapkan kerangka kelayakan OPS pada konteks sistem ketenagalistrikan dan struktur tarif Indonesia (golongan I-3/TM dan Permen ESDM No. 7 Tahun 2024), harga BBM kapal domestik (HSD/Biosolar B40 dan MFO), serta data operasional aktual dari Jetty PLTU Tanjung Jati B, sehingga menghasilkan model yang relevan dan dapat direplikasi untuk pelabuhan industri lain di Indonesia.

1.7 Sistematika Penulisan

Penelitian ini disusun dalam lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I — PENDAHULUAN. Membahas latar belakang penelitian, identifikasi masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II — TINJAUAN PUSTAKA. Menyajikan kajian penelitian terdahulu sebagai dasar identifikasi research gap, serta landasan teori mencakup konsep OPS, teori studi kelayakan finansial (NPV, IRR, DPP, B/C Ratio), dan teori anakisa daya dan hubung singkat.

BAB III — METODOLOGI PENELITIAN. Bab ini menjelaskan jenis penelitian, objek penelitian, data yang digunakan, serta tahapan metodologi yang mencakup pengumpulan data teknis dan finansial, simulasi ETAP untuk load flow dan short circuit, perhitungan avoided fuel cost, analisis kelayakan finansial multiskenario, analisis sensitivitas, dan alur penelitian.

BAB IV — HASIL DAN PEMBAHASAN. Bab ini menyajikan dan membahas hasil analisis teknis meliputi profil tegangan, drop tegangan, pembebanan peralatan, rugi-rugi daya, dan arus hubung singkat pada kedua model konfigurasi OPS; serta hasil analisis finansial meliputi perhitungan avoided fuel cost, arus kas proyek pada empat skenario utilisasi, NPV, IRR, DPP, B/C Ratio, analisis sensitivitas univariat dan multivariabel, serta manfaat ekosistem PLN secara dual benefit.

BAB V — PENUTUP. Bab ini menyajikan kesimpulan yang menjawab seluruh rumusan masalah penelitian dan rekomendasi yang ditujukan bagi pengelola jetty, operator kapal, unit PLN terkait, serta regulator dan peneliti selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA