

Analisis Tekno-Ekonomi Pemasangan Onshore Power Supply (OPS) untuk Kapal Batubara di Jetty PLTU

Adi Prasetyawan¹, Eri Prabowo²

1,2) Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan,
Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat 11750
Email: ady.elits18@gmail.com

ABSTRAK

Aktivitas hoteling kapal pengangkut batubara saat sandar di Jetty PLTU Tanjung Jati B masih dipenuhi oleh *auxiliary engine* berbahan bakar minyak, sehingga menimbulkan biaya operasional dan emisi lokal yang tinggi. *Onshore Power Supply* (OPS) menggantikan pasokan tersebut dengan listrik dari jaringan darat. Penelitian ini menganalisis kelayakan tekno-ekonomi pemasangan OPS berbasis *Static Frequency Converter* 750 kVA melalui pendekatan kuantitatif studi kasus. Aspek ekonomi dinilai menggunakan model penghematan bahan bakar (*avoided fuel cost*) dengan indikator NPV, IRR, DPP, dan B/C Ratio pada empat skenario pemanfaatan (10%, 50%, 80%, dan 100%), dilengkapi analisis arus kas 25 tahun, analisis sensitivitas *one-at-a-time*, matriks sensitivitas dua arah, serta analisis ekosistem manfaat ganda. Hasil menunjukkan proyek tidak layak pada pemanfaatan 10% (NPV -Rp27,43 miliar; B/C 0,34) namun layak pada 50%, 80%, dan 100%, dengan NPV meningkat hingga +Rp78,35 miliar, IRR 43,06%, dan periode pengembalian 3–8 tahun; titik impas tercapai pada utilisasi sekitar 33,34%. Variabel paling berpengaruh adalah tingkat pemanfaatan OPS, diikuti WACC dan biaya O&M. Setiap sandar/*call* menghasilkan penghematan bersih setara Rp5.764/kWh, dan implementasi OPS memberikan manfaat ganda bagi unit pembangkitan serta unit distribusi PLN.

Kata kunci: *Onshore Power Supply*; kelayakan tekno-ekonomi; *avoided fuel cost*; NPV; analisis sensitivitas; kapal batubara.

ABSTRACT

The hoteling activity of coal carrier vessels berthed at the Tanjung Jati B Coal Power Plant Jetty is still supplied by oil-fueled auxiliary engines, resulting in high operating costs and local emissions. Onshore Power Supply (OPS) replaces this supply with onshore grid electricity. This study analyzes the techno-economic feasibility of installing an OPS based on a 750 kVA Static Frequency Converter using a quantitative case-study approach., proven technically feasible in a separate study, is adopted as the basis. The economic aspect is assessed using an avoided fuel cost (cost-saving) model with NPV, IRR, DPP, and B/C Ratio indicators across four utilization scenarios (10%, 50%, 80%, and 100%), complemented by a 25-year cash-flow analysis, a one-at-a-time sensitivity analysis, a two-way sensitivity matrix, and a dual-benefit ecosystem analysis. The results show the project is not feasible at 10% utilization (NPV -IDR 27.43 billion; B/C 0.34) but feasible at 50%, 80%, and 100%, with NPV rising to +IDR 78.35 billion, IRR 43.06%, and payback periods of 3–8 years; break-even is reached at about 33.34% utilization. The most influential variable is the OPS utilization level, followed by WACC and O&M cost. Each call yields a net saving equivalent to IDR 5,764/kWh, and OPS implementation provides dual benefits for both PLN generation and distribution units.

Keywords: *Onshore Power Supply*; techno-economic feasibility; *avoided fuel cost*; NPV; sensitivity analysis; coal carrier.

Pendahuluan

Sektor maritim merupakan tulang punggung distribusi batubara sebagai bahan baku utama pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pertumbuhan volume pengangkutan meningkatkan intensitas aktivitas kapal di jetty industri, sementara transportasi laut diproyeksikan terus menyumbang emisi gas rumah kaca tanpa intervensi teknologi [1], [2], sehingga mendorong regulator menerapkan solusi dekarbonisasi yang layak secara ekonomi [3]. Fase sandar (*hoteling*) menjadi perhatian utama karena kapal tetap memerlukan listrik untuk penerangan, pompa, ventilasi, komunikasi, dan bongkar muat, yang umumnya dipenuhi dengan mengoperasikan *auxiliary engine* berbahan bakar minyak.

Aktivitas kapal sandar menyumbang porsi besar emisi pelayaran di kawasan pelabuhan padat penduduk, mencakup NO_x, SO_x, partikulat, dan CO₂ [4], [5]. *Onshore Power Supply* (OPS) atau *cold ironing* memungkinkan kapal mematikan *auxiliary engine* dan menggantinya dengan listrik jaringan darat [7], yang terbukti menurunkan NO_x hingga 98% [6] dan berpotensi menekan CO₂ bergantung pada intensitas karbon jaringan [11]–[13]. Secara teknis, sistem ini menuntut konversi frekuensi 50 Hz ke 60 Hz melalui *Static Frequency Converter* beserta transformator isolasi dan kesesuaian standar antarmuka [8]–[10].

Dari sisi ekonomi, Ballini dan Bozzo [14] menemukan investasi OPS dapat kembali melalui manfaat kesehatan dalam 12–13 tahun, dan Zis [15] menunjukkan motivasi ekonomi bagi operator pada skenario harga bahan bakar menengah-tinggi. Konfigurasi *Static Frequency Converter* dan transformator isolasi memengaruhi biaya dan kinerja proyek [16], sementara hambatan utama berupa biaya investasi tinggi, kurangnya standardisasi, dan rendahnya utilisasi [17]. Kelayakan finansial pengelola kerap tidak selaras dengan kelayakan sosial sehingga desain insentif menjadi kunci [18]–[20]. Evaluasi kelayakan investasi infrastruktur energi lazim menggunakan indikator NPV, IRR, DPP, dan B/C Ratio yang saling melengkapi [21], [22].

Konteks tersebut relevan bagi Jetty PLTU Tanjung Jati B (4×660 MW) di Jepara, yang menerima 134 *call* per tahun dengan rata-rata sandar 50 jam. Metodologi penilaian kebutuhan daya [23] dan tinjauan tren riset OPS [24] menegaskan pentingnya kajian terintegrasi. Studi terdahulu di Indonesia umumnya menyoroti satu aspek, seperti penurunan biaya bahan bakar satu kapal [25], skema bisnis penyediaan listrik dermaga [26], kelayakan teknologi kelistrikan inovatif [27], dan pemanfaatan fasilitas OPS di pelabuhan [28]. Studi terdahulu tersebut umumnya bersifat parsial dan belum memadukan aspek teknis dan finansial secara utuh maupun mempertimbangkan struktur korporasi penyedia listrik. Berbeda dari studi tersebut, kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi: (1) analisis finansial multiskenario berbasis penghematan bahan bakar (*avoided fuel cost*) dengan proyeksi arus kas 25 tahun; (2) analisis sensitivitas satu arah sekaligus dua arah untuk menangkap interaksi antarvariabel; serta (3) tinjauan ekosistem manfaat ganda (*dual-benefit*) bagi PLN. Secara praktis, hasil penelitian memberikan dasar keputusan investasi yang mempertimbangkan penghematan biaya bahan bakar bagi operator, penurunan emisi lokal di kawasan pembangkit, serta tambahan pendapatan energi bagi unit distribusi, sehingga memperkuat justifikasi investasi pada tingkat korporasi.

Metode Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi kasus pada sistem OPS Jetty PLTU Tanjung Jati B yang dioperasikan PLN UIK Tanjung Jati B. Objek analisis adalah sistem OPS berbasis *Static Frequency Converter* (SFC) 750 kVA yang melayani beban hoteling kapal batubara. Parameter utama tekno-ekonomi dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter dan asumsi tekno-ekonomi

Parameter	Nilai	Satuan
CAPEX investasi OPS	33.182.332.000	Rp
Umur proyek	25	tahun
WACC / discount rate	12	%
Jumlah <i>call kapal</i>	134	call/tahun
Durasi sandar rata-rata	50	jam/call
Daya OPS rata-rata	388	kW
Konsumsi BBM saat sandar	3.350	liter/hari
Harga BBM	18.900	Rp/liter
Tarif listrik beli OPS	1.035	Rp/kWh
O&M tahun pertama	2	% CAPEX
Eskalasi O&M	2	%/tahun
Pendapatan komersial OPS	0	Rp/tahun

Model Penghematan Bahan Bakar

Manfaat proyek berasal dari biaya bahan bakar yang dapat dihindari (*avoided fuel cost*) ketika *auxiliary engine* dimatikan, bukan dari pendapatan penjualan listrik. Energi OPS per *call* dihitung pada Persamaan (1), konsumsi dan biaya bahan bakar yang dihindari pada Persamaan (2)–(3), serta biaya listrik pengganti dan penghematan bersih pada Persamaan (4)–(6).

$$E_{\text{call}} = P_{\text{OPS}} \times t_{\text{sandar}} = 388 \times 50 = 19.400 \text{ kWh} \quad (1)$$

$$V_{\text{BBM}} = K_{\text{BBM}} \times (t_{\text{sandar}}/24) = 3.350 \times (50/24) = 6.979,17 \text{ liter} \quad (2)$$

$$AFC_{\text{call}} = V_{\text{BBM}} \times H_{\text{BBM}} = 6.979,17 \times 18.900 = \text{Rp}131.906.250 \quad (3)$$

$$C_{listrik} = E_{call} \times T_{beli} = 19.400 \times 1.035 = \text{Rp}20.079.000 \text{ (4)}$$

$$S_{call} = AFC_{call} - C_{listrik} = \text{Rp}111.827.250 \text{ (5)}$$

$$s = S_{call} / E_{call} = 111.827.250 / 19.400 = \text{Rp}5.764/\text{kWh} \text{ (6)}$$

Indikator Kelayakan dan Skenario

Arus kas bersih tahunan merupakan fungsi tingkat pemanfaatan OPS (U) sebagaimana Persamaan (7), dan kelayakan dievaluasi dengan NPV, IRR, DPP, serta B/C Ratio pada Persamaan (8)–(11).

$$NCF_t = (AFC_{thn} - C_{listrik, thn}) \times U - O\&M_t \text{ (7)}$$

$$NPV = \sum NCF_t / (1+WACC)^t - CAPEX \text{ (8)}$$

$$\sum NCF_t / (1+IRR)^t - CAPEX = 0 \text{ (9)}$$

$$DPP = \text{tahun saat } \sum PV(NCF) \geq 0 \text{ (10)}$$

$$B/C = PV(\text{benefit}) / PV(\text{cost}) \text{ (11)}$$

Kelayakan dievaluasi pada empat skenario pemanfaatan yang didefinisikan pada Tabel 2, mewakili tingkat adopsi OPS dari rendah hingga penuh. O&M diasumsikan 2% CAPEX pada tahun pertama dengan eskalasi 2% per tahun, dan seluruh manfaat berskala dengan tingkat pemanfaatan karena CAPEX bersifat tetap.

Tabel 2. Definisi skenario tingkat pemanfaatan OPS

Skenario	Pemanfaatan	Interpretasi
Low Case	10%	Adopsi awal/percontohan, sebagian kecil call dilayani OPS
Base Case	50%	Adopsi moderat, separuh call dilayani OPS
High Case	80%	Adopsi tinggi dengan komitmen operasional kuat
Full Utilization	100%	Seluruh call dilayani OPS secara penuh

Hasil dan Pembahasan

Kuantifikasi Avoided Fuel Cost

Setiap sandar/call menggantikan 19.400 kWh energi auxiliary engine. Dengan konsumsi 6.979,17 liter dan harga Rp18.900/liter, nilai bahan bakar yang dihindari adalah Rp131.906.250 per call. Setelah dikurangi biaya listrik pengganti Rp20.079.000, diperoleh penghematan bersih Rp111.827.250 per call atau setara Rp5.764/kWh (Tabel 3). Pada utilisasi penuh (134 call), penghematan bahan bakar tahunan mencapai Rp17,68 miliar dengan biaya listrik Rp2,69 miliar. Margin penghematan yang besar menegaskan bahwa manfaat utama OPS berasal dari selisih harga energi BBM terhadap listrik jaringan, sejalan dengan temuan ekonomi cold ironing pada harga bahan bakar tinggi [15], [20].

Tabel 3. Rincian penghematan bahan bakar per call dan per tahun (utilisasi penuh)

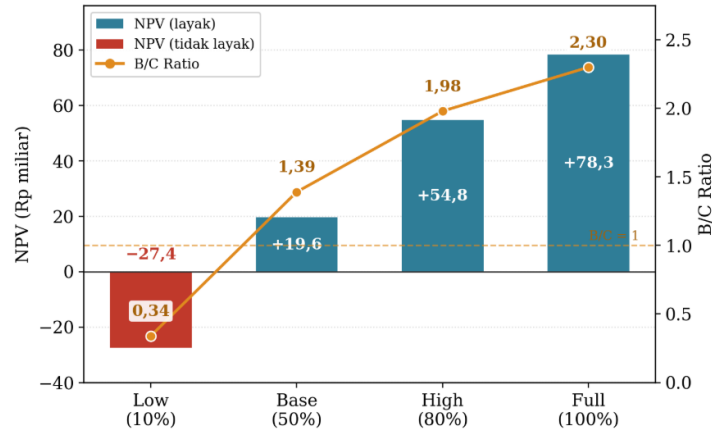
Komponen	Per call	Per tahun (100%)
Energi OPS (kWh)	19.400	2.599.600
Konsumsi BBM dihindari (liter)	6.979,17	935.208
Biaya BBM dihindari (Rp)	131.906.250	17.675.437.500
Biaya listrik OPS (Rp)	20.079.000	2.690.586.000
Penghematan bersih (Rp)	111.827.250	14.984.851.500
Penghematan setara (Rp/kWh)	5.764	5.764

Kelayakan Finansial Multiskenario

Hasil evaluasi pada empat skenario disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 1. Pada pemanfaatan 10%, penghematan tahunan tidak menutup beban investasi dan O&M sehingga NPV bernilai -Rp27,43 miliar dengan B/C 0,34 (tidak layak). Mulai pemanfaatan 50%, proyek menjadi layak (NPV +Rp19,59 miliar; IRR 20,17%; DPP 8 tahun; B/C 1,39) dan terus membaik hingga pemanfaatan 100% (NPV +Rp78,35 miliar; IRR 43,06%; DPP 3 tahun; B/C 2,30).

Tabel 4. Hasil kelayakan finansial per skenario pemanfaatan

Skenario	NPV (Rp)	IRR	DPP	B/C	Status
Low (10%)	-27,43 miliar	-5,35%	Tidak tercapai	0,34	Tidak
Base (50%)	+19,59 miliar	20,17%	8 tahun	1,39	Layak
High (80%)	+54,84 miliar	33,98%	4 tahun	1,98	Layak
Full (100%)	+78,35 miliar	43,06%	3 tahun	2,30	Layak

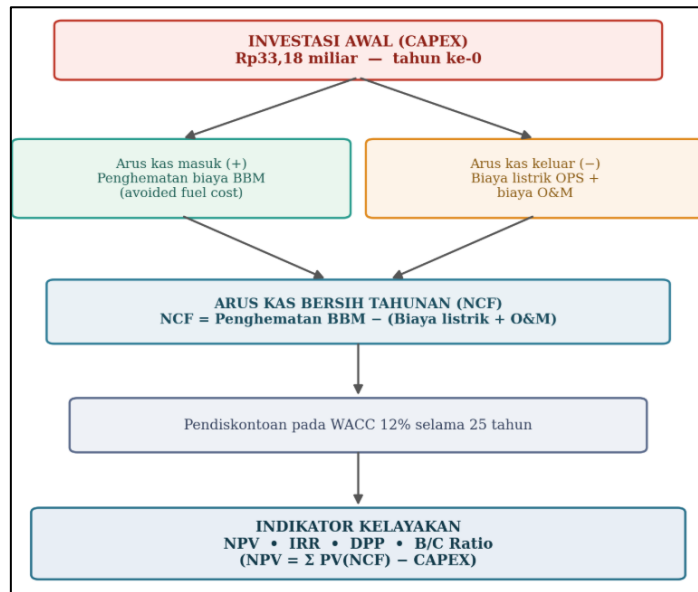


Gambar 1. NPV dan B/C Ratio pada empat skenario pemanfaatan OPS

Konsistensi antarindikator memperkuat keandalan bahwa pada seluruh skenario layak, IRR berada di atas tingkat diskonto WACC 12%, B/C Ratio melebihi satu, dan NPV bernilai positif. Selisih yang lebar antara IRR dan WACC pada utilisasi tinggi (mencapai 43,06% terhadap 12%) menunjukkan ketahanan kelayakan terhadap kenaikan biaya modal. Sebaliknya, pada utilisasi 10% seluruh indikator tidak layak, menandakan bahwa ketidaklayakan finansial pada tingkat pemanfaatan rendah bersifat struktural, bukan sekadar sensitif terhadap asumsi.

Rincian Arus Kas dan Periode Pengembalian

Komponen arus kas bersih tahun pertama untuk setiap skenario disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 2. Karena biaya O&M dan biaya listrik bersifat proporsional sedangkan CAPEX tetap, arus kas bersih meningkat tajam seiring naiknya pemanfaatan.

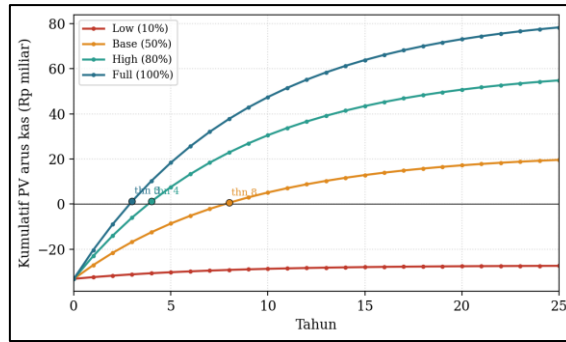


Gambar 2. Peta alur arus kas

Akumulasi nilai kini arus kas (kumulatif PV) sepanjang 25 tahun ditunjukkan pada Gambar 3, yang memperlihatkan titik potong sumbu nol sebagai periode pengembalian terdiskonto: tahun ke-3 pada utilisasi 100%, tahun ke-4 pada 80%, dan tahun ke-8 pada 50%, sedangkan pada utilisasi 10% akumulasi tidak pernah mencapai nol sehingga investasi tidak kembali sepanjang umur proyek.

Tabel 5. Komponen arus kas bersih tahun pertama per skenario (Rp Miliar)

Komponen	10%	50%	80%	100%
Fuel saving	1,77	8,84	14,14	17,68
Biaya listrik OPS	0,27	1,35	2,15	2,69
O&M tahun-1	0,66	0,66	0,66	0,66
NCF tahun-1	0,83	6,83	11,32	14,32



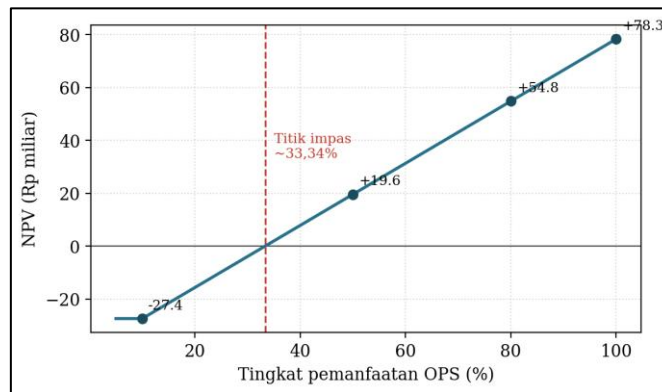
Gambar 3. Kurva akumulasi nilai kini arus kas dan periode pengembalian terdiskonto

Tabel 6. Proyeksi arus kas tahun terpilih: NCF dan akumulasi nilai kini (Rp miliar)

Tahun	NCF (100%)	PV NCF (100%)	Kumulatif PV (100%)	Kumulatif PV (50%)
1	14,32	12,79	-20,40	-27,09
3	14,29	10,17	1,19	-16,81
5	14,27	8,10	18,36	-8,65
8	14,22	5,74	37,76	0,54
10	14,19	4,57	47,45	5,12
15	14,11	2,58	63,87	12,84
20	14,02	1,45	73,13	17,17
25	13,92	0,82	78,35	19,59

Titik Impas Tingkat Pemanfaatan

Karena CAPEX dan sebagian O&M bersifat tetap sementara manfaat berskala dengan utilisasi, NPV meningkat hampir linier terhadap tingkat pemanfaatan. Interpolasi antarskenario menempatkan titik impas finansial (NPV = 0) pada utilisasi sekitar 33,34%, sebagaimana Gambar 4. Temuan ini menegaskan bahwa utilisasi adalah prasyarat kelayakan, konsisten dengan literatur yang menyoroti utilisasi rendah sebagai hambatan utama OPS [17], [33].



Gambar 4. Kurva NPV terhadap tingkat pemanfaatan OPS dan titik impas

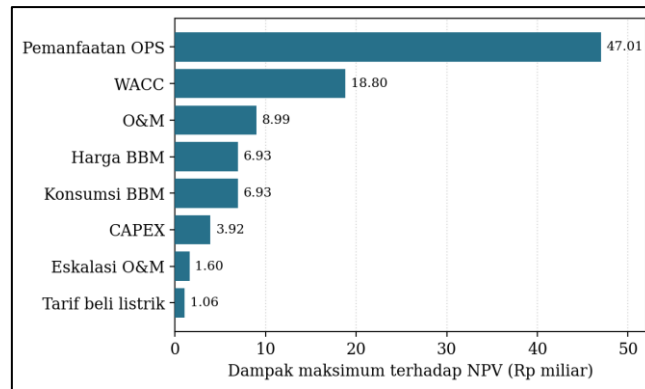
Analisis Sensitivitas Univariat

Analisis *one-at-a-time* mengukur dampak maksimum tiap variabel terhadap NPV pada base case (pemanfaatan 50%). Hasil peringkat disajikan pada Tabel 7 dan divisualisasikan sebagai diagram tornado pada Gambar 5. Tingkat pemanfaatan OPS merupakan variabel paling dominan (dampak ±Rp47,01 miliar), jauh melampaui variabel lain, diikuti WACC (Rp18,80 miliar) dan biaya O&M (Rp8,99 miliar). Harga dan konsumsi BBM masing-masing berdampak Rp6,93 miliar, sedangkan CAPEX, eskalasi O&M, dan tarif beli listrik relatif kecil. Dominasi pemanfaatan dan WACC menunjukkan bahwa kelayakan paling ditentukan oleh komitmen operasional dan biaya modal, bukan oleh struktur biaya investasi.

Tabel 7. Peringkat sensitivitas variabel terhadap NPV

Peringkat	Variabel	Dampak NPV (Rp)	Rentang uji
1	Pemanfaatan OPS	47,01 miliar	10–80%
2	WACC	18,80 miliar	8–12%

3	Biaya O&M	8,99 miliar	1–5% CAPEX
4	Harga BBM	6,93 miliar	±10%
5	Konsumsi BBM	6,93 miliar	±10%
6	CAPEX	3,92 miliar	±10%
7	Eskalasi O&M	1,60 miliar	0–5%
8	Tarif beli listrik	1,06 miliar	±10%



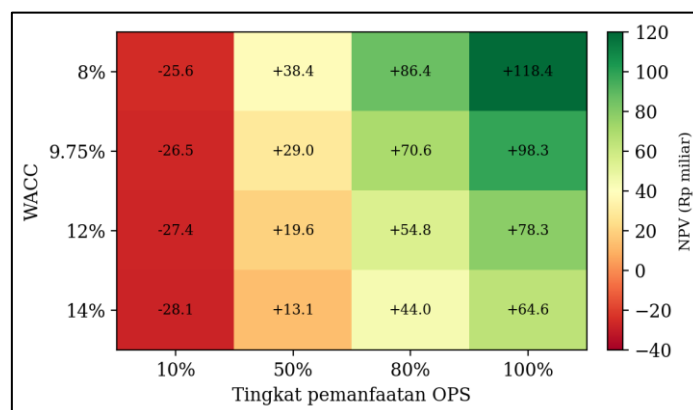
Gambar 5. Diagram sensitivitas variabel terhadap NPV

Matriks Sensitivitas Dua Arah

Untuk menangkap interaksi antara dua variabel paling dominan, disusun matriks NPV terhadap kombinasi WACC dan tingkat pemanfaatan (Tabel 8 dan Gambar 6). Matriks memperlihatkan bahwa pada seluruh tingkat WACC yang diuji (8–14%), proyek tetap tidak layak pada utilisasi 10% namun layak pada utilisasi ≥ 50%. Kenaikan WACC menurunkan NPV secara konsisten, tetapi pengaruhnya jauh lebih kecil dibandingkan lonjakan NPV akibat kenaikan pemanfaatan. Sebagai contoh, pada utilisasi 100%, NPV turun dari Rp118,37 miliar (WACC 8%) menjadi Rp64,62 miliar (WACC 14%), sementara pada WACC tetap 12% NPV melonjak dari –Rp27,43 miliar (10%) menjadi Rp78,35 miliar (100%). Hal ini memperkuat kesimpulan bahwa pemanfaatan adalah pengungkit utama kelayakan.

Tabel 8. Matriks NPV terhadap WACC dan tingkat pemanfaatan (Rp miliar)

WACC \ Pemanfaatan	10%	50%	80%	100%
8%	-25,60	+38,39	+86,37	+118,37
9,75%	-26,51	+28,96	+70,57	+98,30
12%	-27,43	+19,59	+54,84	+78,35
14%	-28,07	+13,13	+44,02	+64,62



Gambar 6. Peta panas NPV terhadap kombinasi WACC dan tingkat pemanfaatan OPS

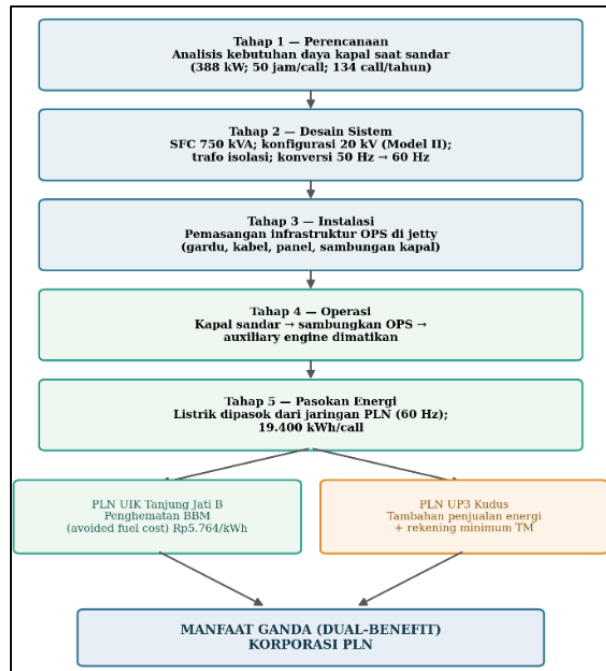
Ekosistem Dua Manfaat (Dual-Benefit) PLN

Karena operator OPS (PLN UIK Tanjung Jati B) dan penyedia energi (PLN UP3 Kudus) berada dalam satu korporasi, implementasi OPS menghasilkan manfaat ganda (Tabel 9 dan Gambar 7). PLN UIK Tanjung Jati B memperoleh penghematan biaya bahan bakar dengan NPV +Rp78,35 miliar pada utilisasi penuh, sedangkan PLN UP3 Kudus memperoleh tambahan penjualan energi sebesar 2.599.600 kWh per tahun, setara pendapatan energi

sekitar Rp2,69 miliar per tahun atau kumulatif nominal sekitar Rp67,26 miliar selama umur proyek, ditambah komponen rekening minimum tegangan menengah sesuai Permen ESDM No. 7 Tahun 2024 [36]. Karena UP3 Kudus merupakan unit distribusi internal PLN dan tidak menanggung CAPEX maupun O&M OPS, manfaatnya disajikan sebagai tambahan pendapatan energi, bukan sebagai NPV. Perspektif ekosistem ini memperkuat justifikasi investasi pada tingkat korporasi meskipun penilaian tunggal pada operator bersifat konservatif, selaras dengan pendekatan ekonomi terpadu untuk OPS [32]–[35].

Tabel 9. Konsolidasi manfaat ganda pada utilisasi penuh

Entitas PLN	Peran	Manfaat utama
UIK Tanjung Jati B	Operator OPS	Penghematan BBM (avoided fuel cost): NPV +Rp78,35 miliar; IRR 43,06%; DPP 3 tahun
UP3 Kudus	Penyedia energi	Tambahan penjualan energi ~Rp2,69 miliar/tahun (kumulatif nominal ~Rp67,26 miliar) + rekening minimum TM



Gambar 7. Diagram alur implementasi OPS

Implikasi Manajerial

Temuan bahwa kelayakan sangat ditentukan oleh tingkat pemanfaatan membawa implikasi manajerial yang jelas. Pertama, pengambil keputusan perlu mengutamakan jaminan utilisasi, misalnya melalui kewajiban penggunaan OPS bagi kapal yang sandar atau skema kontrak layanan dengan tingkat pemanfaatan minimum, karena utilisasi di bawah titik impas 33,34% akan membuat investasi tidak kembali. Kedua, implementasi dapat ditempuh secara bertahap: memulai dari skenario adopsi moderat (50%) yang sudah layak, lalu meningkatkannya menuju utilisasi penuh seiring kesiapan operasional, sehingga risiko investasi awal terkendali tanpa mengorbankan kelayakan [17], [24].

Ketiga, karena WACC merupakan variabel kedua paling berpengaruh, struktur pendanaan yang menekan biaya modal, misalnya pemanfaatan pendanaan hijau atau penempatan OPS sebagai bagian dari program dekarbonisasi korporasi akan memperbesar nilai proyek. Keempat, pengendalian biaya O&M penting untuk menjaga manfaat bersih, mengingat O&M menempati peringkat ketiga sensitivitas. Terakhir, kerangka manfaat ganda menunjukkan bahwa keputusan investasi sebaiknya dinilai pada tingkat korporasi PLN, bukan hanya pada unit operator, karena tambahan pendapatan energi bagi unit distribusi memperkuat justifikasi ekonomi keseluruhan [18], [20].

Perbandingan dengan Studi Terdahulu dan Keterbatasan

Hasil kelayakan pada utilisasi tinggi sejalan dengan studi yang menekankan bahwa OPS menjadi menarik secara ekonomi ketika volume energi yang digantikan besar [15], [20], dan menegaskan utilisasi rendah sebagai penyebab utama ketidaklayakan sebagaimana dilaporkan pada pelabuhan kecil dan menengah [4], [17]. Berbeda dari kajian berbasis tarif komersial, penelitian ini memakai kerangka penghematan bahan bakar sehingga manfaat proyek merepresentasikan biaya nyata yang dihindari operator, bukan asumsi pendapatan yang belum ditetapkan.

Dibandingkan kajian internasional, temuan ini memperkuat pola yang konsisten. Analisis biaya-manfaat OPS di pelabuhan Amerika Serikat menunjukkan kelayakan sangat bergantung pada volume dan durasi sandar

[6], sementara studi di *Port of Aberdeen* menegaskan bahwa perbaikan ekonomi proyek *shore power* dicapai melalui peningkatan pemanfaatan dan penekanan biaya [20]. Evaluasi tekno-ekonomi sistem *shore-to-ship* yang kompleks juga menyimpulkan bahwa pemilihan konfigurasi dan tingkat utilisasi menentukan kelayakan [16]. Dengan demikian, dominasi variabel pemanfaatan pada kasus Jetty PLTU Tanjung Jati B selaras dengan generalisasi temuan lintas pelabuhan tersebut, sehingga rekomendasi untuk menjamin utilisasi minimum memiliki validitas yang lebih luas.

Studi ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu ditegaskan. Pertama, cakupan terbatas pada satu lokasi (Jetty PLTU Tanjung Jati B) dan satu tipe kapal (pengangkut batubara), sehingga generalisasi ke pelabuhan atau tipe kapal lain perlu kehati-hatian. Kedua, konsumsi bahan bakar dan durasi sandar menggunakan nilai rata-rata dengan asumsi pemanfaatan yang seragam, sehingga variasi operasional antar-kapal belum sepenuhnya tercermin. Ketiga, analisis belum memasukkan valuasi moneter dari penurunan emisi yang berpotensi memperbesar kelayakan sosial [14], [19], serta memperlakukan harga bahan bakar dan tarif listrik sebagai tetap. Penelitian lanjutan disarankan memperluas jumlah dan tipe kapal, memperpanjang periode pengamatan, menerapkan pemodelan stokastik terhadap tingkat pemanfaatan, serta mengintegrasikan analisis manfaat lingkungan dari pengurangan emisi.

Simpulan

Analisis tekno-ekonomi pemasangan OPS untuk kapal batubara di Jetty PLTU Tanjung Jati B dengan model penghematan bahan bakar menunjukkan bahwa proyek tidak layak pada tingkat pemanfaatan 10% (NPV -Rp27,43 miliar; B/C 0,34) namun layak pada pemanfaatan 50%, 80%, dan 100%, dengan NPV meningkat dari +Rp19,59 miliar menjadi +Rp78,35 miliar, IRR dari 20,17% menjadi 43,06%, dan periode pengembalian terdiskonto memendek dari 8 tahun menjadi 3 tahun. Titik impas finansial tercapai pada tingkat pemanfaatan sekitar 33,34%. Setiap *call* menghasilkan penghematan bersih setara Rp5.764/kWh dari penggantian bahan bakar. Analisis sensitivitas satu arah maupun matriks dua arah secara konsisten menempatkan tingkat pemanfaatan OPS sebagai variabel paling menentukan, diikuti WACC dan biaya O&M, sehingga kelayakan paling efektif dijaga melalui peningkatan komitmen utilisasi, penekanan biaya modal, dan pengendalian O&M. Karena operator dan penyedia energi berada dalam satu korporasi PLN, implementasi OPS memberikan manfaat ganda berupa penghematan bahan bakar bagi unit pembangkitan dan tambahan pendapatan energi bagi unit distribusi, yang memperkuat justifikasi investasi pada tingkat korporasi. Penelitian lanjutan disarankan mencakup validasi konsumsi bahan bakar berbasis logbook, kajian skema kontrak layanan untuk menjamin tingkat pemanfaatan minimum, serta integrasi analisis manfaat lingkungan dari penurunan emisi.

Daftar Pustaka

- [1] E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand, and A. H. Strømman, "State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 52, pp. 408–421, 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.03.022.
- [2] L. Styhre, H. Winnes, J. Black, J. Lee, and H. Le-Griffin, "Greenhouse gas emissions from ships in ports – Case studies in four continents," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 54, pp. 212–224, 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.04.033.
- [3] H. Daniel, J. P. F. Trovão, and D. Williams, "Shore power as a first step toward shipping decarbonization and related policy impact on a dry bulk cargo carrier," *eTransportation*, vol. 11, p. 100150, 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2021.100150.
- [4] A. Innes and J. Monios, "Identifying the unique challenges of installing cold ironing at small and medium ports – The case of Aberdeen," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 62, pp. 298–313, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.02.004.
- [5] D.-H. Nguyen et al., "Reduction of NOx and SO2 emissions by shore power adoption," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 21, no. 7, p. 210100, 2021, doi: 10.4209/aaqr.210100.
- [6] P. Vaishnav, P. S. Fischbeck, M. G. Morgan, and J. J. Corbett, "Shore power for vessels calling at U.S. ports: Benefits and costs," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 1102–1110, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b04860.
- [7] N. N. Abu Bakar, N. Bazmohammadi, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Electrification of onshore power systems in maritime transportation towards decarbonization of ports: A review of the cold ironing technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 178, p. 113243, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113243.
- [8] E. A. Sciberras, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Electrical characteristics of cold ironing energy supply for berthed ships," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 39, pp. 31–43, 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.05.007.
- [9] D. Tarnapowicz and S. German-Galkin, "International standardization in the design of 'shore to ship' power supply systems of ships in port," *Manag. Syst. Prod. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 9–13, 2018, doi: 10.2478/mspe-2018-0001.
- [10] J. Kumar, L. Kumpulainen, and K. Kauhaniemi, "Technical design aspects of harbour area grid for shore to ship power: State of the art and future solutions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 104, pp. 840–852, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.07.051.
- [11] L. Dai, H. Hu, and Z. Wang, "Is shore side electricity greener? An environmental analysis and policy implications," *Energy Policy*, vol. 137, p. 111144, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111144.
- [12] B. Stolz, M. Held, G. Georges, and K. Boulouchos, "The CO2 reduction potential of shore-side electricity in Europe," *Appl. Energy*, vol. 285, p. 116425, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116425.

- [13] L. Sun, P. Ding, Y. Xiong, W. Liu, and Z. Hu, "Carbon emission reduction of shore power from power energy structure in China," *Front. Mar. Sci.*, vol. 9, 2022, doi: 10.3389/fmars.2022.1077289.
- [14] F. Ballini and R. Bozzo, "Air pollution from ships in ports: The socio-economic benefit of cold-ironing technology," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 17, pp. 92–98, 2015, doi: 10.1016/j.rtbm.2015.10.007.
- [15] T. P. V. Zis, "Prospects of cold ironing as an emissions reduction option," *Transp. Res. Part A: Policy Pract.*, vol. 119, pp. 82–95, 2019, doi: 10.1016/j.tra.2018.11.003.
- [16] D. Colarossi and P. Principi, "Technical analysis and economic evaluation of a complex shore-to-ship power supply system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 181, p. 115988, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115988.
- [17] S.-T. Le, "Research on drivers and barriers to the implementation of cold ironing technology in zero emissions port," *Environ. Health Insights*, vol. 18, 2024, doi: 10.1177/11786302241265090.
- [18] A. Martínez-López, A. Romero-Filgueira, and M. Chica, "Specific environmental charges to boost cold ironing use in the European short sea shipping," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 94, p. 102775, 2021, doi: 10.1016/j.trd.2021.102775.
- [19] T. Spengler and B. Tovar, "Potential of cold-ironing for the reduction of externalities from in-port shipping emissions: The state-owned Spanish port system case," *J. Environ. Manage.*, vol. 279, p. 111807, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111807.
- [20] S. Bullock, E. Higgins, J. Crossan, and A. Larkin, "Improving shore power project economics at the Port of Aberdeen," *Mar. Policy*, vol. 152, p. 105625, 2023, doi: 10.1016/j.marpol.2023.105625.
- [21] M. V. Sokolov, "NPV, IRR, PI, PP, and DPP: A unified view," *J. Math. Econ.*, vol. 114, p. 102992, 2024, doi: 10.1016/j.jmateco.2024.102992.
- [22] J. Pasqual, E. Padilla, and E. Jadotte, "Technical note: Equivalence of different profitability criteria with the net present value," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 142, no. 1, pp. 205–210, 2013, doi: 10.1016/j.ijpe.2012.11.007.
- [23] M. Amaral, N. Amaro, and P. Arsénio, "Methodology for assessing power needs for onshore power supply in maritime ports," *Sustainability*, vol. 15, no. 24, p. 16670, 2023, doi: 10.3390/su152416670.
- [24] J. Kizielewicz, "Onshore power supply – Trends in research studies," *Front. Energy Res.*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1383142.
- [25] M. A. Pamungkas and E. Prabowo, "Pengaruh pemasangan onshore power supply (OPS) terhadap penurunan biaya bahan bakar dan emisi CO2 pada kapal pengangkut batu bara," *J. Authentic Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 383–396, 2026, doi: 10.36312/xmg25r94.
- [26] H. Hamzah and T. W. Adi, "Skema bisnis penyediaan listrik untuk kapal di dermaga PT Pertamina Trans Kontinental dengan metode bisnis model canvas," *J. Akunt. Ekon. Manaj. Bisnis*, vol. 6, no. 1, pp. 351–367, 2026, doi: 10.55606/jaemb.v6i1.9134.
- [27] D. A. H. Nugraha and E. Prabowo, "Studi kelayakan integrasi teknologi vehicle-to-grid pada bus listrik Transjakarta," *J. Authentic Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 510–523, 2026, doi: 10.36312/g3cfkn60.
- [28] J. S. Kustanto, N. F. Rachman, H. Nurdiansari, and A. K. Gupron, "Analysis of the use of onshore power supply facility at Port of Berlian," *J. Earth Mar. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 59–65, 2024, doi: 10.31284/j.jemt.2024.v5i1.6441.
- [29] International Electrotechnical Commission, *IEC 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*. Geneva, Switzerland: IEC, 2016.
- [30] International Electrotechnical Commission, *IEC/IEEE 80005-1:2019 Utility connections in port – Part 1: High voltage shore connection (HVSC) systems – General requirements*. Geneva, Switzerland: IEC, 2019.
- [31] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power System Analysis*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [32] D. Tang et al., "Assessing the potential for energy efficiency improvement through cold ironing: A Monte Carlo analysis with real port data," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 9, p. 1780, 2023, doi: 10.3390/jmse11091780.
- [33] L. Wang, C. Liang, J. Shi, A. Molavi, G. Lim, and Y. Zhang, "A bilevel hybrid economic approach for optimal deployment of onshore power supply in maritime ports," *Appl. Energy*, vol. 292, p. 116892, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116892.
- [34] E. Nikolaidis and M. Maniati, "Is cold ironing a viable solution for reducing greenhouse gas emissions in ports? EU/Greek ports perspective," *Multidiscip. Adapt. Clim. Insights*, vol. 1, no. 1, p. 21, 2024, doi: 10.21622/MACI.2024.01.1.915.
- [35] M. Nigro, M. De Domenico, T. Murgia, and A. Stimilli, "The port sector in Italy: Its keystones for energy-efficient growth," *Energies*, vol. 17, no. 7, p. 1788, 2024, doi: 10.3390/en17071788.
- [36] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM No. 7 Tahun 2024 tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT PLN (Persero)*. Jakarta, Indonesia, 2024.