

Optimalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sebagai Energi Pendukung *Shore Supply Connection* Guna Mewujudkan *Green Port* Di Indonesia

Farkhan Fardian Syah ^{1)a)*}, Dhifah Amaliyah ^{2)b)}

^{1,2)} Universitas Negeri Semarang

a) Tambak Bulusan, Kecamatan Karangtengah, Kabupaten Demak

b) Tenggulun, Kecamatan Solokuro, Kabupaten Lamongan

*farkhanfardian05@gmail.com

ABSTRAK

Sektor pelabuhan di Indonesia masih menghadapi tingginya ketergantungan pada mesin bantu kapal berbahan bakar fosil saat sandar, yang menyebabkan emisi karbon dan polusi udara cukup signifikan. Hingga kini, pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) sebagai sumber daya untuk shore power supply masih minim, sehingga belum tersedia model teknis terintegrasi yang dapat diterapkan pada konsep Green Port. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi energi angin di kawasan pelabuhan dan merancang sistem PLTB on-grid yang mampu mendukung penyediaan daya untuk kapal bersandar. Metode yang digunakan meliputi analisis kecepatan angin berbasis data BMKG, perhitungan kapasitas daya menggunakan model aerodinamika turbin horizontal, perancangan integrasi jaringan ke sistem shore power, serta evaluasi penurunan emisi melalui pendekatan perbandingan konsumsi energi sebelum dan sesudah penerapan PLTB. Hasil menunjukkan bahwa turbin horizontal tipe IIA berkapasitas 2,5 MW pada area pelabuhan dengan kecepatan angin rata-rata 7–9 m/s mampu menghasilkan ± 7.500 MWh per tahun. Pemasangan minimal dua unit turbin dapat memasok kebutuhan energi kapal besar saat sandar dan menurunkan emisi CO₂ dari 1.341 ton menjadi 1.154 ton per tahun, disertai reduksi NO_x, SO_x, dan PM. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa model teknis PLTB–shore power yang aplikatif serta dasar ilmiah bagi roadmap pengembangan Green Port sebagai bagian dari strategi transisi energi maritim di Indonesia.

Kata kunci : emisi karbon, energi terbarukan, Green Port, PLTB, shore power supply, sistem on-grid

Naskah Masuk : 17 Desember 2025

Naskah Revisi : 18 Desember 2025

Naskah Diterima : 22 Desember 2025

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki karakteristik geografis yang kuat dalam sektor maritim, dengan luas wilayah laut mencapai hampir tiga perempat total wilayah nasional dan garis pantai sepanjang 95.161 km (Arianto, 2020). Kondisi tersebut menjadikan transportasi laut sebagai tulang punggung logistik nasional maupun internasional. Aktivitas kapal yang tinggi di berbagai pelabuhan Indonesia mendorong pergerakan barang, energi, dan manusia, namun di sisi lain menimbulkan persoalan lingkungan yang semakin kompleks. Salah satu sumber utama pencemaran di kawasan pelabuhan berasal dari operasi *auxiliary engine* kapal yang bekerja selama proses sandar untuk memenuhi kebutuhan listrik kapal. Pengoperasian mesin bantu ini menghasilkan emisi gas buang seperti CO, NO_x, SO_x, HC, dan partikel halus yang berdampak langsung terhadap kualitas udara, kesehatan pekerja pelabuhan, serta meningkatkan risiko pemanasan global.

Meningkatnya aktivitas bongkar muat dalam dua dekade terakhir membuat isu keberlanjutan lingkungan di kawasan pelabuhan menjadi semakin penting. Berbagai kajian menyebutkan bahwa kontribusi emisi dari mesin kapal selama bersandar dapat mencapai lebih dari 30% total emisi udara di lingkungan dermaga. Upaya pengendalian polusi udara di pelabuhan tidak dapat lagi mengandalkan pendekatan konvensional yang bersifat remedial. Sebaliknya, diperlukan strategi transisi energi yang dapat secara simultan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil, menekan emisi, serta meningkatkan efisiensi energi. Salah satu teknologi yang berkembang pesat dan diakui secara internasional sebagai solusi strategis adalah *Shore Supply Connection* (juga dikenal sebagai *shore power* atau *cold ironing*). Teknologi ini memungkinkan kapal menerima suplai listrik dari darat sehingga mesin bantu dapat dimatikan selama kapal bersandar.

Implementasi *shore power* terbukti mampu menurunkan emisi hingga 90% pada titik dermaga ketika sumber energinya berasal dari pembangkit rendah karbon. Namun demikian, penerapan teknologi ini akan meningkatkan kebutuhan listrik pelabuhan secara signifikan. Di sinilah peran Energi Baru Terbarukan (EBT), khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), menjadi sangat penting.

Indonesia memiliki potensi bayu sekitar 60,6 GW, dan pesisir utara Jawa termasuk Semarang merupakan salah satu wilayah dengan kecepatan angin ideal, berkisar 5,8–6,4 m/s. Potensi ini memberikan peluang besar untuk memanfaatkan energi angin sebagai sumber daya utama dalam mendukung penyediaan listrik bersih untuk sistem *shore power*.

PLTB merupakan teknologi konversi energi yang mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik melalui perputaran rotor turbin. Turbin poros horizontal (HAWT) dikenal memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan turbin poros vertikal karena kemampuannya menangkap energi angin secara optimal dengan arah rotor yang sejajar aliran angin. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa turbin horizontal berkapasitas 2,5 MW mampu beroperasi optimal pada kecepatan angin 5–7 m/s, sehingga cocok untuk kawasan pesisir seperti Pelabuhan Tanjung Emas.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas potensi PLTB di Indonesia maupun implementasi *shore power* secara umum. Prasetyo et al. (2018) meneliti potensi PLTB di berbagai wilayah dan menunjukkan bahwa turbin angin dapat diimplementasikan pada wilayah dengan variasi kecepatan angin berbeda. Namun, studi tersebut tidak secara spesifik mengkaji atau merancang sistem terpadu antara potensi angin lokal pelabuhan dengan kebutuhan energi listrik kapal yang bersandar, atau integrasi dengan sistem kelistrikan *shore power*. Di sisi lain, studi-studi terkait *shore power*, seperti yang dilakukan oleh Kananta (2018) dan Tarnapowicz & German-Galkin (2018), menekankan aspek teknis instalasi dan manfaat penurunan emisi, tetapi belum mempertimbangkan sumber energi terbarukan lokal (khususnya PLTB) sebagai sumber listrik utama yang terintegrasi secara teknis dan berkelanjutan. Dengan demikian, terdapat *gap* penelitian yang signifikan pada aspek integrasi sistem PLTB dengan *Shore Supply Connection* sebagai satu kesatuan sistem energi berbasis EBT yang dirancang spesifik untuk kebutuhan pelabuhan di Indonesia.

Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya kajian komprehensif yang tidak hanya menilai aspek teknis turbin angin atau kelistrikan *shore power* secara terpisah, tetapi juga menyajikan solusi perancangan sistem terpadu. Kebaruan (*novelty*) utama penelitian ini adalah perancangan konsep integrasi *Shore Supply Connection* yang didukung penuh oleh potensi energi angin lokal (PLTB) di Pelabuhan Tanjung Emas, Semarang. Rancangan ini mencakup: (1) analisis kebutuhan energi riil kapal di pelabuhan; (2) perhitungan potensi energi angin lokal secara detail; (3) desain turbin poros horizontal (HAWT) yang optimal; (4) integrasi sistem kelistrikan *on-grid* PLTB-*Shore Power*; hingga (5) proyeksi penurunan emisi. Selain itu, penelitian ini juga menguraikan evaluasi kesiapan infrastruktur pelabuhan dan penyusunan *roadmap* implementasi, menjadi acuan awal menuju *Green Port* di Indonesia. Pelabuhan Tanjung Emas Semarang menjadi lokasi yang strategis karena memiliki tingkat aktivitas kapal yang tinggi, karakteristik angin pesisir yang mendukung, serta minimnya studi integrasi EBT spesifik di kawasan ini.

Penelitian ini menjadi penting mengingat urgensi pengembangan pelabuhan ramah lingkungan di Indonesia. *Green Port* tidak hanya menuntut efisiensi logistik tetapi juga pengelolaan energi yang berkelanjutan, pengendalian limbah, dan pengurangan emisi secara sistematis. Dengan memanfaatkan PLTB sebagai sumber energi pendukung *shore supply*, pelabuhan berpotensi mengurangi ketergantungan pada listrik berbasis fosil, menekan biaya operasional kapal, dan menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan sehat. Pendekatan ini juga sejalan dengan Kebijakan Energi Nasional yang menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23%, serta kontribusi Indonesia dalam agenda transisi energi global.

Dari perspektif teoretis, penelitian ini memperkaya kajian mengenai integrasi energi terbarukan dalam sektor maritim, suatu bidang yang masih relatif terbatas eksplorasinya. Sementara dari perspektif praktis, hasil perancangan dalam penelitian ini dapat dijadikan acuan awal bagi pemerintah, pengelola pelabuhan, dan pemangku kepentingan lainnya dalam menyiapkan implementasi sistem *shore power* berbasis PLTB secara lebih luas di pelabuhan-pelabuhan lain di Indonesia.

Berangkat dari latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) mengoptimalkan pemanfaatan energi angin sebagai sumber utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu untuk mendukung penyediaan energi bersih di pelabuhan; (2) mengurangi emisi gas buang dari kapal saat bersandar melalui pemanfaatan sistem *shore supply* berbasis energi terbarukan; dan (3) merancang konsep integrasi PLTB-*Shore Supply Connection* sebagai strategi konkret menuju terwujudnya pelabuhan hijau (*Green Port*) di Indonesia. Dengan pendekatan desain teknis berbasis model ADDIE,

penelitian ini berupaya menghasilkan rancangan sistem yang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga dapat diterapkan sebagai solusi strategis dalam transisi energi sektor maritim nasional.

TINJAUAN PUSTAKA

Setelah melakukan telaah terhadap beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan sistem Shore Supply Connection, diketahui bahwa belum ada kajian yang secara khusus mengintegrasikan kedua sistem tersebut dalam satu rancangan teknis sebagai solusi penyediaan energi ramah lingkungan di pelabuhan. Beberapa penelitian lebih berfokus pada optimalisasi PLTB di wilayah tertentu, sementara lainnya hanya menyoroti penerapan shore connection tanpa mempertimbangkan sumber daya energi terbarukan. Penelitian ini hadir dengan melakukan pendekatan yang berbeda, yaitu mengusulkan desain sistem Shore Supply Connection berbasis energi bayu, dengan menyertakan perhitungan kebutuhan daya, desain turbin, dan rencana implementasi. Untuk memperjelas posisi kebaruan (novelty) penelitian ini dibandingkan studi sebelumnya, berikut disajikan tabel perbandingan secara komprehensif.

Tabel 2. Kebaruan Penelitian (*Research Novelty*)

No	Penulis/ Tahun/Judul	Metode	Hasil	Keterbatasan	Kebaruan Penelitian
1.	Prasetyo, A. Notosudjono, D. & Soebagja, H. (2018). Studi Potensi Penerapan dan Pengembangan PLTB di Indonesia	Kuantitatif; perancangan sistem turbin angin skala besar dan kecil	Menunjukkan bahwa turbin angin dapat diaplikasikan di berbagai wilayah dengan potensi angin berbeda	Belum mengaitkan Dengan konteks Kebutuhan energi Pelabuhan dan belum terintegrasi dengan sistem <i>Shore Supply Connection</i>	Menawarkan integrasi PLTB dengan Shore Supply Connection, mengoptimalkan potensi angin sebagai pengganti mesin bantu kapal di pelabuhan
2.	Bachtiar, A. dan Hayyatul, W. (2018). Analisis Potensi PLTB PT LAN Ciheras	Kuantitatif; analisis sistem PLTB dengan software Homer dan perangkat pendukung (inverter, accu)	PLTB menghasilkan 1129 kW/hr dengan rata-rata kecepatan angin 4,32 m/s di Ciheras	Terbatas pada studi tapak dan perhitungan teknis lokal, belum menyasar solusi untuk emisi pelabuhan	Menyusun konsep desain system PLTB spesifik menggunakan turbin IIA-2,5 MW dan mendukung pengurangan emisi pelabuhan melalui sistem kelistrikan shore supply

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode deskriptif-analitik yang dirancang untuk menghasilkan gambaran teknis secara komprehensif mengenai optimalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) sebagai sumber energi bagi sistem *Shore Supply Connection* di Pelabuhan Tanjung Emas, Semarang. Seluruh proses penelitian disusun agar dapat direplikasi secara utuh oleh peneliti lain, dengan menyajikan spesifikasi bahan, peralatan teknis, prosedur kerja, serta metode analisis teknis dan matematis yang menjadi landasan perancangan sistem.

Penelitian dilaksanakan pada rentang waktu Mei hingga Juli 2025 di kawasan operasional Pelabuhan Tanjung Emas. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristik geografis pesisir yang mendukung potensi energi angin, intensitas aktivitas pelayaran yang tinggi, serta kebutuhan energi listrik yang signifikan ketika kapal bersandar. Penentuan lokasi ini memungkinkan peneliti mengamati langsung kebutuhan beban kapal, pola angin, potensi instalasi turbin, serta kesiapan infrastruktur kelistrikan pelabuhan.

Secara teknis, penelitian ini memanfaatkan beberapa jenis data dan peralatan. Data yang digunakan terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer dikumpulkan melalui observasi lapangan mengenai arah dan kecepatan angin aktual, kondisi teknis dermaga, beban listrik kapal saat sandar, kondisi geografis titik potensial pemasangan turbin, serta evaluasi kebutuhan komponen kelistrikan

(transformator, *frequency converter*, dan panel distribusi). Observasi ini dilengkapi dengan wawancara mendalam dengan pengelola Pelabuhan Tanjung Emas dan teknisi PT Pelindo III guna memperoleh data operasional aktual tentang konsumsi energi kapal, kondisi mesin bantu, serta kesiapan fasilitas kelistrikan dermaga.

Data sekunder diperoleh melalui dokumen resmi BMKG dan BPPT mengenai kecepatan angin nasional dan potensi energi bayu per provinsi, dokumen rencana pengembangan pelabuhan, standar teknis kelistrikan maritim dari International Maritime Organization (IMO), serta regulasi energi terbarukan dari Kementerian ESDM. Secara spesifik, literatur ilmiah terbaru dan relevan yang mendalam terkait desain dan efisiensi turbin angin, integrasi sistem *on-grid* PLTB-*shore power*, serta studi kasus implementasi *shore power* berbasis Energi Baru Terbarukan (EBT) di pelabuhan global turut dikumpulkan dan dianalisis secara sistematis. Analisis literatur ini berfungsi untuk membangun kerangka analisis teknis, menentukan kriteria pemilihan turbin yang sesuai dengan karakteristik angin lokal, dan menyusun *roadmap* pengembangan bidang kajian.

Peralatan teknis yang digunakan meliputi alat ukur kecepatan dan arah angin (*anemometer* digital), perangkat GPS untuk menentukan koordinat lokasi potensial turbin, kamera dokumentasi, serta perangkat analisis daya berbasis *software* untuk menghitung konversi energi angin menjadi energi listrik. Selain itu, penelitian ini mendeskripsikan spesifikasi teknis perangkat PLTB yang direncanakan, yaitu turbin horizontal tipe IIA berkekuatan 2,5 MW, generator putaran tinggi, transformator *step-up* dan *step-down*, *frequency converter* 50/60 Hz, serta Panel Hubung Bagi (PHB) yang digunakan untuk mengatur distribusi daya ke dermaga dan ke sistem PLN melalui jaringan *on-grid*.

Prosedur penelitian mengikuti model ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*). Pada tahap Analisis, peneliti mengidentifikasi kebutuhan energi kapal berdasarkan data konsumsi rata-rata, kemudian membandingkannya dengan potensi energi angin di kawasan pesisir Semarang melalui analisis data angin lokal menggunakan model distribusi Weibull. Tahap Desain merupakan inti metodologi riset, dimana dilakukan pemilihan model turbin yang optimal (HAWT tipe IIA 2,5 MW) sesuai dengan kurva daya (*power curve*) dan kecepatan angin setempat. Tahap ini mencakup serangkaian perhitungan teknis sistematis, meliputi penentuan parameter desain (diameter rotor, *tip speed ratio*/TSR, kecepatan putaran turbin) dan estimasi kinerja (*output* daya tahunan) untuk menentukan jumlah turbin yang dibutuhkan agar dapat memenuhi kebutuhan energi kapal saat sandar.

Pada tahap Pengembangan, hasil rancangan divalidasi dengan simulasi teknis untuk mengestimasi daya yang dapat dihasilkan, efisiensi konversi energi, serta integrasi daya PLTB ke sistem *on-grid* pelabuhan. Tahap Implementasi diwujudkan melalui penyusunan *roadmap* teknis pemanfaatan PLTB 2025–2030 yang mencakup rencana pemasangan turbin, sistem kelistrikan pendukung, hingga prosedur sinkronisasi listrik antara PLTB, jaringan PLN, dan dermaga kapal. Tahap Evaluasi dilakukan untuk mengukur efisiensi sistem, ketahanan pasokan energi, serta efektivitas penurunan emisi berdasarkan perbandingan data aktual dan hasil simulasi.

Analisis data dilakukan melalui kombinasi analisis teknis, perhitungan matematis, dan analisis kualitatif. Analisis teknis dan matematis merupakan metodologi utama yang digunakan untuk menentukan kelayakan dan spesifikasi sistem PLTB. Langkah-langkahnya meliputi: (1) Perhitungan daya kinetik angin berdasarkan formula $P = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \eta_{gearbox} \cdot \eta_{generator}$; (2) Perhitungan daya turbin ideal dengan mempertimbangkan batas efisiensi Betz (C_p maksimum); (3) Estimasi potensi produksi energi tahunan (*Annual Energy Production/AEP*) sistem PLTB; serta (4) Perhitungan kelayakan integrasi *on-grid* dengan sistem kelistrikan pelabuhan dan PLN. Analisis kualitatif digunakan untuk menginterpretasi hasil observasi lapangan dan wawancara terkait kondisi operasional pelabuhan, kesiapan infrastruktur, serta tantangan penerapan PLTB. Seluruh hasil perhitungan teknis kemudian dihubungkan dengan data emisi mesin bantu kapal untuk menghasilkan model prediksi penurunan emisi apabila sistem *Shore Supply Connection* berbasis PLTB diterapkan.

Dengan kombinasi pendekatan teknis dan analitis yang disusun secara sistematis, metode penelitian ini menyediakan langkah yang dapat diikuti secara berulang oleh peneliti lain dalam mengkaji kelayakan penerapan energi terbarukan di sektor pelabuhan, khususnya integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu sebagai sumber energi utama *Shore Supply Connection* guna mewujudkan *Green Port* di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil observasi teknis dan wawancara langsung dengan pihak manajemen Pelabuhan Tanjung Emas yang dilakukan oleh peneliti pada Mei 2025, ditemukan bahwa kebutuhan energi listrik untuk mendukung operasional kapal saat bersandar mencapai angka signifikan, terutama pada musim puncak aktivitas bongkar muat. Rata-rata kapal besar memerlukan pasokan daya hingga 350–500 kWh per jam. Selama ini, kebutuhan tersebut dipenuhi oleh mesin bantu kapal yang menggunakan bahan bakar fosil, yang secara langsung berkontribusi terhadap pencemaran udara dan peningkatan emisi gas rumah kaca di sekitar kawasan pelabuhan. Berikut merupakan dokumentasi proses wawancara yang dilakukan oleh peneliti bersama pihak PT Pelindo III (Persero):



Gambar 1

Wawancara dengan Pihak PT Pelindo III

Selain itu, dokumentasi visual lokasi observasi juga disertakan sebagai bagian dari bukti lapangan untuk menunjukkan titik-titik strategis pemasangan turbin angin di area pelabuhan.



Gambar 2

Area Pelabuhan yang Menjadi Titik Observasi Dan Perhitungan Potensi Energi Bayu

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dinilai sangat relevan diterapkan pada pelabuhan ini. Provinsi Jawa Tengah, sebagai lokasi pelabuhan, memiliki potensi energi bayu sebesar 5.213 MW menurut data Kementerian ESDM. Kecepatan angin rata-rata di kawasan pesisir Semarang terukur antara 5,8–6,4 m/s, yang merupakan rentang ideal untuk menggerakkan turbin horizontal tipe IIA berkapasitas 2,5 MW. Dari simulasi teknis yang dilakukan, satu unit turbin ini mampu menghasilkan energi hingga ± 7.500 MWh per tahun, tergantung pada variabilitas kecepatan angin. Ini sejalan dengan studi Kasner *et al.* (2020) dan Basri & Djaman (2019) yang menyatakan bahwa turbin horizontal menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan turbin vertikal, karena orientasi rotor sejajar dengan arah aliran angin memungkinkan daya tangkap maksimal terhadap energi kinetik. Berdasarkan kecepatan angin rata-rata $v = 6,19 \text{ m/s}$, maka perhitungan luas penampang rotor (A) dilakukan dengan rumus:

$$A = \frac{2P}{\rho v^3}$$

$$A = \frac{2 \times 2.500.000}{1,2 \times (6,19)^3} = 17.567 \text{ m}^2$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka diameter turbin yang dibutuhkan adalah sekitar 49 meter. Perhitungan tip speed ratio (TSR) dilakukan menggunakan:

$$\lambda = \frac{\pi D}{v} = \frac{3,14 \times 49}{6,19} = 24,8$$

Dan putaran turbin diperoleh dari:

$$RPM = \frac{60 \times \lambda \times v}{\pi D} = 59,8 \text{ rpm}$$

Daya listrik bersih yang dihasilkan satu turbin dihitung sebagai berikut:

$$P_e = Cp \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \eta_{gearbox} \cdot \eta_{generator}$$

$$P_e = 0,35 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 2550 \cdot (6,19)^3 \cdot 0,95 \cdot 0,85$$

$$P_e \approx 102.558 \text{ W}$$

Dari perhitungan tersebut, kebutuhan energi untuk satu kapal saat bersandar sebesar $\pm 192.200 \text{ W}$, maka jumlah turbin minimal yang diperlukan:

$$N = \frac{192.200}{102.558} \approx 1,87 \rightarrow 2 \text{ turbin}$$

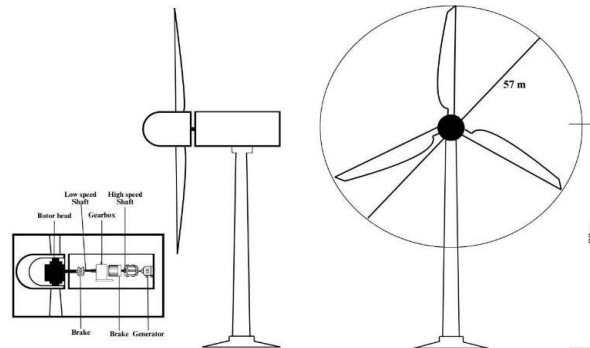
Melalui pertimbangan mengenai fluktuasi cuaca dan beban listrik, maka setidaknya dibutuhkan 2 unit turbin untuk memenuhi kebutuhan shore connection satu kapal besar secara penuh. Pada kondisi di lapangan, hasil pemetaan lokasi menunjukkan beberapa titik strategis yang berpotensi untuk instalasi turbin secara aman dan efisien, seperti area buffer dermaga utara dan sisi timur pelabuhan, yang minim hambatan bangunan tinggi dan memiliki pola angin yang konsisten.

Tabel 3. Data Potensi Energi Bayu Per Provinsi

No	Provinsi	Potensi (MW)	No	Provinsi	Potensi (MW)
1	Nusa Tenggara Timur	10.188	18	Kepulauan Riau	922
2	Jawa Timur	7.907	19	Sulawesi Tengah	908
3	Jawa Barat	7.036	20	Aceh	894
4	Jawa Tengah	5.213	21	Kalimantan Tengah	681
5	Sulawesi Selatan	4.193	22	Kalimantan Barat	554
6	Maluku	3.188	23	Sulawesi Barat	514
7	Nusa Tenggara Barat	2.605	24	Maluku Utara	504
8	Bangka Belitung	1.787	25	Papua Barat	437
9	Banten	1.753	26	Sumatera Barat	428
10	Bengkulu	1.513	27	Sumatera Utara	356
11	Sulawesi Tenggara	1.414	28	Sumatera Selatan	301
12	Papua	1.411	29	Kalimantan Timur	212
13	Sulawesi Utara	1.214	30	Gorontalo	137
14	Lampung	1.137	31	Kalimantan Utara	73
15	DI Yogyakarta	1.079	32	Jambi	37
16	Bali	1.019	33	Riau	22
17	Kalimantan Selatan	1.006	34	DKI Jakarta	4
Total					60.647

Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017

Desain teknis dalam penelitian ini menggunakan turbin horizontal tipe IIA berkapasitas 2,5 MW. Menurut Mulyono *et al.* (2020) dan Kasner *et al.* (2020), turbin horizontal memiliki efisiensi lebih tinggi dibanding turbin vertikal karena rotor sejajar dengan arah angin, memungkinkan konversi energi kinetik menjadi energi listrik secara maksimal. Dari simulasi teknis berdasarkan kecepatan angin rata-rata 6,2 m/s, satu turbin dapat menghasilkan hingga ± 7.500 MWh/tahun. Energi ini cukup untuk menyuplai 4–5 kapal container ukuran menengah hingga besar.



Gambar 3

Desain Turbin Horizontal Tipe IIA 2,5 MW

Penggunaan *shore supply* berbasis PLTB di Pelabuhan Tanjung Emas telah disimulasikan secara komprehensif. Data aktual menunjukkan bahwa dalam kondisi operasional normal, setiap kapal besar menghasilkan emisi CO₂ hingga 1,5 ton per hari hanya dari mesin bantu saat bersandar. Jika terdapat 3–4 kapal per hari, maka dalam sebulan, total emisi CO₂ mencapai lebih dari 180 ton. Melalui penerapan *Shore Supply Connection* berbasis energi angin, emisi tersebut dapat ditekan secara signifikan.

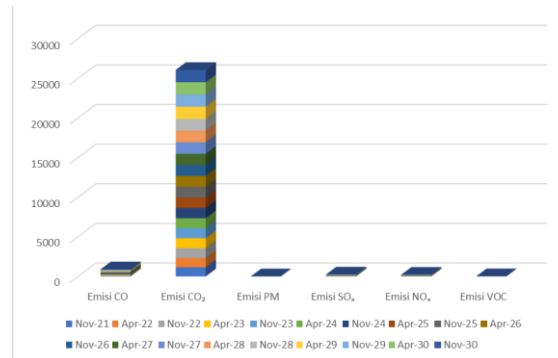
Tabel 4. Prediksi Permodelan Emisi (2025–2030)

Waktu	Emisi CO	Emisi CO ₂	Emisi PM	Emisi SO _x	Emisi NO _x	Emisi VOC
Nov-21	39,442	1157,624	0,486	10,853	9,437	1,065
Apr-22	40,174	1176,069	0,495	11,026	9,615	1,079
Nov-22	42,169	1235,225	0,52	11,58	10,091	1,163
Apr-23	42,841	1249,648	0,528	11,715	10,279	1,166
Nov-23	43,593	1273,781	0,537	11,942	10,444	1,198
Apr-24	42,869	1258,004	0,528	11,794	10,245	1,155
Nov-24	44,732	1306,674	0,552	12,25	10,713	1,223
Apr-25	44,683	1311,233	0,551	12,293	10,688	1,221
Nov-25	45,724	1341,962	0,563	12,581	10,941	1,254
Apr-26	46,589	1369,784	0,574	12,842	11,15	1,27
Nov-26	47,56	1396,552	0,586	13,083	11,36	1,296
Apr-27	47,277	1396,387	0,588	13,09	11,371	1,302
Nov-27	49,684	1449,993	0,613	13,594	11,863	1,374
Apr-28	50,701	1482,183	0,625	13,895	12,128	1,407
Nov-28	50,899	1490,427	0,627	13,973	12,198	1,416
Apr-29	52,229	1533,498	0,645	14,192	12,598	1,46
Nov-29	52,783	1541,403	0,652	14,367	12,634	1,449
Apr-30	52,863	1541,005	0,652	14,447	12,616	1,445
Nov-30	53,085	1552,677	0,654	14,556	12,662	1,448

Sumber: Olahan Data Sekunder (2025)

Prediksi permodelan emisi di atas menunjukkan bahwa jika sistem ini diimplementasikan secara bertahap mulai tahun 2025, maka pada tahun 2030, emisi CO₂ dapat ditekan dari 1.341 ton/tahun menjadi 1.154 ton/tahun, atau terjadi penurunan sekitar 14%. Emisi gas lainnya seperti NO_x, SO_x, PM, dan VOC juga mengalami tren penurunan yang konsisten, seiring menurunnya penggunaan bahan bakar fosil. Temuan ini sejalan dengan studi Wachjoe *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa implementasi

shore power berbasis energi terbarukan dapat menurunkan emisi hingga 90% di titik dermaga. Selain itu, berdasarkan studi Kananta (2018), pengalihan ke shore supply juga menurunkan biaya pelumas, perawatan mesin bantu, dan mengurangi kebisingan hingga 40%, yang berdampak positif terhadap kenyamanan pekerja pelabuhan.



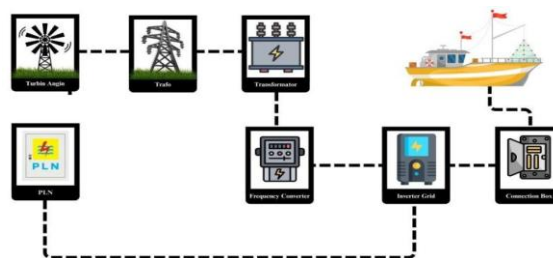
Gambar 4

Grafik Tren Penurunan Emisi Gas Buang Kapal

Integrasi PLTB ke dalam sistem kelistrikan pelabuhan didesain berbasis sistem on-grid, yang memungkinkan sinkronisasi antara output turbin dengan jaringan listrik dari PLN. Hasil observasi teknis di lapangan memperlihatkan bahwa infrastruktur kelistrikan pelabuhan telah cukup siap untuk menerima konfigurasi sistem hybrid, khususnya melalui pemanfaatan panel distribusi eksisting dan titik penyambungan dermaga. Model integrasi ini menggabungkan beberapa komponen teknis utama, yaitu:

1. Transformator (*Step-up & Step-down*): Menyesuaikan tegangan listrik dari turbin dengan kebutuhan kapal
2. *Frequency converter*: Menyesuaikan frekuensi ke standar 50/60 Hz sesuai regulasi pelayaran internasional (IMO)
3. *Panel Hubung Bagi (PHB)*: Mendukung pendistribusian listrik dari turbin ke dermaga dan kapal

Simulasi teknis menunjukkan bahwa 4 unit turbin 2,5 MW dapat menghasilkan listrik hingga 10.000–11.000 kWh per hari, yang cukup untuk menyuplai 4 kapal sekaligus, bahkan dengan cadangan daya untuk keperluan dermaga.



Gambar 5

Skema Sistem On-Grid PLTB dan *Shore Supply Connection*

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan PLTB dan sistem *Shore Supply Connection* di Pelabuhan Tanjung Emas tidak hanya memenuhi aspek efisiensi energi, tetapi juga menjadi pilar utama dalam mewujudkan pelabuhan hijau (*Green Port*). Berdasarkan kriteria dari Pavlic *et al.* (2014), pelabuhan dikategorikan sebagai *Green Port* apabila berhasil menurunkan tingkat pencemaran udara, limbah berbahaya, polusi suara, serta mengadopsi teknologi ramah lingkungan dalam sistem operasionalnya.



Gambar 6

Rancangan *Green Port* Pelabuhan Tanjung Emas

Rancangan *Green Port* yang dikembangkan dalam penelitian ini mencakup beberapa strategi utama, yaitu:

1. Pengelolaan energi berbasis EBT (PLTB) untuk menggantikan bahan bakar fosil;
2. Penataan ulang jalur logistik pelabuhan agar lebih efisien dan rendah emisi;
3. Sistem monitoring lingkungan digital untuk mendeteksi emisi udara dan pengelolaan limbah;
4. Pengembangan area hijau di buffer zone pelabuhan untuk menurunkan suhu mikroklimat dan mendukung keseimbangan ekosistem lokal.

Berdasarkan hasil observasi lapangan, Pelabuhan Tanjung Emas telah memiliki sejumlah elemen penunjang seperti *Energy Monitoring System* (EMS), sistem digitalisasi logistik berbasis ERP, dan sinergi kelembagaan dengan PT PLN dan BPPT. Infrastruktur ini menjadi modal dasar yang sangat mendukung transformasi menuju pelabuhan ramah lingkungan. Penerapan sistem *shore power* berbasis PLTB secara langsung memberikan kontribusi terhadap penurunan emisi gas buang dari kapal yang sedang bersandar. Berdasarkan data aktual di lapangan, mesin bantu kapal berbahan bakar solar (diesel) menghasilkan emisi CO₂ sebesar ±1,5 ton/hari per kapal. Jika diasumsikan terdapat rata-rata 3 kapal bersandar per hari, maka dalam satu tahun potensi emisi mencapai:

$$1,5 \text{ ton/hari} \times 3 \text{ kapal} \times 365 \text{ hari} = 1.642,5 \text{ ton CO}_2/\text{tahun}$$

Melalui pengimplementasian shore connection berbasis PLTB, emisi CO₂ dapat ditekan secara signifikan. Berdasarkan hasil simulasi permodelan emisi, penerapan sistem ini dapat menurunkan emisi dari:

$$1.341 \text{ ton/tahun} \rightarrow 1.154 \text{ ton/tahun}$$

atau terjadi pengurangan sekitar:

$$\frac{1.341 - 1.154}{1.341} \times 100\% \approx 13,95\%$$

Selain penurunan emisi CO₂, dampak positif lainnya yang terukur adalah:

1. Penurunan emisi NO_x dan SO_x akibat pengurangan pembakaran bahan bakar diesel;
2. Penghematan konsumsi BBM sekitar 15–20% per siklus bersandar;
3. Penurunan biaya perawatan mesin bantu kapal dan penggantian oli pelumas hingga ±35%;

Reduksi kebisingan operasional yang signifikan, meningkatkan kualitas lingkungan kerja bagi buruh pelabuhan. Efek jangka panjang dari transformasi ini meliputi peningkatan kualitas udara kawasan pelabuhan, peningkatan efisiensi energi, dan pencapaian indikator keberlanjutan lingkungan sesuai dengan target SDGs sektor transportasi laut dan energi. Dengan capaian ini, Pelabuhan Tanjung Emas sangat berpotensi menjadi percontohan nasional *Green Port* berbasis energi terbarukan, sekaligus berkontribusi terhadap target Net Zero Emission Indonesia pada tahun 2060.

Berdasarkan hasil analisis kesiapan infrastruktur, regulasi, serta dukungan kelembagaan, roadmap implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) sebagai sumber energi untuk *Shore Supply Connection* disusun dalam empat tahapan besar yang berlangsung secara bertahap mulai dari tahun 2022 hingga 2030. Setiap tahap melibatkan kerja sama multipihak, termasuk Pemerintah Pusat, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Kementerian Perhubungan, Badan Pengkajian

dan Penerapan Teknologi (BPPT), PT PLN (Persero), dan pengelola pelabuhan seperti PT Pelindo III (Persero).

1. Tahap I – Perancangan dan Optimasi (2026)

Tahap awal ini mencakup perumusan konsep teknis awal PLTB dan sistem *shore power*, sekaligus pengajuan pendanaan ke lembaga-lembaga pemerintah terkait. Pada tahap ini dilakukan:

- a. Penyusunan desain awal dan optimasi teknis PLTB serta sistem *Shore Supply Connection*, yang dilakukan oleh pemerintah bersama Kementerian ESDM;
- b. Perancangan jalur distribusi daya dari PLTB ke sistem kelistrikan dermaga oleh PT PLN (Persero) bekerja sama dengan pemerintah;
- c. Survei dan seleksi lokasi pelabuhan potensial berdasarkan aspek geografis, arah dan kecepatan angin, serta kesiapan infrastruktur pendukung, bekerja sama dengan pengelola pelabuhan (PT Pelindo III);
- d. Penyusunan proposal dan justifikasi teknis dalam rangka pengajuan pendanaan awal proyek.

2. Tahap II – Analisis, Rekonsiliasi, dan Uji Prototipe (2027)

Setelah desain awal disusun, tahap selanjutnya fokus pada evaluasi kelayakan desain, perumusan kebijakan pendukung, dan uji coba awal sistem. Aktivitas inti pada fase ini meliputi:

- a. Penyusunan kebijakan teknis, lingkungan, dan izin pembangunan oleh pemerintah pusat bersama legislatif dan instansi teknis;
- b. Analisis sistem dan rekonsiliasi antara desain turbin, kapasitas *shore power*, dan jalur distribusi energi;
- c. Pengembangan dan uji coba prototipe turbin oleh industri swasta dan BPPT untuk menilai kinerja daya, efisiensi, dan stabilitas output listrik.

3. Tahap III – Pembangunan Fisik dan Implementasi Awal (2028–2030)

Tahap ini ditandai dengan pelaksanaan pembangunan fisik di lokasi pelabuhan yang telah ditentukan. Kegiatan utama mencakup:

- a. Instalasi awal 1–2 unit turbin angin dan integrasi sistem *shore power* secara terbatas di salah satu dermaga Pelabuhan Tanjung Emas;
- b. Pembangunan infrastruktur distribusi daya kelistrikan dari PLTB ke *shore supply point*, yang dilaksanakan oleh PT PLN (Persero) bekerja sama dengan Direktorat Jenderal Perhubungan Laut;
- c. Pelatihan teknis dan sertifikasi personel yang bertanggung jawab atas operasional dan pemeliharaan sistem;
- d. Pengujian teknis menyeluruh untuk memastikan kesesuaian sistem dengan standar kelistrikan kelautan internasional (IMO, IEC).

4. Tahap IV – Implementasi Nasional dan Sertifikasi *Green Port* (2025–2030)

Tahap akhir merupakan fase ekspansi dan adopsi sistem di tingkat nasional, didukung oleh pembentukan kerangka regulasi hijau. Implementasi tahap akhir ini dilakukan melalui sinergi lintas sektoral antara pemerintah, swasta, dan legislatif melalui perumusan regulasi transisi energi dan insentif kebijakan hijau. Pelaksanaan roadmap ini mendukung peta jalan transisi energi nasional dan sejalan dengan prinsip pengembangan sistem berbasis model ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*) sebagaimana dijelaskan oleh Anafi *et al.* (2021).



Gambar 7

Roadmap Implementasi PLTB–*Shore Supply Connection* (2022–2030)

PEMBAHASAN

Penelitian ini dilandasi oleh grand theory *Sustainable Development* yang menekankan pentingnya keseimbangan antara pembangunan ekonomi, perlindungan lingkungan, dan efisiensi energi (Brundtland Report dalam WCED, 1987). Berkenaan dengan penelitian, maka pengembangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) sebagai energi terbarukan untuk mendukung *Shore Supply Connection* di pelabuhan merupakan wujud nyata implementasi prinsip pembangunan berkelanjutan dalam sektor transportasi laut. Berdasarkan hasil temuan lapangan di Pelabuhan Tanjung Emas, diperoleh fakta bahwa kebutuhan daya saat kapal bersandar masih didominasi oleh penggunaan mesin bantu berbahan bakar solar. Rata-rata konsumsi daya yang dibutuhkan mencapai 350–500 kWh per jam per kapal, dan secara kumulatif memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon di kawasan pelabuhan.

Hasil observasi tersebut diperkuat oleh temuan Wachjoe *et al.* (2020) yang menyebutkan bahwa penggunaan auxiliary engine kapal saat bersandar merupakan sumber utama emisi CO₂ dan polutan udara lainnya seperti NO_x dan SO_x. Oleh karena itu, upaya pengalihan kebutuhan energi tersebut ke sumber terbarukan seperti energi angin menjadi sangat strategis. Berdasarkan hasil simulasi teknis, turbin horizontal tipe IIA dengan kecepatan angin rata-rata 6,19 m/s mampu menghasilkan energi hingga ±7.500 MWh per tahun. Jumlah tersebut dinilai cukup untuk memenuhi kebutuhan daya satu kapal besar secara penuh apabila menggunakan minimal dua unit turbin. Temuan ini sejalan dengan teori konversi energi angin sebagaimana dijelaskan oleh Kasner *et al.* (2020) yang menegaskan bahwa turbin horizontal dengan orientasi rotor sejajar arah angin memberikan efisiensi konversi kinetik yang tinggi.

Selain layak secara teknis, penerapan PLTB juga menunjukkan efektivitas dalam aspek lingkungan. Pemodelan emisi menunjukkan adanya penurunan emisi CO₂ dari 1.341 ton per tahun menjadi 1.154 ton per tahun dalam kurun lima tahun atau sekitar 14%. Penurunan ini juga diikuti oleh tren serupa pada emisi NO_x, SO_x, dan partikel debu (PM). Fakta ini mendukung argumen Tarnapowicz & German-Galkin (2018) yang menjelaskan bahwa penerapan *shore power* secara signifikan dapat menurunkan tingkat pencemaran udara di wilayah pelabuhan. Selanjutnya, penerapan sistem *shore power* berbasis PLTB ini juga mengarah pada tercapainya indikator pelabuhan hijau atau *Green Port*, sebagaimana dikemukakan oleh Pavlic *et al.* (2014), yaitu pelabuhan yang mampu mengurangi polusi, mengelola energi secara efisien, serta menurunkan dampak ekologis secara signifikan.

Berdasarkan aspek sistem kelistrikan, pendekatan *on-grid hybrid* yang digunakan dalam penelitian ini menekankan pada fleksibilitas pasokan energi antara jaringan PLN dan output PLTB. Hal ini penting untuk menjamin kontinuitas suplai, terutama dalam kondisi fluktuasi kecepatan angin. Sistem ini dirancang menggunakan transformator step-up/down, frequency converter, dan PHB (Panel Hubung Bagi) untuk menyesuaikan tegangan dan frekuensi sesuai kebutuhan kapal. Rancangan ini sejalan dengan prinsip sistem kelistrikan pelabuhan yang dikemukakan oleh Prasetyo *et al.* (2018) dan juga mengacu pada standar International Maritime Organization (IMO) mengenai kelistrikan maritim.

Secara kelembagaan, keberhasilan integrasi sistem ini tidak dapat dipisahkan dari sinergi antara berbagai pihak, antara lain Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementerian Perhubungan, PT PLN (Persero), dan pengelola pelabuhan seperti PT Pelindo III. Penerapan roadmap implementasi dari 2022 hingga 2030 menunjukkan pendekatan yang tidak hanya teknis, tetapi juga sistemik dan berkelanjutan. Tahapan yang meliputi perancangan, analisis, pembangunan, dan implementasi nasional mencerminkan penerapan siklus model ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*) sebagaimana dikemukakan oleh Anafi *et al.* (2021) dalam kerangka pengembangan inovasi teknologi terapan.

Penelitian ini secara teoritis memperluas penerapan konsep *renewable energy integration* ke dalam domain infrastruktur pelabuhan, suatu area yang sebelumnya masih terfokus pada solusi berbasis bahan bakar fosil. Secara praktis, hasil penelitian ini juga memberikan kontribusi penting bagi perumusan kebijakan energi nasional, khususnya dalam mendukung target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 sebagaimana tercantum dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN). Selain itu, keberhasilan pelaksanaan sistem ini juga dapat dijadikan sebagai model replikasi untuk pelabuhan lain di Indonesia yang memiliki karakteristik geografis dan potensi angin serupa. Oleh karena itu, pembahasan ini menguatkan bahwa optimalisasi PLTB sebagai sumber energi untuk *shore power*

connection di pelabuhan tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga mendukung upaya dekarbonisasi sektor maritim, memperkuat ketahanan energi lokal, serta mempercepat perwujudan pelabuhan hijau yang berkelanjutan di Indonesia.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI KEBIJAKAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa optimalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) sebagai sumber energi utama untuk sistem *Shore Supply Connection* (SSC) merupakan solusi strategis dan berkelanjutan dalam mendukung transformasi Pelabuhan Tanjung Emas menuju konsep Pelabuhan Hijau (*Green Port*) di Indonesia.

Secara teknis, perancangan sistem ini terbukti layak dan efisien. Turbin horizontal tipe IIA berkapasitas 2,5 MW mampu menghasilkan energi 7.500 MWh per tahun. Pemasangan minimal dua unit turbin sudah cukup untuk menyuplai kebutuhan energi satu kapal besar sepenuhnya saat bersandar. Implementasi sistem ini memberikan dampak lingkungan positif yang signifikan, ditandai dengan potensi pengurangan emisi CO₂ sebesar 14% dari 1.341 ton menjadi 1.154 ton per tahun dalam lima tahun, disertai penurunan emisi NO_x, SO_x, dan partikel PM. Temuan ini menguatkan peran SSC berbasis EBT dalam mendukung target transisi energi nasional.

Dari sisi sistem, Pelabuhan Tanjung Emas dinilai siap sebagai lokasi percontohan karena infrastruktur kelistrikan yang ada mampu mengakomodasi sistem *on-grid hybrid* antara PLTB dan jaringan PLN. Strategi pengembangan telah dijabarkan dalam *roadmap* implementasi 2026–2030 yang sistematis dan melibatkan sinergi multipihak.

Berdasarkan kesimpulan ini, penelitian merekomendasikan langkah-langkah strategis sebagai tindak lanjut untuk menjamin keberlanjutan dan replikasi sistem ini secara nasional:

1. Replikasi dan Validasi Data: Pemerintah perlu mendukung pengembangan sistem simulasi teknis PLTB secara lebih lanjut untuk mereplikasi inovasi ini di berbagai pelabuhan nasional. Hal ini harus didukung dengan peningkatan kualitas dan pemantauan periodik data kecepatan angin (bekerja sama dengan BMKG dan BPPT) guna menjamin keandalan perancangan sistem dalam jangka panjang.
2. Kebijakan Afirmatif dan Insentif: Kementerian ESDM dan Kementerian Perhubungan didorong untuk segera mengeluarkan peta jalan pengembangan *shore power* berbasis EBT, dilengkapi dengan regulasi teknis dan skema insentif (fiskal/non-fiskal) bagi pihak yang mengadopsi sistem ini.
3. Penguatan Kelembagaan: Perlu adanya penguatan sinergi dan koordinasi kelembagaan antara PT PLN, BPPT, dan pengelola pelabuhan (PT Pelindo III) untuk memastikan pelaksanaan *roadmap* implementasi berjalan sesuai target, termasuk standarisasi teknis dan sertifikasi sistem *Green Port* nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Anafi, K., Wiryokusumo, I., & Leksono, I. P. (2021). Pengembangan media pembelajaran model ADDIE menggunakan software Unity 3D. *Jurnal Education and development*, 9(4), 433-438.
- Araujo, M. De, Babo, P., Huboyo, H. S., & Samadikun, B. P. (2022). Emisi Polutan Konvensional dari Aktivitas di Alur Pelayaran Pelabuhan Dili. VII (3), 3338-3344.
- Arianto, M. F. (2020). Potensi wilayah pesisir di negara Indonesia. November.
- Basri, M. H., & Djaman. (2019). Rancang Bangun dan Desain Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Model Savonius. *Jurnal Simetrik*, 9(2), 208-214.
- Kananta, Y. Y. A. (2018). Analisis Shore Side Power Supply Untuk *Green Port*: Studi Kasus PT terminal Teluk Lamong. <https://repository.its.ac.id/56101/>
- Kasner, R., Kruszelnicka, W., Bałdowska-Witos, P., Flizikowski, J., & Tomporowski, A. (2020).
- Mulyono, Mulud, T. H., N. H., D., L., K., & R., N. (2020). Rancang Bangun Turbin Angin Tipe Horizontal Double Multiflat Blade PLTB Skala Mikro. *Jurnal Teknik Energi*, 16(3), 128-135.
- Pavlic, B., Cepak, F., Sucic, B., Peckaj, M., & Kandus, B. (2015). Sustainable port infrastructure, practical implementation of the *Green Port* concept. *Thermal Science*, 18(3), 935-948. <https://doi.org/10.2298/TSCI1403935P>

- Prasetyo, Helmi Cahyo (2018). *Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Maximum Power Point Tracker (MPPT) dengan Metode Perturb and Observe (P&O)*. Jurnal Teknik Elektro, Vol. 7 No. 02, halaman 77–83.
- Tarnapowicz, D., & German-Galkin, S. (2018). STANDARDIZATION IN THE DESIGN OF “ SHORE TO SHIP ” - POWER SUPPLY SYSTEMS OF SHIPS IN PORT. 26(1), 9–13.
- Wachjoe, C. K., Zein, H., Supriyanti, Y., Gantina, T. M., Kurniasetiawati, A., & Marensaputri, P. (2020). Pengurangan Pencemaran Udara berdasarkan Konsep Pelabuhan Hijau. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik
- World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our common future* (Brundtland Report). Oxford University Press.