

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Hasil Utama & Kesenjangan
[1]	Anih Sri Suryani*, 2024	POTENSI DAN TANTANGAN IMPLEMENTASI CARBON CAPTURE AND STORAGE DI INDONESIA	Dalam rangka mencapai target Net Zero Emission (NZE) tahun 2060, Indonesia berinisiatif untuk mengembangkan teknologi CCS dan membentuk pusat hub CCS. Pendekatan ini diharapkan membawa terobosan signifikan bagi ekonomi Indonesia, membuka peluang baru dalam sektor industri, dan menciptakan pasar global untuk produk-produk beremisi karbon rendah. Tulisan ini bertujuan mengkaji potensi dan tantangan implementasi CCS dalam kerangka pembangunan rendah karbon di Indonesia.
[2]	Maulita ¹ , Minarni Adham ²	DAMPAK IMPLEMENTASI GREEN SHIPPING PADA PERUSAHAAN PELAYARAN	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi Green Shipping pada industri Perkapalan dan Transportasi Laut Kalimantan Timur yang sesuai aturan International Maritime Organization yang dimuat dalam Marine Pollution Regulasi Annex VI.

[3]	Undip, 2023	LAPORAN CAPAIAN CARBON OFFSETS Universitas Diponegoro	Jejak karbon atau carbon footprint merupakan suatu ukuran dari aktivitas manusia yang ditimbulkan baik langsung dan tidak langsung oleh individu, produk, aktivitas, organisasi atau negara yang dapat menimbulkan dampak terhadap lingkungan. Jejak karbon dinyatakan dalam satuan ton karbon atau ton karbondioksida ekuivalen. Semakin banyak aktivitas manusia, semakin tinggi nilai emisi karbon yang dihasilkan. Komitmen Undip dalam pengurangan dampak GRK juga dilakukan dengan Upaya penanaman pohon maupun mangrove. Kegiatan penanaman pohon ini rutin dilakukan UNDIP setiap tahunnya. Tercatat pada tahun 2021, UNDIP di lokasi Tembalang memiliki 6.810 pohon dengan sekitar 282 jenis tanaman. Seluruh pohon termasuk mangrove yang ditanam di lokasi UNDIP mampu mereduksi 6.479,63 metrik t CO₂ eq. Selain itu, UNDIP juga mengadakan kegiatan penanaman pohon di KHDTK Wanadipa Penggaron sebanyak 7.500 pohon
-----	-------------	--	--

			untuk menjaga kelestarian hutan dan mengurangi emisi di udara.
[4]	Joanna Kizielewicz*, 2024	Onshore power supply-trends in research studies	Peraturan ketat yang diperkenalkan oleh Parlemen Eropa dan Perserikatan Bangsa-Bangsa telah memaksa otoritas pelabuhan laut untuk mencapai emisi gas nol bersih pada tahun 2030. Sumber polusi penting yang dikeluarkan di pelabuhan melibatkan emisi gas buang dari kapal yang ditenagai oleh mesin kapal saat bersandar di pelabuhan laut. Salah satu cara untuk mengurangi tingkat polusi dan gangguan yang disebabkan oleh mesin kapal adalah dengan melengkapi kapal dengan Onshore Power Supply (OPS). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi arah pengembangan penelitian tentang OPS, untuk mengatur terminologi yang berkaitan dengan OPS, dan untuk mendefinisikan disiplin ilmiah penelitian di bidang OPS.
[5]	ICTH, 2022	INDONESIA CARBON TRADING	Perubahan iklim menjadi salah satu permasalahan utama yang dihadapi manusia dalam dasawarsa ini. Bahkan survei persepsi dari World

			Economic Forum Global Risk Report (2022) menyebutkan bahwa perubahan iklim dalam 10 tahun ke depan dianggap sebagai risiko yang paling memberi ancaman jangka panjang. Tanpa adanya upaya mitigasi bersama dalam melakukan pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) terhadap aktivitas manusia, tujuan Paris Agreement untuk membatasi pemanasan global dari 1,5 °C hingga 2 °C akan berada di luar jangkauan. Pemerintah dan industri perlu menanggapi serius darurat iklim dengan meningkatkan ambisi mereka untuk mencapai net-zero emissions pada pertengahan abad ini.
[6]	PBAS, 2023	Optimalisasi Fasilitas Listrik Dermaga dan Peningkatan Keandalan Auxiliary Engine Kapal terhadap Efisiensi Biaya Operasional Kapal di Pelabuhan Tanjung Emas	Teknik analisis yang digunakan adalah Cost Benefit Analysis (CBA) dengan membandingkan penggunaan bahan bakar minyak dan shore connection. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan shore connection dapat menurunkan biaya operasional kapal sebesar Rp. 6.016.349.488 / tahun dalam efisiensi penggunaan biaya bahan bakar, sedangkan tentang

			keandalan Auxiliary Engine (AE) didapatkan efisiensi hingga Rp. 1.903.000.000/ tahun. Karena setelah penggunaan shore connection sebagai pengganti penggunaan AE yang menggunakan BBM, maka tidak adanya kerusakan AE, sehingga dapat mengurangi biaya perbaikan kapal. Adanya penggunaan fasilitas listrik melalui shore connection juga dapat mendukung tercapainya program pemerintah yaitu Go Green Port (Environmental Friendly) melalui adanya pengurangan pencemaran udara oleh gas buang cerobong kapal sebagai implementasi dari MARPOL Annex VI dan melaksanakan regulasi permenhub nomor 29 tahun 2014 pasal 37 tentang pencegahan pencemaran lingkungan maritim.
[7]	Prosiding, 2022	Studi Literatur Pengoperasian Hemat Bahan Bakar untuk Rencana Pengelolaan Kapal Hemat Energi	Makalah ini berusaha mengkaji beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai bermacam fuel efficient operation diantaranya yaitu pengembangan skill operator kapal, sistem optimasi pelayaran, serta imlementasi cold ironing kemudian

			berusaha melihat tantangan yang dihadapi dalam pelaksanaannya berikut solusi yang tersedia dan potensi penelitian yang perlu dikembangkan untuk kedepannya.
[8]	Bdg, 2025	ANALISA PERBAIKAN TEGANGAN UNTUK SISTEM SAMBUNGAN PANTAI TEGANGAN RENDAH	Sistem LVSC digunakan untuk menggantikan generator diesel pada kapal dengan pasokan listrik dari darat guna mengurangi emisi karbon dan meningkatkan efisiensi energi. Salah satu tantangan utama dalam implementasi LVSC adalah fluktuasi tegangan yang disebabkan oleh beban induktif dari motor kapal, panjang kabel, dan konfigurasi jaringan, yang dapat memengaruhi kestabilan jaringan kelistrikan serta operasional peralatan kapal. Empat metode mitigasi diuji untuk mengatasi masalah ini, yaitu Upsize Converter, Uprate Voltage Setpoint, On-Load Tap Changer (OLTC), dan Static Synchronous Compensator (STATCOM). Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory untuk menganalisis skenario operasi normal dan dinamis, termasuk aktivasi motor induksi.

[9]	SE,2022	Emisi Polutan Konvensional dari Aktivitas di Alur Pelayaran Pelabuhan Dili	Sedangkan total emisi yang dihasilkan dari aktivitas kapal di alur pelayaran untuk parameter PM2.5, SO2, NOx dan VOC masing masing 0,348 g/tahun, 0,421 g/tahun, 4,842 g/tahun dan 0,630 g/tahun. Perbandingan emisi mesin bantu kapal/mesin induk kapal tunda tiap polutan untuk PM2.5, SO2, NOx dan VOC masing-masing : 5%, 14%, 19% dan 4%. Mengingat emisi terbesar berasal dari pengoperasian kapal tunda, maka program reduksi emisi dapat difokuskan pada efisiensi pengoperasian kapal tunda di area pelabuhan.
[10]	Jl, 2022	Studi Kualitatif Performa Mesin Kapal Berbahan Bakar LNG dan Konvensional di Sektor Maritim Indonesia	mesin LNG memiliki efisiensi termal lebih tinggi (45–50%) dibanding mesin diesel konvensional (30–40%), serta konsumsi bahan bakar spesifik lebih rendah (140–180 g/kWh dibanding 180–220 g/kWh). Dari sisi lingkungan, LNG mampu mengurangi emisi CO ₂ sebesar 20–30%, menekan SOx hampir 100%, NOx hingga 90%, dan partikulat hingga 99%. Meski demikian, tantangan seperti methane slip, biaya instalasi awal, serta

			keterbatasan infrastruktur bunker LNG masih menjadi hambatan. Secara keseluruhan, LNG dinilai memiliki potensi besar sebagai bahan bakar transisi menuju pelayaran berkelanjutan di Indonesia.
[11]	BE.JTS, 2025	Estimasi Beban Emisi Gas Buang Akibat Aktivitas Kapal Penyebrangan dan Bongkar Muat Kendaraan Bermotor Pada Pelabuhan Kolaka	Estimasi beban emisi kapal dilakukan menggunakan Pendekatan Faktor Emisi berdasarkan panduan EMEP/EEA (European Monitoring and Evaluation Programme/ European Environment Agency) sedangkan untuk beban emisi kendaraan bermotor menggunakan panduan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines 2006. Polutan utama yang diamati meliputi nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), partikel halus (PM₁₀), sulfur oksida (SO_x), dan senyawa organik volatil non-metana (NMVOC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas kapal mendominasi emisi, dengan NO_x sebagai kontributor tertinggi sebesar 224.78 ton/tahun, diikuti oleh CO (39.91 ton/tahun) dan PM₁₀ (21.56 ton/tahun). Emisi NMVOC dan SO_x

			masing-masing tercatat sebesar 14.03 ton/tahun dan 5.38 ton/tahun. Sementara itu, aktivitas kendaraan bermotor selama proses bongkar muat menambah emisi dalam jumlah yang lebih kecil, terutama CO (509.88 kg/tahun) dan NOx (183.72 kg/tahun).
[12]	JEMT, 2024	Analysis of The Use of Onshore Power Supply Facilities at Port of Berlian	In this methodology, the assessment process carried out includes data gathering and data processing processes. Apart from this process, it is necessary to review the character of the port or terminal that we will examine ships that most often use land-based electricity facilities are ships with a size of 1000-2999 GT. The use of land electricity facilities provides cost efficiency of > 78%. This land electricity facility is used by General Cargo and Container type ships. These results indicate that the use of land electricity facilities is still inefficient (< 2.7%) and there is a need for further review of the implementation of existing policies.

2.2 Landasan Teori

Sektor Transportasi tumbuh dan berkembang seiring dengan peningkatan perekonomian nasional. Transportasi merupakan sarana penting bagi masyarakat modern untuk memperlancar mobilitas manusia dan barang. Gas buang sisa pembakaran Bahan bakar Minyak (BBM) mengandung bahan-bahan pencemar seperti CO₂ (karbon Dioksida), NO_x (Nitrogen Oksida), CO (karbon Monoksida), VHC (*Volatile HydroCarbon*) dan Partikel lainnya. Bahan-bahan tersebut dapat mencemari ekosistem dan berdampak negatif kepada manusia. Dengan pertumbuhan kendaraan bermotor yang begitu pesat mengakibatkan peningkatan penggunaan bahan bakar minyak di sektor transportasi dan tidak dapat dipungkiri maka gas buang yang merupakan polutan juga akan menyebabkan meningkatnya pencemaran udara.[13]

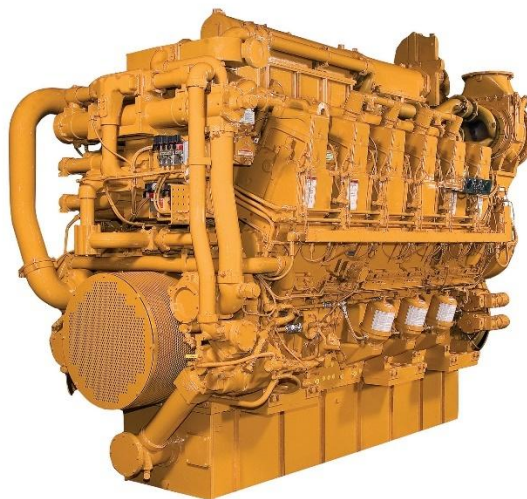
2.2.1 Transportasi Maritim dan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

Salah satu kontributor polutan konvensional dan gas rumah kaca (GRK) sektor transportasi adalah dari sektor transportasi laut. Emisi dari kapal yang sedang berlabuh di pelabuhan mencapai 10 kali dari emisi operasi pelabuhan itu sendiri [14]. Transportasi lintas laut regional dan global secara efektif menghubungkan ekonomi negara-negara melalui pergerakan barang yang efisien, mewakili 80-90 % dari perdagangan dunia. Dengan itu, sektor pelayaran menghasilkan antara 2-3 % emisi gas rumah kaca (GRK) global dan menyumbang antara 12-13 % emisi belerang dan oksida nitrogen terhadap polusi udara global [15].

Pada tahun 2018, IMO mengadopsi *Initial GHG Strategy*, yang menargetkan pengurangan intensitas karbon sebesar 40 % pada tahun 2030 dan hingga 70 % pada tahun 2050 dibandingkan level tahun 2008. Strategi ini tidak hanya berfokus pada inovasi bahan bakar alternatif seperti LNG, hidrogen, atau amonia, tetapi juga mendorong optimalisasi operasional kapal, termasuk efisiensi energi saat kapal berada di Pelabuhan. Dengan demikian, transportasi maritim tidak hanya dihadapkan pada tantangan operasional, tetapi juga tuntutan untuk bertransformasi menuju praktik pelayaran yang lebih ramah lingkungan [16].

2.2.2 Opsional Kapal Saat Sandar dan Peran *Auxillary Engine*

Saat kapal bersandar di pelabuhan, mesin utama (*main engine*) dihentikan, namun kapal tetap membutuhkan pasokan energi untuk keperluan *hoteling operations*, seperti sistem penerangan, pendingin ruangan, pompa, sistem navigasi internal, dan komunikasi. Kebutuhan energi tersebut selama ini dipenuhi oleh *Auxiliary Engine* berbahan bakar solar atau *marine diesel oil* (MDO), yang terus beroperasi selama kapal berada di dermaga. *Auxiliary engine* umumnya mengonsumsi bahan bakar antara 100 hingga 250 liter per jam, tergantung kapasitas kapal dan beban listrik yang diperlukan. Pembakaran bahan bakar fosil tersebut menghasilkan emisi CO₂, CH₄, dan N₂O, yang tidak hanya berdampak pada perubahan iklim global, tetapi juga menurunkan kualitas udara lokal di area Pelabuhan [17].



Gambar 2. 1 *Auxiliary Engine*

2.2.2.1 Prinsip Kerja Pembangkitan Pada Kapal

Kapal itu seperti kota terapung dengan semua hak istimewa yang dinikmati oleh kota normal mana pun di darat. Sama seperti kota konvensional, kapal juga membutuhkan semua fasilitas dasar untuk menopang kehidupan di atas kapal; yang utama di antaranya adalah daya atau listrik. Daya di kapal dihasilkan

menggunakan penggerak utama dan alternator yang bekerja sama. Untuk ini, generator arus bolak-balik digunakan di atas kapal.

Generator bekerja berdasarkan prinsip bahwa ketika medan magnet di sekitar konduktor berubah, arus akan terinduksi dalam konduktor tersebut. Generator terdiri dari seperangkat konduktor stasioner yang dililit menjadi kumparan pada inti besi. Ini dikenal sebagai stator. Magnet berputar yang disebut rotor berputar di dalam stator ini, menghasilkan medan magnet. Bidang ini memotong konduktor, menghasilkan GGL induksi atau gaya elektromagnetik saat masukan mekanis menyebabkan rotor berputar. Medan magnet dihasilkan melalui induksi (pada alternator tanpa sikat) dan melalui lilitan rotor yang dialiri arus DC melalui cincin slip dan sikat [18].

2.2.3 Teknologi *Onshore Power Supply* (OPS)

Onshore Power Supply (OPS), yang juga dikenal sebagai *Shore Power* atau *Cold Ironing*, adalah teknologi yang memungkinkan kapal memperoleh pasokan listrik langsung dari jaringan pelabuhan atau darat selama berada di dermaga. Istilah *cold ironing* sendiri berasal dari masa kapal uap, ketika mesin kapal menjadi “dingin” saat dimatikan di pelabuhan dan tidak lagi beroperasi.

Teknologi ini menghubungkan sistem kelistrikan kapal dengan jaringan listrik pelabuhan melalui kabel tegangan tinggi atau rendah, tergantung jenis kapal. Dengan cara ini, kapal tidak lagi perlu mengoperasikan *auxiliary engine* untuk memenuhi kebutuhan listrik *hoteling*. Implementasi *shore power* telah terbukti mampu mengurangi emisi CO₂ hingga 50–70% pada fase sandar, serta menurunkan emisi NO_x dan SO_x secara drastis [19].

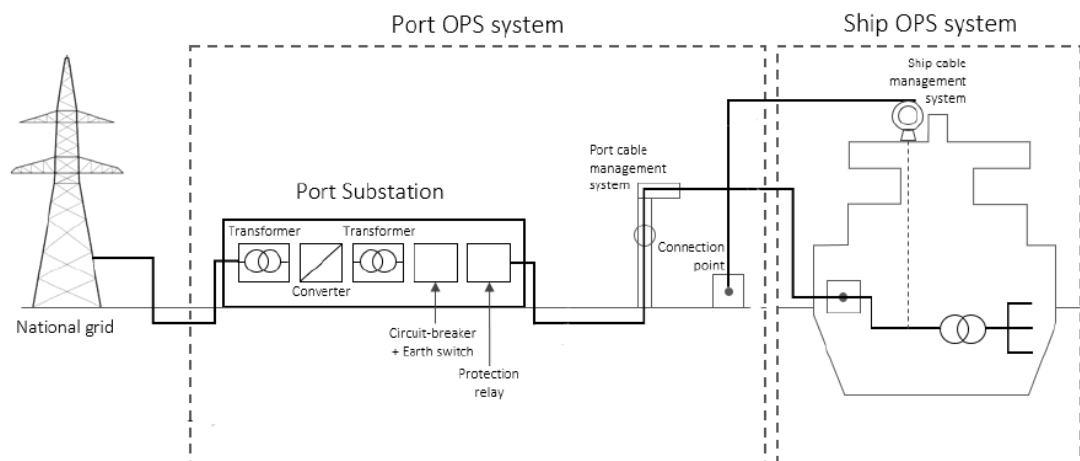
2.2.3.1 Standar Teknis Untuk OPS

Penerapan OPS diatur secara internasional melalui standar IEC/ISO/IEEE 80005, yang membagi sistem menjadi dua kategori utama, yaitu:

1. *High Voltage Shore Connection* (HVSC) – untuk kapal besar (*container, bulk, tanker*).

2. *Low Voltage Shore Connection (LVSC)* – untuk kapal penumpang atau kapal sedang.

Standar ini mengatur sinkronisasi tegangan dan frekuensi antara kapal dan jaringan pelabuhan, tata cara penyambungan kabel, sistem grounding, hingga protokol keselamatan seperti *interlock* dan *emergency shutoff*. Tantangan teknis utama dari OPS adalah kompatibilitas sistem antara kapal dan pelabuhan, serta perlunya pelatihan teknis terhadap operator dan awak kapal [20].



Gambar 2. 2 *Port OPS System*

2.2.4 Komponen Sistem *Onshore Power Supply*

1. Sistem Suplai Tegangan Darat (*Shore-Side Electrical Supply*)

Sistem suplai tegangan darat merupakan komponen utama dalam implementasi OPS karena berfungsi sebagai sumber energi listrik yang menggantikan operasi mesin bantu kapal selama kapal bersandar di pelabuhan. Sumber listrik ini umumnya berasal dari jaringan listrik nasional atau *utility grid*, yang menyediakan energi listrik dengan kapasitas besar dan keandalan tinggi. Pada umumnya, suplai listrik OPS disediakan pada tegangan menengah hingga tinggi, seperti 6,6 kV atau 11 kV, guna memenuhi kebutuhan daya kapal yang relatif besar, terutama kapal peti kemas, kapal pesiar, dan kapal kargo besar.

Penggunaan tegangan menengah atau tinggi bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya (*power losses*) selama transmisi serta meningkatkan efisiensi distribusi energi dari gardu pelabuhan ke titik sambungan kapal. Selain itu, suplai daya darat harus memiliki stabilitas frekuensi dan tegangan yang sesuai dengan standar kelistrikan kapal agar proses transisi dari sumber daya kapal ke sumber darat dapat berlangsung aman dan andal. Oleh karena itu, sistem suplai tegangan darat biasanya dilengkapi dengan fasilitas proteksi, sistem *grounding*, serta koordinasi dengan sistem kelistrikan pelabuhan secara keseluruhan. [21]

2. Transformator

Transformator merupakan komponen penting dalam sistem OPS yang berfungsi untuk menyesuaikan tingkat tegangan listrik antara jaringan darat dan sistem kelistrikan kapal. Karena karakteristik tegangan jaringan listrik nasional sering kali berbeda dengan spesifikasi tegangan yang dibutuhkan oleh kapal, maka transformator digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai kebutuhan. Dalam praktiknya, transformator OPS dapat berfungsi menurunkan tegangan dari level menengah (HV) menjadi level yang lebih rendah (LV), atau menyesuaikan tegangan menengah agar sesuai dengan standar kelistrikan kapal.

Selain fungsi penyesuaian tegangan, transformator juga berperan dalam menjaga kestabilan dan kualitas daya listrik, termasuk mengurangi fluktuasi tegangan dan memastikan kontinuitas suplai daya selama kapal terhubung dengan sistem OPS. Dalam beberapa sistem OPS modern, transformator dirancang khusus dengan fitur proteksi termal dan kelistrikan untuk meningkatkan keandalan operasi serta meminimalkan risiko gangguan atau kerusakan peralatan kapal maupun fasilitas pelabuhan. [21]

3. *Switchgear* dan Panel Kontrol

Switchgear dan panel kontrol merupakan sistem pengendali dan pengaman distribusi daya listrik dalam OPS. Komponen ini berfungsi untuk mengatur aliran listrik dari sumber daya darat menuju kapal, sekaligus melindungi

sistem dari gangguan listrik seperti hubung singkat (*short circuit*), arus lebih (*overcurrent*), dan gangguan isolasi. *Switchgear* biasanya dilengkapi dengan *circuit breaker*, *disconnect switch*, serta sistem relai proteksi yang memungkinkan pemutusan daya secara otomatis apabila terjadi kondisi abnormal.

Selain fungsi proteksi, panel kontrol OPS juga berperan dalam proses pengoperasian sistem, termasuk pengaturan urutan penyambungan daya (*connection sequence*), pemantauan status kelistrikan, dan koordinasi antara sistem pelabuhan dan sistem kapal. Dengan adanya panel kontrol yang terintegrasi, operator pelabuhan dapat memastikan bahwa proses penyambungan dan pemutusan OPS dilakukan secara aman, terkendali, dan sesuai dengan prosedur operasi standar. [22]

4. Sistem Kabel Penghubung (*Cable Management System*)

Sistem kabel penghubung merupakan elemen fisik yang secara langsung mentransfer energi listrik dari dermaga ke kapal. Sistem ini terdiri dari kabel daya berisolasi tinggi yang dirancang untuk menahan tegangan dan arus besar, serta tahan terhadap kondisi lingkungan pelabuhan seperti kelembapan tinggi, paparan air laut, dan beban mekanis. Untuk mendukung fleksibilitas operasional, sistem OPS biasanya dilengkapi dengan *cable management system* berupa *cable reel*, *cable crane*, atau drum otomatis yang memudahkan penarikan dan pengembalian kabel sesuai posisi kapal.

Keberadaan sistem manajemen kabel sangat penting untuk menjamin keamanan, keandalan, dan efisiensi operasi OPS. Sistem ini membantu mencegah kerusakan kabel akibat tarikan berlebih, tekukan ekstrem, atau gangguan mekanis lainnya. Selain itu, manajemen kabel yang baik juga meminimalkan risiko kecelakaan kerja di area dermaga serta memastikan proses penyambungan OPS dapat dilakukan dengan cepat dan aman. [22]

5. Konektor dan Soket Kapal (*Ship Inlet & Connector*)

Konektor dan soket kapal merupakan antarmuka utama antara sistem kelistrikan darat dan sistem kelistrikan kapal. *Ship inlet* terpasang permanen pada

lambung atau superstruktur kapal sebagai titik masuk daya listrik dari OPS, sedangkan konektor atau *plug* berfungsi sebagai penghubung antara kabel darat dan *ship inlet*. Konektor ini umumnya berupa konektor tiga fase yang dilengkapi dengan pin *grounding* serta *pilot contact* untuk komunikasi dan pengendalian sistem.

Untuk menjamin kompatibilitas dan keselamatan, komponen ini dirancang mengikuti standar internasional seperti IEC/ISO/IEEE 80005, yang mengatur spesifikasi teknis, prosedur penyambungan, serta persyaratan keselamatan OPS. Penerapan standar ini memungkinkan kapal dari berbagai negara dan pelabuhan yang berbeda dapat menggunakan sistem OPS secara *interoperabel*, sekaligus meminimalkan risiko kegagalan sambungan dan gangguan kelistrikan. [22]

6. Sistem Kontrol, Monitoring, dan Proteksi

Sistem kontrol, monitoring, dan proteksi merupakan otak dari keseluruhan sistem OPS. Sistem ini biasanya berbasis perangkat lunak dan *control unit* otomatis yang berfungsi untuk mengoordinasikan seluruh proses penyambungan daya, mulai dari verifikasi kondisi sistem, penyinkronan frekuensi dan fase, hingga pemantauan aliran daya selama operasi. Penyinkronan ini sangat penting agar transisi dari mesin bantu kapal ke suplai darat tidak menimbulkan lonjakan arus atau gangguan kelistrikan.

Selain itu, sistem monitoring memungkinkan operator untuk memantau parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, frekuensi, dan daya secara real-time. Apabila terdeteksi gangguan atau kondisi tidak normal, sistem proteksi akan secara otomatis mengaktifkan mekanisme pengamanan, seperti pemutusan daya atau alarm peringatan, guna mencegah kerusakan pada peralatan kapal maupun infrastruktur pelabuhan. [23]

7. Perangkat Konversi Frekuensi

Perbedaan standar frekuensi listrik antara jaringan darat dan sistem kelistrikan kapal sering menjadi tantangan dalam implementasi OPS. Jaringan listrik nasional umumnya beroperasi pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, sementara

beberapa kapal dirancang untuk frekuensi tertentu yang mungkin berbeda dari jaringan pelabuhan. Untuk mengatasi perbedaan ini, sistem OPS dapat dilengkapi dengan *frequency converter* atau perangkat konversi frekuensi yang berfungsi menyesuaikan frekuensi listrik sebelum disalurkan ke kapal.

Penggunaan perangkat konversi frekuensi memungkinkan pelabuhan melayani berbagai jenis kapal dengan spesifikasi kelistrikan yang beragam, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan kompatibilitas sistem OPS. Selain itu, perangkat ini juga berperan dalam menjaga kualitas daya listrik dan mencegah gangguan operasional akibat ketidaksesuaian frekuensi antara sistem darat dan kapal. [23]

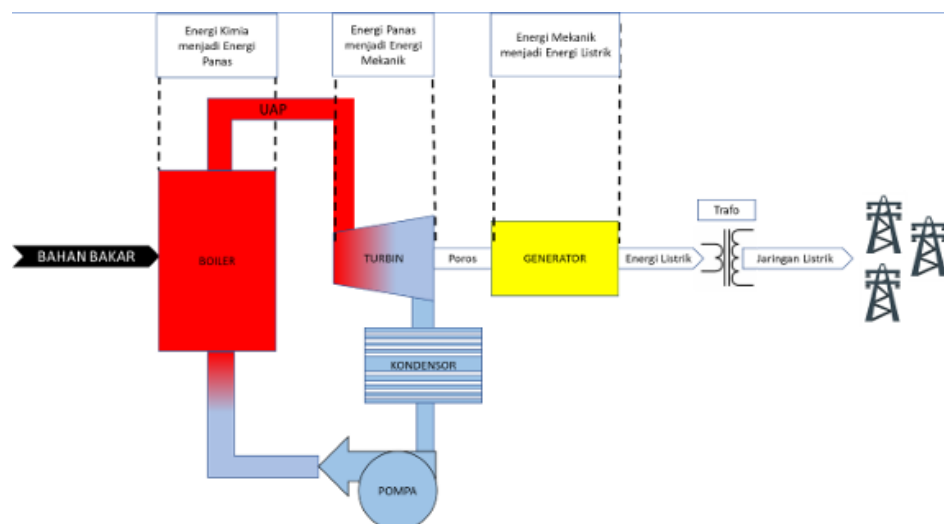
2.2.5 Kelayakan Ekonomi *Onshore Power Supply* (OPS) Terhadap Penurunan Biaya BBM

Onshore Power Supply (OPS) merupakan solusi elektrifikasi yang memungkinkan kapal yang sedang sandar mematikan *auxiliary engine* berbahan bakar minyak dan menggantikan pasokan energinya dengan listrik dari darat. Hal ini menciptakan peluang signifikan untuk mengurangi biaya operasional kapal, karena konsumsi BBM pada mesin bantu dapat dimatikan selama periode sandar. Studi internasional menunjukkan bahwa manfaat ekonomi penggunaan *shore power* terletak pada perbedaan harga antara energi listrik dan BBM, ditambah dengan potensi insentif dari otoritas pelabuhan, yang secara agregat dapat meningkatkan kelayakan ekonomi dari penggunaan OPS, terutama untuk kapal-kapal berukuran sedang dengan frekuensi kunjungan tinggi.

Dalam analisis yang sama, karakteristik manfaat ekonomi *shore power* berbeda menurut ukuran kapal dan kondisi pasar energi di pelabuhan tertentu. Artikel ini juga menemukan bahwa walaupun biaya awal infrastruktur OPS relatif besar, selisih biaya operasional dapat memberikan nilai tambah yang layak bagi operator kapal dan otoritas pelabuhan jika dimaksimalkan penggunaannya dalam jangka panjang. Oleh karena itu, integrasi faktor harga energi, intensitas sandar kapal, dan kebijakan insentif menjadi komponen penting dalam model evaluasi kelayakan ekonomi OPS. [24]

2.2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan uap untuk menggerakkan turbin dan generator. Jenis pembangkit ini banyak digunakan karena biaya bahan bakarnya relatif rendah serta mampu menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar. Pada umumnya, batu bara digunakan sebagai sumber energi utama. Batu bara dibakar untuk menghasilkan panas, yang kemudian digunakan untuk memanaskan air hingga berubah menjadi uap. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik ini kemudian diteruskan untuk mengoperasikan generator agar menghasilkan listrik. Setelah melewati turbin, uap dikondensasikan kembali menjadi air dan ditampung dalam sebuah wadah yang disebut *hotwell*, lalu air tersebut disirkulasikan terus menerus dalam sistem [25].



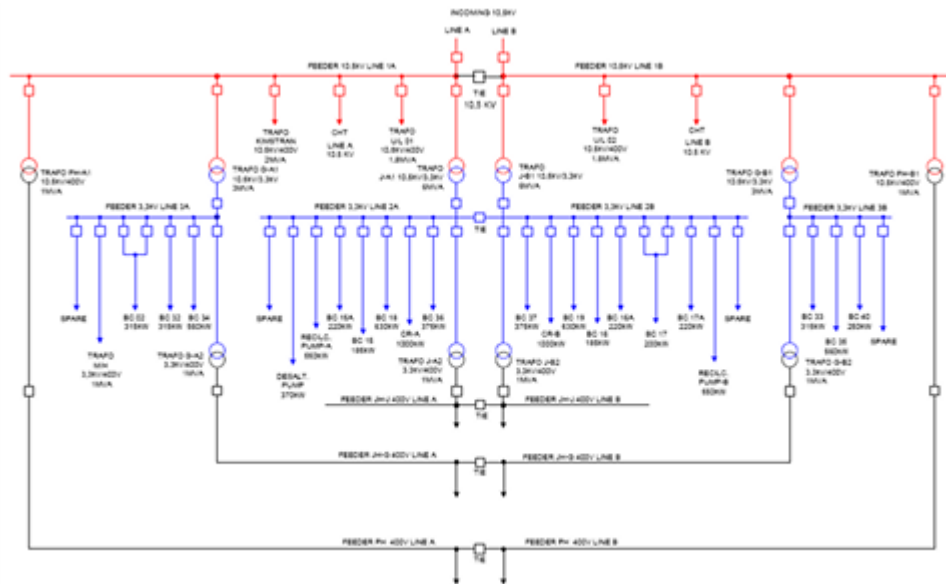
Gambar 2. 3 Proses perubahan energi pada PLTU

2.2.6.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Indonesia Power-Suralaya

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama. Batu bara merupakan sumber energi primer kelima setelah air, minyak bumi, gas, dan panas bumi. Pembangkit ini dibangun untuk meningkatkan pemanfaatan sumber daya energi primer dan diversifikasi sumber daya energi primer untuk pembangkitan listrik

serta memenuhi permintaan listrik yang meningkat, terutama di Pulau Jawa, sesuai dengan kebijakan pemerintah.

Salah satu pembangkit listrik PT Indonesia Power adalah Unit Bisnis Pembangkitan Suralaya. Terletak di ujung barat laut Pulau Jawa, Indonesia. PLTU Suralaya adalah pembangkit listrik tenaga uap terbesar milik PT. Indonesia Power, dengan kapasitas 4025 MW. Unit 1 hingga 4 berkapasitas 400 MW, Unit 5 hingga 7 berkapasitas 600 MW, dan Unit 8 berkapasitas 625 MW. Pembangkit listrik dibangun dalam empat tahap, dengan Unit 1 dan 2 mulai beroperasi pada tahun 1983 dan 1984, Unit 3 dan 4 ditugaskan pada tahun 1989, dan Unit 5 hingga 7 mulai beroperasi pada tahun 1997 [26].



Gambar 2. 4 *Single Line Diagram* PLTU Suralaya

2.2.7 Emisi Carbon Pelabuhan

Emisi karbon pelabuhan merupakan bagian dari emisi gas rumah kaca (*Greenhouse Gas / GHG*) yang dihasilkan oleh aktivitas operasional pelabuhan dan interaksi kendaraan, alat berat, serta kapal udara di area pelabuhan. Emisi ini umumnya dinyatakan dalam bentuk karbon dioksida (CO_2) atau satuan CO_2 ekuivalen (CO_2e) yang mencakup gas lain seperti metana (CH_4) dan nitrous oxide (N_2O).

Emisi karbon berasal dari pembakaran bahan bakar fosil pada mesin kapal, kendaraan darat, alat bongkar muat, serta konsumsi energi listrik yang bersumber dari pembangkit berbasis bahan bakar fosil. Inventarisasi emisi di pelabuhan sering mengikuti pendekatan yang standar seperti Protokol GHG (*Greenhouse Gas Protocol*) dan pedoman inventarisasi emisi pelabuhan internasional.[27]

2.2.7.1 Sumber Emisi Carbon di Pelabuhan

Sumber emisi karbon pelabuhan dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama, diantaranya: [28]

1. Emisi Langsung
berasal dari sumber yang dikendalikan langsung oleh pelabuhan, seperti pembakaran bahan bakar oleh mesin alat berat, kendaraan darat, dan fasilitas pelabuhan.
2. Emisi Tidak Langsung
emisi yang bersifat tidak langsung dari pembangkit energi listrik yang dibeli pelabuhan untuk operasional fasilitas.
3. Emisi Terkait Rantai Pasok
mencakup seluruh emisi yang terjadi akibat kegiatan pihak luar pelabuhan tetapi berkaitan erat dengan aktivitas operasional pelabuhan, misalnya emisi dari kapal asing yang bersandar, truk luar, dan kegiatan logistik pihak ketiga.

2.2.7.2 Dampak Emisi Carbon di Pelabuhan

Emisi karbon yang dihasilkan dari aktivitas pelabuhan berdampak pada: [29]

1. Perubahan iklim global,
dimana hal ini terjadi melalui peningkatan konsentrasi GHG di atmosfer.
2. Kualitas udara setempat,
karena emisi CO₂ sering disertai polutan lain seperti NO_x dan SO_x yang berdampak langsung pada kesehatan masyarakat sekitar pelabuhan.
3. Kebutuhan regulasi dan kebijakan lingkungan,
mendorong pelabuhan untuk beralih ke teknologi rendah karbon dan strategi mitigasi.

2.2.7.3 Strategi Mitigasi dan Pendekatan *Green Port*

Upaya pengurangan emisi karbon di pelabuhan meliputi: [30]

1. Elektrifikasi peralatan pelabuhan untuk mengganti mesin berbahan bakar fosil dengan tenaga listrik.
2. Penggunaan energi terbarukan, termasuk sumber listrik bersih untuk operasi pelabuhan.
3. Optimalisasi logistik dan operasi kapal, seperti *cold ironing/shore power* untuk mengurangi emisi saat kapal bersandar.
4. Konsep *Green Port/Green Port Initiatives* sebagai strategi keberlanjutan pelabuhan yang mengintegrasikan dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan.

2.2.8 Kelayakan Lingkungan *Onshore Power Supply* (OPS) terhadap Penurunan Emisi Carbon

Salah satu manfaat lingkungan utama dari penerapan OPS adalah pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) dan polutan udara lokal yang dihasilkan oleh mesin bantu kapal saat sandar. Dengan memasok listrik dari darat, operasi pembakaran BBM di kapal dapat dihentikan, sehingga emisi NO_x, SO₂, PM, dan CO₂ dapat ditekan secara substansial di area pelabuhan. Penelitian di Pelabuhan Kaohsiung menunjukkan bahwa adopsi *shore power* secara signifikan mengurangi emisi NO_x dan SO₂, yang berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara dan kesehatan masyarakat sekitar pelabuhan.

Lebih jauh, pengurangan konsumsi BBM selama kapal sandar berbanding lurus dengan penurunan emisi karbon, sehingga OPS menjadi instrumen strategis dalam mendukung target dekarbonisasi sektor maritim dan kebijakan lingkungan global. Efek positif ini bahkan lebih kuat apabila listrik di darat berasal dari sumber rendah karbon atau energi terbarukan, sehingga manfaat emisinya tidak hanya lokal tetapi juga menyentuh aspek *well to wake* pengurangan CO₂. Keterkaitan ini menunjukkan bahwa OPS tidak hanya layak secara lingkungan tetapi juga sesuai dengan kerangka *green port* dalam agenda keberlanjutan internasional. [31]