

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perkembangan Industri Kapal di Indonesia

Pada sekitar tahun 1951, industri galangan kapal di Indonesia mulai berkembang dengan didirikannya Galangan Carya di Jakarta. Galangan ini memulai produksi kapal konstruksi baja dengan kapasitas hingga 500 DWT. Meskipun Galangan Carya tergolong sebagai galangan kecil, pendiriannya memiliki arti sejarah yang signifikan dalam industri perkapalan Indonesia. Pada tahun 1960, sebagai akibat dari konflik antara Indonesia dan Belanda, semua perusahaan yang dimiliki oleh Belanda, termasuk galangan kapal di Indonesia, diserahkan kepada pemerintah Indonesia dan diubah menjadi badan usaha milik negara. Galangan Kapal Marina, yang awalnya didirikan oleh pemerintah Belanda pada tahun 1939 di Surabaya, juga mengalami perubahan. Galangan kapal tersebut mengadopsi nama baru sebagai PT PAL (Penataran Angkatan Laut) dan saat ini dikenal sebagai PT. PAL Indonesia (Persero). Industri galangan kapal di Indonesia telah mengalami perkembangan pesat dalam beberapa tahun terakhir. Negara ini memiliki keunggulan geografis dengan ribuan pulau yang membentang, sehingga permintaan akan kapal-kapal baru dan pemeliharaan kapal yang ada terus meningkat. Selain itu, biaya tenaga kerja yang relatif rendah dan dukungan pemerintah yang kuat telah mendorong pertumbuhan industri galangan kapal di Indonesia.

Salah satu galangan kapal terkemuka di Indonesia adalah PT. PAL Indonesia (Persero) yang berlokasi di Surabaya, Jawa Timur. Galangan ini memiliki fasilitas modern dan kapasitas produksi yang besar. PT. PAL Indonesia telah berhasil membangun berbagai jenis kapal, termasuk kapal perang, kapal selam, kapal penumpang, kapal tanker, dan kapal kargo. PT. PAL Indonesia juga mampu memproduksi kapal dengan bobot hingga ribuan ton. Galangan ini memiliki peran penting dalam mendukung pertahanan nasional dan ekonomi maritim Indonesia.

Selain itu, ada juga galangan kapal di Batam, Kepulauan Riau, yang merupakan salah satu pusat industri galangan kapal terbesar di Asia Tenggara. Di sini, terdapat sejumlah galangan kapal yang memiliki fasilitas dan kemampuan

produksi yang canggih. Beberapa galangan terkemuka di Batam adalah PT. Drydocks World Pertama, PT. Karimun Shipyard, dan PT. Nongsa Neptune Shipyard. Galangan-galangan ini mampu membangun kapal-kapal dengan berbagai spesifikasi, termasuk kapal pesiar, kapal feri, kapal penumpang, dan kapal *offshore*.

Perkembangan industri galangan kapal di Indonesia juga tercermin dalam data statistik. Menurut Kementerian Perindustrian, industri galangan kapal di Indonesia terus berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Saat ini, terdapat lebih dari 250 perusahaan galangan kapal di Indonesia dengan kapasitas produksi yang mencapai sekitar 1 juta DWT per tahun untuk bangunan baru dan hingga 12 juta DWT per tahun untuk reparasi kapal.

Pembangunan kapal di Indonesia mayoritas untuk mencukupi kebutuhan pasar dalam negeri sebesar 83 persen, yang diperkirakan sebanyak 120 unit atau 135.440 GT. Sedangkan, sisanya untuk ekspor, sekitar 24 unit atau 82.860 GT. Industri galangan kapal dinilai strategis berperan mendorong pertumbuhan ekonomi nasional dan merupakan sektor yang strategis dan mempunyai peran vital bagi roda perekonomian nasional. [2]

Dengan perkembangan ini, industri galangan kapal di Indonesia terus berusaha untuk meningkatkan kualitas, inovasi, dan daya saing. Pemerintah juga terus memberikan dukungan dalam bentuk kebijakan, insentif, dan fasilitas infrastruktur guna memperkuat posisi Indonesia sebagai salah satu pemain utama dalam industri galangan kapal di kawasan ini. Potensi industri kapal di Indonesia antara lain:

- Pembangunan Kapal Baru (*Ship building*).
- Pemeliharaan dan Reparasi Kapal (*Ship repairing*).
- Pembangunan Industri Sarana Lepas Pantai (*Off shore*).
- Pemeliharaan & Reparasi Bangunan/Peralatan Sarana Lepas Pantai (*Contractor / Oil field Service*).
- Industri Komponen / peralatan Kapal (*Engineering*).
- Jasa Konsultasi dan Perekayasa (*Design & Engineering*).

2.2. Sistem propulsi kapal

Sistem propulsi kapal adalah mekanisme utama yang digunakan untuk menggerakkan kapal melalui air. Sistem ini mencakup berbagai komponen seperti mesin utama, transmisi, poros propeler, dan baling-baling, yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan tenaga dorong yang diperlukan kapal berlayar. Secara tradisional, kapal menggunakan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*), khususnya mesin diesel sebagai sumber tenaga utama karena efisiensi dan kekuatannya yang baik untuk kebutuhan maritim.

Dalam beberapa dekade terakhir, berkembang berbagai tipe sistem propulsi yang mengadaptasi teknologi baru untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi dampak lingkungan. Salah satu inovasi penting adalah pengembangan sistem propulsi yang mengombinasikan mesin konvensional dengan motor listrik dan sumber energi baterai. Sistem ini memungkinkan operasi kapal dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah serta pengurangan emisi gas buang, terutama pada kecepatan rendah atau saat berlabuh.

Selain sistem propulsi mekanis konvensional, ada pula sistem propulsi berbasis teknologi listrik murni dan sistem propulsi pod yang menawarkan pengendalian yang lebih baik dan efisiensi manuver yang tinggi. Sistem propulsi pod, misalnya, menggabungkan motor listrik yang terpasang langsung pada baling-baling sehingga menghilangkan kebutuhan poros *propeller* dan *crankshaft*, menghasilkan efisiensi hidrodinamika lebih tinggi.

Pengembangan sistem propulsi kapal juga dipengaruhi oleh regulasi lingkungan global, termasuk MARPOL Annex VI yang membatasi emisi NO_x dan SO_x dari kapal. Hal ini mendorong penggunaan teknologi seperti *scrubber*, bahan bakar rendah sulfur, dan sistem propulsi alternatif guna mencapai standar emisi yang ketat.

Secara umum, pemilihan sistem propulsi kapal sangat bergantung pada jenis kapal, ukuran, pola operasi, dan kebutuhan efisiensi serta lingkungan. Penggunaan teknologi propulsi menjadi salah satu solusi masa depan yang diharapkan dapat mengakomodasi kebutuhan efisiensi energi dan keberlanjutan dalam industri maritim.

Sistem propulsi kapal merupakan sub-sistem utama yang berperan dalam menghasilkan dorongan sehingga kapal dapat bergerak di perairan. Propulsi kapal secara umum mengubah energi dari sumber tenaga menjadi gaya dorong melalui perangkat pendorong seperti baling-baling atau *waterjet*. Perubahan energi ini melibatkan mesin utama, transmisi daya, dan komponen lainnya yang bekerja secara terpadu untuk menghasilkan gerak linier kapal. Salah satu sistem propulsi yang paling umum digunakan pada kapal konvensional adalah *diesel-mechanical propulsion*, di mana mesin diesel menggerakkan baling-baling melalui *gearbox*. Sistem ini dikenal karena kesederhanaannya dan ketersediaan suku cadang, namun memiliki keterbatasan terkait efisiensi di berbagai kecepatan operasi.

Selain sistem mekanik konvensional, pengembangan teknologi telah memperkenalkan *diesel-electric propulsion*, di mana mesin diesel digunakan untuk menghasilkan listrik yang kemudian memberikan tenaga pada motor listrik penggerak baling-baling. Pendekatan ini memberi fleksibilitas dalam penyusunan ruang mesin dan meningkatkan efisiensi pada beban operasi variatif. [3]

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi propulsi kapal mengalami pergeseran yang signifikan menuju solusi yang lebih ramah lingkungan seperti sistem propulsi . Sistem menggabungkan dua atau lebih sumber tenaga, misalnya mesin diesel dengan generator listrik dan baterai. Integrasi ini menjadikan kapal mampu memilih sumber energi paling efisien sesuai profil operasi.

Sistem propulsi memberikan keuntungan utama berupa penurunan konsumsi bahan bakar dan pengurangan emisi gas buang. Ini karena pada kondisi operasi tertentu misalnya ketika kapal melaju lambat atau melakukan manuver di pelabuhan propulsi listrik bertenaga baterai dapat menggantikan kerja mesin diesel. Di sisi lain, ketika kapal berjalan pada kecepatan tinggi atau melakukan pelayaran jauh, mesin diesel dapat bekerja sebagai sumber utama tenaga dengan motor listrik membantu sebagai *power assist* atau dalam kondisi tertentu mengambil alih beban total. Kombinasi ini memungkinkan mesin diesel beroperasi pada rentang efisiensi terbaik, sehingga meningkatkan *overall fuel economy*.

Menurut kajian sistem propulsi kapal, integrasi baterai dan manajemen energi menjadi bagian penting dalam desain , karena sistem ini harus mampu mengatur

aliran daya secara optimal demi memaksimalkan efisiensi dan meminimalkan emisi. Strategi manajemen seperti itu membutuhkan algoritma atau kontrol cerdas agar dapat beradaptasi dengan perubahan beban kapal dan kondisi laut.

Sistem propulsi modern juga didukung oleh *energy storage systems* (ESS) seperti baterai *lithium-ion* yang kini semakin banyak digunakan karena densitas energi yang tinggi sehingga mampu menyimpan energi besar dalam ruang yang lebih kecil. ESS ini juga berperan dalam meredam fluktuasi beban dan membantu memaksimalkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Penerapan propulsi mencakup kapal penumpang, kapal patroli, kapal feri, dan kapal komersial lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapal yang menggunakan konfigurasi dapat mengalami penghematan bahan bakar hingga 20–30% tergantung profil operasi, sekaligus mengurangi emisi CO² secara signifikan dibandingkan dengan sistem konvensional. Selain itu, pilihan sistem propulsi juga mempertimbangkan faktor kenyamanan penumpang dan kebisingan. Kapal dengan propulsi listrik atau cenderung lebih senyap dan menghasilkan getaran lebih rendah, yang memberi kenyamanan lebih tinggi bagi penumpang dan kru.

Faktor lingkungan merupakan salah satu pendorong utama berkembangnya sistem propulsi baru. Organisasi Maritim Internasional (IMO) menetapkan target pengurangan emisi gas rumah kaca untuk armada global, yang mendorong perancang kapal dan pabrik mesin mengembangkan teknologi propulsi yang lebih bersih dan efisien.

Dalam hal perawatan, sistem propulsi relatif lebih kompleks dibandingkan sistem konvensional, tetapi memiliki potensi pengurangan biaya operasional dalam jangka panjang karena beban kerja mesin utama dapat diatur lebih optimal sehingga mengurangi frekuensi servis. Sistem propulsi listrik yang menjadi bagian dari juga memerlukan perhatian terhadap sistem kelistrikan kapal secara keseluruhan. Integrasi energi dari generator, baterai, dan motor listrik harus diatur oleh *power management system* (PMS) untuk menjamin stabilitas dan respon dinamis terhadap kondisi operasi. Manajemen energi yang efisien memerlukan sensor dan kendali otomatis untuk memantau parameter seperti kecepatan, *torsi*, tegangan baterai, dan

konsumsi bahan bakar secara *real-time* sehingga strategi optimal dapat dipilih selama pelayaran.[4]

Dasar perancangan sistem penggerak utama adalah merupakan koordinasi antara *prime mover* dengan sistem transmisi dan *propulsor*. Untuk menentukan pilihan, seorang *marine engineer* harus mempertimbangkan beberapa kemungkinan kombinasi permesinan. Secara umum, sistem propulsi kapal terdiri dari tiga komponen utama, antara lain:

- a. Motor Penggerak Utama (*Prime Mover*).
- b. Sistem Transmisi (*Transmission*).
- c. Alat Gerak (*Propulsor*).

Ketiga komponen utama ini merupakan suatu kesatuan yang didalam proses perencanaannya tidak dapat ditinjau secara terpisah. Kesalahan di dalam perancangan, akan membawa konsekuensi yang sangat besar terhadap kondisi kondisi sebagai berikut:

- a. Tidak tercapainya kecepatan dinas kapal yang direncanakan.
- b. *Fuel oil consumption* yang tidak efisien.
- c. Turunnya nilai ekonomis dari operasional kapal tersebut.
- d. Pengaruh pada tingkat vibrasi yang terjadi pada badan kapal.

2.3. Sistem propulsi Listrik

Sistem propulsi listrik pada kapal merupakan teknologi yang menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama kapal, menggantikan atau melengkapi mesin pembakaran internal konvensional. Teknologi ini mulai berkembang dan diadopsi secara luas seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan efisiensi energi, pengurangan emisi gas buang, dan operasi kapal yang lebih ramah lingkungan.

Keunggulan utama sistem propulsi listrik adalah kemampuannya dalam memberikan torsi instan, pengoperasian yang lebih halus, dan kemampuan pengaturan kecepatan yang presisi. Sistem ini juga memungkinkan integrasi dengan sumber energi terbarukan dan penyimpanan energi seperti baterai, yang mendukung pengurangan penggunaan bahan bakar fosil dan emisi karbon dioksida (CO²).

Dalam aplikasinya, sistem propulsi listrik dapat digunakan secara penuh (*all-electric propulsion*) atau sebagai bagian dari sistem propulsi yang menggabungkan motor listrik dengan mesin diesel. Untuk kapal dengan penggunaan di area terbatas atau operasi kecepatan rendah seperti kapal pesiar, kapal feri, dan kapal patroli, sistem propulsi listrik memberikan keuntungan besar dalam hal efisiensi energi dan pengurangan polusi udara.

Meskipun sistem propulsi listrik menawarkan banyak manfaat, terdapat beberapa tantangan seperti kebutuhan kapasitas baterai yang besar, infrastruktur pengisian daya, serta sistem manajemen energi canggih untuk mengoptimalkan performa dan keamanan operasional kapal. Oleh karena itu, perencanaan desain dan integrasi sistem yang tepat sangat penting agar sistem propulsi listrik dapat berfungsi optimal dalam berbagai kondisi operasi kapal.

Regulasi internasional yang semakin ketat terhadap emisi gas buang kapal mendorong adopsi sistem propulsi listrik sebagai solusi teknologi masa depan dalam industri maritim. Dengan inovasi terus-menerus pada teknologi baterai dan pengelolaan energi, sistem propulsi listrik diperkirakan akan semakin dominan dan menjadi standar baru dalam mendukung keberlanjutan sektor pelayaran.

Sistem propulsi listrik merupakan teknologi penggerak kapal yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga utama untuk memutar baling-baling atau alat pendorong lainnya. Pada sistem ini, energi listrik dihasilkan dari generator yang digerakkan oleh mesin diesel, turbin, atau sumber energi alternatif, kemudian disalurkan ke motor listrik sebagai penggerak utama. Konsep ini berbeda dengan sistem propulsi mekanis konvensional yang menghubungkan mesin secara langsung ke poros propeller.

Salah satu karakteristik utama sistem propulsi listrik adalah fleksibilitas dalam penempatan komponen mesin dan generator. Karena daya disalurkan dalam bentuk listrik, generator dan motor tidak harus berada dalam satu garis poros, sehingga perancangan ruang mesin menjadi lebih efisien. Fleksibilitas ini sangat menguntungkan terutama pada kapal penumpang dan kapal dengan kebutuhan tata letak ruang yang kompleks.

Sistem propulsi elektris umumnya terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber pembangkit listrik, sistem distribusi daya, motor listrik, sistem kontrol, serta perangkat pendorong seperti baling-baling atau *azimuth thruster*. Sumber listrik dapat berupa generator diesel, baterai, *fuel cell*, atau kombinasi dari beberapa sumber energi tersebut. Semua komponen ini bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan dorongan yang optimal. Motor listrik yang digunakan pada sistem propulsi elektris memiliki efisiensi tinggi dan karakteristik torsi yang baik pada kecepatan rendah. Hal ini menjadikan sistem ini sangat cocok untuk kapal yang sering beroperasi pada kondisi *manuver*, seperti kapal feri, kapal penumpang, dan kapal dinas. Selain itu, motor listrik mampu memberikan respon cepat terhadap perubahan beban, sehingga meningkatkan kendali dan keselamatan kapal. Keunggulan lain dari sistem propulsi elektris adalah kemampuannya dalam mengurangi konsumsi bahan bakar. Mesin diesel yang berfungsi sebagai pembangkit listrik dapat dioperasikan pada titik kerja yang paling efisien, karena tidak lagi terikat langsung dengan perubahan kecepatan kapal. Kondisi ini berkontribusi pada penurunan konsumsi bahan bakar dan peningkatan efisiensi energi secara keseluruhan.

Dari sisi lingkungan, sistem propulsi elektris memberikan dampak positif berupa pengurangan emisi gas buang. Dengan berkurangnya ketergantungan pada mesin diesel sebagai penggerak langsung, emisi karbon dioksida, *nitrogen oksida*, dan partikel dapat ditekan. Pada beberapa konfigurasi, kapal bahkan dapat beroperasi dalam mode listrik penuh tanpa emisi saat berada di area pelabuhan. Sistem propulsi elektris juga dikenal memiliki tingkat kebisingan dan getaran yang lebih rendah dibandingkan sistem propulsi mekanis. Kondisi ini meningkatkan kenyamanan penumpang dan kru, terutama pada kapal penumpang. Tingkat kebisingan yang rendah juga menjadikan sistem ini lebih ramah terhadap lingkungan laut, khususnya bagi kehidupan biota laut.

Dalam implementasinya, sistem propulsi elektris sangat bergantung pada sistem manajemen daya atau *Power Management System (PMS)*. PMS berfungsi mengatur pembangkitan, distribusi, dan penggunaan daya listrik agar sesuai dengan kebutuhan propulsi dan sistem bantu kapal. Sistem ini memastikan stabilitas tegangan dan frekuensi listrik selama operasi kapal.

Perkembangan teknologi penyimpanan energi, khususnya baterai *lithium-ion*, turut mendukung penerapan sistem propulsi elektrik. Baterai memungkinkan kapal menyimpan energi listrik dan menggunakannya kembali saat dibutuhkan. Dengan adanya baterai, kapal dapat beroperasi dalam *mode zero emission* untuk durasi tertentu, terutama saat manuver di pelabuhan atau perairan terbatas.

Namun demikian, penerapan sistem propulsi elektrik juga menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu tantangan utama adalah biaya investasi awal yang relatif tinggi, terutama untuk pengadaan motor listrik, sistem kontrol, dan baterai. Selain itu, aspek keselamatan terkait sistem kelistrikan dan baterai juga memerlukan perhatian khusus dalam desain dan pengoperasian kapal. Dari sudut pandang perawatan, sistem propulsi elektrik cenderung memiliki kebutuhan perawatan yang lebih rendah dibandingkan sistem mekanis, karena jumlah komponen bergerak yang lebih sedikit. Hal ini berpotensi menurunkan biaya operasional jangka panjang, meskipun membutuhkan tenaga ahli dengan kompetensi kelistrikan yang memadai.

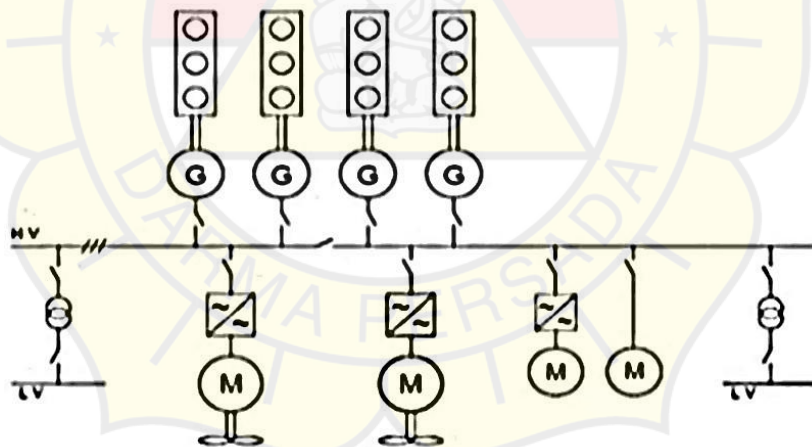
Sistem propulsi elektrik sering kali dikombinasikan dengan teknologi lain dalam konfigurasi. Kombinasi ini memungkinkan kapal memanfaatkan keunggulan masing-masing sistem, seperti efisiensi mesin diesel dan fleksibilitas motor listrik. Oleh karena itu, propulsi elektrik menjadi bagian penting dalam pengembangan kapal dan kapal pintar.

Regulasi internasional yang dikeluarkan oleh *International Maritime Organization* (IMO) turut mendorong penggunaan sistem propulsi elektrik. Target pengurangan emisi gas rumah kaca dan peningkatan efisiensi energi membuat teknologi ini semakin relevan untuk diaplikasikan pada kapal modern, khususnya kapal penumpang dan kapal yang beroperasi di wilayah sensitif lingkungan. Penerapan sistem propulsi elektrik juga membuka peluang integrasi dengan sumber energi terbarukan, seperti panel surya atau *fuel cell*. Meskipun kontribusi energi terbarukan terhadap daya propulsi utama masih terbatas, integrasi ini menunjukkan arah perkembangan teknologi kapal yang lebih berkelanjutan. Dalam konteks *smart passenger ship*, sistem propulsi elektrik memiliki peran strategis karena mudah diintegrasikan dengan sistem kontrol cerdas dan otomasi kapal. Penggunaan sensor

dan algoritma kontrol memungkinkan optimalisasi penggunaan energi secara real-time berdasarkan kondisi operasi kapal. Secara keseluruhan, sistem propulsi listrik merupakan solusi yang menjanjikan dalam upaya meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi gas karbon pada sektor transportasi laut. Teknologi ini menjadi fondasi penting dalam transisi menuju sistem propulsi kapal yang lebih ramah lingkungan.

Dengan demikian, kajian mengenai sistem propulsi listrik sangat relevan untuk mendukung pengembangan kapal penumpang modern yang efisien, nyaman, dan berkelanjutan. Pemahaman menyeluruh terhadap karakteristik dan penerapan sistem ini menjadi dasar dalam pengembangan sistem propulsi dan kapal pintar di masa depan. [5]

Gambar 2.1 merupakan gambaran sederhana sistem Diesel Electric Propulsion, dengan beberapa komponen pendukungnya. Diesel-Generator dengan menggunakan *synchronous machine* yang digunakan sebagai penghasil daya menuju switchboard untuk mensuplai adanya variasi pembebanan di kapal.



Gambar 2.1 Sistem Propulsi Listrik

Sumber: H. K. Prasetya, et al., 2016

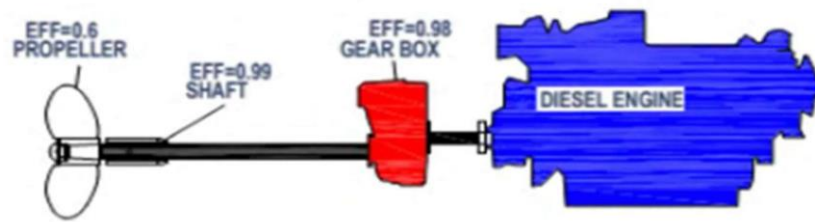
2.4. Sistem Propulsi Mekanis

Sistem propulsi mekanis merupakan sistem propulsi tradisional yang paling banyak digunakan pada kapal hingga saat ini. Sistem ini menggunakan mesin pembakaran internal, umumnya mesin diesel, yang menggerakkan poros propeler melalui transmisi mekanis seperti kopling dan gearbox. Tenaga dari mesin kemudian diteruskan ke baling-baling yang menghasilkan gaya dorong untuk menggerakkan kapal.

Keunggulan sistem propulsi mekanis adalah efisiensi energi yang relatif tinggi pada operasi kecepatan konstan dan daya tahan mesin yang telah terbukti selama bertahun-tahun. Sistem ini memiliki desain yang relatif sederhana dan telah banyak didukung oleh infrastruktur perawatan dan ketersediaan suku cadang yang meluas di seluruh dunia. Namun, sistem propulsi mekanis juga memiliki keterbatasan, terutama dalam hal fleksibilitas operasional dan efisiensi pada kecepatan variabel atau saat kapal beroperasi di kecepatan rendah. Sistem ini menghasilkan tingkat emisi gas buang yang signifikan, termasuk sulfur oksida (SO_x), nitrogen oksida (NO_x), dan partikel karbon, yang menjadi fokus regulasi lingkungan maritim internasional.

Perkembangan teknologi telah mendorong integrasi sistem mekanis dengan komponen lain seperti sistem turbocharging dan kontrol elektronika untuk meningkatkan efisiensi dan pengurangan emisi. Namun, pada kapal-kapal yang memerlukan operasi fleksibel dan ramah lingkungan, sistem propulsi mekanis mulai dilengkapi atau digantikan oleh sistem atau elektris.[6]

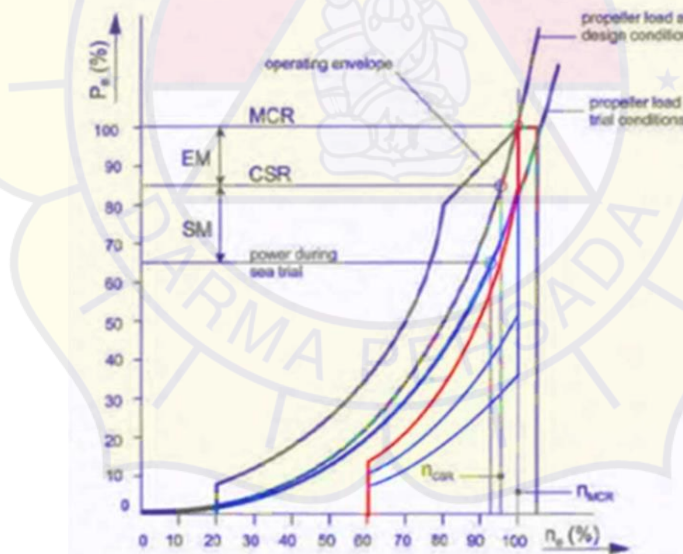
Sistem propulsi mekanis tetap menjadi pilihan utama untuk kapal berukuran besar dengan misi pelayaran jarak jauh karena kehandalan dan efisiensinya pada kondisi operasi tetap, meskipun kini mulai dikombinasikan atau digantikan dengan sistem propulsi alternatif untuk memenuhi tuntutan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan.



Gambar 2. 2 Efisiensi pada Sistem Propulsi Mekanik

Sumber: H. K. Prasetya, et al., 2016

Penggunaan mesin diesel sebagai penggerak utama pada sistem propulsi mekanis memiliki efisiensi yang paling tinggi jika dibandingkan dengan mesin penggerak lainnya seperti gas turbine dan steam turbine. Dalam perencanaan penggunaan mesin diesel sebagai penggerak utama kapal pada sistem propulsi mekanis perlu dilakukan engine propeller matching untuk mendapatkan efisiensi yang optimal. Engine propeller matching digunakan untuk menentukan operasional engine pada engine envelope seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.[7]



Gambar 2. 3 Engine Performance Motor Diesel

Sumber: H. K. Prasetya, et al., 2016

2.5. Sistem Propulsi Energi *Hybrid*

Sistem propulsi merupakan teknologi yang menggabungkan mesin pembakaran internal dengan motor listrik untuk meningkatkan efisiensi energi pada kapal serta mengurangi emisi gas buang. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan sistem propulsi pada kapal dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 30% dan emisi karbon hingga 25% dibandingkan sistem propulsi konvensional yang hanya menggunakan mesin diesel. Teknologi ini memanfaatkan baterai sebagai sumber energi tambahan yang digunakan terutama pada operasi kecepatan rendah dan saat kapal berlabuh, sehingga mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan dampak lingkungan.

Selain itu, sistem propulsi juga dilengkapi dengan teknologi regenerasi energi, di mana energi kinetik yang dihasilkan saat pengereman kapal akan disimpan dalam baterai dan dapat digunakan kembali, meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Sistem ini dapat beroperasi dengan beberapa mode, seperti mode elektrik, mekanis, atau kombinasi keduanya, yang disesuaikan dengan kebutuhan operasional kapal guna mendapatkan performa optimal dan efisiensi bahan bakar terbaik. Penerapan sistem propulsi juga menghadapi berbagai tantangan teknis dan operasional, seperti kompleksitas integrasi sistem, kebutuhan infrastruktur pengisian baterai dan perawatan khusus sistem kelistrikan. Namun, dengan perencanaan yang tepat dan strategi operasional yang optimal, sistem propulsi berpotensi menjadi solusi teknologi yang mendukung keberlanjutan sektor maritim di Indonesia dan secara global.[8]

Sistem propulsi pada kapal menggabungkan dua atau lebih sumber energi yang berbeda untuk menggerakkan kapal. Biasanya, kombinasi yang umum digunakan melibatkan mesin pembakaran dalam (contohnya, diesel) dan motor listrik. Berikut adalah komponen utama dari sistem propulsi pada kapal:

a. Mesin Utama (Diesel atau Gas)

Mesin pembakaran dalam, seperti mesin diesel atau gas, berfungsi sebagai sumber daya utama untuk menghasilkan tenaga. Mesin ini dapat digunakan secara langsung untuk menggerakkan kapal atau sebagai generator untuk membangkitkan listrik.

b. Motor Listrik

Motor listrik digunakan sebagai sumber tenaga tambahan atau sebagai motor utama untuk menggerakkan propulsi kapal. Motor listrik ini dapat bekerja pada kecepatan tetap atau variabel, memberikan fleksibilitas dalam penggunaan energi.

c. Baterai atau Penyimpanan Energi

Baterai atau sistem penyimpanan energi lainnya digunakan untuk menyimpan energi yang dihasilkan dari sumber daya utama (seperti mesin diesel) atau dari regenerasi selama pelayaran. Baterai ini dapat memberikan tenaga tambahan pada saat diperlukan, seperti saat melakukan manuver kecepatan rendah atau saat memasuki zona larangan emisi.

d. Sistem Manajemen Energi (EMS)

Sistem Manajemen Energi (EMS) mengontrol distribusi energi antara mesin utama, motor listrik, dan baterai. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan energi, mengelola daya saat kapal beroperasi pada kondisi yang berbeda.

e. Propulsi Listrik

Sistem propulsi listrik terdiri dari motor listrik dan propulsi (seperti propeller atau thruster). Motor listrik mengubah energi listrik menjadi gerakan mekanis yang diperlukan untuk menggerakkan kapal.

f. Sistem Pengisian Daya (*Charging System*)

Sistem pengisian daya digunakan untuk mengisi baterai saat mesin utama beroperasi atau melalui energi regeneratif saat kapal bergerak di air. Sistem ini memastikan bahwa baterai selalu dalam kondisi siap digunakan.

g. Sistem Regeneratif

Sistem regeneratif memungkinkan kapal untuk menghasilkan energi listrik saat sedang bergerak, maupun ketika kapal melambat atau berhenti. Energi ini dapat diarahkan ke penyimpanan energi, seperti baterai, untuk digunakan di waktu kemudian.

h. Peralatan Sensor dan Kontrol Sensor dan sistem kontrol otomatis membantu memantau dan mengontrol kinerja seluruh sistem propulsi, termasuk

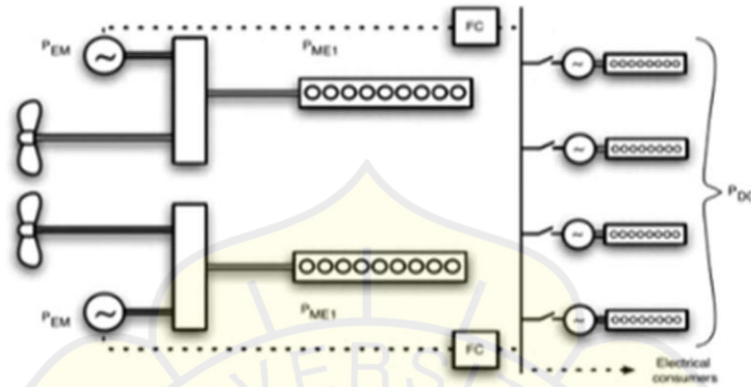
pengawasan kecepatan, beban mesin, tingkat pengisian baterai, dan kondisi operasional lainnya.

- i. Sistem Pemantauan Lingkungan Untuk mematuhi regulasi lingkungan, sistem propulsi pada kapal dapat dilengkapi dengan sensor untuk memantau emisi gas buang dan kinerja lingkungan lainnya.

Sistem propulsi pada kapal dapat memberikan keuntungan seperti penghematan bahan bakar, pengurangan emisi, dan fleksibilitas operasional yang lebih besar, terutama ketika kapal beroperasi di wilayah yang memiliki peraturan ketat terkait dengan emisi gas buang. Sistem propulsi hanya memiliki peningkatan efisiensi 1,2% akan tetapi tergantung profil operasional dari kapal tersebut (Kwasieckyj, 2013). Pada kapal patroli yang menggunakan sistem propulsi, ketika beroperasi pada kecepatan rendah menggunakan mode listrik dimana power disuplai menggunakan motor listrik. Sedangkan pada saat kapal beroperasi dengan kecepatan tinggi menggunakan mode mekanik dimana power disuplai menggunakan motor diesel utama. Ketika kapal beroperasi pada kecepatan menengah, sistem berjalan secara Power Take Off (PTO). Konsumsi bahan bakar terendah dapat dicapai dengan menggunakan sistem propulsi yang mengkombinasikan sistem propulsi mekanik (diesel mechanical propulsion) dan sistem propulsi listrik (*diesel electrical propulsion*).

Dengan meningkatnya regulasi lingkungan dan kebutuhan efisiensi energi di sektor maritim, sistem propulsi menjadi alternatif teknologi yang menjanjikan untuk mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan kinerja kapal secara ekonomis dan berkelanjutan.[9]

Sistem propulsi pada kapal dapat dibagi menjadi dua konfigurasi utama: seri dan paralel. Baik sistem seri maupun sistem paralel memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, tergantung pada aplikasi dan kondisi operasional kapal. Berikut adalah penjelasan singkat tentang kedua konfigurasi ini:



Gambar 2.4 Konfigurasi Sistem Propulsi Hybrid

Sumber: H. K. Prasetya, et al., 2016

2.5.1. Sistem Propulsi Energi Hybrid Seri

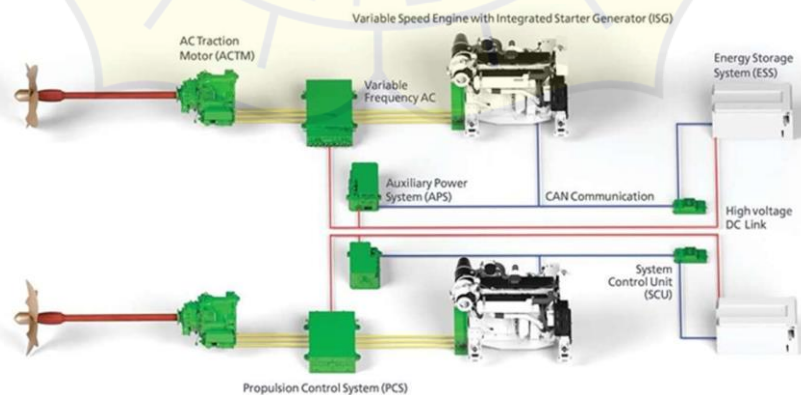
Sistem propulsi seri merupakan salah satu konfigurasi sistem propulsi yang menggabungkan mesin pembakaran internal dengan motor listrik secara seri. Dalam sistem ini, mesin pembakaran internal berfungsi hanya sebagai generator untuk menghasilkan listrik, yang kemudian menggerakkan motor listrik yang terhubung langsung ke baling-baling kapal. Sistem ini memungkinkan mesin pembakaran internal beroperasi pada kondisi optimal untuk menghasilkan listrik, meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi gas buang.

Keunggulan utama dari sistem propulsi seri adalah kemampuan untuk memisahkan sumber tenaga mekanis dan propulsi, sehingga sistem ini menawarkan fleksibilitas dalam pengaturan tenaga serta pengurangan emisi yang signifikan. Sistem ini sangat cocok untuk kapal dengan kebutuhan operasi yang beragam, seperti kapal feri, kapal patroli, dan kapal penumpang, yang sering beroperasi pada kecepatan variabel dan memerlukan manuver yang presisi.

Namun, sistem propulsi seri juga memiliki kekurangan seperti kompleksitas sistem dan kebutuhan perangkat kontrol canggih untuk mengelola aliran energi.

Selain itu, efisiensi total sistem bergantung pada kualitas dan kapasitas generator serta motor listrik yang digunakan, serta sistem penyimpanan energi seperti baterai dalam rangka mengakomodasi beban puncak dan operasi listrik saat mesin tidak menyala. Penelitian dan aplikasi di lapangan menunjukkan bahwa sistem ini dapat menurunkan konsumsi bahan bakar sekitar 20-30% dan mengurangi emisi NO_x dan SO_x secara signifikan dibandingkan dengan sistem propulsi mekanis konvensional. Sistem propulsi seri juga berpotensi meningkatkan kemampuan operasi kapal di zona lingkungan yang ketat tanpa harus mengorbankan performa. Dengan perkembangan teknologi baterai dan sistem manajemen energi, sistem propulsi seri semakin menarik untuk dijadikan solusi pada kapal masa depan yang mengedepankan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan. Pengembangan teknologi ini didukung oleh regulasi internasional yang mendorong pengurangan emisi di sektor maritim.

Pada sistem propulsi seri, mesin utama (biasanya mesin diesel) digunakan untuk menghasilkan listrik. Listrik yang dihasilkan oleh mesin utama digunakan untuk menggerakkan motor listrik, yang pada gilirannya menggerakkan propulsi kapal. Baterai atau penyimpanan energi lainnya dapat ditempatkan di antara mesin utama dan motor listrik untuk menyimpan energi tambahan atau mengoptimalkan kinerja sistem pada kondisi tertentu. Kelebihan Sistem ini adalah memberikan fleksibilitas dalam pengelolaan daya, memungkinkan penggunaan energi yang efisien pada berbagai kecepatan kapal. Cocok untuk aplikasi dimana variasi kecepatan dan kebutuhan daya bervariasi sangat signifikan.[10]



Gambar 2. 5 Sistem Propulsi Hybrid Seri

Sumber: seapowermagazine.org, diakses Oktober 2025

2.5.2. Sistem Propulsi Energi *Hybrid Paralel*

Sistem propulsi paralel adalah konfigurasi sistem propulsi yang menggabungkan mesin pembakaran internal dengan motor listrik yang keduanya dapat secara langsung menggerakkan poros propeler secara bersamaan atau bergantian. Dalam sistem ini, mesin diesel dan motor listrik bekerja paralel, yang memungkinkan kapal untuk beroperasi menggunakan salah satu atau keduanya tergantung pada kebutuhan daya dan kondisi operasional, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi energi.

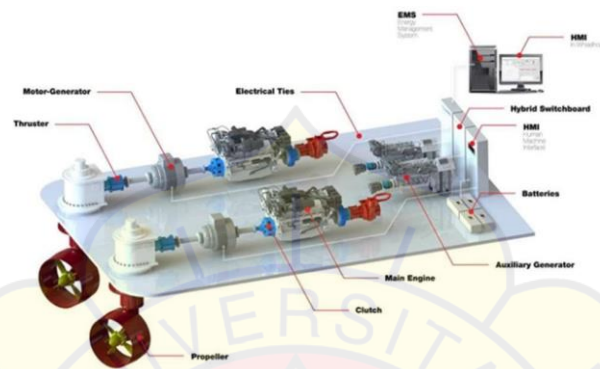
Kelebihan utama dari sistem propulsi paralel adalah kemampuan untuk memaksimalkan penggunaan tenaga listrik saat beban rendah atau pada operasi kecepatan rendah, serta memanfaatkan mesin pembakaran internal saat dibutuhkan tenaga penuh. Sistem ini memberikan peningkatan efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi gas buang, khususnya dalam fase operasional kapal yang sering mengalami perubahan kecepatan dan manuver kompleks seperti berlabuh atau berlayar di perairan terbatas.

Selain itu, konfigurasi paralel memungkinkan integrasi lebih mudah dengan sistem penyimpanan energi, seperti baterai, yang dapat mendukung operasi kapal secara elektrik selama periode tertentu tanpa menghidupkan mesin diesel. Hal ini penting untuk memenuhi regulasi lingkungan yang ketat serta mengurangi dampak polusi di kawasan pelabuhan dan perairan sensitif.

Namun, sistem propulsi paralel memiliki desain yang lebih kompleks dibandingkan dengan sistem konvensional, membutuhkan pengelolaan kontrol yang canggih agar kedua sumber tenaga dapat bekerja secara harmonis. Kendala teknis dan biaya investasi awal yang relatif tinggi juga menjadi tantangan dalam implementasi sistem ini pada kapal-kapal yang lebih kecil atau dengan pola operasi tertentu.

Pada sistem propulsi paralel, mesin utama dan motor listrik bekerja bersama sama untuk menggerakkan propulsi kapal secara paralel. Mesin utama dapat menggerakkan kapal secara langsung pada kecepatan tinggi, sementara motor listrik dapat menyediakan daya tambahan pada kecepatan rendah atau saat diperlukan. Baterai atau penyimpanan energi dapat digunakan untuk memberikan

tenaga tambahan pada saat tertentu atau untuk mengoptimalkan efisiensi operasional. Kelebihan dari sistem ini adalah menyediakan fleksibilitas dalam pengelolaan daya dan memberikan kemampuan untuk meningkatkan efisiensi pada kecepatan rendah atau saat kapal berlabuh. Sistem ini cocok digunakan untuk aplikasi dengan variasi beban daya yang signifikan.



Gambar 2. 6 Sistem Propulsi Hybrid Parallel

Sumber: aka-group.com, diakses Oktober 2025

Setiap konfigurasi sistem propulsi memiliki keunggulan dan kelemahan yang berbeda, yang sangat bergantung pada kebutuhan spesifik dan kondisi operasi kapal tersebut. Seiring dengan kemajuan teknologi dan pemahaman yang semakin mendalam tentang performa sistem propulsi, muncul berbagai inovasi dan variasi baru dalam desain sistem ini. Pilihan antara konfigurasi seri atau paralel akan sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti tipe kapal, rute pelayaran, serta persyaratan lingkungan yang berlaku.[11]

2.6. Emisi Gas Karbon

Emisi gas karbon mengacu pada keluaran gas yang mengandung karbon, terutama karbon dioksida (CO_2) dan karbon monoksida (CO), yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil pada sektor transportasi, termasuk kapal laut. CO_2 adalah gas rumah kaca utama yang berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim dengan meningkatkan efek rumah kaca di atmosfer. Karbon

monoksida (CO) merupakan gas beracun tanpa warna dan bau, yang juga termasuk polutan udara berbahaya.

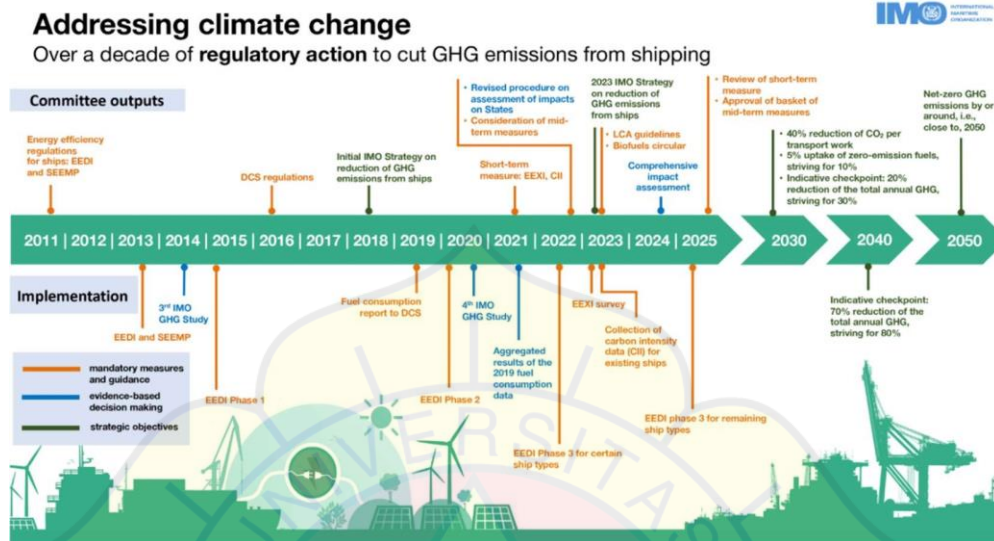
Selain CO₂ dan CO, emisi gas buang kapal juga mengandung nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_x), hidrokarbon (HC), dan partikel padat yang berdampak negatif pada kualitas udara dan kesehatan manusia. Di sektor pelayaran, emisi ini berasal dari pembakaran bahan bakar mesin kapal dan dapat melewati ambang batas polusi yang ditetapkan oleh regulasi lingkungan. Oleh karena itu, pengurangan emisi gas karbon menjadi prioritas penting dalam rangka memerangi pencemaran udara dan perubahan iklim global. Pengelolaan emisi gas karbon di sektor maritim juga mendukung inisiatif *green shipping* yang menargetkan efisiensi energi dan penggunaan bahan bakar rendah sulfur untuk menurunkan jejak karbon kapal demi keberlanjutan lingkungan laut dan atmosfer global.[12]

2.7. Standar dan Regulasi

Standar emisi gas karbon pada kapal diatur secara global melalui International *Maritime Organization* (IMO) dalam konvensi MARPOL Annex VI yang mengatur tentang pengendalian polusi udara dari kapal. Beberapa regulasi terbaru yang berlaku mulai 2025-2027 di antaranya adalah amandemen MARPOL Annex VI terkait *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) dan Carbon Intensity Indicator (CII) yang mewajibkan kapal-kapal untuk memenuhi standar efisiensi energi dan batas emisi CO₂. Kapal dengan tonase di atas 5.000 GT wajib menyusun dan melaporkan Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) dan data terkait intensitas karbon. Regulasi lain adalah pedoman penerapan sistem Selective Catalytic Reduction (SCR) untuk mengurangi emisi nitrogen oksida (NO_x) yang juga berkontribusi pada pencemaran udara.

Pengawasan dan evaluasi regulasi ini dilakukan secara berkala dengan kemungkinan penyesuaian agar target pengurangan emisi sesuai dengan strategi IMO untuk mengurangi gas rumah kaca dari sektor pelayaran, dengan target *zero-emission* pada tahun 2050. Indikator capaian untuk mencapai *zero emission* gas rumah kaca (GRK) sebagaimana disebutkan dalam 2023 IMO *GHG Strategy* antara lain, pengurangan total emisi GRK tahunan dari pelayaran internasional setidaknya

sebesar 20%, dengan upaya mencapai 30%, pada tahun 2030 dan total emisi GRK tahunan dari pelayaran internasional setidaknya sebesar 70%, dengan upaya mencapai 80%, pada tahun 2040 dengan *baseline* tahun 2008. [13]



Gambar 2. 7 Roadmap zero emisi IMO 2023

Sumber: imo.org, diakses Februari 2026

Di tingkat nasional, Indonesia memiliki Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 1 Tahun 2025 tentang Tata Cara Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon Sektor Kelautan yang mendukung implementasi perdagangan karbon, serta pengukuran, pelaporan, dan verifikasi emisi gas rumah kaca di sektor kelautan. Regulasi ini sejalan dengan Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon.

Selain itu, mulai 2028 akan diterapkan pajak karbon untuk kapal yang tidak menggunakan bahan bakar rendah karbon sebagai insentif pengurangan emisi di sektor pelayaran. Regulasi ini bertujuan mendorong transisi ke teknologi propulsi ramah lingkungan seperti sistem propulsi dan bahan bakar alternatif.[14]

2.8. Manfaat dan potensi penggunaan sistem pada kapal penumpang

Penggunaan sistem propulsi pada kapal penumpang memberikan manfaat signifikan karena mampu mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 30% serta menurunkan emisi karbon dioksida hingga 25%, karena sistem ini mengoptimalkan

penggunaan mesin diesel dan motor listrik yang dapat beroperasi secara bergantian sesuai kebutuhan operasional kapal.

Selain itu, sistem memanfaatkan energi regeneratif saat pengereman kapal yang disimpan dalam baterai, sehingga meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Fleksibilitas operasional juga menjadi keunggulan utama, di mana kapal dapat berlayar dalam mode listrik saat kecepatan rendah atau di pelabuhan guna mengurangi polusi udara sekaligus beroperasi dengan tenaga mesin diesel saat diperlukan daya besar. Manfaat lainnya adalah peningkatan keberlanjutan sektor maritim yang mendukung implementasi *green shipping*, di mana pengurangan jejak karbon dan konsumsi bahan bakar fosil menjadi hal krusial untuk menjaga kelestarian lingkungan laut dan atmosfer global.

Potensi pengembangan teknologi yang lebih maju seperti integrasi bahan bakar alternatif, termasuk hidrogen dan sel bahan bakar, juga membuka peluang untuk menekan emisi karbon lebih jauh, sehingga sistem propulsi tidak hanya menawarkan efisiensi ekonomi, tetapi juga menjadi solusi strategis dalam menghadapi regulasi emisi yang semakin ketat dan tantangan perubahan iklim global.[15]

2.9. Keuntungan dan Tantangan Sistem Propulsi Hybrid

Penerapan sistem propulsi pada kapal merupakan salah satu inovasi teknologi yang berkembang pesat seiring dengan meningkatnya tuntutan efisiensi energi dan pengurangan emisi gas buang di sektor pelayaran. Sistem propulsi mengombinasikan dua atau lebih sumber energi, umumnya mesin diesel dan motor listrik, sehingga memungkinkan kapal beroperasi secara lebih fleksibel sesuai dengan kebutuhan daya dan kondisi operasional.

2.9.1. Keuntungan Sistem Propulsi Hybrid

1. Efisiensi Energi

Sistem propulsi dapat mengoptimalkan penggunaan bahan bakar dengan memanfaatkan kombinasi sumber energi. Misalnya, mesin diesel dapat

berfungsi pada beban penuh, sementara motor listrik dapat digunakan pada kondisi beban rendah.

2. Pengurangan Emisi

Dengan menggunakan motor listrik, sistem ini dapat secara signifikan mengurangi emisi gas buang, terutama CO₂ dan NO_x. Ini sangat penting dalam memenuhi regulasi lingkungan yang semakin ketat.

3. Pengurangan Biaya Operasional

Efisiensi bahan bakar yang lebih baik berujung pada pengurangan biaya operasional. Meskipun biaya awal investasi mungkin tinggi, penghematan jangka panjang dapat sangat menguntungkan.

4. Fleksibilitas Operasional

Sistem dapat beroperasi secara fleksibel di berbagai kondisi, memungkinkan kapal untuk beralih antara sumber energi sesuai kebutuhan. Ini juga termasuk kemampuan untuk beroperasi dalam mode silent (senyap), yang bermanfaat di area sensitif lingkungan.

5. Dukungan Untuk Energi Terbarukan:

Sistem ini dapat diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan, seperti panel surya atau turbin angin, untuk lebih mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.[16]

2.9.2. Tantangan Sistem Propulsi Hybrid

1. Biaya Investasi Awal yang Tinggi

Meskipun ada penghematan jangka panjang, biaya awal untuk pengadaan dan instalasi sistem propulsi bisa sangat tinggi. Ini dapat menjadi penghalang bagi banyak operator kapal, terutama yang memiliki anggaran terbatas.

2. Keterbatasan Infrastruktur

Tidak semua pelabuhan memiliki infrastruktur yang diperlukan untuk mendukung sistem propulsi, seperti stasiun pengisian baterai. Ini dapat membatasi fleksibilitas operasi kapal.

3. Kompleksitas Sistem

Sistem propulsi lebih kompleks dibandingkan dengan sistem konvensional. Ini memerlukan pelatihan khusus bagi kru dan teknisi untuk mengoperasikan dan memelihara sistem ini dengan baik.

4. Regulasi dan Standar

Meskipun ada dorongan untuk teknologi ramah lingkungan, regulasi yang ada mungkin belum sepenuhnya mendukung atau mengakui sistem propulsi, yang dapat mempengaruhi implementasinya.

5. Keterbatasan Teknologi Baterai

Kapasitas dan efisiensi baterai masih menjadi tantangan dalam sistem. Masalah seperti waktu pengisian, usia pakai, dan pengaruh lingkungan terhadap performa baterai perlu diperhatikan.[17]

2.10. Dampak Emisi Gas Karbon Terhadap Lingkungan

Emisi gas karbon, terutama karbon dioksida (CO₂), memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan dan kehidupan di Bumi. Salah satu dampak terpenting dari emisi ini adalah perubahan iklim, yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Gas-gas tersebut menjebak panas, sehingga menyebabkan pemanasan global yang memicu perubahan pola cuaca dan fenomena cuaca ekstrem. Akibatnya, kenaikan suhu global menyebabkan pencairan es di kutub dan gletser, yang berkontribusi pada kenaikan permukaan air laut. Fenomena ini mengancam wilayah pesisir dengan banjir, merusak habitat, dan mengancam kehidupan manusia serta ekosistem. Selain itu, perubahan iklim juga berdampak pada kehilangan keanekaragaman hayati. Banyak spesies fauna dan flora yang tidak mampu beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lingkungan ini, yang mengarah pada kepunahan dan penurunan keanekaragaman hayati.

Dampak lain dari emisi gas karbon adalah asidifikasi lautan, di mana sekitar sepertiga dari CO₂ yang dipancarkan ke atmosfer diserap oleh lautan, mengakibatkan penurunan pH air laut. Proses ini memberikan dampak negatif yang besar pada organisme laut, seperti terumbu karang dan moluska, yang kesulitan dalam membangun cangkang dan kerangka. Selain dampak lingkungan, emisi gas karbon juga memiliki konsekuensi serius bagi kesehatan manusia. Kualitas udara

yang buruk, yang sering kali terkait dengan emisi gas ini, dapat memicu berbagai masalah kesehatan, termasuk penyakit pernapasan, jantung, dan kanker. Peningkatan suhu juga berdampak pada kesehatan masyarakat, meningkatkan risiko heat stroke dan penyakit terkait panas.

Lebih jauh lagi, perubahan iklim dapat mengganggu ekosistem alami, mengubah interaksi antara spesies, dan mempengaruhi distribusi organisme. Dampak ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam rantai makanan serta mengganggu fungsi ekosistem yang penting bagi kehidupan manusia. Selain itu, dampak sosial dan ekonomi dari emisi gas karbon tidak dapat diabaikan. Perubahan iklim dapat mengganggu sektor-sektor penting seperti pertanian dan perikanan, yang berdampak pada ketahanan pangan dan mata pencaharian masyarakat. Wilayah yang paling rentan, terutama negara-negara berkembang, sering kali menghadapi tantangan yang lebih besar dalam menghadapi dampak ini. Oleh karena itu, mengurangi emisi gas karbon menjadi sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem, melindungi keanekaragaman hayati, dan memastikan masa depan yang berkelanjutan bagi generasi mendatang. Upaya untuk menurunkan emisi, seperti adopsi teknologi ramah lingkungan dan sistem propulsi, merupakan langkah penting dalam menghadapi tantangan ini dan menciptakan dunia yang lebih baik.[18]

2.11. Teknologi *Smart Ship*

Teknologi, atau kapal pintar, merupakan inovasi terbaru dalam industri perkapalan yang memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan efisiensi operasional, keselamatan, dan keberlanjutan. Konsep melibatkan integrasi berbagai sistem canggih, termasuk Internet of Things (IoT), big data, dan kecerdasan buatan (AI), untuk mengumpulkan dan menganalisis data secara real-time. Dengan sensor yang terpasang di berbagai bagian kapal, data mengenai kinerja mesin, kondisi cuaca, dan lingkungan laut dapat dipantau secara terus-menerus. Informasi ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat, seperti pengoptimalan rute pelayaran untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca. Selain itu, teknologi juga meningkatkan

keselamatan dengan memberikan peringatan dini terhadap potensi bahaya, seperti cuaca buruk atau kerusakan sistem, sehingga kru dapat mengambil tindakan preventif yang tepat.

Keberadaan sistem otomatisasi dan kontrol yang canggih juga membantu dalam pengelolaan operasi sehari-hari kapal, mengurangi beban kerja kru dan meningkatkan efisiensi manajemen. Selain itu, teknologi dapat terhubung dengan infrastruktur pelabuhan dan sistem logistik lainnya, memungkinkan pertukaran informasi yang lebih baik dan pengelolaan rantai pasokan yang lebih efisien. Kapal pintar juga berpotensi untuk beroperasi dalam mode , di mana sistem propulsi dapat diintegrasikan dengan teknologi ini untuk meningkatkan keberlanjutan.

Dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, serta memanfaatkan data untuk mengoptimalkan penggunaan energi, kapal pintar dapat berkontribusi pada pengurangan emisi gas karbon dan dampak lingkungan lainnya. Secara keseluruhan, teknologi bukan hanya meningkatkan efisiensi dan keselamatan, tetapi juga berperan penting dalam transformasi industri perkapalan menuju praktik yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan, menjadikannya sebagai solusi vital dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim dan polusi.[19]

2.12. Tren dan Inovasi dalam teknologi propulsi

Tren dan inovasi dalam teknologi propulsi kapal semakin berkembang seiring dengan kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan dari industri perkapalan. Salah satu tren utama adalah pergeseran menuju penggunaan sumber energi alternatif, seperti gas alam cair (LNG), yang menawarkan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil tradisional.

Selain itu, penggunaan teknologi hidrogen sebagai bahan bakar juga mulai mendapatkan perhatian, dengan penelitian yang fokus pada pengembangan sel bahan bakar hidrogen yang dapat memberikan energi bersih tanpa emisi karbon. Di samping itu, inovasi dalam teknologi penyimpanan energi, seperti baterai lithium-

ion dan superkapasitor, memungkinkan kapal untuk mengoperasikan sistem propulsi yang lebih efisien, yang memadukan mesin konvensional dengan sumber daya terbarukan.

Penerapan sistem manajemen energi yang canggih juga menjadi fokus utama, di mana teknologi digital dan IoT digunakan untuk memantau dan mengoptimalkan konsumsi energi secara real-time. Dengan adanya sensor dan perangkat lunak analitik, operator kapal dapat membuat keputusan yang lebih baik terkait pemanfaatan energi, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya.

Selain itu, kapal-kapal baru semakin dilengkapi dengan teknologi otomatisasi dan kontrol yang canggih, memungkinkan operasi yang lebih aman dan efisien. Inovasi dalam desain hidrodinamik kapal juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi propulsi, dengan fokus pada pengurangan hambatan air dan peningkatan kinerja keseluruhan. Secara keseluruhan, tren dan inovasi ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi kapal, tetapi juga untuk memenuhi tuntutan global akan solusi yang lebih ramah lingkungan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan polusi, menjadikan industri perkapalan lebih berkelanjutan di masa depan.[20]

2.13. Dampak Sosial dan Ekonomi dari Penerapan Teknologi Hybrid

Penerapan teknologi dalam industri perkapalan membawa dampak sosial dan ekonomi yang signifikan, seiring dengan upaya untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Secara sosial, adopsi sistem propulsi dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat, terutama di daerah pesisir yang sering terpengaruh oleh polusi dari kapal konvensional.

Dengan mengurangi emisi dan kebisingan, teknologi ini berkontribusi pada lingkungan yang lebih bersih dan sehat, sehingga meningkatkan kenyamanan hidup masyarakat. Selain itu, pengembangan dan penerapan teknologi ini juga membuka peluang kerja baru dalam sektor teknologi ramah lingkungan, seperti produksi,

instalasi, dan pemeliharaan sistem propulsi , yang dapat mendorong pertumbuhan ekonomi lokal dan nasional.

Di sisi ekonomi, meskipun biaya awal untuk investasi dalam teknologi sering kali lebih tinggi, penghematan jangka panjang yang dihasilkan dari efisiensi bahan bakar dan pengurangan biaya operasional dapat memberikan manfaat ekonomi yang signifikan bagi operator kapal. Dengan meningkatnya efisiensi, perusahaan dapat mengalokasikan sumber daya yang lebih baik dan meningkatkan profitabilitas. Selain itu, penerapan teknologi berpotensi untuk menarik investasi asing dan domestik, mendukung pengembangan infrastruktur baru yang diperlukan untuk mendukung teknologi ini, serta memperkuat daya saing industri perkapalan di pasar global.

Namun, untuk mencapai dampak positif ini, penting bagi pemerintah dan pemangku kepentingan lainnya untuk mendukung transisi tersebut melalui kebijakan dan insentif yang tepat, serta pendidikan dan pelatihan untuk mempersiapkan tenaga kerja menghadapi perubahan teknologi. Dengan demikian, teknologi tidak hanya berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan, tetapi juga menjadi pendorong pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup masyarakat. [15]

2.14. Studi Komparatif Kapal Penumpang dengan Sistem Propulsi *Hybrid*

Studi komparatif kapal penumpang dengan sistem propulsi berfokus pada analisis dan perbandingan antara kapal penumpang tradisional yang menggunakan mesin diesel konvensional dan kapal yang dilengkapi dengan sistem propulsi , yang menggabungkan mesin diesel dengan motor listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kedua jenis kapal dalam berbagai aspek, seperti efisiensi bahan bakar, emisi gas rumah kaca, biaya operasional, dan kenyamanan penumpang.

Kapal penumpang dengan sistem propulsi menawarkan sejumlah keuntungan signifikan. Pertama, penggunaan motor listrik memungkinkan kapal untuk beroperasi dengan lebih efisien di pelabuhan dan pada kecepatan rendah,

mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi selama fase-fase tersebut. Kedua, sistem penyimpanan energi, seperti baterai, dapat diisi ulang menggunakan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya, yang lebih ramah lingkungan. Hasil dari studi ini sering menunjukkan bahwa kapal dapat mengurangi emisi CO₂ dan polutan lainnya secara signifikan dibandingkan dengan kapal diesel konvensional.

Dalam hal biaya operasional, meskipun investasi awal untuk kapal mungkin lebih tinggi, penghematan jangka panjang dari pengurangan konsumsi bahan bakar dan biaya pemeliharaan sering kali dapat menutupi perbedaan tersebut. Selain itu, kapal penumpang dengan sistem propulsi dapat meningkatkan pengalaman penumpang dengan mengurangi kebisingan dan getaran, menciptakan lingkungan yang lebih nyaman selama perjalanan.

Studi ini juga mempertimbangkan dampak regulasi dan kebijakan lingkungan yang semakin ketat, yang mendorong industri pelayaran untuk beralih ke teknologi yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, studi komparatif ini tidak hanya memberikan gambaran tentang manfaat teknis dan ekonomi dari sistem propulsi, tetapi juga menyoroti peran pentingnya dalam transisi menuju praktik pelayaran yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. [21]

2.15. Analisis Risiko dan Keamanan dalam Sistem *Hybrid*

Analisis risiko dan keamanan dalam sistem propulsi sangat penting untuk memastikan bahwa kapal dapat beroperasi dengan aman dan efisien. Sistem, yang menggabungkan mesin diesel konvensional dengan sistem propulsi listrik, menghadirkan sejumlah tantangan dan potensi risiko yang perlu diidentifikasi dan dikelola dengan baik. Salah satu risiko utama adalah kemungkinan kegagalan sistem, baik pada komponen mesin diesel maupun motor listrik. Kegagalan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti keausan mekanis, masalah pada sistem penyimpanan energi, atau kesalahan dalam perangkat lunak kontrol. Oleh karena itu, pemeliharaan yang rutin dan pemeriksaan berkala sangat penting untuk mencegah masalah ini.

Selain itu, risiko kebakaran atau ledakan juga menjadi perhatian, terutama terkait dengan penyimpanan dan penggunaan baterai lithium-ion yang sering digunakan dalam sistem propulsi . Kegagalan dalam sistem manajemen baterai dapat mengakibatkan overheating atau kerusakan yang parah, sehingga memerlukan prosedur keamanan yang ketat dan pelatihan kru untuk menangani situasi darurat. Keamanan siber juga merupakan aspek kritis, mengingat kapal modern semakin terhubung dengan jaringan digital. Serangan siber dapat mengganggu sistem kontrol dan navigasi, yang dapat menyebabkan kecelakaan atau kerugian besar. Oleh karena itu, implementasi protokol keamanan siber yang kuat dan pelatihan untuk awak kapal mengenai potensi ancaman cyber sangat penting.

Dari perspektif regulasi, banyak otoritas maritim kini menetapkan standar yang lebih ketat untuk kapal-kapal yang menggunakan teknologi . Kapal harus memenuhi kriteria keselamatan tertentu dan menjalani audit untuk memastikan bahwa semua sistem berfungsi dengan baik. Dengan demikian, analisis risiko dan keamanan dalam sistem propulsi tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mencakup pelatihan, regulasi, dan pengelolaan risiko secara menyeluruh untuk memastikan keselamatan dan keandalan operasional kapal.[22]

2.16. Kriteria mengenai Emisi Sistem Propulsi *Hybrid*

Kriteria emisi pada jarak yang sama dengan daya yang sama mengacu pada perbandingan tingkat emisi gas buang (seperti CO₂, NO_x, SO_x) dari sistem propulsi versus konvensional diesel, di mana kapal menempuh jarak identik dengan output daya propulsi yang sama. Dalam kondisi ini, unggul karena efisiensi termal lebih tinggi melalui optimalisasi load antara sumber energi diesel dan listrik, sehingga konsumsi bahan bakar fosil berkurang meskipun total daya tetap konstan.

Pada operasi steady-state (jarak dan daya fixed), sistem mengurangi emisi hingga 20-40% dibanding diesel murni, terutama pada partial load di mana diesel konvensional kurang efisien, sementara motor listrik beroperasi mendekati peak efficiency.

Faktor Penentu Kriteria Emisi

- Efisiensi Load Sharing: *Hybrid* membagi daya antara diesel (efisien >70% load) dan baterai/listrik (efisien 90-95% pada partial load), minimalkan Specific Fuel Consumption (SFC) per kWh output.
- Mode Operasi: Pada jarak sama (misalnya 100 NM), *switch* ke *electric* mode untuk *manuver* rendah daya, kurangi emisi CO₂ secara proporsional tanpa ubah total *power demand*.
- Metrik Pengukuran: Emisi dihitung sebagai gram CO₂ per nautical mile (gCO₂/NM) atau per kWh, dengan lebih rendah karena *lower fuel* input untuk daya *equivalent*.

Lebih dari 80% pengangkutan barang dan penumpang melalui transportasi laut. Sektor transportasi ini bertanggung jawab lebih dari 30% emisi CO₂ dan sekitar 3 -4% emisi CO₂ ini telah berdampak terhadap manusia. Pengurangan tingkat emisi gas buang (NO_x, SO_x, CO₂) sektor transportasi laut sebagaimana ketentuan IMO (International Maritime Organization) terus digalakan melalui pengembangan sistem propulsi dengan sumber energi yang diperlukan. Pengembangan konfigurasi sistem propulsi diesel-listrik, khususnya pengembangan dimensi dan berat peralatan kelistrikan (baterai, sel bahan bakar dan kapasitor) terus dioptimalisasi. Teknologi ini selain dapat mengurangi konsumsi bahan bakar, dapat pula diyakini mengurangi polusi udara dan emisi gas buang. [15]

2.17. Batasan Emisi Karbon Menurut MARPOL

Batasan emisi karbon yang diizinkan berdasarkan aturan MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) mengatur batas maksimum emisi gas rumah kaca, termasuk CO₂, yang dihasilkan kapal selama operasinya. MARPOL Annex VI menetapkan standar efisiensi energi kapal dan batas emisi untuk mengurangi dampak lingkungan dari sektor pelayaran internasional. Salah satu regulasi utama adalah Energy Efficiency Design Index (EEDI), yang mengatur batas emisi CO₂ per kapasitas angkut tertentu untuk kapal

baru, dengan target penurunan emisi secara bertahap dari tahun ke tahun. Selain itu, MARPOL juga mengatur batas konsentrasi maksimum NO_x dan SO_x dari pembakaran bahan bakar. Mulai 2023-2025 dan seterusnya, MARPOL semakin memperketat batas emisi CO₂ dengan target penurunan total emisi karbon di sektor pelayaran sampai 40% pada 2030 dibandingkan dengan level 2008, dan net zero emissions pada tahun 2050. Kapal yang melebihi batas emisi akan dikenakan sanksi atau denda sesuai mekanisme nasional yang sudah diadopsi oleh banyak negara, termasuk mekanisme perdagangan karbon.

Di Indonesia, pemerintah menerapkan batas teknis emisi karbon melalui regulasi nasional yang mengacu pada ketentuan MARPOL dan target pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK), dengan batas emisi CO₂ dalam ton per MWh untuk sektor pembangkit bahkan diterapkan untuk kapal yang menghasilkan emisi dengan sistem kuota dan perdagangan karbon. Hal ini juga berlaku bagi kapal melalui mekanisme pengukuran emisi per rute sesuai norma IMO EEDI dan CII (Carbon Intensity Indicator).[23]

