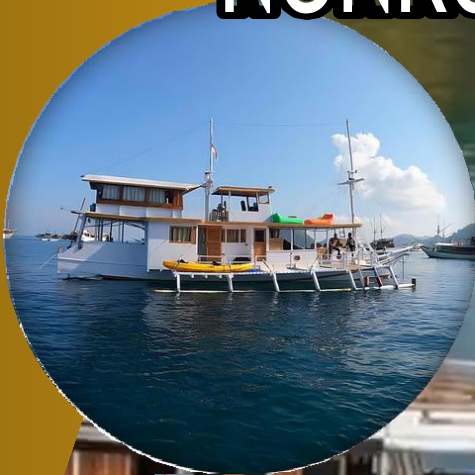


PENGANTAR KAPAL NONKONVENSIOAL



Wihdat Djafar

Wihdat Djafar

PENGANTAR KAPAL NONKONVENSIONAL



PENGANTAR KAPAL NONKONVENSIONAL

Penulis : **Wihdat Djafar**

Penyunting : **Marwati**

Tata sampul : **Wahdana**

Tata isi : **Arajmi**

Cetakan Pertama, **Oktober 2024**

ISBN **978-623-89432-6-5**

Penerbit **Professorline**

🌐 Jl. Dg. Ngadde Raya, Parangtambung, Makassar,
Sulawesi Selatan, Indonesia

✉ professorline123@gmail.com
adminbook@professorline.com

☎ +62 851-9154-7225

🌐 www.professorline.com

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang.

Dilarang mengutip dan memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku
baik secara elektronik maupun mekanik tanpa izin tertulis

Penerbit Professorline.

KATA PENGANTAR

Dalam era yang semakin kompleks dan dinamis ini, teknologi kapal nonkonvensional telah menjadi elemen penting dalam industri maritim. Buku “Pengantar Kapal Nonkonvensional” ini hadir sebagai panduan komprehensif yang menggabungkan teori dasar dengan praktik kontemporer dalam desain dan operasional kapal nonkonvensional. Karya ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan para praktisi, akademisi, dan mahasiswa yang ingin memahami secara mendalam seluk-beluk kapal nonkonvensional dari perspektif yang holistik dan *up-to-date*.

Dimulai dari pengenalan dasar tentang definisi dan sejarah kapal nonkonvensional, buku ini membawa pembaca melalui perjalanan yang menyeluruh dalam dunia teknologi maritim. Kami mengeksplorasi berbagai klasifikasi kapal, mulai dari desain lambung hingga sistem propulsi, serta membahas regulasi dan standar internasional yang relevan. Pembahasan tentang pentingnya kapal nonkonvensional dalam industri maritim modern menjadi bagian integral dari buku ini, menggarisbawahi peran strategis teknologi ini dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan.

Buku ini juga menyajikan pembahasan mendalam tentang prinsip-prinsip desain, keunggulan, dan tantangan yang dihadapi oleh kapal nonkonvensional. Kami meyakini bahwa pemahaman yang kuat tentang aspek-aspek ini sangat penting dalam mengoptimalkan performa kapal dan operasional maritim secara keseluruhan. Selanjutnya, kami membahas tren perkembangan teknologi dan inovasi terbaru dalam desain dan operasional kapal nonkonvensional, memberikan wawasan tentang bagaimana teknologi ini dapat diterapkan secara efektif di berbagai sektor maritim.

Salah satu keunggulan buku ini adalah pembahasan tentang berbagai jenis kapal nonkonvensional seperti monohull, multihull, *hydrofoil*, dan hovercraft. Kami juga memberikan perhatian khusus pada aspek regulasi dan standar internasional, mengakui bahwa kepatuhan terhadap regulasi

adalah fondasi dari praktik maritim yang baik. Setiap bab dilengkapi dengan soal latihan yang dirancang untuk memperdalam pemahaman dan merangsang pemikiran kritis. Kami juga menyertakan studi kasus dan contoh praktis untuk membantu pembaca menghubungkan teori dengan penerapan di dunia nyata.

Akhir kata, kami berharap buku ini dapat menjadi sumber pengetahuan yang berharga bagi siapa pun yang terlibat atau tertarik dalam teknologi kapal nonkonvensional. Semoga karya ini dapat memberikan kontribusi positif dalam meningkatkan praktik maritim di Indonesia dan mendorong inovasi serta keunggulan dalam desain dan operasional kapal di berbagai sektor. Kami mengundang pembaca untuk memulai perjalanan pembelajaran ini dan menemukan wawasan baru yang dapat diterapkan dalam karir dan organisasi mereka.

Makassar, Oktober 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB I GAMBARAN UMUM	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Definisi Kapal Nonkonvensional	3
1.3 Sejarah Singkat Perkembangan Kapal Nonkonvensional	6
1.4 Pentingnya Kapal Nonkonvensional dalam Industri Maritim Modern	11
1.5 Klasifikasi Umum Kapal Nonkonvensional	22
1.5.1 Klasifikasi Berdasarkan Desain Lambung	22
1.5.2 Klasifikasi Berdasarkan Sistem Propulsi	26
1.5.3 Klasifikasi Berdasarkan Prinsip Operasional	29
1.5.4 Klasifikasi Berdasarkan Fungsi Khusus	32
1.6 Regulasi dan Standar Internasional untuk Kapal Nonkonvensional	36
1.6.1 Kerangka Regulasi Internasional	36
1.6.2 Peran Badan Klasifikasi	39
1.6.3 Regulasi untuk Kapal Otonom	39
1.6.4 Standar Lingkungan	40
1.6.5 Tantangan dan Perkembangan Masa Depan	40
1.7 Tren Perkembangan Teknologi Kapal Nonkonvensional	41
1.8 Soal Latihan	51
1.9 Kesimpulan	52
BAB II KONSEP DASAR KAPAL NONKONVENSIONAL	55
2.1 Pendahuluan	55
2.2 Perbedaan antara Kapal Konvensional dan Nonkonvensional	57
2.3 Prinsip-prinsip Desain Kapal Nonkonvensional	61
2.4 Keunggulan dan Tantangan Kapal Nonkonvensional	66
2.4.1 Keunggulan Kapal Nonkonvensional	66
2.4.2 Tantangan Kapal Nonkonvensional	70
2.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Performa Kapal Nonkonvensional ..	74
2.6 Metode Analisis dan Pengujian Khusus untuk Kapal Nonkonvensional ...	81

2.7	Konsiderasi Lingkungan dan Efisiensi Energi	90
2.8	Potensi Aplikasi di Berbagai Sektor Maritim	96
2.9	Soal Latihan.....	100
2.10	Kesimpulan	101
BAB III KAPAL MONOHULL NONKONVENSIONAL		105
3.1	Pendahuluan	105
3.2	<i>Round Bilge Semi-Displacement Hull</i>	106
3.2.1	Karakteristik Desain.....	106
3.2.2	Performa Hidrodinamika.....	110
3.2.3	Aplikasi dan Contoh Kapal	117
3.3	<i>Planing Hull</i>	121
3.3.1	Prinsip <i>Planning</i>	122
3.3.2	Desain <i>Hull Planning</i>	122
3.3.3	Dinamika <i>Planning</i>	123
3.3.4	Contoh Kapal <i>Planning</i>	124
3.4	Perbandingan Kinerja dan Aplikasi	125
3.5	Inovasi dalam Desain <i>Monohull</i> Nonkonvensional.....	133
3.6	Tantangan dan Solusi dalam Operasi <i>Monohull</i> Nonkonvensional.....	136
3.7	Soal Latihan.....	139
3.8	Kesimpulan	140
BAB IV KAPAL <i>MULTIHULL</i>		143
4.1	Pendahuluan	143
4.2	<i>Catamaran</i>	144
4.2.1	Prinsip Desain <i>Catamaran</i>	145
4.2.2	Konfigurasi <i>Hull Catamaran</i>	145
4.2.3	Stabilitas dan <i>Seakeeping Catamaran</i>	146
4.2.4	Aplikasi Komersial dan Militer	147
4.3	<i>Small Waterplane Area Twin Hull Ship (SWATH)</i>	147
4.4	Analisis Komparatif <i>Catamaran</i> dan <i>SWATH</i>	151
4.5	Trimaran dan Konfigurasi <i>Multihull</i> Lainnya	155
4.6	Desain Sistem Propulsi untuk Kapal <i>Multihull</i>	162
4.6.2	Jenis Sistem Propulsi untuk Kapal <i>Multihull</i>	163
4.6.2	Optimalisasi Propulsi untuk Kapal <i>Multihull</i>	165

4.6.3 Inovasi Terbaru dalam Propulsi <i>Multihull</i>	166
4.7 Manajemen Stabilitas dan Trim pada <i>Multihull</i>	168
4.8 Soal Latihan.....	171
4.9 Kesimpulan	172
BAB V KAPAL <i>HYDROFOIL</i>	175
5.1 Pendahuluan	175
5.2 <i>Deeply Submerged Hydrofoil</i>	176
5.2.1 Prinsip Kerja	176
5.2.2 Desain <i>Foil</i> dan <i>Strut</i>	178
5.2.3 Sistem Kontrol dan Stabilisasi.....	181
5.3 <i>Surface Piercing Hydrofoil</i>	184
5.3.1 Karakteristik Operasional	184
5.3.2 Performa <i>Take-off</i> dan <i>Landing</i>	186
5.3.3 Desain <i>Hull</i> dan <i>Foil</i>	188
5.3.4 Tantangan dan Solusi dalam Pengembangan <i>Surface Piercing Hydrofoil</i>	189
5.3.5 Aplikasi dan Perkembangan Terkini.....	192
5.4 Perbandingan Kinerja dan Aplikasi <i>Hydrofoil</i>	194
5.4.1 Perbandingan Kinerja	194
5.4.2 Aplikasi <i>Hydrofoil</i>	198
5.5 Sistem Propulsi untuk Kapal <i>Hydrofoil</i>	201
5.5.1 Jenis-Jenis Sistem Propulsi	202
5.5.2 Pertimbangan Desain Khusus.....	203
5.5.3 Perkembangan Terbaru dalam Teknologi Propulsi.....	205
5.6 Tantangan dalam Pemeliharaan dan Operasi <i>Hydrofoil</i>	207
5.6.1 Tantangan Struktural dan Material	207
5.6.2 Tantangan Sistem Kontrol dan Elektronik	208
5.6.3 Tantangan Operasional	209
5.6.4 Tantangan Pemeliharaan dan Logistik.....	210
5.7 Perkembangan Terbaru dalam Teknologi <i>Hydrofoil</i>	211
5.8 Soal Latihan.....	214
5.9 Kesimpulan	215
BAB VI <i>HOVERCRAFT</i> DAN KAPAL BERBANTALAN UDARA	219

6.1 Pendahuluan	219
6.2 <i>Surface Effect Ship</i> (SES)	221
6.2.1 Prinsip Operasi SES	222
6.2.2 Sistem Bantalan Udara	223
6.2.3 Desain <i>Hull</i> dan <i>Skirting</i>	224
6.2.4 Performa di Berbagai Kondisi Laut	228
6.3 <i>Air Cushion Vehicle</i> (ACV)	231
6.3.1 Konsep Dasar ACV	231
6.3.2 Sistem <i>Lift</i> dan Propulsi	232
6.3.3 Manuverabilitas dan Kontrol	234
6.3.4 Aplikasi Khusus ACV	236
6.4 Analisis Komparatif SES dan ACV	239
6.4.1 Prinsip Operasi dan Desain	240
6.4.2 Performa dan Efisiensi	242
6.4.3 Aplikasi dan Fleksibilitas Operasional	244
6.4.4 Tantangan Teknis dan Operasional	246
6.4.5 Perkembangan Teknologi dan Prospek Masa Depan	247
6.5 Desain Sistem Bantalan Udara	248
6.5.1 Komponen Utama	249
6.5.2 Pertimbangan Desain dan Optimalisasi	251
6.5.3 Sistem Kontrol dan Manajemen Bantalan Udara	251
6.5.4 Inovasi Terbaru dan Arah Pengembangan Masa Depan	252
6.6 Tantangan Operasional dan Solusinya	253
6.7 Perkembangan Terkini dalam Teknologi Bantalan Udara	259
6.8 Implikasi Ekonomi dan Lingkungan	267
6.9 Soal Latihan	272
6.10 Kesimpulan	273
DAFTAR PUSTAKA	277

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kapal <i>Hydrofoil</i>	4
Gambar 1. 2 Kapal Penelitian NOAA <i>Ship Thomas Jefferson</i>	8
Gambar 1. 3 Kapal Listrik <i>ZeroCat</i>	10
Gambar 1. 4 Kapal <i>Yara Birkeland</i>	10
Gambar 1. 5 Kapal Siluman (<i>Stealth Ships</i>)	16
Gambar 1. 6 <i>Landing Craft Air Cushion</i> (LCAC)	17
Gambar 1. 7 Instalasi <i>Brave Tern</i>	20
Gambar 1. 8 <i>Horizon Power Catamarans</i>	23
Gambar 1. 9 Kapal Feri „ <i>Benchijigua Express</i> ’	23
Gambar 1. 10 Perbedaan <i>Waterplane Area Twin Hull Catamaran</i> dan SWATH	24
Gambar 1. 11 <i>Wave Pierching Catarmaram</i>	25
Gambar 1. 12 Kapal dengan <i>Axe Bow</i>	26
Gambar 1. 13 Fery Listrik <i>E-Ferry Operating in Denmark</i>	27
Gambar 1. 14 Kapal Hidrogen Pertama di Dunia	28
Gambar 1. 15 Kapal <i>Color Hybrid</i>	28
Gambar 1. 16 <i>Hovercraf SR.N4</i>	30
Gambar 1. 17 Kapal <i>Hydrofoil</i>	31
Gambar 1. 18 Kapal <i>Saipem 7000</i>	32
Gambar 1. 19 Kapal <i>Pioneering Spirit</i>	34
Gambar 1. 20 <i>Salmon Vessel Norwegian Gannet</i>	35
Gambar 2. 1 Kapal <i>Energy Observer</i>	59
Gambar 2. 2 <i>Peace Boat Ecoship</i>	98
Gambar 3. 1 <i>Damen Stan Patrol 5009</i>	117
Gambar 3. 2 <i>Autal Auto Express 109</i>	118
Gambar 3. 3 <i>Heesen YN 19150 Project Electra</i>	119
Gambar 3. 4 <i>Damen Offshore Carrier 8500</i>	120
Gambar 3. 5 <i>Severn Class Lifeboat (RNLI, UK)</i>	121

BAB I

GAMBARAN UMUM

1.1 Pendahuluan

Dunia maritim terus berkembang dengan pesat, didorong oleh kemajuan teknologi dan tuntutan efisiensi yang semakin tinggi. Di tengah perkembangan ini, muncul suatu kategori kapal yang menawarkan solusi inovatif untuk berbagai tantangan di industri pelayaran: kapal nonkonvensional. Bab ini akan mengajak pembaca untuk menyelami dunia kapal nonkonvensional, sebuah bidang yang menarik dan penuh potensi dalam industri maritim modern.

Kapal nonkonvensional, secara sederhana, dapat didefinisikan sebagai kapal yang memiliki desain, sistem propulsi, atau karakteristik operasional yang berbeda secara signifikan dari kapal konvensional pada umumnya. Definisi ini mencakup berbagai jenis kapal, mulai dari kapal berkecepatan tinggi hingga kapal dengan kemampuan manuver khusus, serta kapal-kapal yang menggunakan teknologi propulsi alternatif. Keunikan desain dan fungsi kapal-kapal ini membuat mereka menjadi solusi yang menarik untuk berbagai kebutuhan spesifik dalam industri maritim.

Sejarah perkembangan kapal nonkonvensional merupakan kisah inovasi yang menarik. Dimulai dari eksperimen-eksperimen awal pada abad ke-20, perkembangan kapal nonkonvensional mengalami percepatan signifikan setelah Perang Dunia II. Dorongan untuk menciptakan kapal yang lebih cepat, lebih efisien, dan mampu beroperasi dalam kondisi yang lebih ekstrem telah menghasilkan berbagai terobosan teknologi. Dari kapal *hydrofoil* yang mampu "terbang" di atas permukaan air hingga kapal bertenaga nuklir yang dapat berlayar selama berbulan-bulan tanpa mengisi ulang bahan bakar, sejarah kapal nonkonvensional penuh dengan inovasi yang mengubah wajah industri maritim.

Dalam lanskap maritim kontemporer, kapal nonkonvensional memainkan peran yang semakin penting. Mereka menawarkan solusi untuk tantangan-tantangan yang tidak dapat diatasi oleh kapal konvensional, seperti kebutuhan akan kecepatan tinggi, kemampuan

operasi di perairan dangkal, atau pengurangan dampak lingkungan. Kapal-kapal ini juga membuka peluang baru dalam eksplorasi laut dalam, penelitian oseanografi, dan bahkan dalam industri pariwisata maritim. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang kapal nonkonvensional menjadi semakin penting bagi para profesional di industri maritim.

Klasifikasi kapal nonkonvensional mencakup berbagai kategori yang mencerminkan keragaman desain dan fungsinya. Beberapa kategori utama meliputi kapal berkecepatan tinggi seperti *hydrofoil* dan *hovercraft*, kapal dengan stabilitas tinggi seperti SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*), kapal dengan kemampuan manuver khusus seperti *dynamic positioning vessels*, serta kapal-kapal yang menggunakan sistem propulsi alternatif seperti tenaga angin atau surya. Setiap kategori ini memiliki karakteristik unik yang membuatnya cocok untuk aplikasi-aplikasi tertentu dalam industri maritim.

Seiring dengan perkembangan teknologi kapal nonkonvensional, muncul pula kebutuhan akan regulasi dan standar internasional yang mengatur desain, konstruksi, dan operasi kapal-kapal ini. Organisasi Maritim Internasional (IMO) dan badan-badan klasifikasi telah mengembangkan berbagai aturan dan pedoman untuk memastikan keselamatan dan efisiensi operasional kapal nonkonvensional. Pemahaman tentang regulasi ini penting bagi semua pihak yang terlibat dalam industri kapal nonkonvensional, mulai dari desainer hingga operator.

Tren perkembangan teknologi kapal nonkonvensional terus bergerak dengan cepat, didorong oleh inovasi dalam berbagai bidang seperti material komposit, sistem propulsi bersih, dan teknologi informasi. Penggunaan kecerdasan buatan dan sistem navigasi otonomos, misalnya, membuka peluang baru dalam operasi kapal nonkonvensional. Sementara itu, fokus pada keberlanjutan lingkungan mendorong pengembangan kapal-kapal dengan emisi rendah atau bahkan nol emisi. Memahami tren-tren ini penting untuk mengantisipasi arah perkembangan industri di masa depan.

Bab ini akan mengeksplorasi semua aspek tersebut, memberikan pembaca pemahaman komprehensif tentang dunia kapal nonkonvensional. Dari definisi dasar hingga tren terkini, bab ini akan menjadi fondasi yang kokoh bagi pembaca untuk memahami bab-bab selanjutnya yang akan membahas aspek-aspek spesifik dari kapal nonkonvensional secara lebih mendalam.

1.2 Definisi Kapal Nonkonvensional

Kapal nonkonvensional merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan berbagai jenis kapal yang memiliki karakteristik desain, sistem propulsi, atau metode operasional yang berbeda secara signifikan dari kapal-kapal konvensional pada umumnya. Definisi ini mencakup spektrum luas kapal-kapal yang telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan spesifik dalam industri maritim modern, di mana kapal konvensional mungkin tidak dapat beroperasi secara optimal atau efisien.

Kapal nonkonvensional merupakan kategori luas yang mencakup berbagai jenis kapal dengan desain, teknologi, atau metode operasional yang berbeda secara signifikan dari kapal konvensional. Untuk memahami konsep ini dengan lebih baik, kita perlu mengeksplorasi berbagai aspek yang membentuk definisi kapal nonkonvensional.

1. Karakteristik Desain

Kapal nonkonvensional sering kali memiliki desain lambung yang inovatif. Berbeda dengan kapal konvensional yang umumnya menggunakan desain lambung tunggal, kapal nonkonvensional mungkin mengadopsi konfigurasi lambung ganda (*catamaran*), tripel (*trimaran*), atau bahkan desain yang lebih kompleks seperti SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*). Desain-desain ini dikembangkan untuk mencapai tujuan tertentu, seperti stabilitas yang lebih baik, pengurangan hambatan air, atau kemampuan untuk beroperasi di kondisi laut yang ekstrem.

Selain itu, beberapa kapal nonkonvensional memiliki desain yang memungkinkan mereka untuk "mengangkat" sebagian atau seluruh badan kapal di atas permukaan air. Contohnya termasuk *hydrofoil*,

yang menggunakan sayap bawah air untuk mengangkat lambung kapal ketika bergerak cepat, dan *hovercraft*, yang menggunakan bantalan udara untuk bergerak di atas permukaan air atau darat [1].



Gambar 1. 1 Kapal *Hydrofoil* [2]

2. Sistem Propulsi

Sistem propulsi kapal nonkonvensional sering kali merupakan salah satu fitur yang paling membedakannya dari kapal konvensional. Sementara kapal konvensional umumnya mengandalkan baling-baling yang digerakkan oleh mesin diesel, kapal nonkonvensional dapat menggunakan berbagai sistem propulsi alternatif. Ini termasuk:

- a. Jet air: Sistem ini menggunakan pompa untuk menyedot air dan memancarkannya dengan kecepatan tinggi, memberikan dorongan kepada kapal.
- b. *Azipod*: Unit propulsi listrik yang dapat berputar 360 derajat, memberikan manuverabilitas yang sangat baik.
- c. Sistem propulsi *magnetohydrodynamic* (MHD): Teknologi eksperimental yang menggunakan medan magnet untuk menggerakkan air tanpa bagian yang bergerak.
- d. Layar modern: Beberapa kapal nonkonvensional menggunakan desain layar canggih, seperti layar kaku atau rotor *Flettner*, yang

memanfaatkan energi angin dengan cara yang lebih efisien dibandingkan layar tradisional.

3. Teknologi dan Material

Kapal nonkonvensional sering kali menjadi pelopor dalam penggunaan teknologi dan material baru dalam industri maritim. Beberapa contoh termasuk:

- a. Material komposit: Penggunaan serat karbon, kevlar, dan material komposit lainnya untuk mengurangi berat dan meningkatkan kekuatan struktur kapal.
- b. Sistem kontrol canggih: Implementasi kecerdasan buatan dan sistem kontrol otomatis untuk meningkatkan efisiensi operasional dan keselamatan.
- c. Teknologi pengurangan gesekan: Penggunaan lapisan lambung khusus atau sistem injeksi gelembung udara untuk mengurangi gesekan dengan air.
- d. Sistem penyimpanan dan propulsi energi alternatif: Termasuk baterai *lithium-ion* berkapasitas tinggi, sel bahan bakar *hydrogen*, dan panel surya terintegrasi [3].

4. Tujuan Operasional Spesifik

Salah satu karakteristik utama kapal nonkonvensional adalah desainnya yang seringkali ditujukan untuk memenuhi kebutuhan operasional yang sangat spesifik. Beberapa contoh termasuk:

- a. Kapal berkecepatan tinggi: Dirancang untuk mencapai kecepatan jauh melebihi kapal konvensional, sering digunakan untuk transportasi penumpang jarak pendek atau operasi militer.
- b. Kapal penelitian oseanografi: Dilengkapi dengan peralatan khusus dan kemampuan manuver presisi untuk penelitian laut dalam.
- c. Kapal pengeboran lepas pantai: Memiliki sistem stabilisasi canggih dan kemampuan untuk mempertahankan posisi secara tepat dalam kondisi laut yang sulit.
- d. Kapal pemecah es: Dirancang dengan lambung yang diperkuat dan bentuk khusus untuk beroperasi di perairan es.

5. Aspek Regulasi dan Standar

Definisi kapal nonkonvensional juga memiliki implikasi penting dalam konteks regulasi dan standar internasional. Organisasi Maritim Internasional (IMO) telah mengembangkan pedoman khusus untuk beberapa jenis kapal nonkonvensional, seperti "*Code of Safety for High-Speed Craft*" dan "*Code of Safety for Special Purpose Ships*" [4]. Pedoman ini mengakui bahwa kapal nonkonvensional mungkin memerlukan pendekatan yang berbeda dalam hal keselamatan, konstruksi, dan operasi dibandingkan dengan kapal konvensional.

6. Evolusi Definisi

Penting untuk dicatat bahwa definisi "nonkonvensional" dalam konteks kapal bersifat dinamis dan terus berkembang. Apa yang dianggap nonkonvensional hari ini mungkin akan menjadi standar di masa depan. Misalnya, penggunaan propulsi elektrik, yang dahulu dianggap nonkonvensional, kini semakin umum di berbagai jenis kapal. Oleh karena itu, pemahaman tentang kapal nonkonvensional harus selalu mempertimbangkan konteks historis dan perkembangan terkini dalam teknologi maritim.

1.3 Sejarah Singkat Perkembangan Kapal Nonkonvensional

Sejarah perkembangan kapal nonkonvensional merupakan narasi yang kaya akan inovasi dan adaptasi terhadap tantangan maritim yang terus berubah. Akar dari konsep ini sebenarnya dapat ditelusuri jauh ke masa lalu, bahkan sebelum era modern. Bangsa Polynesia, misalnya, telah menggunakan *catamarans* (kapal berlambung ganda) selama ribuan tahun untuk pelayaran jarak jauh mereka di Samudra Pasifik. Desain ini memberikan stabilitas yang superior dan kapasitas muatan yang lebih besar dibandingkan dengan kapal berlambung tunggal tradisional. Sementara itu, di belahan dunia lain, bangsa Cina kuno telah mengembangkan kapal dengan roda dayung sejak abad ke-5 Masehi, yang dapat dianggap sebagai bentuk awal dari kapal nonkonvensional. Inovasi-inovasi awal ini meletakkan dasar bagi perkembangan lebih lanjut dalam desain kapal yang menantang norma-norma konvensional [5].

Memasuki abad ke-20, kita menyaksikan era eksperimen yang intensif dalam desain kapal nonkonvensional. Salah satu tonggak penting adalah pengembangan kapal *hydrofoil* oleh Alexander Graham Bell dan Casey Baldwin. Proyek mereka mencapai puncaknya dengan HD-4 pada tahun 1919, yang mencapai kecepatan menakjubkan 114 km/jam, memecahkan rekor kecepatan air pada saat itu. Pencapaian ini menandai awal dari era baru dalam teknologi kapal cepat. Pada periode yang sama, insinyur Italia Enrico Forlanini juga melakukan eksperimen dengan *hydrofoil*, yang karyanya kemudian menginspirasi desainer Jerman, Hanns von Schertel. Von Schertel kemudian mengembangkan *hydrofoil* komersial pertama setelah Perang Dunia II, membuka jalan bagi adopsi teknologi ini dalam aplikasi praktis [6].

Periode pasca Perang Dunia II menyaksikan akselerasi dramatis dalam inovasi kapal nonkonvensional, didorong oleh kebutuhan militer dan komersial yang mendesak. Salah satu terobosan paling signifikan adalah pengembangan *hovercraft* oleh Sir Christopher Cockerell pada 1950-an. Prinsip "bantalan udara" yang ia temukan memungkinkan kendaraan untuk bergerak di atas permukaan datar dengan gesekan minimal, membuka kemungkinan baru untuk transportasi amfibi. *Hovercraft* pertama yang berhasil, SR.N1, melintasi Selat Inggris pada tahun 1959, menandai awal era baru dalam teknologi maritim. Perkembangan *hovercraft* berlanjut dengan cepat, dengan tipe SR.N4 yang mulai beroperasi sebagai feri melintasi Selat Inggris pada tahun 1968, mampu mengangkut hingga 418 penumpang dan 60 mobil. Meskipun penggunaan komersialnya akhirnya terbatas, *hovercraft* terus digunakan dalam aplikasi militer dan operasi penyelamatan, menunjukkan fleksibilitas teknologi ini [7].

Pada periode yang sama, kapal *Small Waterplane Area Twin Hull* (SWATH) dikembangkan sebagai solusi untuk stabilitas yang lebih baik di laut bergelombang. Desain inovatif ini mengurangi area permukaan kapal yang bersentuhan dengan air, secara signifikan mengurangi efek gelombang dan meningkatkan kenyamanan serta keamanan operasional. Kapal SWATH pertama yang beroperasi secara komersial, MV Duplus, diluncurkan pada tahun 1969,

menandai awal dari adopsi luas teknologi ini. SWATH kemudian diadopsi untuk berbagai aplikasi, termasuk kapal penelitian oseanografi, kapal survei, dan bahkan kapal perang. Salah satu contoh terkenal adalah kapal penelitian NOAA, *SWATH Ship Thomas Jefferson*, yang diluncurkan pada tahun 1992 dan terus memberikan kontribusi signifikan terhadap penelitian kelautan [8].



Gambar 1. 2 Kapal Penelitian NOAA *Ship Thomas Jefferson* [9]

Era 1970-an dan 1980-an ditandai oleh fokus yang kuat pada pengembangan kapal cepat untuk aplikasi komersial dan militer. Salah satu inovasi paling signifikan adalah *Wave-Piercing Catamarans*, yang diperkenalkan oleh perusahaan *Australia International Catamarans* (sekarang Incat) pada akhir 1970-an. Desain revolusioner ini memungkinkan kapal untuk "memotong" gelombang alih-alih naik dan turun di atasnya, memberikan perjalanan yang lebih stabil dan efisien. Teknologi ini segera mendominasi pasar feri cepat, mengubah wajah transportasi laut jarak pendek di banyak bagian dunia. Pada saat yang sama, angkatan laut di seluruh dunia mulai mengadopsi desain kapal cepat nonkonvensional. Contoh yang menonjol termasuk kelas kapal patrol cepat *Skjold* Norwegia, yang menggabungkan teknologi *Surface*

Effect Ship (SES) dengan desain *stealth*, dan kapal missile *hydrofoil* kelas Pegasus Angkatan Laut AS. Inovasi-inovasi ini tidak hanya meningkatkan kapabilitas militer tetapi juga mendorong pengembangan teknologi yang kemudian diterapkan dalam aplikasi sipil.

Memasuki akhir abad ke-20, fokus inovasi beralih ke sistem propulsi. Sistem *Azipod*, yang merupakan unit propulsi listrik yang dapat berputar 360 derajat, pertama kali diperkenalkan pada tahun 1990 oleh ABB Group. Teknologi revolusioner ini secara signifikan meningkatkan manuverabilitas kapal dan efisiensi operasional. Sistem ini pertama kali digunakan pada kapal pemecah es Finlandia, *Seili*, dan sejak itu telah diadopsi secara luas, terutama di industri kapal pesiar. *Azipod* tidak hanya meningkatkan kinerja kapal tetapi juga membuka kemungkinan baru dalam desain kapal, memungkinkan layout yang lebih fleksibel dan efisien. Pada periode yang sama, propulsi *waterjet* juga mengalami perkembangan pesat. Meskipun konsepnya telah ada sejak abad ke-18, penggunaannya dalam kapal besar baru berkembang pada akhir abad ke-20. Sistem ini memberikan manuverabilitas yang sangat baik dan efisiensi tinggi pada kecepatan tinggi, menjadikannya pilihan populer untuk kapal cepat dan feri.

Memasuki abad ke-21, fokus pengembangan kapal nonkonvensional beralih ke efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan, dan otomatisasi. Munculnya kembali minat pada teknologi layar modern, seperti *SkySails* dan rotor *Flettner*, mencerminkan upaya untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi. *SkySails*, yang dikembangkan oleh perusahaan Jerman, menggunakan layang-layang besar untuk menarik kapal, sementara rotor *Flettner* memanfaatkan efek *Magnus* untuk menghasilkan daya dorong. Inovasi-inovasi ini menunjukkan bagaimana teknologi lama dapat direvitalisasi dan diterapkan dalam konteks modern untuk mengatasi tantangan kontemporer [10].

Perkembangan teknologi baterai telah memungkinkan pengembangan kapal listrik dan *hybrid* untuk rute-rute pendek. Contoh terkenal adalah feri listrik Ampere di Norwegia, yang mulai

beroperasi pada tahun 2015. Kapal ini menandai awal dari era baru dalam transportasi maritim yang lebih bersih dan berkelanjutan. Sementara itu, proyek-proyek kapal otonom mulai berkembang, dengan *Yara Birkeland* sebagai salah satu contoh paling ambisius. Diumumkan pada tahun 2017, kapal ini dirancang untuk menjadi kapal kontainer otonom dan listrik pertama di dunia, menjanjikan revolusi dalam logistik maritim.



Gambar 1. 3 Kapal Listrik ZeroCat [11]



Gambar 1. 4 Kapal *Yara Birkeland* [12]

Perkembangan terkini juga mencakup inovasi dalam kapal yang dirancang untuk operasi di lingkungan ekstrem. Ini termasuk kapal pemecah es canggih seperti Kelas Arktika Rusia, yang menggunakan tenaga nuklir, dan kapal penelitian yang mampu beroperasi di kondisi Antartika yang paling keras. Kapal-kapal ini tidak hanya mendorong batas-batas teknologi maritim tetapi juga membuka kemungkinan baru untuk eksplorasi dan pemanfaatan sumber daya di daerah kutub.

Integrasi teknologi canggih terus menjadi pendorong utama dalam evolusi kapal nonkonvensional. Penggunaan material maju, seperti komposit berbasis karbon, telah memungkinkan konstruksi kapal yang lebih ringan dan kuat. Sementara itu, integrasi teknologi seperti kecerdasan buatan dan *Internet of Things* membuka peluang baru untuk optimalisasi operasional dan pemeliharaan prediktif. Inovasi-inovasi ini tidak hanya meningkatkan kinerja dan efisiensi kapal tetapi juga mengubah cara kapal dioperasikan dan dikelola.

Sejarah perkembangan kapal nonkonvensional ini mencerminkan kisah inovasi manusia yang terus-menerus dalam menghadapi tantangan maritim. Dari eksperimen awal dengan *hydrofoil* hingga kapal otonom dan ramah lingkungan modern, perjalanan ini ditandai oleh kreativitas, keberanian untuk menantang norma yang ada, dan komitmen untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan. Seiring kita memasuki era yang ditandai oleh urgensi perubahan iklim dan revolusi digital, dapat dipastikan bahwa inovasi dalam desain dan teknologi kapal nonkonvensional akan terus memainkan peran krusial dalam membentuk masa depan industri maritim, mendorong efisiensi, keberlanjutan, dan kemampuan operasional yang lebih besar.

1.4 Pentingnya Kapal Nonkonvensional dalam Industri Maritim Modern

Kapal nonkonvensional memainkan peran yang semakin penting dalam industri maritim modern, menawarkan solusi inovatif untuk berbagai tantangan yang dihadapi sektor ini. Dalam era globalisasi dan perubahan iklim, industri maritim dituntut untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi dampak lingkungan, dan mengeksplorasi wilayah operasi baru. Kapal nonkonvensional, dengan desain dan

teknologi inovatifnya, menjadi kunci dalam menjawab tuntutan-tuntutan ini.

Berikut beberapa aspek penting dari kapal nonkonvensional:

1. Efisiensi Operasional dan Pengurangan Emisi

Kapal nonkonvensional telah membawa revolusi dalam hal efisiensi operasional di industri maritim. Desain lambung inovatif, seperti yang ditemukan pada katamaran dan *trimaran*, memainkan peran kunci dalam meningkatkan efisiensi ini. Bentuk lambung ganda atau tripel ini secara signifikan mengurangi hambatan air, yang merupakan faktor utama dalam konsumsi bahan bakar kapal.

Penelitian komprehensif yang dilakukan oleh Molland et al. [13] menunjukkan bahwa katamaran dapat menghemat hingga 20% bahan bakar dibandingkan dengan kapal *monohull* konvensional pada kecepatan yang sama. Penghematan ini berasal dari pengurangan hambatan gelombang dan hambatan gesek yang dihasilkan oleh konfigurasi lambung ganda. Lebih lanjut, desain lambung katamaran memungkinkan distribusi berat yang lebih efisien, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kapasitas muatan tanpa mengorbankan performa.

Selain desain lambung, integrasi teknologi propulsi canggih pada kapal nonkonvensional juga berkontribusi signifikan terhadap efisiensi operasional. Sistem seperti *Azipod*, yang merupakan unit propulsi listrik yang dapat berputar 360 derajat, telah terbukti meningkatkan efisiensi bahan bakar hingga 20% dibandingkan dengan sistem propulsi konvensional [14]. Keunggulan sistem *Azipod* terletak pada kemampuannya untuk mengarahkan daya dorong secara optimal dalam berbagai kondisi operasional, mengurangi kehilangan energi yang biasanya terjadi pada sistem shaft dan *rudder* konvensional.

Penggunaan material ringan seperti aluminium dan komposit dalam konstruksi kapal nonkonvensional juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi bahan bakar. Pengurangan berat kapal secara keseluruhan berarti lebih sedikit energi yang diperlukan untuk menggerakkan kapal, yang pada gilirannya mengurangi konsumsi bahan bakar. Sebagai contoh, penggunaan aluminium dalam konstruksi kapal cepat dapat mengurangi berat kapal hingga 50%

dibandingkan dengan konstruksi baja konvensional, yang menghasilkan penghematan bahan bakar yang signifikan [13].

Efisiensi operasional yang lebih tinggi ini memiliki implikasi langsung pada pengurangan emisi gas rumah kaca. Dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah, kapal nonkonvensional menghasilkan lebih sedikit emisi CO₂ per ton-mil muatan yang diangkut. Ini menjadi semakin penting dalam konteks regulasi lingkungan yang semakin ketat di industri maritim, seperti target Organisasi Maritim Internasional (IMO) untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari pelayaran internasional setidaknya 50% pada tahun 2050 dibandingkan dengan tingkat 2008 [15].

2. Eksplorasi dan Eksploitasi Sumber Daya Laut

Kapal nonkonvensional telah membuka era baru dalam eksplorasi dan eksploitasi sumber daya laut. Salah satu kontribusi paling signifikan adalah dalam industri minyak dan gas lepas pantai, di mana kapal-kapal dengan kemampuan *positioning* dinamis telah memungkinkan operasi di perairan yang lebih dalam dan lebih menantang.

Sistem *positioning* dinamis (DP) pada kapal nonkonvensional menggunakan kombinasi sensor, komputer, dan sistem propulsi untuk mempertahankan posisi kapal secara otomatis, bahkan dalam kondisi cuaca yang sulit. Ini memungkinkan operasi pengeboran dan produksi di lokasi di mana penggunaan jangkar tradisional tidak praktis atau tidak mungkin. Menurut laporan oleh Global Market Insights [15], pasar kapal *offshore* nonkonvensional diproyeksikan tumbuh dengan CAGR lebih dari 8% antara 2021 dan 2027, mencerminkan pentingnya teknologi ini dalam industri energi lepas pantai.

Dalam konteks penelitian oseanografi, kapal SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*) telah membawa perubahan besar. Desain unik kapal SWATH, dengan sebagian besar volume lambungnya berada di bawah permukaan air, memberikan stabilitas yang luar biasa bahkan dalam kondisi laut yang bergelombang. Ini memungkinkan pengumpulan data yang lebih akurat dan konsisten,

yang sangat penting dalam penelitian perubahan iklim dan ekosistem laut.

Sebagai contoh, kapal penelitian SWATH Thomas G. Thompson, yang dioperasikan oleh University of Washington, mampu melakukan operasi penelitian dalam kondisi cuaca yang akan membuat kapal konvensional harus berlindung di pelabuhan [16]. Kemampuan ini memperluas jendela operasional untuk penelitian laut, memungkinkan pengumpulan data yang lebih komprehensif dan berkelanjutan.

Kapal nonkonvensional juga telah merevolusi industri energi terbarukan lepas pantai. *Vessel Installation Offshore* (VIO), yang sering menggunakan desain nonkonvensional seperti *jack-up rigs* atau *semi-submersible platforms*, memainkan peran krusial dalam instalasi dan pemeliharaan turbin angin lepas pantai. Kemampuan mereka untuk beroperasi di laut dalam dan dalam kondisi cuaca yang menantang telah memungkinkan pengembangan ladang angin lepas pantai yang lebih besar dan lebih jauh dari pantai, di mana sumber daya angin lebih konsisten dan kuat.

3. Revolusi dalam Transportasi Laut

Kapal nonkonvensional telah mengubah lanskap transportasi laut, terutama dalam sektor feri cepat dan kapal penumpang. Inovasi dalam desain kapal telah menghasilkan peningkatan dramatis dalam kecepatan, efisiensi, dan kenyamanan penumpang.

Hydrofoil, misalnya, menggunakan sayap bawah air untuk mengangkat lambung kapal di atas permukaan air ketika bergerak cepat, secara drastis mengurangi hambatan air dan memungkinkan kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kapal konvensional. Di Rusia, *hydrofoil* Meteor yang beroperasi di Sungai Volga dapat mencapai kecepatan hingga 65 km/jam, memangkas waktu perjalanan hampir setengahnya dibandingkan dengan feri konvensional [17].

Wave-Piercing Catamarans (WPC) adalah inovasi lain yang telah mengubah industri feri cepat. Desain unik mereka memungkinkan kapal untuk "memotong" gelombang alih-alih naik dan turun di atasnya, memberikan perjalanan yang lebih stabil dan efisien.

Sebagai contoh, feri cepat WPC yang beroperasi di Selat Inggris telah mengurangi waktu perjalanan hingga 50% dibandingkan dengan feri konvensional, sambil tetap mempertahankan kenyamanan penumpang dalam kondisi laut yang menantang.

Dalam konteks kapal kargo, pengembangan kapal kontainer nonkonvensional seperti desain *Tripletee* yang dikembangkan oleh *Det Norske Veritas* (DNV) menjanjikan peningkatan kapasitas muatan hingga 30% dibandingkan dengan kapal kontainer konvensional pada ukuran yang sama [18]. Desain ini menggunakan konfigurasi lambung tripel yang tidak hanya meningkatkan kapasitas muatan tetapi juga stabilitas dan efisiensi bahan bakar. Inovasi seperti ini berpotensi mengubah ekonomi transportasi laut jarak jauh, memungkinkan pengiriman lebih banyak kargo dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah.

Selain itu, pengembangan kapal Ro-Pax (*Roll-on/Roll-off Passenger*) nonkonvensional telah meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi dalam transportasi kombinasi penumpang dan kendaraan. Desain seperti *Stena Elektra*, sebuah konsep feri listrik dengan lambung katamaran, menjanjikan pengurangan emisi yang signifikan sambil mempertahankan kapasitas dan kecepatan yang kompetitif [19].

4. Peran dalam Operasi Militer dan Keamanan Maritim

Kapal nonkonvensional memainkan peran vital dalam operasi militer dan keamanan maritim modern. Desain inovatif mereka menawarkan keunggulan taktis yang signifikan dalam berbagai skenario operasional.

Kapal patroli cepat dengan desain nonkonvensional, seperti *trimaran* atau *Surface Effect Ship* (SES), menawarkan kecepatan dan manuverabilitas yang superior. Sebagai contoh, kapal patroli kelas *Independence* Angkatan Laut AS, dengan desain *trimaran* aluminium, mampu mencapai kecepatan lebih dari 40 knot dan memiliki jangkauan operasi yang luas [20]. Kecepatan tinggi ini sangat penting dalam operasi anti-pembajakan, penegakan hukum maritim, dan misi pencarian dan penyelamatan.

Desain *trimaran* pada kelas *Independence* juga memberikan keuntungan lain. Stabilitas yang lebih baik memungkinkan pengoperasian helikopter dalam kondisi laut yang lebih menantang, sementara geladak yang luas meningkatkan fleksibilitas dalam penempatan senjata dan sensor. Lebih lanjut, penggunaan konstruksi aluminium mengurangi berat kapal, meningkatkan efisiensi bahan bakar dan jangkauan operasional.



Gambar 1. 5 Kapal Siluman (*Stealth Ships*) [21]

Kapal siluman (*Stealth Ships*) merupakan contoh lain dari kapal nonkonvensional yang memainkan peran krusial dalam operasi militer modern. Teknologi pengurangan radar *cross-section* (RCS) yang diterapkan pada kapal-kapal ini sering melibatkan desain lambung dan superstruktur yang sangat tidak konvensional. Sebagai contoh, kapal perusak kelas Zumwalt Angkatan Laut AS memiliki desain

tumblehome yang unik, di mana sisi lambung miring ke dalam alih-alih ke luar, secara signifikan mengurangi deteksi radar.



Gambar 1. 6 *Landing Craft Air Cushion* (LCAC) [22]

Selain itu, kapal amfibi nonkonvensional seperti *Landing Craft Air Cushion* (LCAC) telah merevolusi operasi pendaratan amfibi. Dengan menggunakan teknologi *hovercraft*, LCAC dapat beroperasi di atas air, pantai, dan bahkan daratan, memberikan fleksibilitas taktis yang tidak mungkin dicapai dengan kapal konvensional [22].

5. Solusi Inovatif untuk Pengurangan Emisi

Dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global, kapal nonkonvensional menawarkan solusi inovatif untuk pengurangan emisi di industri maritim. Pengembangan kapal dengan propulsi alternatif, seperti tenaga listrik, hidrogen, atau bahkan tenaga angin modern, menunjukkan potensi besar dalam mencapai tujuan dekarbonisasi industri.

Kapal listrik, misalnya, telah mulai merevolusi transportasi jarak pendek. Proyek *E-ferry Ellen* di Denmark, yang menggunakan desain katamaran dengan propulsi listrik penuh, telah menunjukkan pengurangan emisi CO₂ hingga 2000 ton per tahun dibandingkan dengan feri diesel konvensional. Kapal ini menggunakan baterai

lithium-ion berkapasitas besar yang dapat diisi ulang dengan energi terbarukan, mendemonstrasikan potensi transportasi maritim bebas emisi. Sementara itu, pengembangan kapal berbahan bakar hidrogen menawarkan solusi potensial untuk rute yang lebih panjang. Sebagai contoh, proyek *HySeas III* di Skotlandia bertujuan untuk mengembangkan feri berbahan bakar hidrogen pertama di dunia, menggunakan sel bahan bakar untuk menghasilkan listrik tanpa emisi [23].

Inovasi dalam teknologi layar modern juga menawarkan pendekatan yang menarik untuk pengurangan emisi. Sistem *SkySails*, yang menggunakan layang-layang besar untuk memanfaatkan energi angin, telah terbukti dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 20% pada kapal kargo. Sementara itu, teknologi rotor *Flettner*, yang menggunakan silinder berputar vertikal untuk menghasilkan daya dorong dari efek *Magnus*, telah diimplementasikan pada beberapa kapal kargo, menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 8%.

Lebih lanjut, pengembangan kapal dengan desain lambung yang sangat efisien, seperti *Air Lubrication System (ALS)*, menawarkan cara inovatif untuk mengurangi emisi. ALS bekerja dengan menciptakan lapisan gelembung udara di bawah lambung kapal, mengurangi gesekan antara air dan lambung. Teknologi ini telah menunjukkan potensi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 10% pada kapal-kapal besar.

6. Kontribusi dalam Akuakultur Lepas Pantai

Kapal nonkonvensional memainkan peran penting dalam pengembangan industri akuakultur lepas pantai, sebuah sektor yang semakin penting mengingat meningkatnya permintaan global akan protein laut dan tekanan pada stok ikan liar.

Kapal-kapal khusus dengan desain nonkonvensional, seperti katamaran atau *trimaran* yang dilengkapi dengan sistem penanganan ikan canggih, memungkinkan operasi budidaya yang lebih efisien dan berkelanjutan di perairan terbuka. Desain *multihull* ini menawarkan stabilitas yang lebih baik dan area geladak yang lebih luas, yang sangat penting untuk operasi akuakultur.

Penelitian oleh Buck et al. [24] menunjukkan bahwa penggunaan kapal multifungsi nonkonvensional dalam akuakultur lepas pantai dapat meningkatkan produktivitas hingga 40% dibandingkan dengan metode konvensional. Peningkatan ini berasal dari kemampuan kapal untuk beroperasi dalam kondisi laut yang lebih menantang, memungkinkan akses yang lebih konsisten ke fasilitas budidaya lepas pantai.

Selain itu, kapal nonkonvensional untuk akuakultur sering dilengkapi dengan sistem pemantauan dan kontrol canggih. Ini termasuk sonar untuk memantau kondisi ikan, sistem pemberian pakan otomatis, dan bahkan *drone* bawah air untuk inspeksi jaring. Integrasi teknologi canggih pada kapal nonkonvensional untuk akuakultur memungkinkan manajemen yang lebih efisien dan responsif terhadap kondisi budidaya, meningkatkan kesejahteraan ikan dan produktivitas secara keseluruhan. Misalnya, sistem pemantauan *real-time* memungkinkan operator untuk segera merespon perubahan kondisi lingkungan atau kesehatan ikan. Lebih lanjut, desain kapal nonkonvensional untuk akuakultur sering kali mempertimbangkan aspek keberlanjutan lingkungan. Beberapa kapal dilengkapi dengan sistem pengolahan air *ballast* canggih untuk mencegah penyebaran spesies invasif, serta sistem pengolahan limbah yang efisien untuk meminimalkan dampak operasi terhadap ekosistem laut sekitarnya.

Penggunaan kapal nonkonvensional dalam akuakultur lepas pantai juga membuka peluang untuk integrasi dengan energi terbarukan. Beberapa konsep inovatif menggabungkan fasilitas akuakultur dengan turbin angin lepas pantai, menggunakan kapal nonkonvensional sebagai *platform* operasional yang dapat melayani kedua fungsi tersebut. Pendekatan *multi-use* ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan ruang laut, tetapi juga berpotensi mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan.

7. Peran dalam Industri Energi Terbarukan Lepas Pantai

Kapal nonkonvensional memainkan peran vital dalam pengembangan dan operasi industri energi terbarukan lepas pantai, terutama dalam sektor angin lepas pantai yang berkembang pesat.

Vessel Installation Offshore (VIO) dengan desain nonkonvensional, seperti *jack-up vessels* atau *semi-submersible platforms*, sangat penting dalam instalasi turbin angin lepas pantai. Kapal-kapal ini memiliki kemampuan unik untuk mengangkat diri mereka di atas permukaan air menggunakan kaki hidrolik, memberikan *platform* stabil untuk operasi pengangkatan berat dalam kondisi laut yang menantang. Sebagai contoh, kapal instalasi *Brave Tern*, dengan desain *jack-up* yang inovatif, mampu menginstal turbin angin dengan kapasitas hingga 1000 ton pada kedalaman air hingga 60 meter. Kemampuan ini telah memungkinkan instalasi turbin angin yang lebih besar dan lebih efisien di lokasi yang lebih jauh dari pantai, di mana sumber daya angin lebih konsisten [25].



Gambar 1. 7 Instalasi *Brave Tern* [26]

Selain instalasi, kapal nonkonvensional juga penting untuk pemeliharaan dan operasi ladang angin lepas pantai. *Service Operation Vessels (SOV)* dengan desain yang stabil dan sistem walk-to-work canggih memungkinkan akses yang aman ke turbin dalam berbagai kondisi cuaca, meningkatkan waktu operasional dan efisiensi pemeliharaan. Menurut laporan WindEurope, penggunaan kapal instalasi dan pemeliharaan nonkonvensional telah berkontribusi pada penurunan biaya instalasi turbin angin lepas pantai sebesar 40% antara 2015 dan 2020 [27]. Penurunan biaya ini sangat penting

dalam meningkatkan daya saing energi angin lepas pantai dibandingkan dengan sumber energi konvensional.

Lebih lanjut, perkembangan dalam teknologi kapal nonkonvensional juga mendukung eksplorasi sumber energi terbarukan laut lainnya. Misalnya, kapal khusus dengan desain yang stabil diperlukan untuk instalasi dan pemeliharaan teknologi energi gelombang dan arus laut. Kemampuan *positioning* yang presisi dan stabilitas dalam kondisi laut yang bergelombang menjadi krusial dalam operasi ini.

8. Perkembangan Teknologi Otonom

Integrasi teknologi otonom dengan desain kapal nonkonvensional membuka era baru dalam industri maritim. Proyek-proyek seperti *Yara Birkeland*, yang bertujuan menjadi kapal kontainer otonom dan listrik pertama di dunia, menunjukkan potensi revolusioner dari kombinasi ini. *Yara Birkeland*, dengan desain lambung yang dioptimalkan untuk efisiensi energi dan stabilitas, dilengkapi dengan sistem navigasi otonom canggih yang memungkinkannya beroperasi tanpa awak.

Pengembangan kapal otonom nonkonvensional juga membawa implikasi signifikan untuk keselamatan maritim. Dengan menghilangkan faktor kesalahan manusia, yang berkontribusi pada sebagian besar kecelakaan maritim, kapal-kapal ini berpotensi meningkatkan keselamatan pelayaran secara keseluruhan. Selain itu, kapal otonom nonkonvensional membuka peluang untuk operasi di daerah-daerah yang sebelumnya dianggap terlalu berbahaya atau tidak ekonomis untuk pelayaran konvensional. Misalnya, kapal otonom kecil dengan desain yang sangat stabil dapat digunakan untuk pengumpulan data oseanografi di daerah kutub atau untuk pemantauan lingkungan jangka panjang di lokasi-lokasi terpencil.

Namun, pengembangan kapal otonom nonkonvensional juga menghadapi tantangan signifikan, termasuk masalah regulasi, keamanan siber, dan integrasi dengan lalu lintas maritim konvensional. Mengatasi tantangan-tantangan ini akan memerlukan kolaborasi antara industri, regulator, dan peneliti untuk

mengembangkan standar dan praktik terbaik untuk operasi kapal otonom [28].

1.5 Klasifikasi Umum Kapal Nonkonvensional

Kapal nonkonvensional mencakup berbagai jenis kapal dengan desain, teknologi, atau metode operasional yang berbeda secara signifikan dari kapal konvensional. Klasifikasi umum kapal nonkonvensional dapat dibagi menjadi beberapa kategori utama berdasarkan karakteristik desain, sistem propulsi, dan fungsi operasionalnya. Berikut adalah penjelasan rinci tentang klasifikasi umum kapal nonkonvensional:

1.5.1 Klasifikasi Berdasarkan Desain Lambung

1. Kapal *Multi-hull*

Kapal *multi-hull* merupakan salah satu inovasi paling signifikan dalam desain kapal nonkonvensional. Kategori ini mencakup berbagai jenis kapal dengan lebih dari satu lambung, masing-masing menawarkan keunggulan spesifik dalam hal stabilitas, efisiensi, dan kinerja. Kategori ini meliputi:

a. Katamaran:

Katamaran, dengan dua lambung paralel, telah menjadi pilihan populer untuk berbagai aplikasi. Desain ini menawarkan area geladak yang luas dan stabilitas yang superior dibandingkan dengan kapal *monohull* konvensional. Penelitian oleh Molland et al. menunjukkan bahwa katamaran dapat mengurangi hambatan gelombang hingga 20% dibandingkan dengan kapal *monohull* pada *displacement* yang sama [13]. Ini menghasilkan efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi, terutama pada kecepatan tinggi. Katamaran telah diadopsi secara luas untuk feri penumpang cepat, kapal wisata, dan kapal penelitian.



Gambar 1. 8 *Horizon Power Catamarans* [29]



Gambar 1. 9 Kapal Feri „*Benchijigua Express*’ [30]

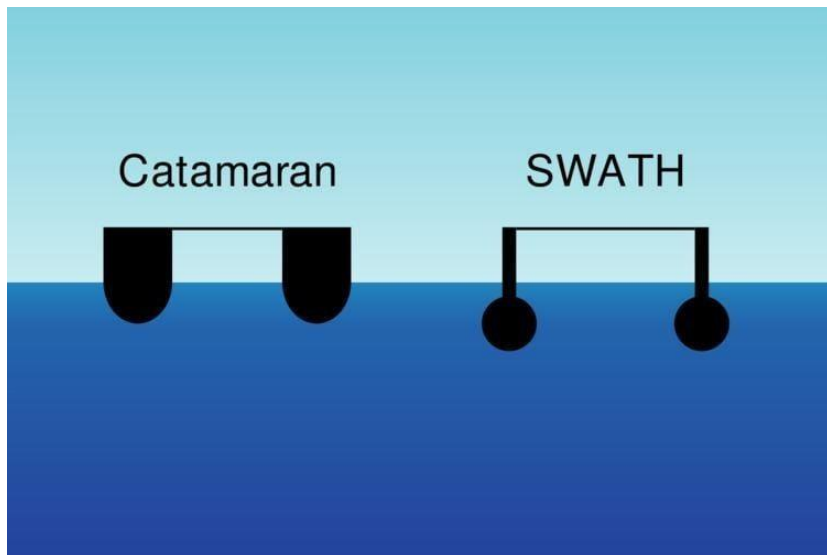
b. *Trimaran*:

Trimaran, dengan tiga lambung, menawarkan kombinasi unik antara stabilitas katamaran dan efisiensi hidrodinamis yang lebih tinggi. Lambung utama di tengah memberikan sebagian besar volume *displacement*, sementara dua lambung samping yang lebih

kecil memberikan stabilitas tambahan dan mengurangi gerakan *rolling*. Penelitian menunjukkan bahwa *trimaran* dapat memiliki hambatan total hingga 10% lebih rendah daripada katamaran pada kecepatan tinggi. Misalnya, feri „*Benchijigua Express*’ yang beroperasi di Kepulauan Kanaria adalah katamaran *Wave-Piercing* yang dapat mengangkut 1291 penumpang dan 341 mobil dengan kecepatan 38 knot, menunjukkan kapabilitas tinggi dari desain ini.

c. SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*):

SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*) adalah varian khusus dari katamaran yang menawarkan stabilitas luar biasa dalam kondisi laut bergelombang. Desain ini menempatkan sebagian besar volume lambung di bawah permukaan air, dengan hanya *strut* vertikal tipis yang menembus permukaan air. Ini secara drastis mengurangi efek gelombang pada kapal, menghasilkan *platform* yang sangat stabil. SWATH telah terbukti sangat berharga untuk aplikasi yang memerlukan stabilitas tinggi, seperti kapal penelitian oseanografi, kapal survei, dan bahkan kapal penumpang untuk rute dengan kondisi laut yang menantang.



Gambar 1. 10 Perbedaan *Waterplane Area Twin Hull* Catamaran dan SWATH [31]

2. Kapal dengan Desain Lambung Khusus

Kategori ini mencakup kapal dengan bentuk lambung yang sangat berbeda dari kapal konvensional, masing-masing dirancang untuk memenuhi kebutuhan operasional spesifik atau untuk mengatasi tantangan tertentu dalam navigasi laut:

a. *Wave-Piercing Hull*:

Wave-Piercing Hull adalah desain inovatif yang "memotong" gelombang alih-alih naik dan turun di atasnya. Ini secara signifikan mengurangi gerakan vertikal kapal, meningkatkan kenyamanan penumpang dan efisiensi bahan bakar. *Wave-Piercing Catamarans* (WPC) telah menjadi standar baru dalam industri feri cepat. Studi oleh Haase et al. menunjukkan bahwa WPC dapat mempertahankan kecepatan operasionalnya dalam kondisi laut yang jauh lebih buruk dibandingkan dengan katamaran konvensional, dengan pengurangan akselerasi vertikal hingga 40% [32].



Gambar 1. 11 *Wave Piercing Catarmaram* [33]

b. *Tumblehome Hull*:

Tumblehome Hull, di mana sisi lambung miring ke dalam alih-alih ke luar, awalnya dikembangkan untuk kapal perang modern untuk mengurangi radar *cross-section*. Desain ini meningkatkan kemampuan *stealth* kapal, membuatnya lebih sulit untuk dideteksi oleh radar. Kapal perusak kelas Zumwalt Angkatan Laut AS adalah contoh terkenal dari penggunaan lambung *tumblehome*. Meskipun

desain ini menawarkan keunggulan dalam hal *stealth*, ia juga menghadirkan tantangan dalam hal stabilitas dan *seakeeping*, yang telah menjadi subjek penelitian dan pengembangan ekstensif.

c. *Axe Bow*:

Axe Bow adalah desain haluan yang sangat tajam dan vertikal, dirancang untuk "memotong" gelombang dan mengurangi perlambatan kapal dalam kondisi laut bergelombang. Penelitian oleh Keuning dan Pinkster menunjukkan bahwa kapal dengan *Axe Bow* dapat mempertahankan kecepatan hingga 30% lebih tinggi dalam kondisi laut bergelombang dibandingkan dengan desain konvensional [34]. Desain ini telah diadopsi untuk berbagai jenis kapal, termasuk kapal patroli cepat, kapal penumpang, dan kapal *supply* lepas pantai.



Gambar 1. 12 Kapal dengan *Axe Bow* [35]

1.5.2 Klasifikasi Berdasarkan Sistem Propulsi

1. Kapal dengan Propulsi Alternatif

Seiring dengan meningkatnya fokus pada keberlanjutan dan pengurangan emisi, kapal dengan sistem propulsi alternatif menjadi semakin penting dalam industri maritim. Kategori ini mencakup kapal yang menggunakan sistem propulsi non-konvensional:

a. Kapal Listrik:

Kapal Listrik menggunakan motor listrik untuk propulsi, sering dikombinasikan dengan baterai berkapasitas besar. Feri listrik *E-ferry Ellen* di Denmark adalah contoh pionir dalam kategori ini. Dengan kapasitas baterai 4,3 MWh, *Ellen* dapat menempuh jarak 22 *nautical mile* dengan sekali pengisian daya, mengurangi emisi CO₂ sebesar 2000 ton per tahun dibandingkan dengan feri diesel konvensional. Perkembangan dalam teknologi baterai dan infrastruktur pengisian daya cepat terus meningkatkan kelayakan kapal listrik untuk rute yang lebih panjang.



Gambar 1. 13 Fery Listrik *E-Ferry Operating in Denmark* [36]

b. Kapal Hidrogen:

Kapal Hidrogen, yang menggunakan sel bahan bakar hidrogen untuk menghasilkan listrik untuk propulsi, menawarkan potensi untuk operasi jarak jauh tanpa emisi. Proyek *HySeas III* di Skotlandia bertujuan untuk mengembangkan feri *RoPax* berbahan bakar hidrogen pertama di dunia. Sistem propulsi ini menggabungkan sel bahan bakar hidrogen dengan baterai *lithium-ion* untuk manajemen daya yang optimal [23]. Meskipun teknologi ini masih dalam tahap pengembangan, ia menawarkan potensi besar untuk dekarbonisasi transportasi maritim jarak jauh.



Gambar 1. 14 Kapal Hidrogen Pertama di Dunia [37]

c. Kapal *Hybrid*:

Kapal *Hybrid* menggabungkan sistem propulsi konvensional dengan sistem listrik, memungkinkan operasi yang lebih fleksibel dan efisien. Kapal penyeberangan *Color Hybrid*, yang beroperasi antara Norwegia dan Swedia, adalah contoh kapal *hybrid* terbesar di dunia. Kapal ini dapat beroperasi hanya dengan tenaga baterai selama 60 menit, memungkinkan operasi bebas emisi di pelabuhan dan di area yang sensitif secara lingkungan.



Gambar 1. 15 Kapal *Color Hybrid* [38]

2. Kapal dengan Sistem Propulsi Khusus

Sistem propulsi khusus telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan operasional spesifik atau untuk meningkatkan kinerja kapal dalam kondisi tertentu. Kategori ini mencakup kapal dengan sistem propulsi unik:

a. *Azipod*:

Azipod, sistem propulsi listrik yang dapat berputar 360 derajat, telah merevolusi manuverabilitas kapal besar. Dikembangkan oleh *ABB Group*, sistem ini menggabungkan *propeller* dengan motor listrik dalam satu unit yang dapat berputar. Penelitian menunjukkan bahwa kapal dengan sistem *Azipod* dapat menghemat hingga 20% bahan bakar dibandingkan dengan sistem propulsi konvensional. Sistem ini telah diadopsi secara luas pada kapal pesiar dan kapal pemecah es, di mana manuverabilitas tinggi sangat penting.

b. *Waterjet Propulsion*:

Waterjet Propulsion menggunakan jet air berkecepatan tinggi untuk propulsi, memberikan akselerasi cepat dan manuverabilitas yang baik. Sistem ini sangat efektif pada kecepatan tinggi dan di perairan dangkal. Feri cepat kelas Francisco, yang menggunakan sistem *waterjet Rolls-Royce*, dapat mencapai kecepatan 58 knot, menjadikannya salah satu feri tercepat di dunia. *Waterjet* juga memiliki keunggulan dalam hal efisiensi pada kecepatan tinggi, dengan beberapa studi menunjukkan efisiensi propulsif hingga 90% pada kecepatan di atas 30 knot.

c. *Cycloidal Propellers (Voith Schneider Propellers)*:

Cycloidal Propellers (Voith Schneider Propellers) adalah sistem propulsi unik yang terdiri dari bilah vertikal yang berputar pada sumbu vertikal. Sistem ini memberikan kontrol *thrust* yang sangat presisi, memungkinkan kapal untuk bergerak ke segala arah tanpa menggunakan *rudder*. Ini sangat berguna untuk kapal yang memerlukan manuverabilitas tinggi dalam ruang terbatas, seperti kapal tunda dan feri.

1.5.3 Klasifikasi Berdasarkan Prinsip Operasional

1. Kapal Efek Permukaan

Kapal efek permukaan memanfaatkan interaksi unik antara kapal dan permukaan air untuk mencapai kinerja yang superior. Kategori ini mencakup kapal yang beroperasi dengan memanfaatkan efek permukaan air:

a. *Hovercraft*:

Hovercraft, atau *Air-Cushion Vehicles (ACV)*, menggunakan bantalan udara untuk mengangkat dirinya di atas permukaan, memungkinkan operasi di atas air dan darat. Bantalan udara ini secara signifikan mengurangi gesekan, memungkinkan kecepatan tinggi dan operasi di perairan sangat dangkal. *Hovercraft* SR.N4, yang pernah beroperasi di Selat Inggris, dapat mengangkut 418 penumpang dan 60 mobil dengan kecepatan 65 knot. Meskipun penggunaan komersialnya telah menurun, *hovercraft* masih digunakan secara luas untuk aplikasi militer dan penyelamatan di daerah dengan kondisi pantai yang sulit.



Gambar 1. 16 *Hovercraft* SR.N4 [39]

b. *Surface Effect Ships (SES)*:

Surface Effect Ships (SES) menggabungkan elemen *hovercraft* dengan katamaran. SES menggunakan bantalan udara di antara dua lambung untuk mengangkat sebagian besar badan kapal di atas air, secara signifikan mengurangi hambatan. Kapal patroli kelas *Skjold* Angkatan Laut Norwegia adalah contoh SES yang sukses, mampu mencapai kecepatan lebih dari 60 knot. SES menawarkan kombinasi unik antara kecepatan tinggi, stabilitas yang baik, dan kemampuan operasi di perairan dangkal.

2. *Hydrofoil*

Hydrofoil menggunakan sayap bawah air (*foil*) untuk mengangkat lambung di atas permukaan air ketika bergerak cepat. Ini secara drastis mengurangi hambatan air, memungkinkan kecepatan yang sangat tinggi. Ketika *foil* mengangkat lambung keluar dari air, hambatan dapat berkurang hingga 80% dibandingkan dengan kapal konvensional pada ukuran yang sama. Meskipun penggunaan komersial *hydrofoil* telah menurun sejak masa jayanya di tahun 1960-an dan 1970-an, teknologi ini masih digunakan dalam aplikasi militer dan rekreasi. Misalnya, kapal patroli *hydrofoil* kelas Pegasus Angkatan Laut AS dapat mencapai kecepatan lebih dari 48 knot [20].



Gambar 1. 17 Kapal *Hydrofoil* [40]

3. Kapal *Semi-submersible*

Kapal *semi-submersible* dapat mengubah drafnya dengan mengisi atau mengosongkan tangki *ballast*. Ini memungkinkan kapal untuk beroperasi dalam dua mode: mode transit dengan *draft* rendah untuk efisiensi, dan mode operasional dengan stabilitas tinggi. Kapal ini sering digunakan dalam industri lepas pantai untuk operasi pengeboran dan konstruksi. Kapal *crane semi-submersible* Saipem 7000, misalnya, memiliki kapasitas angkat hingga 14.000 ton,

memungkinkannya untuk menginstal struktur besar seperti *platform* minyak dan tiang turbin angin di laut dalam.



Gambar 1. 18 Kapal Saipem 7000 [41]

1.5.4 Klasifikasi Berdasarkan Fungsi Khusus

1. Kapal Penelitian dan Survei Nonkonvensional

Kapal penelitian dan survei nonkonvensional dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan unik dari penelitian ilmiah dan eksplorasi laut. Kapal SWATH, seperti yang telah disebutkan sebelumnya, sering digunakan untuk aplikasi ini karena stabilitasnya yang superior. Kapal penelitian RV Kilo Moana, yang dioperasikan oleh University of Hawaii, adalah contoh kapal SWATH yang digunakan untuk penelitian oseanografi. Dengan panjang 57 meter, kapal ini dapat beroperasi dengan stabil bahkan dalam kondisi laut yang sangat bergelombang, memungkinkan pengumpulan data yang akurat.

Kapal dengan kemampuan *positioning* dinamis juga sangat penting dalam penelitian laut dalam dan survei geologi bawah laut. Sistem DP memungkinkan kapal untuk mempertahankan posisinya dengan presisi tinggi, yang penting untuk operasi ROV (*Remotely Operated Vehicle*) dan pengambilan sampel dari dasar laut. Kapal penelitian *Okeanos Explorer*, yang dioperasikan oleh NOAA, dilengkapi dengan sistem DP canggih yang memungkinkannya untuk

melakukan pemetaan dasar laut dan eksplorasi laut dalam dengan presisi tinggi.

2. Kapal Instalasi Lepas Pantai

Kapal instalasi lepas pantai adalah kategori khusus kapal nonkonvensional yang dirancang untuk menginstal struktur besar di laut, seperti turbin angin atau *platform* minyak. Kapal-kapal ini sering melibatkan desain yang sangat stabil dan sistem pengangkatan berat.

- a. *Jack-up vessels* adalah contoh umum dari kapal instalasi lepas pantai. Kapal-kapal ini memiliki kaki yang dapat diturunkan ke dasar laut, mengangkat badan kapal di atas permukaan air dan memberikan *platform* kerja yang sangat stabil. Kapal instalasi angin lepas pantai *Brave Tern*, misalnya, memiliki kapasitas *crane* 800 ton dan dapat beroperasi di kedalaman air hingga 55 meter. Kapal ini telah berperan penting dalam instalasi turbin angin besar di berbagai proyek energi terbarukan lepas pantai di Eropa dan Amerika Utara.
- b. Selain *jack-up vessels*, ada juga kapal *crane semi-submersible* yang digunakan untuk instalasi struktur besar di laut dalam. Kapal seperti *Saipem 7000* dapat mengapung di permukaan untuk transit, kemudian *partially submerge* untuk stabilitas maksimum selama operasi pengangkatan berat. Dengan dua *crane* yang masing-masing memiliki kapasitas 7000 ton, kapal ini mampu menginstal *platform* minyak dan gas terbesar di dunia.
- c. *Heavy lift Vessels* (HLV) adalah kategori lain dari kapal instalasi lepas pantai. Kapal-kapal ini dirancang khusus untuk mengangkut dan menginstal modul-modul besar untuk industri minyak, gas, dan energi terbarukan lepas pantai. Sebagai contoh, kapal *Pioneering Spirit*, yang dioperasikan oleh Allseas, adalah kapal terbesar di dunia dengan panjang 382 meter dan lebar 124 meter. Kapal ini mampu mengangkat dan menginstal *platform* minyak utuh dengan berat hingga 48.000 ton.



Gambar 1. 19 Kapal *Pioneering Spirit* [42]

3. Kapal Penanganan Ikan Nonkonvensional

Seiring dengan perkembangan industri akuakultur lepas pantai, kebutuhan akan kapal khusus untuk mendukung operasi ini juga meningkat. Kapal penanganan ikan nonkonvensional sering menggabungkan fitur katamaran atau *trimaran* dengan sistem penanganan ikan canggih.

Salah satu contoh adalah kapal pemanen ikan salmon yang dikembangkan untuk industri akuakultur Norwegia. Kapal-kapal ini sering menggunakan desain katamaran untuk stabilitas yang lebih baik dan area geladak yang lebih luas. Mereka dilengkapi dengan sistem pemanenan ikan otomatis, fasilitas penyortiran dan pendinginan, serta sistem pemantauan kesehatan ikan *real-time*. Misalnya, kapal pemanen ikan Norwegian Gannet, dengan panjang 94 meter, dapat memanen hingga 150 ton salmon per jam dan memiliki kapasitas penyimpanan 1000 ton.

Kapal penanganan ikan nonkonvensional lainnya termasuk kapal pengolahan ikan yang dapat beroperasi jauh dari pantai. Kapal-kapal ini sering menggunakan desain *hull* yang stabil dan sistem propulsi efisien untuk operasi jangka panjang di laut. Mereka dilengkapi dengan fasilitas pengolahan ikan canggih, memungkinkan pengolahan dan pembekuan ikan segera setelah penangkapan, menjaga kualitas produk.



Gambar 1. 20 Salmon Vessel Norwegian Gannet [43]

4. Kapal Militer Nonkonvensional

Kapal militer nonkonvensional mencakup berbagai desain inovatif yang dikembangkan untuk memenuhi tuntutan operasi militer modern.

- a. Kapal siluman (*Stealth Ships*) adalah salah satu kategori utama dalam kapal militer nonkonvensional. Desain ini bertujuan untuk mengurangi deteksi oleh radar, sonar, dan sensor inframerah. Kapal perusak kelas Zumwalt Angkatan Laut AS adalah contoh terkemuka dari teknologi ini. Dengan desain lambung *tumblehome* dan penggunaan material penyerap radar, kapal ini memiliki radar *cross-section* yang setara dengan kapal nelayan kecil meskipun ukurannya jauh lebih besar.
- b. Kapal patroli cepat dengan desain khusus juga termasuk dalam kategori ini. Misalnya, kapal patroli kelas *Skjold* Angkatan Laut Norwegia menggabungkan teknologi *Surface Effect Ship* (SES) dengan desain *stealth*, menghasilkan kapal yang sangat cepat (lebih dari 60 knot) dan sulit dideteksi.
- c. Kapal amfibi seperti *Landing Craft Air Cushion* (LCAC) adalah contoh lain dari kapal militer nonkonvensional. LCAC menggunakan teknologi *hovercraft* untuk bergerak cepat di atas air dan mendarat di pantai, memungkinkan pengiriman personel dan peralatan militer dengan cepat dari kapal ke pantai. LCAC

Angkatan Laut AS dapat mengangkut beban hingga 75 ton dengan kecepatan lebih dari 40 knot.

Klasifikasi ini menunjukkan keragaman dan kompleksitas kapal nonkonvensional dalam industri maritim modern. Setiap kategori menawarkan keunggulan spesifik dalam hal kinerja, efisiensi, atau kemampuan operasional yang membuatnya cocok untuk aplikasi tertentu. Seiring dengan kemajuan teknologi dan tuntutan operasional yang terus berubah, dapat diperkirakan bahwa klasifikasi ini akan terus berkembang, dengan munculnya desain dan teknologi baru yang mendorong batas-batas apa yang dianggap "konvensional" dalam desain kapal.

1.6 Regulasi dan Standar Internasional untuk Kapal Nonkonvensional

Regulasi dan standar internasional untuk kapal nonkonvensional merupakan aspek krusial dalam memastikan keselamatan, keamanan, dan perlindungan lingkungan dalam operasi maritim. Mengingat karakteristik unik dan inovatif dari kapal nonkonvensional, pengembangan dan penerapan regulasi yang tepat menjadi tantangan tersendiri bagi badan regulasi internasional dan nasional.

1.6.1 Kerangka Regulasi Internasional

Organisasi Maritim Internasional (IMO) memainkan peran sentral dalam pengembangan regulasi untuk kapal nonkonvensional. Sebagai badan PBB yang bertanggung jawab atas keselamatan dan keamanan pelayaran serta pencegahan polusi laut dari kapal, IMO telah mengadopsi beberapa instrumen kunci yang secara khusus mengatur berbagai jenis kapal nonkonvensional.

1. *International Code of Safety for High-Speed Craft (HSC Code)*

HSC Code adalah salah satu regulasi paling signifikan untuk kapal nonkonvensional. Kode ini pertama kali diadopsi pada tahun 1994 dan kemudian diperbarui pada tahun 2000. *HSC Code 2000* berlaku untuk kapal berkecepatan tinggi yang melakukan perjalanan internasional, termasuk:

- a. Kapal penumpang yang tidak berlayar lebih dari empat jam dari tempat perlindungan pada kecepatan operasional.

- b. Kapal kargo hingga 500 GT yang tidak berlayar lebih dari 8 jam dari tempat perlindungan.

HSC *Code* memperkenalkan pendekatan yang berbeda dari konvensi SOLAS tradisional, dengan fokus pada manajemen risiko dan pengurangan risiko operasional. Beberapa aspek kunci dari HSC *Code* meliputi:

- a. Persyaratan untuk sistem kontrol aktif
- b. Kompartementasi yang andal
- c. Area evakuasi dua arah
- d. Penekanan pada pelatihan kru yang tepat
- e. Pembatasan operasional berdasarkan kondisi cuaca

HSC *Code* juga mencakup persyaratan spesifik untuk desain dan konstruksi, stabilitas dalam kondisi rusak dan utuh, mesin dan sistem, perlengkapan keselamatan, dan manajemen operasional [44].

2. *Code of Safety for Special Purpose Ships (SPS Code)*

SPS *Code* dikembangkan untuk mengakomodasi kapal dengan karakteristik dan penggunaan khusus. Kode ini berlaku untuk kapal yang membawa lebih dari 12 personel khusus, seperti:

- a. Kapal penelitian
- b. Kapal eksplorasi
- c. Kapal pelatihan pelaut

SPS *Code* mempertimbangkan bahwa personel khusus memiliki familiaritas dengan kapal dan prosedur keselamatan, sehingga memungkinkan beberapa penyesuaian dari persyaratan yang biasanya berlaku untuk kapal penumpang. Kode ini mencakup aspek-aspek seperti:

- a. Stabilitas dan kompartementasi
- b. Perlindungan kebakaran
- c. Peralatan keselamatan
- d. Komunikasi radio

SPS *Code* memberikan fleksibilitas dalam desain dan operasi kapal khusus, sambil tetap memastikan tingkat keselamatan yang tinggi [45].

3. *International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code)*

Polar Code mulai berlaku pada 1 Januari 2017 dan mencakup kapal-kapal yang beroperasi di perairan Arktik dan Antarktika. Meskipun tidak secara khusus ditujukan untuk kapal nonkonvensional, *Polar Code* memiliki implikasi signifikan untuk kapal-kapal dengan desain khusus yang beroperasi di lingkungan ekstrem ini. Kode ini mencakup:

- a. Desain dan konstruksi kapal untuk lingkungan kutub
- b. Peralatan khusus untuk operasi di es
- c. Pelatihan khusus untuk kru
- d. Perencanaan perjalanan yang mempertimbangkan kondisi es
- e. Prosedur pencarian dan penyelamatan di lingkungan kutub
- f. Perlindungan lingkungan khusus untuk daerah sensitif kutub

Polar Code mengadopsi pendekatan holistik terhadap risiko yang unik di lingkungan kutub, mempertimbangkan tidak hanya keselamatan kapal dan kru, tetapi juga perlindungan lingkungan yang rentan [46].

4. *International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)*

IGF Code mulai berlaku pada 1 Januari 2017 dan menetapkan standar keselamatan untuk kapal-kapal yang menggunakan gas atau bahan bakar dengan titik nyala rendah lainnya. Kode ini sangat relevan untuk banyak kapal nonkonvensional yang mengadopsi teknologi propulsi alternatif sebagai bagian dari upaya untuk mengurangi emisi. *IGF Code* mencakup:

- a. Desain dan konstruksi sistem bahan bakar
- b. Pengaturan mesin dan listrik
- c. Sistem pemadam kebakaran
- d. Persyaratan pelatihan khusus untuk kru

IGF Code bertujuan untuk meminimalkan risiko yang terkait dengan penggunaan bahan bakar alternatif, sambil memungkinkan adopsi teknologi yang lebih bersih [47].

1.6.2 Peran Badan Klasifikasi

Selain regulasi IMO, standar yang dikembangkan oleh badan klasifikasi juga memainkan peran penting dalam regulasi kapal nonkonvensional. Badan klasifikasi seperti DNV GL, *Lloyd's Register*, dan *American Bureau of Shipping* telah mengembangkan aturan dan pedoman khusus untuk berbagai jenis kapal nonkonvensional.

Misalnya, DNV GL telah menerbitkan aturan untuk *High Speed and Light Craft* yang mencakup berbagai jenis kapal cepat dan ringan, termasuk *hydrofoil* dan *hovercraft*. Aturan ini meliputi:

1. Kriteria stabilitas khusus
2. Persyaratan struktural untuk lambung cepat
3. Standar untuk sistem propulsi khusus
4. Pedoman untuk sistem kontrol dan navigasi canggih

Badan klasifikasi juga sering bekerja sama dengan pembuat kapal dan operator untuk mengembangkan standar untuk teknologi baru yang belum dicakup oleh regulasi yang ada. Ini memungkinkan inovasi sambil tetap memastikan keselamatan dan keandalan [48].

1.6.3 Regulasi untuk Kapal Otonom

Regulasi untuk kapal otonom, yang sering melibatkan desain nonkonvensional, adalah area yang sedang berkembang pesat. IMO sedang melakukan *Regulatory Scoping Exercise* untuk *Maritime Autonomous Surface Ships* (MASS) untuk menentukan bagaimana operasi kapal otonom dapat diatur dalam instrumen IMO yang ada.

Proses ini melibatkan:

1. Identifikasi ketentuan dalam instrumen IMO yang ada yang menghalangi operasi MASS
2. Identifikasi ketentuan yang tidak berlaku untuk MASS
3. Identifikasi kesenjangan dalam regulasi yang perlu diatasi

Hasil dari proses ini akan menentukan apakah diperlukan amandemen terhadap instrumen yang ada atau pengembangan instrumen baru khusus untuk MASS. Beberapa area kunci yang sedang dipertimbangkan meliputi:

1. Definisi "nakhoda" dan "kru" dalam konteks kapal otonom

2. Persyaratan untuk sistem kontrol jarak jauh dan pusat kontrol darat
3. Standar untuk sistem pengambilan keputusan otonom
4. Protokol untuk interaksi antara kapal otonom dan kapal konvensional

Pengembangan regulasi untuk kapal otonom menunjukkan bagaimana kerangka regulasi maritim internasional harus beradaptasi dengan cepat untuk mengakomodasi inovasi teknologi [28].

1.6.4 Standar Lingkungan

Kapal nonkonvensional juga harus mematuhi regulasi IMO tentang pencegahan polusi laut, terutama MARPOL (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*). Annex VI MARPOL, yang mengatur polusi udara dari kapal, memiliki implikasi khusus untuk kapal nonkonvensional dengan sistem propulsi alternatif.

Beberapa aspek kunci dari regulasi lingkungan yang relevan untuk kapal nonkonvensional meliputi:

1. Batas emisi NO_x dan SO_x
2. Persyaratan efisiensi energi (*Energy Efficiency Design Index - EEDI*)
3. Rencana Manajemen Efisiensi Energi Kapal (*Ship Energy Efficiency Management Plan - SEEMP*)
4. Pengumpulan data konsumsi bahan bakar

Kapal dengan propulsi listrik atau hidrogen mungkin lebih mudah memenuhi standar emisi yang semakin ketat, memberikan keunggulan kompetitif dalam lingkungan regulasi yang semakin ketat [49].

1.6.5 Tantangan dan Perkembangan Masa Depan

Tantangan utama dalam regulasi kapal nonkonvensional adalah menyeimbangkan kebutuhan untuk inovasi dengan kebutuhan untuk keselamatan dan perlindungan lingkungan. Regulasi harus cukup fleksibel untuk mengakomodasi teknologi baru, tetapi juga cukup ketat untuk memastikan standar keselamatan yang tinggi.

Pendekatan berbasis tujuan (*goal-based standards*) semakin banyak diadopsi, di mana tujuan keselamatan ditetapkan, tetapi cara untuk mencapai tujuan tersebut dapat bervariasi tergantung pada desain dan teknologi spesifik. Ini memungkinkan fleksibilitas dalam inovasi sambil tetap memastikan hasil keselamatan yang diinginkan.

Implementasi dan penegakan regulasi untuk kapal nonkonvensional juga menghadirkan tantangan unik. Inspektur kapal dan surveyor klasifikasi perlu memiliki pemahaman yang mendalam tentang teknologi dan desain inovatif yang digunakan dalam kapal-kapal ini. Ini sering membutuhkan pelatihan khusus dan pengembangan keahlian baru dalam industri.

Ke depannya, perkembangan regulasi untuk kapal nonkonvensional kemungkinan akan fokus pada:

1. Standar untuk kapal dengan nol emisi
2. Regulasi yang lebih komprehensif untuk kapal otonom
3. Pedoman untuk penggunaan teknologi digital canggih dalam operasi kapal
4. Standar untuk penggunaan bahan bakar alternatif baru seperti amonia dan hidrogen
5. Regulasi untuk operasi kapal di lingkungan ekstrem, termasuk laut dalam dan ruang angkasa dekat

Perkembangan ini akan memerlukan kolaborasi erat antara regulator, industri, dan lembaga penelitian untuk memastikan bahwa regulasi tetap relevan dan efektif dalam menghadapi kemajuan teknologi yang cepat [50].

1.7 Tren Perkembangan Teknologi Kapal Nonkonvensional

Perkembangan teknologi kapal nonkonvensional terus mengalami akselerasi, didorong oleh kebutuhan akan efisiensi yang lebih tinggi, keberlanjutan lingkungan, dan kemampuan operasional yang lebih canggih. Beberapa tren utama yang sedang membentuk masa depan kapal nonkonvensional meliputi:

1. Propulsi Alternatif dan Teknologi Nol Emisi

Salah satu tren paling signifikan dalam perkembangan kapal nonkonvensional adalah pergeseran menuju sistem propulsi alternatif

dan teknologi nol emisi. Ini didorong oleh regulasi lingkungan yang semakin ketat dan kesadaran global akan perubahan iklim.

a. Propulsi Listrik dan *Hybrid*

Perkembangan teknologi baterai telah membuka jalan bagi adopsi yang lebih luas dari sistem propulsi listrik dan *hybrid* dalam industri maritim. Baterai *lithium-ion* dengan densitas energi tinggi kini memungkinkan kapal untuk beroperasi sepenuhnya dengan tenaga listrik untuk jarak yang semakin jauh.

Feri listrik '*Ellen*' di Denmark adalah contoh pionir dalam kategori ini. Dengan kapasitas baterai 4,3 MWh, *Ellen* dapat menempuh jarak 22 *nautical mile* dengan sekali pengisian daya. Sistem propulsi elektriknya tidak hanya mengurangi emisi CO₂ sebesar 2000 ton per tahun dibandingkan dengan feri diesel konvensional, tetapi juga mengurangi biaya operasional secara signifikan.

Selain baterai *lithium-ion*, penelitian sedang dilakukan pada teknologi baterai generasi berikutnya, termasuk baterai *solid-state* dan baterai *lithium-sulfur*. Baterai *solid-state* menjanjikan densitas energi yang lebih tinggi, waktu pengisian yang lebih cepat, dan keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan baterai *lithium-ion* konvensional. Sementara itu, baterai *lithium-sulfur* berpotensi menawarkan kapasitas penyimpanan energi hingga lima kali lipat dibandingkan dengan baterai *lithium-ion* dengan berat yang sama.

Sistem propulsi *hybrid*, yang menggabungkan mesin diesel konvensional dengan motor listrik dan baterai, juga semakin populer. Sistem ini memungkinkan kapal untuk beroperasi dalam mode listrik penuh di pelabuhan atau di area yang sensitif secara lingkungan, sementara tetap memiliki jangkauan dan fleksibilitas yang ditawarkan oleh mesin diesel untuk perjalanan jarak jauh.

b. Teknologi Sel Bahan Bakar Hidrogen

Sel bahan bakar hidrogen muncul sebagai pilihan menjanjikan untuk propulsi kapal jarak jauh tanpa emisi. Teknologi ini mengubah hidrogen menjadi listrik melalui reaksi elektrokimia, dengan air sebagai satu-satunya produk sampingan.

Proyek *HySeas* III di Skotlandia sedang mengembangkan feri *RoPax* berbahan bakar hidrogen pertama di dunia. Kapal ini akan menggunakan sel bahan bakar yang dikombinasikan dengan baterai *lithium-ion* untuk manajemen daya yang optimal. Tantangan utama dalam adopsi teknologi ini termasuk produksi hidrogen hijau dalam skala besar, infrastruktur pengisian bahan bakar, dan penyimpanan hidrogen *on-board* yang aman dan efisien.

Penelitian juga sedang dilakukan pada sel bahan bakar suhu tinggi, seperti *Solid Oxide Fuel cells* (SOFC), yang menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dan kemampuan untuk menggunakan berbagai jenis bahan bakar, termasuk gas alam dan amonia.

c. Layar Canggih dan Teknologi Angin

Kebangkitan minat pada teknologi angin modern untuk propulsi kapal mencerminkan upaya industri untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan. Sistem *SkySails*, yang menggunakan layang-layang besar untuk menarik kapal, telah menunjukkan potensi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 20% pada kondisi yang optimal.

Rotor *Flettner*, yang memanfaatkan efek *Magnus* untuk menghasilkan daya dorong, juga mendapatkan perhatian yang signifikan. Perusahaan *Norsepower* telah menunjukkan bahwa rotor sail mereka dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 20% pada kondisi yang optimal. Teknologi ini telah diuji pada berbagai jenis kapal, termasuk kapal tanker dan kapal feri.

Penelitian lebih lanjut sedang dilakukan pada layar kaku yang dapat dilipat dan sistem sayap yang terinspirasi dari desain pesawat. Teknologi-teknologi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi aerodinamis dan memungkinkan integrasi yang lebih baik dengan desain kapal modern.

2. Otomatisasi dan Kapal Otonom

Otomatisasi dan pengembangan kapal otonom merupakan tren yang berkembang pesat dalam teknologi kapal nonkonvensional.

a. Sistem Navigasi Otonom

Pengembangan sistem navigasi otonom yang canggih merupakan langkah penting menuju realisasi kapal otonom sepenuhnya. Sistem-sistem ini menggabungkan berbagai teknologi sensor, termasuk radar, lidar, kamera optik, dan sistem penginderaan akustik, untuk menciptakan kesadaran situasional yang komprehensif. Algoritma *machine learning* dan kecerdasan buatan digunakan untuk menginterpretasikan data sensor ini, memungkinkan kapal untuk mendeteksi dan menghindari hambatan, mengoptimalkan rute berdasarkan kondisi cuaca dan lalu lintas maritim, dan membuat keputusan navigasi yang kompleks.

Proyek *AUTOSHIP* Uni Eropa sedang mengembangkan dan menguji teknologi untuk kapal otonom di lingkungan yang terkontrol. Ini termasuk pengembangan sistem deteksi dan klasifikasi objek berbasis AI yang dapat mengidentifikasi dan melacak berbagai jenis kapal dan hambatan di laut.

b. Pusat Kontrol Jarak Jauh

Seiring dengan pengembangan kapal otonom, terjadi perkembangan paralel dalam teknologi pusat kontrol jarak jauh. Pusat-pusat ini akan memungkinkan pemantauan dan kontrol beberapa kapal otonom dari lokasi darat, mengubah sifat operasi maritim. Pusat kontrol jarak jauh ini dilengkapi dengan teknologi visualisasi canggih, termasuk realitas virtual dan *augmented reality*, yang memungkinkan operator untuk "berada" di kapal secara virtual. Ini memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang situasi di kapal dan pengambilan keputusan yang lebih informasi.

Tantangan utama dalam pengembangan pusat kontrol jarak jauh termasuk memastikan keamanan siber yang kuat, mengatasi keterlambatan dalam komunikasi satelit, dan mengembangkan protokol untuk transisi antara kontrol otonom dan manusia.

c. Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) dan *Machine Learning*

AI dan *machine learning* semakin diintegrasikan ke dalam berbagai aspek operasi kapal, dari optimalisasi rute dan manajemen energi hingga pemeliharaan prediktif. Sistem AI canggih dapat menganalisis data dari berbagai sensor di kapal untuk memprediksi kegagalan peralatan sebelum terjadi, memungkinkan pemeliharaan

proaktif yang mengurangi waktu henti dan biaya operasional. AI juga digunakan untuk mengoptimalkan konsumsi bahan bakar dengan menyesuaikan kecepatan dan rute kapal berdasarkan kondisi cuaca, arus laut, dan faktor-faktor lainnya.

Dalam konteks keselamatan maritim, AI digunakan untuk mengembangkan sistem deteksi anomali yang dapat mengidentifikasi perilaku kapal yang tidak biasa atau mencurigakan, membantu dalam pencegahan kecelakaan dan aktivitas ilegal di laut.

3. Desain *Hull* dan Struktur Inovatif

Inovasi dalam desain *hull* dan struktur kapal terus mendorong batas-batas kinerja dan efisiensi.

a. Material Canggih

Penggunaan material komposit canggih dalam konstruksi kapal nonkonvensional terus meningkat. Material seperti serat karbon, kevlar, dan komposit matriks keramik menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang superior dibandingkan dengan baja konvensional. Kapal yang dibangun dengan material komposit dapat memiliki berat hingga 40% lebih ringan dibandingkan dengan kapal baja yang setara, yang mengarah pada pengurangan signifikan dalam konsumsi bahan bakar dan peningkatan kinerja. Selain itu, material komposit memiliki ketahanan korosi yang lebih baik, mengurangi kebutuhan pemeliharaan dan memperpanjang umur kapal.

Penelitian juga sedang dilakukan pada nanomaterial dan material fungsional cerdas yang dapat mengubah sifatnya dalam menanggapi rangsangan eksternal. Misalnya, *coating* yang dapat mengubah kekasarannya untuk mengurangi hambatan atau meningkatkan *antifouling*.

b. Desain Biomimetik

Tren yang berkembang dalam menerapkan prinsip-prinsip biomimetik pada desain kapal melibatkan peniruan bentuk dan struktur yang ditemukan di alam untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamis. Desain *hull* yang terinspirasi dari bentuk ikan tuna telah menunjukkan pengurangan hambatan yang signifikan. Penelitian

menunjukkan bahwa desain seperti ini dapat mengurangi hambatan hingga 15% dibandingkan dengan desain konvensional, yang mengarah pada penghematan bahan bakar yang substansial.

Selain itu, penelitian sedang dilakukan pada permukaan mikrostruktur yang terinspirasi dari kulit hiu untuk mengurangi hambatan. Teknologi ini, yang dikenal sebagai *riblets*, telah menunjukkan potensi untuk mengurangi hambatan gesekan hingga 8%.

c. Struktur Adaptif

Konsep struktur kapal adaptif yang dapat mengubah bentuknya untuk mengoptimalkan kinerja dalam berbagai kondisi operasi sedang dalam pengembangan aktif. Ini termasuk *foil* yang dapat disesuaikan yang dapat mengubah bentuk atau orientasinya berdasarkan kecepatan kapal dan kondisi laut, mengoptimalkan *lift* dan mengurangi hambatan. Penelitian juga sedang dilakukan pada lambung yang dapat berubah bentuk, yang dapat menyesuaikan profil bawahannya untuk mengoptimalkan kinerja pada berbagai kecepatan dan kondisi beban. Teknologi material cerdas, seperti paduan dengan memori bentuk dan material *piezoelektrik*, memainkan peran kunci dalam pengembangan struktur adaptif ini.

4. Teknologi Digital dan Konektivitas

Digitalisasi dan peningkatan konektivitas sedang mengubah cara kapal konvensional beroperasi dan dikelola.

a. *Internet of Things* (IoT) Maritim

Penerapan teknologi IoT di kapal memungkinkan pemantauan *real-time* berbagai sistem dan komponen. Sensor canggih dipasang di seluruh kapal untuk mengumpulkan data tentang segala hal mulai dari kinerja mesin dan konsumsi bahan bakar hingga kondisi struktural dan parameter lingkungan.

Data ini dikirim ke sistem manajemen kapal terpusat, yang menggunakan algoritma analitik canggih untuk mengoptimalkan kinerja kapal, memprediksi kebutuhan pemeliharaan, dan meningkatkan efisiensi operasional. Misalnya, sistem IoT dapat mengoptimalkan penggunaan bahan bakar dengan menyesuaikan

kecepatan kapal berdasarkan kondisi cuaca dan laut secara *real-time*. Teknologi IoT juga memungkinkan pemantauan jarak jauh kondisi kargo sensitif, seperti kontainer berpendingin, memastikan integritas kargo sepanjang perjalanan.

b. *Digital Twin*

Konsep *digital twin*, di mana representasi digital yang akurat dari kapal dibuat dan diperbarui secara *real-time*, semakin diadopsi dalam industri maritim. *Digital twin* memungkinkan simulasi dan optimalisasi kinerja kapal dalam berbagai skenario operasional. Ini dapat digunakan untuk menguji perubahan desain secara virtual, mengoptimalkan rute dan konsumsi bahan bakar, dan bahkan melatih kru dalam skenario operasional yang kompleks.

Dalam konteks pemeliharaan, *digital twin* memungkinkan pemecahan masalah jarak jauh yang canggih. Teknisi di darat dapat mengakses representasi digital kapal untuk mendiagnosis masalah dan merencanakan perbaikan, bahkan sebelum kapal tiba di pelabuhan.

c. Komunikasi Satelit Canggih

Perkembangan dalam teknologi komunikasi satelit, termasuk konstelasi satelit orbit rendah (LEO) baru, memungkinkan konektivitas yang lebih cepat dan andal antara kapal dan darat. Ini mendukung berbagai aplikasi, termasuk operasi jarak jauh, pemantauan kinerja *real-time*, dan pembaruan perangkat lunak *over-the-air* untuk sistem kapal. Konektivitas yang ditingkatkan juga memungkinkan penggunaan teknologi *augmented reality* untuk dukungan pemeliharaan jarak jauh, di mana teknisi di darat dapat memandu kru kapal melalui prosedur perbaikan kompleks.

Tantangan utama dalam pengembangan teknologi komunikasi maritim termasuk memastikan keamanan siber yang kuat dan mengatasi masalah cakupan di daerah terpencil.

5. Teknologi Energi Terbarukan Terintegrasi

Integrasi teknologi energi terbarukan ke dalam desain kapal menjadi tren yang semakin penting.

a. Panel Surya Canggih

Pengembangan panel surya yang lebih efisien dan fleksibel memungkinkan integrasi yang lebih baik ke dalam struktur kapal. Teknologi sel surya terbaru, seperti sel *perovskite* dan sel *multi-junction*, menawarkan efisiensi konversi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan panel silikon konvensional. Beberapa konsep kapal menggabungkan panel surya ke dalam layar atau bahkan seluruh permukaan lambung. Misalnya, proyek "Solar Sailor" telah mengembangkan layar kaku yang berfungsi ganda sebagai pengumpul energi surya dan alat propulsi angin.

Penelitian juga sedang dilakukan pada *coating fotovoltai* transparan yang dapat diterapkan pada jendela dan permukaan lain di kapal, lebih jauh meningkatkan area yang tersedia untuk pengumpulan energi surya.

b. Sistem Penyimpanan Energi Hibrid

Tren menuju sistem penyimpanan energi hibrid yang menggabungkan berbagai teknologi seperti baterai, *supercapacitor*, dan sel bahan bakar untuk mengoptimalkan manajemen energi di kapal. Sistem ini memungkinkan pemanfaatan yang lebih efisien dari sumber energi yang berbeda. Misalnya, *supercapacitor* dapat menangani lonjakan daya jangka pendek, sementara baterai menyediakan penyimpanan energi jangka menengah, dan sel bahan bakar memberikan daya dasar jangka panjang.

Penelitian juga sedang dilakukan pada teknologi penyimpanan energi alternatif, seperti penyimpanan energi termal dan sistem penyimpanan udara terkompresi, yang dapat menawarkan solusi penyimpanan energi skala besar untuk kapal.

c. Pemanfaatan Energi Limbah

Pengembangan teknologi untuk memanfaatkan energi limbah di kapal menjadi fokus penelitian yang semakin penting. Sistem pemulihan panas limbah canggih dapat mengubah panas yang dihasilkan oleh mesin kapal menjadi listrik, meningkatkan efisiensi energi keseluruhan kapal. Perangkat *piezoelektrik* sedang dikembangkan untuk mengubah getaran kapal menjadi listrik. Meskipun jumlah energi yang dihasilkan relatif kecil, ini dapat

digunakan untuk mentenagai sensor dan perangkat IoT di seluruh kapal, mengurangi kebutuhan untuk kabel dan baterai.

Penelitian juga sedang dilakukan pada sistem yang dapat memanfaatkan energi dari gerakan kapal di laut. Ini termasuk perangkat yang mengkonversi gerakan vertikal kapal menjadi energi listrik, mirip dengan prinsip yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga gelombang.

6. Teknologi Pengurangan Emisi

Selain propulsi alternatif, berbagai teknologi sedang dikembangkan untuk mengurangi emisi dari kapal konvensional dan nonkonvensional. Beberapa diantaranya:

a. Sistem *Scrubber* Canggih

Pengembangan sistem *scrubber* yang lebih efisien dan kompak untuk mengurangi emisi sulfur dari kapal yang masih menggunakan bahan bakar konvensional terus berlanjut. Sistem *scrubber hybrid*, yang dapat beroperasi dalam mode loop tertutup atau terbuka, menawarkan fleksibilitas yang lebih besar dalam memenuhi regulasi emisi yang berbeda di berbagai wilayah perairan.

Penelitian terbaru fokus pada pengembangan *scrubber* "kering" yang menggunakan material padat alih-alih air laut atau air tawar untuk menangkap polutan. Sistem ini menawarkan keuntungan berupa pengurangan konsumsi air dan eliminasi kebutuhan untuk membuang air *scrubber*.

b. Teknologi Penangkapan Karbon

Penelitian sedang dilakukan pada sistem penangkapan karbon *on-board* yang dapat menangkap dan menyimpan emisi CO₂ dari kapal untuk pembuangan atau penggunaan kembali yang aman. Beberapa pendekatan yang sedang dieksplorasi termasuk:

- Sistem absorpsi kimia yang menggunakan larutan amine untuk menangkap CO₂
- Teknologi membran yang dapat memisahkan CO₂ dari gas buang
- Sistem adsorpsi yang menggunakan material berpori untuk menangkap CO₂

Tantangan utama dalam pengembangan teknologi ini termasuk mengurangi ukuran dan berat sistem agar cocok di kapal, serta mengembangkan metode yang efisien untuk menyimpan dan menangani CO₂ yang ditangkap.

c. Katalis Canggih

Pengembangan katalis canggih untuk mengurangi emisi NO_x dan partikulat dari mesin kapal terus berlanjut. Katalis *Selective Catalytic Reduction* (SCR) yang lebih efisien dan tahan lama sedang dikembangkan untuk mengurangi emisi NO_x.

Penelitian juga sedang dilakukan pada katalis yang dapat mengkonversi emisi menjadi produk yang berguna. Misalnya, beberapa proyek sedang mengeksplorasi penggunaan katalis untuk mengubah CO₂ menjadi metanol, yang kemudian dapat digunakan sebagai bahan bakar.

7. Teknologi Keselamatan dan Keamanan Canggih

a. Sistem Deteksi dan Penghindaran Tabrakan Canggih

Pengembangan sistem deteksi dan penghindaran tabrakan yang lebih canggih menggunakan kombinasi radar, lidar, kamera optik, dan kecerdasan buatan. Sistem-sistem ini dapat mendeteksi objek kecil dan kapal lain dalam jarak jauh dan dalam berbagai kondisi cuaca, meningkatkan keselamatan navigasi.

b. *Cybersecurity* Maritim

Dengan meningkatnya digitalisasi dan konektivitas kapal, keamanan siber menjadi semakin penting. Pengembangan sistem keamanan siber khusus maritim yang dapat melindungi sistem kapal dari serangan siber dan gangguan menjadi fokus utama.

c. Sistem Evakuasi Canggih

Inovasi dalam sistem evakuasi kapal, termasuk peluncur evakuasi yang dapat diinflasi dengan cepat dan sistem lifeboat yang lebih canggih. Beberapa konsep baru melibatkan penggunaan kapsul evakuasi individual yang dapat melindungi penumpang dalam kondisi cuaca ekstrem.

8. Teknologi untuk Operasi di Lingkungan Ekstrem

a. Kapal untuk Eksplorasi Laut Dalam

Pengembangan kapal dan *submersible* untuk eksplorasi laut dalam dengan kemampuan untuk beroperasi pada kedalaman yang lebih besar dan dalam jangka waktu yang lebih lama. Ini termasuk penggunaan material baru yang tahan tekanan tinggi dan sistem propulsi yang lebih efisien untuk operasi di kedalaman.

b. Kapal untuk Operasi di Kutub

Inovasi dalam desain kapal untuk operasi di lingkungan kutub, termasuk sistem pemecah es yang lebih canggih dan material yang tahan suhu ekstrem. Beberapa konsep melibatkan penggunaan gelembung udara atau sistem pemanasan lambung untuk mengurangi gesekan dengan es.

c. Teknologi untuk Eksplorasi Luar Angkasa

Meskipun masih dalam tahap konseptual, penelitian sedang dilakukan pada "kapal luar angkasa" yang dapat beroperasi di orbit rendah Bumi atau bahkan di permukaan planet lain. Ini melibatkan pengembangan sistem propulsi dan life support yang sangat canggih.

1.8 Soal Latihan

1. Bagaimana definisi kapal nonkonvensional memengaruhi pengembangan regulasi dan standar keselamatan maritim internasional?
2. Jelaskan perbedaan utama antara desain lambung kapal konvensional dan nonkonvensional, serta berikan contoh spesifik dari desain lambung nonkonvensional!
3. Jelaskan bagaimana perkembangan kapal *hydrofoil* pada awal abad ke-20 berkontribusi terhadap evolusi kapal nonkonvensional secara keseluruhan!
4. Analisis bagaimana fokus pada keberlanjutan lingkungan di awal abad ke-21 telah memengaruhi arah perkembangan kapal nonkonvensional!
5. Jelaskan bagaimana desain lambung inovatif pada kapal nonkonvensional berkontribusi terhadap efisiensi operasional dan pengurangan emisi dalam industri maritim!
6. Jelaskan keunggulan desain katamaran dibandingkan dengan kapal *monohull* konvensional dalam hal efisiensi dan stabilitas.

Berikan contoh spesifik penerapan desain ini dalam industri maritim!

7. Jelaskan peran kapal penelitian dan survei nonkonvensional dalam kemajuan ilmu kelautan. Berikan contoh spesifik bagaimana desain kapal ini memungkinkan pengumpulan data yang lebih akurat!
8. Jelaskan perbedaan utama antara pendekatan regulasi dalam HSC *Code* dibandingkan dengan konvensi SOLAS tradisional. Bagaimana perbedaan ini mencerminkan karakteristik unik kapal berkecepatan tinggi?
9. Analisis tantangan regulasi yang dihadapi dalam pengembangan dan implementasi standar untuk kapal otonom (MASS). Bagaimana IMO berupaya mengatasi tantangan-tantangan ini?
10. Jelaskan tren terkini dalam teknologi pengurangan emisi untuk kapal. Bagaimana inovasi seperti sistem *scrubber* canggih dan teknologi penangkapan karbon dapat membantu industri maritim mencapai tujuan keberlanjutan?

1.9 Kesimpulan

1. Definisi kapal nonkonvensional mencakup berbagai aspek inovatif dalam desain, teknologi, dan operasi kapal yang berbeda secara signifikan dari norma tradisional dalam industri maritim. Karakteristik utamanya meliputi desain lambung yang unik, sistem propulsi alternatif, penggunaan teknologi canggih, dan fokus pada tujuan operasional spesifik. Pemahaman komprehensif tentang kapal nonkonvensional penting untuk mengapresiasi potensinya dalam mengatasi tantangan maritim kontemporer dan masa depan, serta untuk pengembangan regulasi yang tepat. Seiring dengan kemajuan teknologi, definisi ini akan terus berkembang, mencerminkan dinamika inovasi dalam industri maritim.
2. Sejarah perkembangan kapal nonkonvensional mencerminkan evolusi teknologi maritim yang didorong oleh kebutuhan akan kinerja yang lebih baik, efisiensi yang lebih tinggi, dan kemampuan untuk beroperasi dalam kondisi yang sebelumnya tidak mungkin. Dari eksperimen awal dengan *hydrofoil* hingga kapal otonom dan ramah lingkungan modern, perjalanan ini ditandai oleh inovasi berkelanjutan dan adaptasi terhadap tantangan baru. Perkembangan ini meliputi revolusi dalam desain

lambung, sistem propulsi, material konstruksi, dan integrasi teknologi canggih. Seiring kita memasuki era yang ditandai oleh urgensi perubahan iklim dan revolusi digital, dapat dipastikan bahwa inovasi dalam desain dan teknologi kapal nonkonvensional akan terus memainkan peran krusial dalam membentuk masa depan industri maritim, mendorong efisiensi, keberlanjutan, dan kemampuan operasional yang lebih besar.

3. Pentingnya kapal nonkonvensional dalam industri maritim modern tidak dapat dilebih-lebihkan. Dari meningkatkan efisiensi operasional dan membuka peluang eksplorasi baru, hingga berkontribusi pada pengurangan emisi dan revolusi dalam transportasi laut, kapal nonkonvensional terus mendorong batas-batas inovasi dalam sektor maritim. Desain inovatif dan teknologi canggih yang diterapkan pada kapal nonkonvensional menawarkan solusi untuk berbagai tantangan yang dihadapi industri maritim, termasuk efisiensi energi, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan. Seiring industri ini menghadapi tantangan global yang semakin kompleks, peran kapal nonkonvensional dalam membentuk masa depan maritim yang lebih efisien, berkelanjutan, dan inovatif akan semakin krusial. Perkembangan berkelanjutan dalam desain dan teknologi kapal nonkonvensional akan terus membuka peluang baru dan mendorong transformasi positif dalam industri maritim global.
4. Klasifikasi umum kapal nonkonvensional mencerminkan keragaman dan inovasi yang luar biasa dalam industri maritim modern. Dari desain *multi-hull* yang meningkatkan stabilitas dan efisiensi, hingga sistem propulsi alternatif yang mendukung keberlanjutan lingkungan, setiap kategori kapal nonkonvensional menawarkan solusi unik untuk tantangan spesifik dalam operasi maritim. Perkembangan dalam teknologi material, sistem propulsi, dan desain *hull* terus mendorong evolusi kapal nonkonvensional, membuka peluang baru dalam eksplorasi laut, transportasi, dan operasi militer. Seiring dengan meningkatnya tuntutan akan efisiensi, keberlanjutan, dan kinerja yang lebih tinggi di industri maritim, peran kapal nonkonvensional dipastikan akan semakin penting di masa depan.
5. Regulasi dan standar internasional untuk kapal nonkonvensional merupakan bidang yang kompleks dan dinamis, mencerminkan sifat inovatif dari teknologi yang mereka atur. Kerangka regulasi

yang ada, yang dipimpin oleh IMO dan didukung oleh badan klasifikasi, berusaha untuk menyeimbangkan kebutuhan akan inovasi dengan persyaratan ketat untuk keselamatan, keamanan, dan perlindungan lingkungan. Seiring dengan perkembangan teknologi baru seperti kapal otonom dan sistem propulsi alternatif, regulasi ini terus berkembang untuk memastikan bahwa kapal nonkonvensional dapat beroperasi secara aman dan efisien dalam industri maritim global. Tantangan ke depan akan melibatkan pengembangan pendekatan regulasi yang cukup fleksibel untuk mengakomodasi inovasi, namun cukup ketat untuk mempertahankan standar keselamatan dan lingkungan yang tinggi. Kolaborasi antara regulator, industri, dan lembaga penelitian akan menjadi kunci dalam memastikan bahwa kerangka regulasi tetap relevan dan efektif dalam menghadapi perubahan cepat dalam teknologi maritim.

6. Tren perkembangan teknologi kapal nonkonvensional mencerminkan pergeseran paradigma dalam industri maritim menuju operasi yang lebih bersih, efisien, dan cerdas. Dari propulsi alternatif dan desain inovatif hingga otomatisasi dan digitalisasi, inovasi-inovasi ini membentuk masa depan transportasi maritim. Integrasi teknologi energi terbarukan, pengembangan material canggih, dan fokus pada pengurangan emisi menunjukkan komitmen industri terhadap keberlanjutan lingkungan. Sementara itu, kemajuan dalam otomatisasi, AI, dan komunikasi satelit membuka jalan bagi era baru operasi maritim yang lebih aman dan efisien. Seiring berjalannya waktu, batas antara apa yang dianggap "konvensional" dan "nonkonvensional" mungkin akan semakin kabur, dengan banyak teknologi yang saat ini dianggap nonkonvensional menjadi standar industri di masa depan. Tantangan ke depan akan melibatkan integrasi yang mulus dari berbagai teknologi ini, memastikan keamanan dan keandalan mereka, serta mengembangkan kerangka regulasi yang sesuai untuk mendukung adopsi mereka secara luas.

BAB II

KONSEP DASAR KAPAL NONKONVENSIONAL

2.1 Pendahuluan

Dalam perkembangan teknologi maritim yang pesat, dunia perkapalan telah mengalami revolusi signifikan dengan munculnya berbagai jenis kapal nonkonvensional. Bab ini akan mengeksplorasi konsep dasar kapal nonkonvensional, sebuah inovasi yang telah mengubah paradigma desain dan operasional di industri maritim. Kapal nonkonvensional, dengan karakteristik uniknya, menawarkan solusi baru untuk tantangan yang tidak dapat sepenuhnya diatasi oleh kapal konvensional. Pemahaman mendalam tentang konsep ini penting bagi para insinyur, desainer, dan praktisi maritim untuk mengoptimalkan potensi dan mengatasi kendala dalam pengembangan serta pengoperasian kapal-kapal inovatif ini.

Sejarah perkembangan kapal nonkonvensional mencerminkan upaya manusia untuk mengatasi batasan fisika dan mekanika fluida yang selama ini membatasi desain kapal konvensional. Dari kapal hidrofoil yang "terbang" di atas permukaan air hingga kapal swath (*Small Waterplane Area Twin Hull*) yang meminimalkan dampak gelombang, setiap inovasi membawa perubahan paradigma dalam cara kita memahami interaksi antara kapal dan lingkungan maritim. Bab ini akan membedah perbedaan fundamental antara kapal konvensional dan nonkonvensional, menyoroti prinsip-prinsip desain yang mendasari inovasi ini, serta menganalisis keunggulan dan tantangan yang dihadapi dalam pengembangan dan pengoperasian kapal nonkonvensional.

Dalam era di mana efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan menjadi fokus utama, kapal nonkonvensional menawarkan perspektif baru dalam desain yang ramah lingkungan. Bab ini akan menggali bagaimana prinsip-prinsip hidrodinamika lanjutan, material inovatif, dan sistem propulsi alternatif diintegrasikan untuk menciptakan kapal yang tidak hanya lebih efisien dalam penggunaan bahan bakar, tetapi juga memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah. Pembahasan akan mencakup faktor-faktor kritis yang mempengaruhi performa

kapal nonkonvensional, termasuk stabilitas, manuverabilitas, dan kemampuan operasional dalam berbagai kondisi laut.

Metodologi analisis dan pengujian khusus untuk kapal nonkonvensional juga akan dibahas secara komprehensif. Mengingat karakteristik unik dari kapal-kapal ini, pendekatan konvensional dalam analisis dan pengujian seringkali tidak memadai. Bab ini akan memperkenalkan teknik-teknik mutakhir dalam *Computational Fluid Dynamics* (CFD), pengujian model skala, dan simulasi virtual yang diperlukan untuk memvalidasi desain dan memprediksi performa kapal nonkonvensional dengan akurasi tinggi. Pemahaman tentang metode-metode ini penting bagi para profesional di bidang maritim untuk dapat mengevaluasi dan mengoptimalkan desain kapal nonkonvensional dengan efektif.

Akhirnya, bab ini akan mengeksplorasi potensi aplikasi kapal nonkonvensional di berbagai sektor maritim. Dari transportasi penumpang berkecepatan tinggi hingga operasi militer yang membutuhkan kapal dengan karakteristik khusus, kapal nonkonvensional membuka peluang baru dalam eksplorasi dan pemanfaatan sumber daya laut. Diskusi akan mencakup bagaimana inovasi ini dapat diterapkan dalam industri *offshore*, penelitian oseanografi, dan bahkan dalam misi penyelamatan dan penegakan hukum di laut. Dengan memahami spektrum luas dari aplikasi potensial ini, pembaca akan mendapatkan wawasan tentang peran penting kapal nonkonvensional dalam membentuk masa depan industri maritim global.

Melalui eksplorasi mendalam tentang konsep dasar kapal nonkonvensional ini, bab ini bertujuan untuk memberikan fondasi yang kuat bagi pembaca dalam memahami, mengevaluasi, dan potensial mengembangkan solusi inovatif dalam desain dan operasi kapal di masa depan. Dengan menggabungkan prinsip-prinsip teknik yang solid dengan pemahaman tentang tren dan kebutuhan industri maritim kontemporer, pembahasan ini akan mempersiapkan pembaca untuk menghadapi tantangan dan memanfaatkan peluang dalam era baru teknologi perkapalan.

2.2 Perbedaan antara Kapal Konvensional dan Nonkonvensional

Kapal konvensional dan nonkonvensional memiliki perbedaan mendasar yang mencakup berbagai aspek desain, performa, dan aplikasi. Pemahaman mendalam tentang perbedaan ini sangat penting untuk mengevaluasi kesesuaian masing-masing jenis kapal dalam konteks operasional tertentu. Kapal konvensional, yang telah menjadi tulang punggung industri maritim selama berabad-abad, umumnya mengacu pada desain tradisional dengan lambung tunggal atau ganda yang sepenuhnya tercelup dalam air. Desain ini telah terbukti handal dan serbaguna, mampu mengakomodasi berbagai ukuran dan fungsi, dari kapal kargo besar hingga kapal penumpang dan kapal tanker. Di sisi lain, kapal nonkonvensional mewakili serangkaian inovasi yang bertujuan untuk mengatasi batasan inherent dari desain konvensional, sering kali dengan memanfaatkan prinsip-prinsip hidrodinamika lanjutan atau konfigurasi struktural yang tidak biasa [51].

1. Geometri Lambung dan Interaksi dengan Air:

Salah satu perbedaan paling mendasar terletak pada geometri lambung dan interaksinya dengan air. Kapal konvensional bergantung pada prinsip perpindahan air (*displacement*) untuk menghasilkan daya apung, dengan sebagian besar badan kapal tercelup di bawah permukaan air. Hal ini menghasilkan stabilitas yang baik tetapi juga menciptakan hambatan yang signifikan, terutama pada kecepatan tinggi. Sebaliknya, banyak kapal nonkonvensional dirancang untuk mengurangi kontak dengan air, baik melalui penggunaan *foil* yang mengangkat sebagian besar badan kapal di atas permukaan (seperti pada kapal hidrofoil), atau melalui desain lambung yang meminimalkan area permukaan air (seperti pada kapal SWATH - *Small Waterplane Area Twin Hull*).

Kapal hidrofoil, misalnya, menggunakan sayap bawah air (*foil*) yang menghasilkan gaya angkat saat kapal bergerak, mengangkat sebagian besar badan kapal di atas permukaan air pada kecepatan tinggi. Ini secara drastis mengurangi hambatan air dan memungkinkan kapal mencapai kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kapal konvensional dengan daya mesin yang

sebanding. Kapal SWATH, di sisi lain, menggunakan dua lambung ramping yang sebagian besar tercelup di bawah permukaan, dihubungkan oleh struktur di atas air yang relatif kecil. Desain ini meminimalkan area kapal yang berinteraksi dengan permukaan air, mengurangi dampak gelombang dan meningkatkan stabilitas dalam kondisi laut yang bergelombang [52].

2. Stabilitas dan Manuverabilitas:

Stabilitas dan manuverabilitas juga menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kedua jenis kapal ini. Kapal konvensional umumnya mengandalkan bentuk lambung dan distribusi berat untuk stabilitas. Meskipun pendekatan ini dapat diandalkan, seringkali membatasi performa dalam kondisi laut yang ekstrem. Kapal nonkonvensional, seperti kapal *trimaran* atau *pentamaran*, memanfaatkan konfigurasi multi-lambung untuk meningkatkan stabilitas lateral dan longitudinal. Desain multi-lambung ini menciptakan momen inersia yang lebih besar terhadap gerakan *rolling* dan *pitching*, menghasilkan perjalanan yang lebih stabil dan nyaman bahkan dalam kondisi laut yang bergelombang.

Selain itu, beberapa desain kapal nonkonvensional, seperti *hovercraft* atau kapal berteknologi efek permukaan (*Surface Effect Ship*), memiliki kemampuan unik untuk beroperasi di berbagai jenis permukaan. *Hovercraft*, misalnya, menggunakan bantalan udara untuk mengangkat seluruh kapal di atas permukaan, memungkinkannya bergerak dengan mudah di atas air, es, lumpur, atau bahkan daratan. *Surface Effect Ship* menggabungkan prinsip bantalan udara dengan lambung katamaran, menciptakan kapal yang dapat beroperasi dengan efisien di perairan dangkal dan memiliki hambatan yang rendah pada kecepatan tinggi.

3. Propulsi dan Efisiensi Energi:

Dari perspektif propulsi dan efisiensi energi, kapal nonkonvensional sering kali menggabungkan teknologi inovatif yang sulit diterapkan pada desain konvensional. Misalnya, penggunaan sistem propulsi *Pod Azimuth* pada beberapa kapal nonkonvensional memungkinkan manuver yang lebih presisi dan efisien dibandingkan dengan sistem propeler dan kemudi tradisional pada kapal

konvensional. *Pod Azimuth* dapat berputar 360 derajat, menggabungkan fungsi propulsi dan kemudi dalam satu unit, yang sangat meningkatkan manuverabilitas kapal, terutama dalam ruang terbatas seperti pelabuhan.

Selain itu, beberapa kapal nonkonvensional dirancang khusus untuk mengintegrasikan sumber energi alternatif dengan lebih efektif. Kapal dengan tenaga surya atau angin, misalnya, sering mengadopsi desain nonkonvensional untuk memaksimalkan area permukaan yang tersedia untuk panel surya atau untuk mengoptimalkan pemanfaatan angin. Kapal *Energy Observer*, contohnya, adalah katamaran yang menggunakan kombinasi energi surya, angin, dan hidrogen untuk propulsi, mendemonstrasikan potensi kapal nonkonvensional dalam mendorong inovasi energi bersih di sektor maritim.



Gambar 2. 1 Kapal *Energy Observer* [53]

4. Kapasitas dan Fleksibilitas Operasional:

Aspek lain yang membedakan kapal konvensional dan nonkonvensional adalah kapasitas dan fleksibilitas operasional. Kapal konvensional umumnya dirancang untuk mengoptimalkan kapasitas kargo atau penumpang dalam batas-batas desain tradisional. Ini menghasilkan kapal yang efisien untuk operasi standar tetapi

mungkin kurang fleksibel dalam situasi khusus. Sebaliknya, kapal nonkonvensional seringkali mengadopsi pendekatan yang lebih spesialisasi, fokus pada performa spesifik seperti kecepatan tinggi, kemampuan operasi di perairan dangkal, atau stabilitas superior dalam kondisi cuaca ekstrem.

Misalnya, kapal *catamaran* cepat dapat mengangkut penumpang dengan kecepatan jauh lebih tinggi dibandingkan feri konvensional, membuka peluang untuk rute transportasi baru yang sebelumnya tidak praktis. Kapal amfibi nonkonvensional dapat beroperasi di lingkungan yang sama sekali tidak dapat diakses oleh kapal konvensional, menawarkan solusi unik untuk operasi militer, penyelamatan, atau eksplorasi pesisir. Fleksibilitas operasional ini membuat kapal nonkonvensional menjadi pilihan menarik untuk aplikasi khusus di mana kapal konvensional mungkin mengalami keterbatasan.

5. Konstruksi dan Material:

Perbedaan signifikan juga terlihat dalam aspek konstruksi dan material yang digunakan. Sementara kapal konvensional umumnya mengandalkan baja sebagai material utama konstruksi, banyak kapal nonkonvensional memanfaatkan material komposit canggih, aluminium ringan, atau kombinasi material inovatif lainnya. Penggunaan material ini tidak hanya mengurangi berat keseluruhan kapal, tetapi juga memungkinkan desain yang lebih kompleks dan aerodinamis.

Material komposit, seperti serat karbon atau *fiberglass*, memungkinkan pembentukan struktur yang lebih kuat dan ringan dibandingkan dengan baja konvensional. Ini berdampak langsung pada performa, efisiensi bahan bakar, dan bahkan biaya pemeliharaan jangka panjang. Kapal nonkonvensional yang menggunakan material komposit dapat mencapai kecepatan lebih tinggi dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah, serta memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dan kerusakan struktural.

6. Pendekatan Desain dan Proses Pengembangan:

Terakhir, perbedaan antara kapal konvensional dan nonkonvensional juga tercermin dalam pendekatan desain dan proses pengembangan. Desain kapal konvensional umumnya mengikuti metodologi yang telah mapan dan terbukti, dengan modifikasi inkremental berdasarkan pengalaman dan data historis. Proses ini, meskipun aman dan dapat diandalkan, mungkin membatasi inovasi radikal.

Sebaliknya, pengembangan kapal nonkonvensional sering kali melibatkan pendekatan yang lebih eksperimental dan inovatif. Ini membutuhkan penggunaan teknologi simulasi canggih, seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang kompleks, pengujian model yang ekstensif, dan bahkan *prototipe* skala penuh sebelum dapat diimplementasikan secara komersial. Proses ini, meskipun lebih kompleks dan mahal, memungkinkan terobosan teknologi yang signifikan dan pembukaan pasar baru dalam industri maritim.

2.3 Prinsip-prinsip Desain Kapal Nonkonvensional

Desain kapal nonkonvensional merupakan bidang yang terus berkembang dalam teknik perkapalan, menggabungkan inovasi teknologi dengan pemahaman mendalam tentang hidrodinamika dan arsitektur kapal. Prinsip-prinsip desain ini bertujuan untuk menciptakan kapal yang mampu melampaui batasan performa, efisiensi, dan fungsionalitas desain konvensional. Beberapa prinsip utama yang mendasari desain kapal nonkonvensional meliputi pengurangan hambatan, peningkatan stabilitas, optimalisasi propulsi, adaptabilitas terhadap kondisi operasional yang beragam, integrasi teknologi canggih, keselamatan dan kepatuhan regulasi, serta analisis risiko dan manajemen *lifecycle* [52].

1. Pengurangan Hambatan:

Pengurangan hambatan merupakan prinsip fundamental dalam desain kapal nonkonvensional. Pendekatan ini melibatkan manipulasi interaksi antara lambung kapal dan air untuk meminimalkan hambatan hidrodinamis. Beberapa teknik inovatif yang digunakan meliputi:

- a. Desain Hidrofoil: Kapal hidrofoil menggunakan sayap bawah air (*foil*) yang menghasilkan gaya angkat saat kapal bergerak. Pada kecepatan tinggi, *foil* ini mengangkat sebagian besar badan kapal di atas permukaan air, secara drastis mengurangi hambatan gelombang dan hambatan gesek. Prinsip ini memungkinkan kapal hidrofoil mencapai kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan kapal konvensional dengan daya mesin yang sebanding.
- b. Teknologi *Air Cavity Bottom* (ACB): Desain ACB menciptakan lapisan udara di bawah lambung kapal, mengurangi kontak langsung antara lambung dan air. Lapisan udara ini bertindak sebagai pelumas, secara signifikan mengurangi hambatan gesek. Implementasi ACB melibatkan desain lambung khusus dengan saluran dan kompresor udara untuk mempertahankan lapisan udara selama operasi.
- c. *Surface Effect Ship* (SES): Kapal SES menggabungkan prinsip bantalan udara dengan desain katamaran. Bantalan udara bertekanan di antara dua lambung mengangkat sebagian besar badan kapal, mengurangi hambatan dan memungkinkan operasi efisien di perairan dangkal. Desain ini memerlukan sistem pemompaan udara yang kompleks dan segel fleksibel untuk mempertahankan bantalan udara.
- d. Optimalisasi Bentuk Lambung: Penggunaan teknik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang canggih memungkinkan optimalisasi bentuk lambung yang lebih presisi. Desainer dapat menganalisis dan meminimalkan pembentukan gelombang dan distribusi tekanan di sekitar lambung, menghasilkan desain yang secara signifikan mengurangi hambatan gelombang [13].

2. Peningkatan Stabilitas:

Stabilitas merupakan aspek kritis dalam desain kapal, dan kapal nonkonvensional sering mengadopsi pendekatan inovatif untuk meningkatkan stabilitas tanpa mengorbankan performa. Beberapa prinsip yang diterapkan meliputi:

- a. Desain *Multihull*: Kapal *multihull*, seperti katamaran dan trimaran, memanfaatkan distribusi volume *displacement* yang lebih luas untuk meningkatkan momen inersia. Hal ini menghasilkan

stabilitas yang superior dibandingkan dengan kapal *monohull* konvensional, terutama dalam kondisi laut bergelombang. Desain *multihull* juga memungkinkan area dek yang lebih luas, meningkatkan fleksibilitas dalam penataan ruang dan kenyamanan penumpang.

- b. *Small Waterplane Area Twin Hull* (SWATH): Kapal SWATH menerapkan prinsip pengurangan area garis air untuk meningkatkan stabilitas. Sebagian besar volume *displacement* ditempatkan jauh di bawah permukaan air dalam bentuk dua lambung torpedo, dihubungkan oleh struktur ramping di permukaan. Desain ini menghasilkan stabilitas yang luar biasa dalam kondisi laut bergelombang, membuatnya ideal untuk aplikasi seperti kapal penelitian oseanografi atau *platform* lepas pantai.
- c. Sistem Stabilisasi Aktif: Kapal nonkonvensional sering mengintegrasikan sistem stabilisasi aktif yang canggih. Ini dapat meliputi *fin stabilizer* yang dapat digerakkan, tangki anti-rolling, atau sistem *gyroscopic stabilizer*. Sistem-sistem ini bekerja secara *real-time* untuk meminimalkan gerakan *rolling* dan *pitching*, meningkatkan kenyamanan penumpang dan memperluas *envelope* operasional kapal.

3. Optimalisasi Propulsi:

Desain kapal nonkonvensional melibatkan pendekatan inovatif dalam sistem propulsi untuk meningkatkan efisiensi dan manuverabilitas:

- a. Sistem Propulsi *Pod Azimuth*: *Pod azimuth* yang dapat diputar 360 derajat menggabungkan fungsi propulsi dan kemudi dalam satu unit. Sistem ini meningkatkan manuverabilitas secara signifikan, memungkinkan kapal untuk melakukan manuver presisi tinggi bahkan dalam ruang terbatas. *Pod azimuth* juga dapat meningkatkan efisiensi propulsi dengan mengeliminasi kebutuhan akan poros *propeller* panjang dan kemudi konvensional.
- b. Propulsi *Waterjet*: Sistem propulsi *waterjet* memanfaatkan prinsip akselerasi massa air untuk menghasilkan daya dorong. Air

dihisap melalui saluran di bawah kapal, diakselerasi oleh pompa, dan dikeluarkan dengan kecepatan tinggi di buritan. Sistem ini sangat efektif untuk kapal berkecepatan tinggi dan operasi di perairan dangkal, karena menghilangkan risiko kerusakan *propeller* akibat benturan dengan objek di air.

- c. Propulsi Magnetohidrodinamik (MHD): Meskipun masih dalam tahap pengembangan untuk aplikasi skala besar, propulsi MHD menawarkan potensi sistem propulsi tanpa bagian bergerak. Prinsip ini menggunakan interaksi antara medan magnet dan arus listrik dalam air laut untuk menghasilkan daya dorong. Keuntungan utama meliputi pengurangan signifikan dalam kebisingan dan getaran, serta potensi efisiensi yang lebih tinggi pada kecepatan tertentu.
- d. Sistem Propulsi *Hybrid*: Banyak kapal nonkonvensional mengadopsi sistem propulsi *hybrid* yang menggabungkan berbagai teknologi. Misalnya, kombinasi motor listrik dengan mesin diesel konvensional, atau integrasi sistem energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin. Pendekatan *hybrid* ini meningkatkan fleksibilitas operasional dan efisiensi energi.

4. Adaptabilitas dan Fleksibilitas:

Prinsip adaptabilitas dan fleksibilitas menjadi semakin penting dalam desain kapal nonkonvensional:

- a. Desain Kapal Amfibi: Kapal amfibi dirancang untuk operasi multi-lingkungan, mampu beroperasi di air dan di darat. Ini melibatkan desain lambung yang dapat menahan beban struktural dalam kedua kondisi, serta sistem propulsi yang dapat beradaptasi. Misalnya, penggunaan roda atau track untuk pergerakan di darat, yang dapat ditarik saat beroperasi di air.
- b. Kapal Modular: Konsep kapal modular memungkinkan konfigurasi ulang cepat untuk berbagai misi atau fungsi. Modul-modul standar dapat ditukar atau ditambahkan untuk mengubah kapabilitas kapal. Ini sangat bermanfaat untuk kapal militer atau kapal penelitian yang memerlukan adaptasi cepat terhadap berbagai skenario operasional.

- c. Sistem *Ballast* Dinamis: Sistem *ballast* yang dapat dikontrol secara dinamis memungkinkan kapal untuk menyesuaikan *draft*, *trim* , dan stabilitas sesuai dengan kondisi operasional. Ini meningkatkan fleksibilitas dalam menangani berbagai jenis muatan dan kondisi laut.

5. Integrasi Teknologi Canggih:

Desain kapal nonkonvensional semakin mengandalkan integrasi teknologi canggih:

- a. Material Maju: Penggunaan material komposit, seperti serat karbon, untuk mengurangi berat dan meningkatkan kekuatan struktural. Material ini juga dapat memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dan kelelahan.
- b. Sistem Kontrol Otomatis: Implementasi sistem kontrol otomatis dan kecerdasan buatan untuk optimalisasi performa dan efisiensi operasional. Ini dapat mencakup manajemen energi otomatis, optimalisasi rute, dan pemantauan kesehatan struktural *real-time*.
- c. *Digital Twin*: Penggunaan teknologi *digital twin* dalam desain dan operasi kapal memungkinkan simulasi dan optimalisasi *real-time*. Ini membantu dalam pemeliharaan prediktif dan pengambilan keputusan operasional yang lebih baik.
- d. Sistem Energi Terbarukan: Integrasi sistem energi terbarukan, seperti panel surya atau turbin angin, ke dalam desain kapal untuk meningkatkan keberlanjutan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

6. Keselamatan dan Kepatuhan Regulasi:

Meskipun inovatif, desain kapal nonkonvensional harus tetap mematuhi standar keselamatan dan regulasi maritim yang ketat. Ini melibatkan:

- a. Analisis Keselamatan Integral: Penerapan metodologi analisis keselamatan yang komprehensif dari tahap awal desain, termasuk analisis stabilitas, evakuasi, dan penanggulangan kebakaran.
- b. Simulasi dan Pengujian Ekstensif: Penggunaan simulasi komputer canggih dan pengujian model skala untuk memvalidasi aspek keselamatan desain nonkonvensional.

- c. Pengembangan Standar Baru: Kolaborasi dengan badan regulasi untuk mengembangkan standar baru yang mengakomodasi fitur unik dari desain nonkonvensional.

7. Analisis Risiko dan Manajemen *Lifecycle*:

Prinsip analisis risiko komprehensif dan manajemen *lifecycle* menjadi semakin penting dalam desain kapal nonkonvensional. Prinsip ini melibatkan:

- a. Evaluasi Risiko Komprehensif: Analisis mendalam terhadap potensi risiko operasional, lingkungan, dan ekonomi sepanjang siklus hidup kapal.
- b. Desain untuk Keberlanjutan: Pertimbangan aspek keberlanjutan jangka panjang, termasuk efisiensi energi, emisi, dan kemampuan daur ulang.
- c. Optimalisasi Biaya *Lifecycle*: Analisis dan optimalisasi biaya total kepemilikan, termasuk biaya operasional dan pemeliharaan jangka panjang.

2.4 Keunggulan dan Tantangan Kapal Nonkonvensional

Kapal nonkonvensional, dengan desain inovatif dan teknologi canggihnya, menawarkan solusi unik untuk berbagai tantangan dalam industri maritim modern. Pemahaman mendalam tentang keunggulan dan tantangan kapal nonkonvensional sangat penting untuk mengoptimalkan penggunaan dan pengembangan teknologi ini di masa depan.

2.4.1 Keunggulan Kapal Nonkonvensional

1. Efisiensi dan Performa Superior

Kapal nonkonvensional sering menunjukkan efisiensi dan performa yang jauh melampaui kapal konvensional dalam berbagai kondisi operasional. Keunggulan ini terutama terlihat dalam aspek-aspek berikut:

- a. Pengurangan Hambatan:

Kapal hidrofoil, misalnya, mampu mengurangi hambatan air hingga 80% pada kecepatan tinggi dibandingkan dengan kapal konvensional yang setara. Ini dicapai melalui penggunaan *foil* yang mengangkat badan kapal di atas permukaan air, secara drastis

mengurangi area kontak dengan air dan konsekuensinya, hambatan hidrodinamis [51].

Surface Effect Ship (SES) menggunakan kombinasi bantalan udara dan lambung katamaran untuk mengurangi hambatan. Penelitian menunjukkan bahwa SES dapat mencapai pengurangan hambatan total hingga 40-50% dibandingkan dengan kapal konvensional pada *displacement* yang sama, memungkinkan kecepatan yang lebih tinggi atau konsumsi bahan bakar yang lebih rendah.

b. Efisiensi Bahan Bakar:

Kapal dengan teknologi *Air Cavity Bottom* (ACB) telah mendemonstrasikan peningkatan efisiensi bahan bakar yang signifikan. Studi operasional menunjukkan penghematan bahan bakar hingga 15-25% pada kecepatan operasional tertentu, tergantung pada desain spesifik dan kondisi operasi. Ini tidak hanya mengurangi biaya operasional tetapi juga memiliki implikasi positif terhadap emisi gas rumah kaca [13].

c. Stabilitas dan Kenyamanan:

Kapal *multihull*, seperti katamaran dan *trimaran*, menawarkan stabilitas yang superior dibandingkan dengan *monohull* konvensional. Katamaran dapat mengurangi gerakan *rolling* hingga 60% dalam kondisi laut bergelombang dibandingkan dengan *monohull* yang setara, meningkatkan kenyamanan penumpang dan memperluas *envelope* operasional.

2. Adaptabilitas dan Fleksibilitas Operasional:

Kapal nonkonvensional sering dirancang dengan tingkat adaptabilitas dan fleksibilitas operasional yang tinggi, memberikan keunggulan signifikan dalam berbagai skenario:

- a. Operasi Multi-lingkungan: Kapal amfibi, seperti *hovercraft*, menunjukkan kemampuan unik untuk beroperasi di berbagai jenis permukaan. Misalnya, *hovercraft* LCAC (*Landing Craft Air Cushion*) yang digunakan oleh angkatan laut AS dapat beroperasi di laut, pantai, es, dan bahkan rawa, dengan kecepatan mencapai 70 knot. Kemampuan ini memungkinkan operasi yang tidak

mungkin dilakukan oleh kapal konvensional, terutama dalam misi militer atau penyelamatan di daerah terpencil.

- b. Modularitas: Konsep kapal modular, seperti yang diterapkan pada kapal *Littoral Combat Ship* (LCS) Angkatan Laut AS, memungkinkan konfigurasi ulang yang cepat untuk berbagai misi. Sistem modular ini memungkinkan penggantian peralatan misi dalam waktu kurang dari 24 jam, meningkatkan fleksibilitas operasional dan memperpanjang relevansi kapal sepanjang masa pakainya.
- c. Adaptabilitas Misi: Kapal penelitian oseanografi nonkonvensional sering dirancang dengan kemampuan adaptasi tinggi. Misalnya, kapal SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*) untuk penelitian oseanografi dapat mengakomodasi berbagai peralatan ilmiah dan menawarkan stabilitas superior untuk operasi di laut dalam, memungkinkan pengumpulan data yang lebih akurat dalam berbagai kondisi cuaca.

3. Inovasi Teknologi dan Integrasi Sistem Canggih:

Kapal nonkonvensional sering menjadi *platform* untuk integrasi teknologi canggih, mendorong inovasi dalam industri maritim:

- a. Material Maju: Penggunaan material komposit seperti serat karbon dalam konstruksi kapal nonkonvensional telah menunjukkan pengurangan berat hingga 30-40% dibandingkan dengan konstruksi baja konvensional, sambil mempertahankan atau bahkan meningkatkan kekuatan struktural. Ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memungkinkan desain yang lebih fleksibel dan aerodinamis.
- b. Sistem Kontrol Canggih: Integrasi sistem kontrol otomatis dan kecerdasan buatan pada kapal nonkonvensional memungkinkan optimalisasi performa *real-time*. Misalnya, sistem *Dynamic Positioning* (DP) canggih pada kapal pengeboran lepas pantai nonkonvensional dapat mempertahankan posisi dengan presisi tinggi dalam kondisi cuaca ekstrem, meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional.
- c. *Digital Twin*: Implementasi teknologi *digital twin* dalam desain dan operasi kapal nonkonvensional memungkinkan pemantauan,

prediksi, dan optimalisasi yang lebih akurat. Studi menunjukkan bahwa penggunaan *digital twin* dapat mengurangi biaya pemeliharaan hingga 20% dan meningkatkan ketersediaan operasional kapal.

4. Performa Superior dalam Kondisi Khusus:

Beberapa jenis kapal nonkonvensional dirancang khusus untuk unggul dalam kondisi operasional tertentu:

- a. Stabilitas dalam Cuaca Ekstrem: Kapal SWATH telah menunjukkan kemampuan untuk mempertahankan operasi dalam kondisi laut dengan tinggi gelombang signifikan hingga 6-7 meter, di mana kapal konvensional dengan ukuran serupa mungkin harus menghentikan operasi. Ini memungkinkan penggunaan kapal SWATH sebagai *platform* stabil untuk berbagai aplikasi, dari penelitian oseanografi hingga transfer personel ke *platform* lepas pantai dalam cuaca buruk.
- b. Operasi Perairan Dangkal: Kapal dengan teknologi efek permukaan atau hidrofoil dapat beroperasi efektif di perairan dangkal di mana kapal konvensional mengalami keterbatasan. Ini membuka peluang untuk rute baru dan akses ke area yang sebelumnya sulit dijangkau.

5. Potensi Ekonomi dan Operasional:

Meskipun biaya awal pengembangan dan konstruksi kapal nonkonvensional mungkin lebih tinggi, potensi ekonomi jangka panjangnya sering kali signifikan:

- a. Efisiensi Operasional: Analisis *lifecycle cost* menunjukkan bahwa meskipun biaya awal lebih tinggi, kapal nonkonvensional seperti katamaran cepat untuk transportasi penumpang dapat mencapai *break-even point* lebih cepat dibandingkan dengan kapal konvensional berkat efisiensi operasional yang lebih tinggi dan kapasitas penumpang yang lebih besar.
- b. Pembukaan Pasar Baru: Kemampuan unik kapal nonkonvensional dapat membuka peluang bisnis baru. Misalnya, penggunaan kapal swath untuk transfer kru ke ladang angin lepas pantai telah memungkinkan operasi dalam kondisi cuaca yang lebih luas, meningkatkan produktivitas dan mengurangi *downtime*.

2.4.2 Tantangan Kapal Nonkonvensional

1. Kompleksitas Desain dan Konstruksi

Pengembangan kapal nonkonvensional menghadapi tantangan signifikan dalam hal desain dan konstruksi:

- a. Analisis Hidrodinamika Kompleks: Desain kapal nonkonvensional sering memerlukan analisis hidrodinamika yang jauh lebih kompleks dibandingkan dengan kapal konvensional. Misalnya, memprediksi performa hidrofoil pada berbagai kondisi beban dan kecepatan memerlukan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang sangat canggih dan komputasi intensif.
- b. Integrasi Sistem: Mengintegrasikan berbagai sistem inovatif dalam desain kapal nonkonvensional dapat menjadi sangat kompleks. Misalnya, dalam kapal dengan sistem propulsi *hybrid*, menyelaraskan operasi antara mesin diesel konvensional, motor listrik, dan sumber energi terbarukan memerlukan sistem kontrol yang sangat *sophisticated*.
- c. Teknik Produksi Khusus: Penggunaan material maju seperti komposit karbon *fiber* memerlukan teknik produksi khusus yang mungkin belum tersedia secara luas di kalangan kapal tradisional. Ini dapat meningkatkan biaya dan waktu produksi, serta memerlukan investasi dalam pelatihan dan peralatan khusus.

2. Regulasi dan Sertifikasi

Kapal nonkonvensional sering menghadapi tantangan signifikan dalam hal regulasi dan sertifikasi:

- a. Kerangka Regulasi yang Tidak Memadai: Banyak regulasi maritim yang ada dikembangkan dengan fokus pada kapal konvensional dan mungkin tidak sepenuhnya mengakomodasi fitur unik dari desain nonkonvensional. Misalnya, kriteria stabilitas standar mungkin tidak sesuai untuk mengevaluasi kapal dengan geometri lambung yang sangat berbeda atau sistem stabilisasi aktif.
- b. Proses Persetujuan yang Kompleks: Kapal dengan desain yang sangat inovatif mungkin memerlukan proses persetujuan "*alternative design*" yang kompleks dan memakan waktu. Ini melibatkan analisis risiko yang ekstensif dan mungkin

memerlukan pengujian tambahan untuk membuktikan kesetaraan keselamatan dengan desain konvensional.

- c. Standarisasi: Kurangnya standarisasi dalam desain dan komponen kapal nonkonvensional dapat menyulitkan proses sertifikasi dan pemeliharaan. Ini juga dapat meningkatkan biaya karena kurangnya ekonomi skala dalam produksi komponen.

3. Keterbatasan Infrastruktur

Beberapa jenis kapal nonkonvensional memerlukan infrastruktur khusus yang mungkin tidak tersedia secara luas:

- a. Fasilitas Pelabuhan: Kapal dengan geometri lambung yang tidak biasa atau sistem propulsi khusus mungkin memerlukan modifikasi pada fasilitas pelabuhan. Misalnya, kapal hidrofoil mungkin memerlukan sistem tambat khusus untuk melindungi *foil* saat bersandar.
- b. Fasilitas Pemeliharaan: Pemeliharaan kapal nonkonvensional mungkin memerlukan peralatan dan keahlian khusus yang tidak tersedia di semua galangan. Misalnya, perbaikan struktur komposit memerlukan fasilitas dan keahlian yang berbeda dari perbaikan struktur baja konvensional.
- c. Infrastruktur Bunkering: Untuk kapal dengan sistem propulsi alternatif, seperti LNG atau hidrogen, ketersediaan infrastruktur bunkering yang sesuai dapat menjadi kendala operasional yang signifikan.

4. Tantangan Operasional dan Pelatihan

Operasi kapal nonkonvensional sering memerlukan keterampilan dan pengetahuan khusus:

- a. Pelatihan Kru: Sistem propulsi yang kompleks, teknologi kontrol canggih, dan karakteristik penanganan yang unik membutuhkan pelatihan khusus untuk kru. Ini dapat meningkatkan biaya pelatihan dan potensial menciptakan keterbatasan dalam ketersediaan kru yang berkualifikasi.
- b. Prosedur Operasional: Kapal nonkonvensional mungkin memerlukan pengembangan prosedur operasional baru yang spesifik untuk desain tersebut. Misalnya, prosedur evakuasi darurat

untuk kapal *multihull* mungkin sangat berbeda dari prosedur standar untuk kapal *monohull*.

- c. Manajemen Risiko: Operasi kapal dengan teknologi baru atau dalam mode operasi yang tidak biasa (seperti kapal amfibi) memerlukan pendekatan manajemen risiko yang lebih kompleks.

5. Ketidakpastian Performa Jangka Panjang

Untuk desain yang sangat inovatif, mungkin ada ketidakpastian terkait performa jangka panjang:

- a. Durabilitas Material: Penggunaan material baru seperti komposit dalam aplikasi maritim jangka panjang mungkin menghadapi tantangan yang belum sepenuhnya dipahami, seperti degradasi akibat paparan lingkungan laut dalam jangka panjang.
- b. Reliabilitas Sistem: Sistem inovatif seperti propulsi magnetohidrodinamik atau sistem kontrol berbasis AI mungkin belum memiliki *track record* operasional jangka panjang, menciptakan ketidakpastian tentang reliabilitas dan biaya pemeliharaan jangka panjang.
- c. Prediksi Biaya *Lifecycle*: Kurangnya data historis dapat menyulitkan prediksi akurat tentang biaya *lifecycle* total, yang penting untuk pengambilan keputusan investasi.

6. Tantangan Pasar dan Penerimaan Industri:

Meskipun menawarkan banyak keunggulan, kapal nonkonvensional mungkin menghadapi resistensi dari industri:

- a. Konservatisme Industri: Industri maritim cenderung konservatif dan mungkin ragu-ragu untuk mengadopsi teknologi yang belum terbukti secara luas.
- b. Risiko Investasi: Ketidakpastian tentang performa jangka panjang dan nilai jual kembali dapat mempengaruhi keputusan investasi, terutama dalam industri yang sangat sensitif terhadap biaya seperti pengiriman komersial.
- c. Kurva Pembelajaran: Adopsi teknologi baru memerlukan periode pembelajaran dan adaptasi, yang dapat menimbulkan resistensi dari operator yang terbiasa dengan sistem konvensional.

7. Tantangan Teknis Spesifik

Setiap jenis kapal nonkonvensional menghadapi tantangan teknis yang spesifik:

- a. Kapal Hidrofoil:
 - Kavitasi pada kecepatan tinggi
 - Kerentanan terhadap kerusakan *foil* akibat puing-puing di air
 - Kompleksitas sistem kontrol untuk mempertahankan stabilitas
- b. *Surface Effect Ship* (SES):
 - Mempertahankan segel udara dalam kondisi laut yang ekstrem
 - Manajemen *noise* dan getaran dari sistem bantalan udara
- c. Kapal SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*):
 - Sensitivitas terhadap perubahan berat dan distribusi muatan
 - Kompleksitas sistem *ballast* untuk mengoptimalkan *draft* dan *trim*
 - Potensi *slamming* yang lebih tinggi pada kondisi laut tertentu
 - Tantangan dalam desain sambungan antara *strut* dan *hull* utama
- d. Kapal dengan *Air Cavity Bottom* (ACB):
 - Mempertahankan stabilitas lapisan udara pada berbagai kecepatan dan kondisi laut
 - Optimalisasi sistem kompresor udara untuk efisiensi energi
 - Potensi kehilangan performa jika integritas lapisan udara terganggu
- e. Kapal dengan Propulsi Magnetohidrodinamik (MHD):
 - Efisiensi yang relatif rendah pada kecepatan rendah
 - Kebutuhan akan sistem pendinginan yang kompleks untuk magnet superkonduktor
 - Tantangan dalam menghasilkan medan magnet yang cukup kuat untuk propulsi skala besar
- f. Kapal Tenaga Surya:
 - Keterbatasan dalam hal daya yang tersedia, terutama dalam kondisi cuaca buruk atau pada malam hari
 - Kerentanan panel surya terhadap lingkungan laut yang korosif
 - Tantangan dalam mengintegrasikan area panel surya yang luas dengan desain kapal yang aerodinamis
- g. Kapal Autonomous:

- Kompleksitas sistem navigasi dan pengambilan keputusan otomatis
- Keandalan sensor dan sistem komunikasi dalam lingkungan maritim yang keras
- Tantangan keamanan siber untuk sistem yang terhubung

2.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Performa Kapal Nonkonvensional

Performa kapal nonkonvensional dipengaruhi oleh serangkaian faktor yang kompleks dan saling terkait. Pemahaman mendalam tentang faktor-faktor ini sangat penting untuk optimalisasi desain, operasi, dan pemeliharaan kapal nonkonvensional. Berikut adalah faktor-faktor utama yang mempengaruhi performa kapal nonkonvensional:

1. Hidrodinamika Lambung

Desain hidrodinamis lambung merupakan faktor kunci yang mempengaruhi performa kapal nonkonvensional. Berbeda dengan kapal konvensional, kapal nonkonvensional sering mengadopsi geometri lambung yang unik untuk mencapai karakteristik performa tertentu.

a. Hambatan Hidrodinamis:

Hambatan hidrodinamis terdiri dari beberapa komponen utama: hambatan gesek, hambatan gelombang, dan hambatan tambahan (seperti hambatan induksi pada hidrofoil). Desain lambung kapal nonkonvensional bertujuan untuk meminimalkan hambatan total melalui berbagai pendekatan inovatif [52].

Kapal hidrofoil, misalnya, mengurangi hambatan dengan mengangkat sebagian besar badan kapal di atas permukaan air pada kecepatan tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa hidrofoil dapat mengurangi hambatan total hingga 80% pada kecepatan operasional penuh dibandingkan dengan kapal konvensional yang setara. Namun, efektivitas ini sangat bergantung pada desain *foil*, kecepatan operasi, dan kondisi beban.

Kapal dengan teknologi *Air Cavity Bottom* (ACB) mengurangi hambatan gesek dengan menciptakan lapisan udara di bawah lambung. Studi eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa ACB

dapat mengurangi hambatan total hingga 15-25% pada rentang kecepatan operasional tertentu. Efektivitas sistem ACB sangat bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan stabilitas lapisan udara pada berbagai kondisi operasional, yang melibatkan optimalisasi geometri *cavity*, sistem injeksi udara, dan manajemen aliran.

b. Stabilitas Dinamis:

Stabilitas dinamis kapal nonkonvensional sering kali lebih kompleks dibandingkan dengan kapal konvensional. Misalnya, kapal SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*) memiliki karakteristik stabilitas yang sangat berbeda dari *monohull* konvensional karena area garis air yang kecil. Ini menghasilkan stabilitas *roll* yang superior tetapi juga menciptakan tantangan dalam manajemen stabilitas *pitch* dan *heave*.

Analisis stabilitas dinamis untuk kapal nonkonvensional sering memerlukan pendekatan yang lebih canggih, termasuk analisis spektral *respons* kapal terhadap gelombang dan simulasi *time-domain* untuk menangkap perilaku *nonlinear*. Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang canggih dan pengujian model skala menjadi sangat penting dalam tahap desain untuk memvalidasi karakteristik stabilitas.

c. Interaksi dengan Gelombang:

Respons kapal terhadap gelombang sangat mempengaruhi performa, terutama dalam hal kenyamanan penumpang dan kemampuan operasional. Kapal nonkonvensional seperti SWATH atau SES (*Surface Effect Ship*) dirancang untuk mengurangi dampak gelombang, memungkinkan operasi yang lebih stabil dalam kondisi laut yang bergelombang.

Studi menunjukkan bahwa kapal SWATH dapat mengurangi gerakan vertikal hingga 50% dibandingkan dengan *monohull* konvensional dalam kondisi gelombang yang sama. Namun, performa ini sangat bergantung pada frekuensi gelombang dan kecepatan kapal. Optimalisasi desain melibatkan analisis *Response Amplitude Operator* (RAO) yang kompleks untuk berbagai kondisi operasional [54].

2. Sistem Propulsi

Sistem propulsi kapal nonkonvensional sering kali jauh lebih kompleks dan beragam dibandingkan dengan kapal konvensional, memainkan peran krusial dalam menentukan performa keseluruhan.

a. Efisiensi Propulsi:

Efisiensi propulsi dipengaruhi oleh interaksi antara sistem propulsi dan aliran air di sekitar lambung. Kapal nonkonvensional mungkin menggunakan sistem propulsi yang tidak konvensional, seperti *waterjet*, *podded propulsor*, atau bahkan sistem propulsi magnetohidrodinamik (MHD).

Waterjet, misalnya, sangat efektif untuk kapal berkecepatan tinggi dan operasi di perairan dangkal. Efisiensi propulsif *waterjet* dapat mencapai 70% pada kecepatan tinggi, dibandingkan dengan sekitar 60% untuk *propeller* konvensional. Namun, efisiensinya dapat menurun signifikan pada kecepatan rendah. Optimalisasi sistem *waterjet* melibatkan desain intake, pompa, dan *nozzle* yang kompleks untuk memaksimalkan efisiensi pada rentang operasional yang luas [14].

Sistem propulsi *podded*, seperti *Azipod*, menawarkan efisiensi dan manuverabilitas yang tinggi. Studi menunjukkan peningkatan efisiensi propulsif hingga 10% dibandingkan dengan sistem *shaft-line* konvensional. Namun, keuntungan ini harus diimbangi dengan kompleksitas sistem yang lebih tinggi dan potensi hambatan tambahan dari pod itu sendiri [55].

b. Manuverabilitas:

Sistem propulsi pada kapal nonkonvensional sering dirancang untuk meningkatkan manuverabilitas. Misalnya, sistem *azipod* yang dapat berputar 360 derajat memberikan kemampuan manuver yang sangat tinggi, terutama penting untuk operasi di pelabuhan atau perairan terbatas.

Analisis manuverabilitas untuk kapal nonkonvensional melibatkan simulasi numerik yang kompleks dan pengujian model untuk mengevaluasi karakteristik *turning*, *zig-zag*, dan *stopping*. Integrasi

sistem propulsi dengan sistem kemudi dan kontrol dinamis kapal menjadi kunci untuk mengoptimalkan performa manuver.

c. Integrasi Sistem Propulsi *Hybrid*:

Banyak kapal nonkonvensional modern mengadopsi sistem propulsi *hybrid*, menggabungkan motor listrik dengan mesin diesel konvensional atau sumber energi alternatif. Optimalisasi manajemen energi dan transisi antara mode propulsi yang berbeda menjadi faktor kritis dalam menentukan efisiensi operasional keseluruhan.

Sistem propulsi *hybrid* memungkinkan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi, dengan potensi pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 20% dalam skenario operasional tertentu. Namun, realisasi potensi ini memerlukan sistem manajemen energi yang canggih dan strategi operasional yang dioptimalkan untuk profil misi spesifik kapal.

3. Material dan Struktur:

Pemilihan material dan desain struktural memiliki dampak signifikan pada performa kapal nonkonvensional.

a. Berat dan Kekuatan:

Penggunaan material maju seperti komposit karbon *fiber* memungkinkan pengurangan berat yang signifikan sambil mempertahankan atau bahkan meningkatkan kekuatan struktural. Studi menunjukkan bahwa penggunaan komposit dapat mengurangi berat struktur hingga 30-40% dibandingkan dengan konstruksi baja konvensional, dengan implikasi langsung pada efisiensi bahan bakar dan kapasitas muatan.

Namun, desain struktural yang optimal harus menyeimbangkan pengurangan berat dengan pertimbangan kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap beban dinamis yang dialami kapal dalam operasi. Analisis elemen hingga (FEA) yang canggih dan pengujian material ekstensif diperlukan untuk memvalidasi integritas struktural dan performa jangka panjang material komposit dalam lingkungan laut yang keras.

b. Hidroelastisitas:

Pada kapal nonkonvensional berkecepatan tinggi atau dengan geometri lambung yang tidak biasa, interaksi antara deformasi struktur dan aliran fluida (hidroelastisitas) menjadi semakin penting. Fenomena seperti *springing* dan *whipping* pada lambung dapat mempengaruhi performa dan umur kelelahan struktur.

Analisis hidroelastis melibatkan *coupling* antara analisis struktural dan hidrodinamika, sering memerlukan pendekatan komputasional yang sangat canggih. Studi menunjukkan bahwa efek hidroelastis dapat meningkatkan beban dinamis hingga 15-20% di atas prediksi analisis kaku tradisional, dengan implikasi signifikan untuk desain struktural dan performa jangka panjang.

c. Dampak Lingkungan:

Ketahanan material terhadap lingkungan laut yang korosif dan degradasi jangka panjang akibat paparan UV dan fluktuasi suhu mempengaruhi performa dan biaya pemeliharaan kapal sepanjang masa pakainya. Pengembangan *coating* dan teknik proteksi korosi yang inovatif menjadi krusial untuk mempertahankan integritas struktural dan performa hidrodinamis lambung dalam jangka panjang.

4. Sistem Kontrol dan Otomasi

Kapal nonkonvensional sering mengandalkan sistem kontrol canggih untuk mengoptimalkan performa.

a. Sistem Stabilisasi Aktif:

Banyak kapal nonkonvensional menggunakan sistem stabilisasi aktif untuk meningkatkan kenyamanan dan memperluas *envelope* operasional. Ini dapat mencakup *fin stabilizer* yang dapat dikendalikan, tangki anti-*rolling*, atau sistem *gyroscopic stabilizer*. Efektivitas sistem ini bergantung pada algoritma kontrol yang canggih dan *respons real-time* terhadap kondisi laut.

Studi menunjukkan bahwa sistem stabilisasi aktif dapat mengurangi gerakan *rolling* hingga 90% dalam kondisi laut tertentu. Namun, efektivitas ini bergantung pada integrasi yang mulus antara sensor, aktuator, dan algoritma kontrol, serta optimalisasi untuk karakteristik dinamis spesifik kapal [56].

b. *Dynamic Positioning*:

Untuk kapal nonkonvensional yang digunakan dalam operasi lepas pantai atau penelitian oseanografi, sistem *Dynamic Positioning* (DP) menjadi krusial. Performa sistem DP dipengaruhi oleh integrasi sensor, aktuator, dan algoritma kontrol yang kompleks.

Sistem DP modern menggunakan algoritma kontrol adaptif dan prediktif untuk mengantisipasi perubahan dalam kondisi lingkungan dan *respons* kapal. Implementasi teknologi *machine learning* dan AI dalam sistem DP menunjukkan potensi untuk meningkatkan akurasi *positioning* hingga 30% dan mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 20% dibandingkan dengan sistem DP konvensional.

c. *Optimalisasi Performa Real-Time:*

Sistem manajemen energi dan optimalisasi rute yang canggih dapat secara signifikan mempengaruhi efisiensi operasional kapal nonkonvensional. Ini melibatkan penggunaan data *real-time* tentang kondisi laut, cuaca, dan performa kapal untuk mengoptimalkan parameter operasional secara kontinu. Implementasi *digital twin* dan teknik big data analytics memungkinkan prediksi performa yang lebih akurat dan optimalisasi operasional yang lebih efektif.

5. Faktor Lingkungan

Kondisi lingkungan memiliki dampak signifikan pada performa kapal nonkonvensional, seringkali lebih kompleks dibandingkan dengan kapal konvensional.

a. *Interaksi dengan Gelombang:*

Respons kapal terhadap gelombang sangat mempengaruhi performa, terutama untuk desain yang tidak konvensional. Misalnya, kapal SWATH dirancang untuk meminimalkan gerakan akibat gelombang, tetapi performa optimalnya mungkin terbatas pada rentang frekuensi gelombang tertentu.

Analisis spektral gelombang dan *respons* kapal menjadi krusial dalam memprediksi performa operasional. Penggunaan data oseanografi *real-time* dan prediksi cuaca canggih memungkinkan optimalisasi rute dan operasional yang lebih efektif untuk memaksimalkan performa dalam berbagai kondisi laut.

b. *Pengaruh Angin:*

Kapal nonkonvensional dengan superstruktur yang besar atau desain yang tidak biasa mungkin lebih sensitif terhadap gaya angin. Ini dapat mempengaruhi stabilitas, konsumsi bahan bakar, dan kemampuan manuver, terutama pada kecepatan rendah atau saat bersandar. Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang kompleks diperlukan untuk memodelkan interaksi angin dengan struktur kapal dan memprediksi dampaknya pada performa. Integrasi data angin *real-time* ke dalam sistem kontrol kapal menjadi semakin penting untuk optimalisasi performa dalam berbagai kondisi lingkungan.

c. Operasi di Perairan Dangkal:

Banyak kapal nonkonvensional dirancang untuk operasi di perairan dangkal atau lingkungan pesisir. Interaksi dengan dasar laut dapat secara signifikan mempengaruhi karakteristik hidrodinamis dan performa propulsi.

Studi menunjukkan bahwa efek perairan dangkal dapat meningkatkan hambatan kapal hingga 50% pada kedalaman kritis tertentu. Pemahaman mendalam tentang fenomena ini dan pengembangan strategi operasional yang tepat menjadi krusial untuk mengoptimalkan performa kapal nonkonvensional di lingkungan pesisir [57].

6. Faktor Operasional

Cara kapal dioperasikan dan dipelihara memiliki dampak besar pada performanya.

- a. Manajemen Beban: Distribusi beban dan manajemen *ballast* menjadi sangat penting, terutama untuk desain seperti SWATH atau *trimaran* di mana stabilitas dan *trim* sangat sensitif terhadap perubahan distribusi massa.
- b. Kecepatan Operasional: Efisiensi banyak teknologi yang digunakan pada kapal nonkonvensional sangat bergantung pada kecepatan operasional. Misalnya, hidrofoil mencapai efisiensi maksimum pada rentang kecepatan tertentu ketika lambung sepenuhnya terangkat dari air.
- c. Pemeliharaan dan Perawatan: Sistem yang kompleks pada kapal nonkonvensional memerlukan rejim pemeliharaan yang lebih

intensif dan terspesialisasi. Kinerja sistem seperti ACB atau hidrofoil dapat terdegradasi secara signifikan jika tidak dipelihara dengan baik.

7. Faktor Ekonomi dan Regulasi:

Meskipun tidak secara langsung mempengaruhi performa teknis, faktor ekonomi dan regulasi memiliki dampak signifikan pada bagaimana kapal nonkonvensional didesain dan dioperasikan.

- a. Efisiensi Bahan Bakar: Tekanan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi mendorong inovasi dalam desain lambung dan sistem propulsi, yang pada gilirannya mempengaruhi karakteristik performa kapal.
- b. Regulasi Keselamatan dan Lingkungan: Kepatuhan terhadap regulasi keselamatan dan lingkungan yang semakin ketat dapat mempengaruhi desain dan operasional kapal, kadang-kadang menghasilkan *trade-off* antara performa dan kepatuhan regulasi.
- c. Fleksibilitas Operasional: Tuntutan pasar untuk kapal yang lebih fleksibel dan multi-guna dapat mendorong desain yang mengoptimalkan performa di berbagai kondisi operasional, daripada memaksimalkan efisiensi untuk satu mode operasi spesifik.

2.6 Metode Analisis dan Pengujian Khusus untuk Kapal Nonkonvensional

Kapal nonkonvensional, dengan desain inovatif dan teknologi canggihnya, memerlukan pendekatan analisis dan pengujian yang jauh lebih kompleks dibandingkan dengan kapal konvensional. Metode-metode ini tidak hanya penting untuk memvalidasi desain dan memprediksi performa, tetapi juga krusial dalam memastikan keamanan, efisiensi operasional, dan kepatuhan terhadap regulasi yang semakin ketat. Berikut berbagai metode analisis dan pengujian khusus yang digunakan untuk kapal nonkonvensional:

1. Computational Fluid Dynamics (CFD) Lanjutan:

CFD telah menjadi alat yang tidak tergantikan dalam analisis hidrodinamika kapal nonkonvensional. Perkembangan terbaru dalam

teknik CFD memungkinkan pemodelan yang lebih akurat dan kompleks.

a. Simulasi Multifase:

Untuk kapal dengan teknologi *Air Cavity Bottom* (ACB) atau *Surface Effect Ship* (SES), simulasi aliran multifase menjadi sangat penting. Teknik *Volume of Fluid* (VOF) dan *Level Set Method* digunakan untuk memodelkan interface udara-air dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan adaptive mesh refinement di sekitar interface udara-air dapat meningkatkan akurasi prediksi hambatan hingga 5-10% dibandingkan dengan metode mesh statis [52].

Selain itu, pengembangan model turbulensi khusus untuk aliran multifase, seperti model $k-\omega$ SST dengan koreksi tegangan permukaan, telah terbukti meningkatkan akurasi prediksi karakteristik lapisan batas dan separasi aliran pada kapal ACB. Implementasi model ini dalam simulasi *full-scale* telah menunjukkan korelasi yang lebih baik dengan data pengujian, dengan perbedaan prediksi hambatan kurang dari 3% pada rentang *Froude number* operasional.

b. Analisis Interaksi Fluida-Struktur (FSI):

Untuk kapal berkecepatan tinggi atau dengan struktur yang fleksibel, analisis FSI menjadi semakin penting. Metode *coupling* yang kuat (*strong coupling*) antara *solver* CFD dan *solver* struktur telah dikembangkan, memungkinkan prediksi yang lebih akurat tentang fenomena hidroelastis.

Penelitian terbaru pada kapal hidrofoil komposit menunjukkan bahwa analisis FSI dapat memprediksi deformasi *foil* dengan akurasi hingga 95% dibandingkan dengan pengukuran eksperimental. Hal ini memiliki implikasi signifikan pada prediksi performa dan umur kelelahan struktur. Implementasi metode adaptif *time-stepping* dalam analisis FSI telah terbukti mengurangi waktu komputasi hingga 40% sambil mempertahankan akurasi hasil.

c. *Large Eddy Simulation* (LES) dan *Detached Eddy Simulation* (DES):

Untuk analisis yang lebih akurat tentang turbulensi dan separasi aliran, metode LES dan DES semakin banyak digunakan. Meskipun membutuhkan sumber daya komputasi yang intensif, metode ini memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang fenomena aliran kompleks.

Studi terbaru menggunakan LES pada propulsor *waterjet* kapal jet berkecepatan tinggi telah mengungkapkan struktur *vortex* yang sebelumnya tidak terdeteksi dengan model RANS standar. Pemahaman ini telah mengarah pada optimalisasi desain intake *waterjet* yang meningkatkan efisiensi propulsi hingga 7% pada kecepatan operasional penuh [58].

2. Pengujian Model Skala

Meskipun simulasi numerik semakin canggih, pengujian model skala tetap menjadi komponen kritis dalam validasi desain kapal nonkonvensional.

a. Fasilitas Pengujian Khusus:

Pengembangan fasilitas pengujian khusus telah memungkinkan evaluasi yang lebih akurat terhadap kapal nonkonvensional. Misalnya, tangki uji dengan sistem pembangkit gelombang *multi-directional* dan *wind generator* terintegrasi telah dikembangkan untuk menguji performa SES dan WIG (*Wing-In-Ground effect*) *craft* dalam kondisi lingkungan yang lebih realistis.

Fasilitas *cavitation tunnel* dengan kemampuan simulasi gelombang telah memungkinkan studi mendalam tentang fenomena kavitasi pada hidrofoil dan *propeller* kapal berkecepatan tinggi. Penggunaan teknik visualisasi aliran canggih seperti *high-speed imaging* dan *laser-induced fluorescence* telah mengungkapkan mekanisme inisiasi dan perkembangan kavitasi yang sebelumnya tidak terdeteksi.

b. Teknik *Scaling* Lanjutan:

Pengembangan teknik *scaling* lanjutan telah memungkinkan ekstrapolasi yang lebih akurat dari hasil pengujian model ke performa *full-scale*. Metode *scaling* berbasis *Reynolds number* lokal untuk

kapal *multihull* telah terbukti meningkatkan akurasi prediksi hambatan hingga 8% dibandingkan dengan metode *scaling* tradisional.

Untuk kapal dengan teknologi pengurangan hambatan aktif seperti *micro-bubble injection*, teknik *scaling* baru yang mempertimbangkan efek skala pada karakteristik gelembung telah dikembangkan. Ini telah memungkinkan prediksi yang lebih akurat tentang efektivitas sistem ini pada skala penuh.

c. Pengukuran *Non-intrusive*:

Kemajuan dalam teknik pengukuran *non-intrusive* telah secara signifikan meningkatkan kualitas data yang diperoleh dari pengujian model. Penggunaan *Particle Image Velocimetry* (PIV) stereoskopik dan tomografi telah memungkinkan pengukuran medan aliran 3D dengan resolusi temporal dan spasial yang tinggi.

Implementasi *Pressure-Sensitive Paint* (PSP) untuk pengukuran distribusi tekanan pada model kapal telah memberikan wawasan baru tentang karakteristik aliran pada geometri lambung yang kompleks. Teknik ini telah terbukti sangat berharga dalam optimalisasi desain appendage dan sistem kontrol aliran aktif.

3. Analisis Struktur Lanjutan

Kapal nonkonvensional sering menggunakan material dan konfigurasi struktural yang tidak biasa, memerlukan metode analisis struktur yang lebih canggih.

a. *Finite Element Analysis* (FEA) *Non-linear*:

Perkembangan dalam FEA *non-linear* telah memungkinkan pemodelan yang lebih akurat dari *respons* struktur kapal nonkonvensional terhadap beban ekstrem. Implementasi model material canggih, seperti model kerusakan progresif untuk komposit, telah meningkatkan akurasi prediksi kegagalan struktur.

Analisis *coupled* CFD-FEA untuk evaluasi beban *slamming* pada kapal berkecepatan tinggi telah menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat memprediksi beban puncak dengan akurasi hingga 90% dibandingkan dengan pengukuran *full-scale*. Ini memiliki implikasi signifikan untuk desain struktural kapal yang beroperasi dalam kondisi laut yang keras.

b. Analisis Kelelahan Spektral dan Pendekatan Probabilistik:

Pengembangan metode analisis kelelahan spektral yang lebih canggih telah meningkatkan akurasi prediksi umur kelelahan struktur kapal nonkonvensional. Integrasi data lingkungan *site-specific* dan profil operasional kapal ke dalam analisis telah memungkinkan penilaian yang lebih realistis tentang akumulasi kerusakan kelelahan.

Pendekatan probabilistik untuk analisis kelelahan, yang mempertimbangkan ketidakpastian dalam beban dan kekuatan material, semakin banyak digunakan. Metode ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang risiko kegagalan struktural dan memungkinkan optimalisasi jadwal inspeksi dan pemeliharaan.

c. Pengujian Struktur *Full-Scale*:

Pengujian struktur *full-scale* tetap menjadi komponen penting dalam validasi desain kapal nonkonvensional. Pengembangan teknik pengukuran *strain fiber optic distributed* telah memungkinkan pemantauan deformasi struktural dengan resolusi spasial yang tinggi selama pengujian statis dan dinamis.

Implementasi sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) pada kapal *prototype* telah memberikan data berharga tentang performa struktur dalam kondisi operasional nyata. Analisis data SHM jangka panjang telah mengungkapkan pola pembebanan dan *respons* struktural yang tidak terdeteksi dalam analisis dan pengujian konvensional.

4. Simulasi Performa Dinamis

Untuk kapal dengan karakteristik dinamis yang kompleks, simulasi performa dinamis menjadi semakin penting dalam proses desain dan evaluasi.

a. Simulasi *Time-Domain*:

Perkembangan dalam algoritma integrasi waktu dan teknik reduksi model telah meningkatkan efisiensi dan akurasi simulasi *time-domain*. Implementasi model hidrodinamis *non-linear* dalam simulasi *seakeeping* telah memungkinkan prediksi yang lebih akurat tentang *respons* kapal dalam kondisi laut ekstrem.

Pengembangan model *coupled* 6-DOF untuk analisis manuver kapal *multihull* telah meningkatkan pemahaman tentang interaksi kompleks antara gerakan *heave*, *pitch*, dan *roll* selama manuver. Ini telah mengarah pada penyempurnaan sistem kontrol dan prosedur operasional untuk kapal-kapal ini.

b. *Hardware-in-the-Loop* (HIL) *Simulation*:

Kemajuan dalam teknologi HIL telah memungkinkan pengujian yang lebih komprehensif terhadap sistem kontrol kapal nonkonvensional. Implementasi model *real-time* dengan fidelitas tinggi, termasuk dinamika aktuator dan sensor, telah meningkatkan realisme dan efektivitas pengujian HIL.

Penggunaan *digital twin* dalam simulasi HIL telah membuka peluang baru untuk optimalisasi sistem kontrol dan prediksi performa. Integrasi data operasional *real-time* ke dalam model simulasi memungkinkan penyesuaian dan optimalisasi sistem kontrol secara kontinyu selama masa pakai kapal.

c. Pengujian Manuver *Real-Time*:

Pengembangan model skala yang dikendalikan jarak jauh dengan instrumentasi canggih telah meningkatkan kualitas data yang diperoleh dari pengujian manuver *real-time*. Implementasi sistem navigasi dan kontrol autonomous pada model skala telah memungkinkan evaluasi algoritma manuver dan *collision avoidance* dalam skenario operasional yang kompleks.

Penggunaan simulator *full-mission* dengan sistem visualisasi dan motion *platform* canggih telah meningkatkan realisme pelatihan operator dan evaluasi prosedur operasional untuk kapal nonkonvensional. Integrasi model performa kapal yang akurat dan skenario lingkungan yang kompleks telah memungkinkan penilaian yang lebih komprehensif tentang keamanan dan efisiensi operasional.

5. Analisis Operasional dan *Lifecycle*

Analisis komprehensif tentang performa operasional dan *lifecycle* menjadi semakin penting dalam evaluasi kelayakan dan keberlanjutan kapal nonkonvensional.

a. Simulasi Misi:

Pengembangan framework simulasi misi yang fleksibel dan skalabel telah memungkinkan evaluasi yang lebih realistis terhadap efektivitas kapal nonkonvensional dalam berbagai skenario operasional. Integrasi model performa kapal yang akurat, data lingkungan, dan algoritma pengambilan keputusan telah meningkatkan fidelitas simulasi.

Implementasi teknik optimasi berbasis simulasi, seperti algoritma genetika dan *particle swarm optimization*, telah memungkinkan optimalisasi konfigurasi kapal dan strategi operasional untuk misi spesifik. Ini telah mengarah pada peningkatan signifikan dalam efisiensi operasional dan efektivitas misi.

b. Analisis *Lifecycle Cost*:

Pengembangan model *lifecycle cost* yang lebih komprehensif, yang mempertimbangkan ketidakpastian dalam biaya operasional dan pemeliharaan, telah meningkatkan akurasi penilaian ekonomis kapal nonkonvensional. Integrasi analisis sensitivitas dan teknik *Monte Carlo* telah memberikan pemahaman yang lebih baik tentang risiko finansial dan peluang optimisasi.

Implementasi pendekatan *Value-Driven Design* dalam analisis *lifecycle* telah memungkinkan evaluasi yang lebih holistik terhadap nilai kapal nonkonvensional, mempertimbangkan tidak hanya biaya tetapi juga manfaat operasional dan strategis.

c. Analisis Risiko Operasional:

Pengembangan metodologi *Probabilistic Risk Assessment* (PRA) yang lebih canggih telah meningkatkan kemampuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi risiko operasional kapal nonkonvensional. Integrasi data operasional dan *maintenance* dari kapal serupa telah meningkatkan akurasi estimasi probabilitas kegagalan dan konsekuensinya.

Implementasi teknik *Dynamic Risk Analysis*, yang mempertimbangkan perubahan risiko selama masa pakai kapal, telah memungkinkan pendekatan manajemen risiko yang lebih proaktif. Ini

telah mengarah pada pengembangan strategi pemeliharaan prediktif dan prosedur operasional yang lebih adaptif.

6. Pengujian dan Validasi Lingkungan

Dengan meningkatnya fokus pada keberlanjutan dan dampak lingkungan, metode pengujian dan validasi lingkungan untuk kapal nonkonvensional telah menjadi semakin canggih dan komprehensif.

a. Pengukuran Emisi *Real-time*:

Pengembangan sistem pemantauan emisi *on-board* yang canggih telah memungkinkan pengukuran *real-time* yang lebih akurat dan komprehensif. Implementasi sensor multi-parameter dan teknik analisis data lanjutan telah meningkatkan kemampuan untuk mengkarakterisasi profil emisi kapal dalam berbagai kondisi operasional.

Integrasi data emisi *real-time* dengan sistem manajemen energi kapal telah memungkinkan optimalisasi operasional yang lebih efektif untuk meminimalkan dampak lingkungan. Pengembangan algoritma prediktif untuk estimasi emisi telah membantu dalam perencanaan rute dan manajemen kecepatan yang lebih ramah lingkungan.

b. Analisis Siklus Hidup (LCA):

Penyempurnaan metodologi LCA untuk kapal nonkonvensional telah meningkatkan akurasi dan komprehensivitas evaluasi dampak lingkungan. Pengembangan database material dan proses yang lebih rinci telah memungkinkan penilaian yang lebih akurat tentang dampak lingkungan dari teknologi dan material inovatif yang digunakan dalam kapal nonkonvensional.

Implementasi pendekatan *dynamic* LCA, yang mempertimbangkan perubahan dalam teknologi dan sumber energi selama masa pakai kapal, telah memberikan gambaran yang lebih realistis tentang dampak lingkungan jangka panjang. Integrasi analisis ketidakpastian dalam LCA telah meningkatkan *robustness* hasil dan membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih informatif.

c. Pengujian *Noise Underwater*:

Perkembangan dalam teknologi pengukuran akustik bawah air telah meningkatkan kemampuan untuk mengkarakterisasi profil *noise* kapal nonkonvensional dengan lebih akurat. Penggunaan *array* hidrofons yang lebih canggih dan teknik *beamforming* telah memungkinkan identifikasi sumber *noise* yang lebih presisi.

Implementasi model propagasi suara bawah air yang lebih kompleks, yang mempertimbangkan variasi lingkungan seperti profil kecepatan suara dan karakteristik dasar laut, telah meningkatkan akurasi prediksi dampak *noise* pada lingkungan marine. Ini telah membantu dalam pengembangan strategi mitigasi *noise* yang lebih efektif. Penggunaan teknik pengolahan sinyal lanjutan, seperti analisis *wavelet* dan *machine learning*, dalam analisis data akustik telah memungkinkan deteksi dan karakterisasi yang lebih baik dari signature akustik kapal. Ini memiliki implikasi penting tidak hanya untuk dampak lingkungan tetapi juga untuk aplikasi militer dan keamanan.

d. Analisis Dampak pada Ekosistem:

Pengembangan model ekosistem yang lebih komprehensif telah memungkinkan evaluasi yang lebih akurat tentang dampak jangka panjang kapal nonkonvensional pada lingkungan marine. Integrasi data dari sensor lingkungan *on-board* dengan model ekosistem telah meningkatkan pemahaman tentang interaksi kapal dengan habitat marine.

Implementasi teknik *remote sensing* dan *environmental* DNA (eDNA) sampling dalam pemantauan dampak lingkungan telah membuka peluang baru untuk mendeteksi perubahan *subtle* dalam ekosistem akibat operasi kapal. Ini telah mengarah pada pengembangan protokol operasional yang lebih ramah lingkungan.

e. Validasi Teknologi Pengurangan Dampak Lingkungan:

Pengujian dan validasi teknologi pengurangan dampak lingkungan, seperti sistem pengolahan air *ballast* atau *scrubber*, telah menjadi semakin *rigorous*. Pengembangan protokol pengujian yang lebih komprehensif, yang mensimulasikan berbagai kondisi operasional dan lingkungan, telah meningkatkan reliabilitas dan efektivitas teknologi ini.

Implementasi pendekatan berbasis risiko dalam sertifikasi teknologi pengurangan dampak lingkungan telah memungkinkan evaluasi yang lebih holistik terhadap keefektifan dan keandalan sistem ini dalam jangka panjang.

2.7 Konsiderasi Lingkungan dan Efisiensi Energi

Dalam era di mana keberlanjutan lingkungan dan efisiensi energi menjadi prioritas global, industri maritim, khususnya dalam pengembangan kapal nonkonvensional, menghadapi tantangan dan peluang yang signifikan. Kapal nonkonvensional, dengan desain inovatif dan teknologi canggihnya, memiliki potensi besar untuk memimpin transformasi menuju transportasi maritim yang lebih ramah lingkungan dan hemat energi. Berikut adalah aspek-aspek konsiderasi lingkungan dan efisiensi energi dalam konteks kapal nonkonvensional:

1. Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca

Pengurangan emisi gas rumah kaca, terutama CO₂, menjadi prioritas utama dalam pengembangan kapal nonkonvensional. Pendekatan multifaset diperlukan untuk mencapai target ambisius yang ditetapkan oleh *International Maritime Organization* (IMO) untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari pelayaran internasional setidaknya 50% pada tahun 2050 dibandingkan dengan tingkat 2008.

a. Desain Hidrodinamis Lanjutan:

Kapal nonkonvensional mengadopsi geometri lambung yang sangat efisien untuk mengurangi hambatan dan, sebagai konsekuensinya, konsumsi bahan bakar. Misalnya, kapal *trimaran* dan *pentamaran* telah menunjukkan pengurangan hambatan total hingga 30% dibandingkan dengan *monohull* konvensional. Studi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terbaru pada desain *trimaran* untuk kapal kontainer berkapasitas 14.000 TEU menunjukkan potensi pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 15% pada kecepatan operasional yang sama dengan desain *monohull* konvensional [59].

Teknologi *Air Lubrication System* (ALS) semakin banyak diimplementasikan pada kapal nonkonvensional. Sistem ini menginjeksikan gelembung udara di bawah lambung kapal untuk mengurangi gesekan antara air dan lambung. Studi lapangan pada

kapal tanker berukuran besar yang dilengkapi dengan ALS menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar rata-rata sebesar 5-8% dalam kondisi operasional nyata. Namun, efektivitas ALS sangat bergantung pada kondisi operasional dan desain lambung, dengan beberapa kasus menunjukkan penghematan hingga 12% pada kondisi optimal.

b. Sistem Propulsi Alternatif:

Kapal nonkonvensional menjadi *platform* untuk implementasi sistem propulsi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Sistem propulsi elektrik-*hybrid* telah menunjukkan potensi besar dalam mengurangi emisi, terutama untuk kapal yang beroperasi dengan profil beban yang bervariasi.

Studi kasus pada kapal feri cepat berkapasitas 1500 penumpang yang menggunakan sistem propulsi diesel-elektrik dengan baterai *lithium-ion* untuk penyimpanan energi menunjukkan pengurangan emisi CO₂ hingga 25% dibandingkan dengan sistem diesel konvensional. Sistem ini memungkinkan operasi *zero-emission* saat masuk dan keluar pelabuhan, serta optimisasi beban mesin diesel selama pelayaran.

Teknologi *fuel cell* berbasis hidrogen menawarkan potensi pengurangan emisi yang lebih besar lagi. Proyek demonstrasi pada kapal wisata berkapasitas 100 penumpang yang menggunakan sistem *fuel cell* PEM (*Proton Exchange Membrane*) menunjukkan operasi *zero-emission* dengan jangkauan operasional hingga 150 km. Namun, tantangan utama dalam implementasi teknologi ini adalah infrastruktur pengisian bahan bakar hidrogen dan biaya awal yang tinggi.

c. Manajemen Energi Terintegrasi:

Sistem manajemen energi canggih pada kapal nonkonvensional memainkan peran kunci dalam optimisasi penggunaan energi. Implementasi algoritma berbasis kecerdasan buatan untuk manajemen beban dan distribusi daya telah menunjukkan hasil yang menjanjikan.

Studi pada kapal *cruise* berukuran besar yang menggunakan sistem manajemen energi berbasis *machine learning* menunjukkan penghematan bahan bakar hingga 15%. Sistem ini mengoptimalkan operasi generator, manajemen beban, dan strategi pengisian/pengosongan sistem penyimpanan energi berdasarkan prediksi kebutuhan daya dan kondisi lingkungan [60].

2. Pengurangan Polusi Air:

Kapal nonkonvensional juga berkontribusi signifikan dalam upaya mengurangi polusi air laut, fokus utama terletak pada manajemen air *ballast* dan pencegahan *fouling*.

a. Sistem Pengolahan Air *Ballast* Inovatif:

Beberapa desain kapal nonkonvensional, seperti SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*), secara inheren mengurangi kebutuhan akan air *ballast*. Untuk kapal yang masih memerlukan sistem *ballast*, teknologi pengolahan yang lebih efektif dan hemat energi terus dikembangkan.

Sistem pengolahan air *ballast* berbasis UV dan elektrolisis telah menunjukkan efektivitas tinggi. Studi terbaru pada sistem elektrolisis lanjutan yang menggunakan elektroda berlapis boron-doped diamond menunjukkan kemampuan untuk mencapai standar IMO D-2 dengan konsumsi energi 40% lebih rendah dibandingkan sistem UV konvensional. Sistem ini juga menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dalam menghilangkan mikroorganisme yang resisten terhadap klorin.

b. Desain Anti-*Fouling* Canggih:

Perkembangan dalam material dan *coating* anti-*fouling* telah membuka peluang baru untuk mengurangi pertumbuhan organisme laut pada lambung kapal tanpa menggunakan bahan kimia berbahaya. *Coating* biomimetik yang terinspirasi dari struktur kulit hiu telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Studi laboratorium dan uji lapangan terbatas menunjukkan pengurangan *fouling* hingga 67% dibandingkan dengan *coating silicone* konvensional. Selain mengurangi pertumbuhan organisme, *coating* ini juga menunjukkan

potensi pengurangan hambatan hingga 5% pada kondisi operasional tertentu.

Sistem pembersihan lambung otomatis yang terintegrasi juga semakin banyak diimplementasikan pada kapal nonkonvensional. Sistem robotik yang dapat bergerak di sepanjang lambung kapal untuk membersihkan *fouling* secara berkala telah menunjukkan kemampuan untuk mempertahankan kondisi lambung yang optimal, mengurangi hambatan hingga 9% dibandingkan dengan kapal tanpa sistem pembersihan reguler [61].

3. Efisiensi Energi dan Energi Terbarukan:

Kapal nonkonvensional menjadi pionir dalam implementasi teknologi efisiensi energi dan integrasi sumber energi terbarukan.

a. Sistem Rekuperasi Panas:

Teknologi rekuperasi panas terus berkembang, dengan fokus pada peningkatan efisiensi dan pengurangan kompleksitas sistem. Implementasi sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) untuk memanfaatkan panas buang dari mesin utama telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Studi pada kapal kontainer berukuran 14.000 TEU yang dilengkapi dengan sistem ORC menunjukkan peningkatan efisiensi energi keseluruhan hingga 8%. Sistem ini mampu menghasilkan listrik tambahan sebesar 1,5 MW dari panas buang, mengurangi konsumsi bahan bakar generator bantu secara signifikan [62].

Perkembangan terbaru dalam material termoelektrik telah meningkatkan efisiensi konversi panas menjadi listrik. *Prototype* generator termoelektrik yang menggunakan material skutterudite menunjukkan efisiensi konversi hingga 10% pada suhu operasional gas buang kapal. Implementasi sistem ini pada kapal kontainer ukuran menengah menunjukkan potensi untuk menghasilkan hingga 7% dari total kebutuhan listrik kapal.

b. Integrasi Energi Surya dan Angin:

Kapal nonkonvensional sering dirancang dengan pertimbangan khusus untuk mengintegrasikan teknologi energi terbarukan. Penggunaan panel surya fleksibel dengan efisiensi tinggi (>24%)

pada permukaan kapal telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Studi pada kapal penumpang ukuran menengah yang mengintegrasikan panel surya ke dalam struktur atap dan dinding superstructure menunjukkan kemampuan untuk memenuhi hingga 15% kebutuhan energi listrik kapal dalam kondisi cuaca cerah. Sistem ini juga berkontribusi pada pengurangan beban pendinginan kapal.

Teknologi *sail assist modern*, seperti *rigid wingsails* atau *rotor sails*, semakin banyak diimplementasikan pada kapal kargo nonkonvensional. Uji coba pada kapal bulk carrier berukuran 64.000 DWT yang dilengkapi dengan dua rotor sail berdiameter 5 meter dan tinggi 24 meter menunjukkan penghematan bahan bakar rata-rata sebesar 8,2% selama operasi satu tahun. Pada beberapa rute dengan kondisi angin yang menguntungkan, penghematan bahan bakar mencapai 20% [63].

4. Pengurangan *Noise* Bawah Air:

Kesadaran akan dampak *noise* bawah air terhadap ekosistem laut telah mendorong pengembangan teknologi untuk mengurangi emisi akustik kapal.

a. Desain Propulsi *Low-Noise*:

Pengembangan sistem propulsi yang lebih senyap menjadi fokus utama dalam desain kapal nonkonvensional. *Propeller* dengan desain tip yang dioptimalkan menggunakan analisis CFD lanjutan telah menunjukkan pengurangan *noise* kavitasi hingga 3-5 dB pada frekuensi tinggi. Sistem propulsi elektrik, terutama yang menggunakan motor sinkron magnet permanen, telah menunjukkan pengurangan signifikan dalam *noise* bawah air.

b. Isolasi Getaran:

Teknik isolasi getaran canggih semakin banyak diterapkan pada kapal nonkonvensional. Penggunaan sistem *mounting elastomer multilayer* yang dikombinasikan dengan massa tambahan yang dioptimalkan telah menunjukkan pengurangan transmisi getaran ke struktur kapal hingga 40 dB pada frekuensi rendah (5-100 Hz).

Implementasi sistem *active noise control* pada beberapa titik kritis di struktur kapal telah menunjukkan potensi untuk mengurangi *noise structure-borne* hingga 10 dB tambahan pada frekuensi rendah. Sistem ini menggunakan sensor dan aktuator yang terdistribusi untuk menghasilkan anti-*noise* yang menetralkan getaran yang tidak diinginkan.

5. Manajemen Limbah dan Ekonomi Sirkular

Konsep ekonomi sirkular semakin diterapkan dalam desain dan operasi kapal nonkonvensional, dengan fokus pada pengurangan limbah dan peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya.

a. Sistem Pengolahan Limbah Terintegrasi:

Kapal nonkonvensional sering dilengkapi dengan sistem pengolahan limbah canggih yang memungkinkan pengolahan *on-board* yang lebih efektif. Implementasi teknologi gasifikasi plasma untuk pengolahan limbah padat pada kapal *cruise* besar telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Sistem ini mampu mengolah hingga 5 ton limbah per hari, mengurangi volume limbah hingga 95% sambil menghasilkan *syngas* yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik *on-board*.

b. Desain untuk Daur Ulang:

Konsep "*Design for Recycling*" semakin diterapkan dalam pengembangan kapal nonkonvensional. Pendekatan ini melibatkan penggunaan material yang mudah didaur ulang dan konstruksi modular yang memfasilitasi pembongkaran dan daur ulang di akhir masa pakai kapal.

Studi *Life Cycle Assessment* (LCA) pada kapal kontainer yang menerapkan prinsip ini menunjukkan potensi pengurangan dampak lingkungan sebesar 30% selama siklus hidup kapal. Penggunaan aluminium daur ulang untuk struktur superstructure dan implementasi sistem modular untuk instalasi peralatan telah menunjukkan peningkatan tingkat daur ulang hingga 90% pada akhir masa pakai kapal.

2.8 Potensi Aplikasi di Berbagai Sektor Maritim

Kapal nonkonvensional, dengan desain inovatif dan teknologi canggihnya, memiliki potensi aplikasi yang luas di berbagai sektor maritim. Keunikan dan keunggulan kapal-kapal ini membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan keberlanjutan operasi maritim. Berikut adalah potensi aplikasi kapal nonkonvensional di berbagai sektor maritim:

1. Transportasi Penumpang dan Kargo

Dalam sektor transportasi penumpang, kapal nonkonvensional menawarkan solusi untuk meningkatkan kecepatan, kenyamanan, dan efisiensi energi:

a. Feri Cepat:

Kapal hidrofoil dan *Surface Effect Ship* (SES) memiliki potensi besar untuk revolutionisasi layanan feri cepat. Dengan kemampuan mencapai kecepatan hingga 50-60 knot, kapal-kapal ini dapat secara signifikan mengurangi waktu perjalanan pada rute pendek hingga menengah. Misalnya, implementasi feri hidrofoil pada rute Hongkong-Macau telah mengurangi waktu perjalanan dari 1 jam menjadi hanya 15 menit, meningkatkan mobilitas dan konektivitas antar pulau. Selain itu, desain kapal *multihull* seperti katamaran dan *trimaran* semakin populer untuk layanan feri karena stabilitas yang lebih baik dan efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi.

b. Kapal Kontainer Nonkonvensional:

Dalam transportasi kargo, kapal kontainer nonkonvensional dengan desain lambung inovatif menunjukkan potensi untuk meningkatkan efisiensi dan kapasitas. Konsep kapal kontainer *trimaran*, misalnya, memungkinkan peningkatan kapasitas muatan hingga 20% dibandingkan dengan kapal *monohull* pada panjang keseluruhan yang sama, sambil mempertahankan stabilitas yang lebih baik dan mengurangi hambatan.

Implementasi teknologi *Air Lubrication System* (ALS) pada kapal kontainer besar telah menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 5-8% dalam operasi nyata. Kombinasi teknologi ini dengan desain lambung yang dioptimalkan dapat menghasilkan

penghematan operasional yang signifikan dan pengurangan emisi CO₂.

2. Eksplorasi dan Eksploitasi Sumber Daya Laut

Kapal nonkonvensional memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan keamanan operasi eksplorasi dan eksploitasi sumber daya laut:

a. Kapal Survei dan Penelitian:

Kapal SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*) telah terbukti sangat efektif untuk operasi survei dan penelitian oseanografi. Stabilitas superior mereka dalam kondisi laut bergelombang memungkinkan pengumpulan data yang lebih akurat dan operasi yang lebih lama. Misalnya, kapal penelitian SWATH "Planet" milik Angkatan Laut Jerman mampu beroperasi dalam kondisi laut dengan tinggi gelombang signifikan hingga 6 meter, jauh melampaui kemampuan kapal penelitian konvensional.

b. Kapal Pendukung *Offshore*:

Dalam industri minyak dan gas *offshore*, kapal nonkonvensional seperti *semi-submersible* dan kapal dengan sistem *Dynamic Positioning* (DP) canggih menawarkan stabilitas dan presisi yang lebih baik untuk operasi di laut dalam. Kapal pendukung *offshore* dengan desain *X-bow*, misalnya, menunjukkan peningkatan performa *seakeeping* hingga 60% dan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 20% dalam kondisi laut yang keras.

3. Operasi Militer dan Keamanan

Sektor militer dan keamanan maritim memanfaatkan keunggulan kapal nonkonvensional untuk meningkatkan kemampuan operasional:

a. Kapal Patroli Cepat:

Kapal patroli berbasis teknologi hidrofoil atau SES menawarkan kecepatan tinggi dan manuverabilitas yang unggul, ideal untuk operasi penegakan hukum dan keamanan pesisir. Misalnya, kapal patroli SES kelas *Skjold* Angkatan Laut Norwegia mampu mencapai kecepatan 60 knot, memungkinkan *respons* cepat terhadap ancaman keamanan.

b. Kapal Perang *Stealth*:

Desain kapal perang nonkonvensional dengan fitur *stealth* yang ditingkatkan, seperti lambung *tumblehome* dan penggunaan material penyerap radar, meningkatkan kemampuan survival dalam lingkungan pertempuran modern. Kapal perang kelas Zumwalt Angkatan Laut AS, dengan desain lambung *tumblehome*-nya yang unik, menunjukkan pengurangan radar *cross-section* hingga 50 kali dibandingkan dengan destroyer konvensional.

4. Wisata dan Rekreasi

Sektor wisata dan rekreasi maritim juga memanfaatkan inovasi kapal nonkonvensional:

a. Kapal Pesiar *Eco-friendly*:

Kapal pesiar dengan desain nonkonvensional yang mengintegrasikan teknologi ramah lingkungan semakin diminati. Misalnya, konsep kapal pesiar dengan tenaga angin dan matahari, seperti "*Peace Boat EcoShip*", menggabungkan desain lambung yang efisien dengan teknologi energi terbarukan untuk mengurangi emisi CO₂ hingga 40% dibandingkan dengan kapal pesiar konvensional.



Gambar 2. 2 *Peace Boat EcoShip* [64]

b. Kapal Wisata *Submersible*:

Kapal wisata *semi-submersible* dan *full-submersible* menawarkan pengalaman unik bagi wisatawan untuk menjelajahi kehidupan bawah

laut tanpa perlu menyelam. Teknologi ini memiliki potensi besar untuk ekowisata dan pendidikan lingkungan laut.

5. Operasi Penyelamatan dan Tanggap Darurat

Kapal nonkonvensional memiliki peran penting dalam meningkatkan efektivitas operasi penyelamatan dan tanggap darurat:

a. Kapal Penyelamat *All-Weather*:

Kapal penyelamat dengan desain nonkonvensional, seperti SWATH atau *self-righting*, mampu beroperasi dalam kondisi cuaca ekstrem. Misalnya, kapal penyelamat kelas *Severn* dari *Royal National Lifeboat Institution* (RNLI) Inggris, dengan kemampuan *self-righting*, dapat beroperasi dalam kondisi badai paling ekstrem, meningkatkan keselamatan dan efektivitas operasi penyelamatan.

b. Kapal Tanggap Bencana Multi-fungsi:

Kapal nonkonvensional dengan desain modular dan kemampuan multi-fungsi semakin relevan untuk operasi tanggap bencana. Konsep kapal seperti "*Adaptive Mission Vessel*" menggabungkan kemampuan transportasi, medis, dan logistik dalam satu *platform*, memungkinkan *respons* yang lebih cepat dan efektif terhadap bencana alam di wilayah pesisir dan pulau-pulau terpencil.

6. Akuakultur dan Perikanan Berkelanjutan

Sektor akuakultur dan perikanan juga memanfaatkan inovasi kapal nonkonvensional:

a. Kapal Pengolahan dan Budidaya Terapung:

Konsep kapal nonkonvensional untuk budidaya dan pengolahan ikan terapung membuka peluang baru untuk akuakultur lepas pantai yang berkelanjutan. Misalnya, proyek "*Smart Fish Farm*" di Norwegia menggunakan *platform semi-submersible* besar untuk budidaya salmon di laut lepas, mengurangi dampak lingkungan pada ekosistem pesisir.

b. Kapal Penangkap Ikan Hemat Energi:

Kapal penangkap ikan dengan desain lambung dan sistem propulsi yang dioptimalkan menunjukkan potensi untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi dampak lingkungan. Implementasi teknologi *hybrid* dan desain lambung yang efisien pada

kapal penangkap ikan telah menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 25% dibandingkan dengan kapal konvensional.

2.9 Soal Latihan

1. Jelaskan perbedaan utama antara prinsip operasional kapal hidrofoil dan kapal SWATH. Bagaimana perbedaan ini mempengaruhi performa masing-masing jenis kapal dalam kondisi laut yang berbeda?
2. Bagaimana penggunaan material komposit dalam konstruksi kapal nonkonvensional mempengaruhi performa dan efisiensi operasional dibandingkan dengan kapal konvensional berbahan baja?
3. Jelaskan prinsip kerja teknologi *Air Cavity Bottom* (ACB) dalam konteks pengurangan hambatan pada kapal nonkonvensional. Bagaimana teknologi ini berbeda dengan dan melengkapi pendekatan pengurangan hambatan lainnya?
4. Evaluasi potensi dan tantangan penggunaan material komposit dalam konstruksi kapal nonkonvensional. Bagaimana keuntungan pengurangan berat harus diimbangi dengan pertimbangan durabilitas dan biaya *lifecycle*?
5. Jelaskan tantangan spesifik yang dihadapi dalam pengembangan dan operasi kapal autonomous nonkonvensional. Bagaimana tantangan ini berbeda dari yang dihadapi oleh kapal autonomous konvensional?
6. Jelaskan bagaimana teknologi *Air Cavity Bottom* (ACB) mempengaruhi hambatan hidrodinamis kapal nonkonvensional. Apa tantangan utama dalam implementasi teknologi ini dan bagaimana tantangan tersebut dapat diatasi?
7. Analisis dampak penggunaan material komposit dalam konstruksi kapal nonkonvensional terhadap performa kapal. Bagaimana keuntungan pengurangan berat harus diimbangi dengan pertimbangan struktural dan ekonomi?
8. Analisis peran pengujian model skala dalam validasi desain kapal nonkonvensional. Bagaimana perkembangan dalam teknik *scaling* lanjutan dan pengukuran *non-intrusive* telah meningkatkan akurasi dan relevansi hasil pengujian?
9. Evaluasi potensi dan tantangan implementasi teknologi energi terbarukan, khususnya integrasi panel surya dan sistem sail

assist modern, pada kapal kargo nonkonvensional. Bagaimana teknologi ini dapat dioptimalkan untuk berbagai rute dan kondisi operasional?

10. Analisis potensi kapal pesiar eco-friendly dalam konteks pariwisata berkelanjutan. Bagaimana integrasi teknologi ramah lingkungan pada kapal pesiar dapat mempengaruhi pengalaman wisatawan, operasional kapal, dan dampak lingkungan industri wisata bahari?

2.10 Kesimpulan

1. Perbedaan antara kapal konvensional dan nonkonvensional mencerminkan evolusi teknologi maritim dalam merespons tantangan dan peluang baru. Sementara kapal konvensional tetap menjadi tulang punggung industri maritim global karena keandalan dan efisiensinya dalam tugas-tugas tradisional, kapal nonkonvensional menawarkan solusi inovatif untuk kebutuhan spesifik dan membuka peluang baru dalam eksplorasi dan pemanfaatan lingkungan maritim. Pemahaman mendalam tentang kekuatan dan keterbatasan masing-masing jenis kapal ini sangat penting bagi para profesional maritim dalam merancang, mengoperasikan, dan mengatur armada yang efektif dan berkelanjutan untuk masa depan.
2. Prinsip-prinsip desain kapal nonkonvensional mencerminkan pendekatan holistik yang menggabungkan inovasi teknologi dengan pemahaman mendalam tentang dinamika fluida, material maju, dan kebutuhan operasional yang beragam. Dengan menerapkan prinsip-prinsip ini, desainer kapal dapat menciptakan solusi yang tidak hanya mendorong batas-batas performa dan efisiensi, tetapi juga memenuhi tuntutan keselamatan, keberlanjutan, dan fleksibilitas yang semakin meningkat dalam industri maritim modern. Pendekatan inovatif ini membuka peluang baru dalam eksplorasi laut, transportasi maritim, dan operasi militer, sambil terus mendorong evolusi teknologi perkapalan ke arah yang lebih efisien dan berkelanjutan.
3. Kapal nonkonvensional menawarkan solusi inovatif untuk berbagai tantangan dalam industri maritim modern, dengan keunggulan signifikan dalam hal efisiensi, performa, dan fleksibilitas operasional. Namun, pengembangan dan

implementasi teknologi ini juga menghadapi sejumlah tantangan yang kompleks, mulai dari aspek teknis hingga regulatori dan ekonomi. Keberhasilan adopsi kapal nonkonvensional akan bergantung pada kemampuan industri untuk mengatasi tantangan-tantangan ini melalui penelitian dan pengembangan berkelanjutan, kolaborasi antar-disiplin, dan adaptasi kerangka regulasi. Dengan pendekatan yang tepat, kapal nonkonvensional memiliki potensi untuk mengubah lanskap industri maritim, mendorong efisiensi yang lebih besar, keberlanjutan lingkungan, dan membuka peluang baru dalam eksplorasi dan pemanfaatan sumber daya laut. Penting bagi para pemangku kepentingan di industri maritim untuk memahami secara mendalam keunggulan dan tantangan ini guna mengoptimalkan pengembangan dan penggunaan teknologi kapal nonkonvensional di masa depan.

4. Performa kapal nonkonvensional dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara berbagai faktor, mulai dari hidrodinamika lambung hingga sistem kontrol canggih dan kondisi lingkungan. Optimalisasi performa memerlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan semua faktor ini secara terpadu. Inovasi berkelanjutan dalam teknologi material, sistem propulsi, dan teknik analisis memungkinkan peningkatan performa yang terus-menerus, membuka peluang baru dalam desain dan operasi kapal. Namun, realisasi potensi penuh dari kapal nonkonvensional juga memerlukan pertimbangan cermat terhadap faktor-faktor operasional, ekonomi, dan regulatori. Dengan pemahaman mendalam tentang faktor-faktor ini, insinyur dan operator dapat mengoptimalkan desain dan pengoperasian kapal nonkonvensional untuk memenuhi tuntutan industri maritim yang terus berkembang, sambil memastikan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan.
5. Metode analisis dan pengujian untuk kapal nonkonvensional telah berkembang secara signifikan, mencerminkan kompleksitas dan inovasi dalam desain mereka serta tuntutan yang meningkat untuk performa, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan. Integrasi teknik simulasi canggih, pengujian fisik yang ekstensif, dan analisis operasional yang komprehensif telah memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam tentang karakteristik dan potensi kapal-kapal ini. Perkembangan dalam *computational*

power dan teknik analisis data telah membuka peluang baru untuk optimisasi desain dan prediksi performa yang lebih akurat. Namun, tantangan tetap ada, terutama dalam validasi teknologi baru dan pemahaman dampak jangka panjang dari inovasi ini. Kolaborasi lintas disiplin antara ahli hidrodinamika, struktur, kontrol, dan lingkungan menjadi semakin penting dalam mengembangkan dan memvalidasi metode analisis dan pengujian yang efektif. Dengan terus berkembangnya teknologi dan meningkatnya tuntutan untuk transportasi maritime yang lebih efisien dan ramah lingkungan, metode-metode ini akan terus berevolusi, mendorong inovasi dalam desain dan operasi kapal nonkonvensional.

6. **Konsiderasi lingkungan dan efisiensi energi** telah menjadi faktor kunci dalam pengembangan kapal nonkonvensional, mendorong inovasi dalam berbagai aspek desain dan teknologi. Dari pengurangan emisi gas rumah kaca melalui desain hidrodinamis lanjutan dan sistem propulsi alternatif, hingga pengurangan polusi air dan *noise* bawah air, kapal nonkonvensional menawarkan solusi potensial untuk mengatasi tantangan lingkungan yang dihadapi industri maritim. Integrasi energi terbarukan dan penerapan prinsip ekonomi sirkular lebih lanjut memperkuat peran kapal nonkonvensional dalam mendorong transformasi menuju industri pelayaran yang lebih berkelanjutan. Namun, realisasi penuh dari potensi ini memerlukan investasi berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan, serta kolaborasi erat antara industri, lembaga penelitian, dan regulator. Dengan terus mendorong inovasi dan implementasi teknologi canggih, kapal nonkonvensional dapat memainkan peran kunci dalam mencapai target keberlanjutan global dan membentuk masa depan industri maritim yang lebih ramah lingkungan dan efisien energi.
7. **Potensi aplikasi kapal nonkonvensional** di berbagai sektor maritim menunjukkan transformasi signifikan dalam cara kita memanfaatkan dan menjelajahi lingkungan laut. Dari meningkatkan efisiensi transportasi dan eksplorasi sumber daya, hingga mendukung operasi militer canggih dan mempromosikan wisata berkelanjutan, kapal nonkonvensional menawarkan solusi inovatif untuk tantangan kompleks yang dihadapi industri maritim.

Keunggulan dalam kecepatan, stabilitas, efisiensi energi, dan kemampuan operasional dalam kondisi ekstrem membuat kapal-kapal ini semakin relevan dalam konteks global yang menekankan keberlanjutan dan adaptabilitas. Namun, realisasi penuh dari potensi ini memerlukan investasi berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan, serta adaptasi regulasi dan infrastruktur pendukung. Dengan terus mendorong inovasi dan kolaborasi antar sektor, kapal nonkonvensional berpotensi tidak hanya meningkatkan efisiensi dan keamanan operasi maritim, tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap perlindungan lingkungan laut dan pengembangan ekonomi biru yang berkelanjutan.

BAB III

KAPAL *MONOHULL* NONKONVENSIONAL

3.1 Pendahuluan

Kapal *monohull* nonkonvensional merupakan evolusi penting dalam dunia perkapalan, menawarkan solusi inovatif untuk berbagai tantangan yang dihadapi oleh desain kapal tradisional. Bab ini mengeksplorasi beragam jenis kapal *monohull* nonkonvensional, dengan fokus utama pada *Round Bilge Semi-displacement hull* dan *planing hull*. Kedua jenis lambung ini telah membuka pintu bagi peningkatan kinerja dan efisiensi yang signifikan dalam berbagai aplikasi maritim.

Seiring dengan perkembangan teknologi dan tuntutan akan performa yang lebih tinggi, desainer kapal telah mengembangkan bentuk lambung yang melampaui batasan konvensional. *Round Bilge Semi-displacement hull*, misalnya, menawarkan keseimbangan unik antara efisiensi pada kecepatan rendah dan kemampuan mencapai kecepatan tinggi. Sementara itu, *planing hull* telah merevolusi konsep kecepatan di air, memungkinkan kapal untuk "meluncur" di atas permukaan air pada kecepatan tinggi dengan resistensi yang jauh lebih rendah dibandingkan desain konvensional.

Bab ini mendalami karakteristik desain, performa hidrodinamika, dan aplikasi praktis dari kedua jenis lambung tersebut. Pembahasan mencakup prinsip-prinsip dasar yang mendasari desain mereka, faktor-faktor yang mempengaruhi dinamika kapal, serta contoh-contoh nyata penerapannya dalam industri maritim. Selain itu, eksplorasi inovasi terbaru dalam desain *monohull* nonkonvensional juga disajikan, menggambarkan bagaimana teknologi ini terus mendorong batas-batas kemajuan perkapalan.

Meskipun kapal *monohull* nonkonvensional menawarkan banyak keunggulan, mereka juga menghadirkan tantangan unik dalam hal desain, konstruksi, dan operasi. Bab ini membahas tantangan-tantangan tersebut serta solusi yang telah dikembangkan untuk mengatasinya. Dengan demikian, pembaca akan mendapatkan

pemahaman komprehensif tentang potensi dan batasan dari teknologi ini.

Akhirnya, perbandingan kinerja dan aplikasi dari berbagai jenis kapal *monohull* nonkonvensional disajikan. Analisis ini membantu pembaca memahami kelebihan dan kekurangan relatif dari setiap desain, serta konteks di mana masing-masing paling efektif. Melalui pembahasan ini, diharapkan pembaca akan memperoleh wawasan yang mendalam tentang peran penting kapal *monohull* nonkonvensional dalam membentuk masa depan industri maritim.

3.2 Round Bilge Semi-Displacement Hull

Round Bilge Semi-Displacement Hull merupakan inovasi penting dalam desain kapal yang menggabungkan keunggulan dari lambung *displacement* tradisional dan lambung *planing*. Jenis lambung ini dicirikan oleh bentuk melengkung halus pada bagian *bilge* (sudut antara dasar dan sisi lambung), yang memberikan transisi lebih lancar antara bagian bawah dan sisi kapal. Desain ini memungkinkan kapal untuk beroperasi secara efisien dalam berbagai kondisi kecepatan, dari kecepatan rendah hingga menengah, sambil tetap mempertahankan kemampuan untuk mencapai kecepatan yang relatif tinggi.

Karakteristik utama dari *Round Bilge Semi-Displacement Hull* terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan *lift* hidrodinamis moderat saat bergerak pada kecepatan tinggi, namun tetap mempertahankan stabilitas dan efisiensi bahan bakar yang baik pada kecepatan rendah hingga menengah. Bentuk lambung yang melengkung membantu mengurangi turbulensi air dan *drag*, sehingga meningkatkan efisiensi propulsi secara keseluruhan. Selain itu, desain ini juga menawarkan performa yang lebih baik dalam kondisi laut bergelombang dibandingkan dengan lambung *planing* murni, memberikan kenyamanan yang lebih tinggi bagi penumpang dan awak kapal.

3.2.1 Karakteristik Desain

Karakteristik desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull* merupakan hasil dari evolusi panjang dalam teknologi perkapalan,

yang bertujuan untuk mengoptimalkan performa kapal pada berbagai kondisi operasi. Berikut adalah elemen-elemen kunci dalam desain ini:

1. Bentuk *Bilge*

Bilge yang melengkung halus adalah ciri khas utama dari desain ini. Lengkungan ini bukan hanya estetika, tetapi memiliki fungsi hidrodinamis yang krusial. Transisi halus antara bagian bawah dan sisi kapal mengurangi turbulensi aliran air secara signifikan. Hal ini meminimalkan pembentukan *vortex* dan pemisahan aliran, yang merupakan sumber utama hambatan tambahan pada kapal.

Bentuk *bilge* ini juga mempengaruhi distribusi tekanan di sekitar lambung. Pada kecepatan rendah, bentuk melengkung membantu mempertahankan aliran laminar lebih lama, mengurangi gesekan permukaan. Pada kecepatan tinggi, lengkungan ini memfasilitasi pembentukan *lift* hidrodinamis yang lebih efisien, memungkinkan kapal untuk "naik" sedikit di atas permukaan air, mengurangi volume air yang dipindahkan dan konsekuensinya mengurangi hambatan gelombang.

2. Distribusi Volume:

Distribusi volume sepanjang lambung *Round Bilge Semi-Displacement Hull* dirancang dengan sangat cermat untuk mengoptimalkan performa pada berbagai kecepatan. Bagian depan (*bow*) yang ramping membantu membelah air dengan efisien, mengurangi pembentukan gelombang dan meningkatkan penetrasi melalui gelombang laut. Hal ini sangat penting untuk kinerja *seakeeping* yang baik dan pengurangan hambatan pada kecepatan tinggi.

Bagian tengah lambung memiliki volume yang lebih besar, yang memberikan beberapa keuntungan. Pertama, ini menyediakan ruang internal yang memadai untuk muatan atau penumpang. Kedua, volume ini berkontribusi pada stabilitas transversal kapal. Ketiga, pada kecepatan tinggi, bagian ini membantu dalam pembentukan "*pressure pad*" di bawah lambung, yang berkontribusi pada *lift* hidrodinamis.

Bagian belakang lambung juga memiliki peran penting. Volume di bagian ini membantu dalam mendukung berat mesin dan sistem propulsi, yang sering terletak di belakang. Selain itu, bentuk bagian belakang dirancang untuk mengoptimalkan aliran air ke *propeller* dan mengurangi pembentukan gelombang belakang (*wake*).

3. *Deadrise*

Sudut *deadrise* pada *Round Bilge Semi-Displacement Hull* adalah hasil dari kompromi yang cermat. Sudut ini biasanya lebih moderat dibandingkan dengan lambung *planing* murni, tetapi lebih besar daripada lambung *displacement* tradisional. Sudut *deadrise* yang moderat ini memungkinkan kapal untuk tetap efisien pada kecepatan rendah, di mana sebagian besar gaya angkat berasal dari daya apung statis.

Namun, sudut ini juga cukup untuk menghasilkan *lift* hidrodinamis yang signifikan pada kecepatan tinggi. Ketika kecepatan meningkat, air yang mengalir di sepanjang bagian bawah lambung menciptakan area bertekanan tinggi, menghasilkan gaya angkat. Sudut *deadrise* yang tepat membantu dalam mengarahkan aliran air ini untuk menghasilkan *lift* yang optimal sambil tetap mempertahankan stabilitas.

Selain itu, sudut *deadrise* memiliki implikasi penting untuk performa kapal dalam kondisi bergelombang. Sudut yang lebih besar membantu dalam meredam *impact* ketika kapal menghantam gelombang, meningkatkan kenyamanan dan mengurangi beban struktural pada lambung.

4. *Chine*

Chine pada *Round Bilge Semi-Displacement Hull* biasanya lebih lembut dan kurang tajam dibandingkan dengan lambung *planing*. Ini adalah area transisi antara bagian bawah dan sisi lambung. *Chine* yang lebih lembut memiliki beberapa keuntungan:

- a. Mengurangi hambatan: *Chine* yang lebih halus mengurangi turbulensi dan pemisahan aliran, yang dapat menjadi sumber hambatan tambahan.

- b. Meningkatkan kenyamanan: Dalam kondisi bergelombang, *chine* yang lebih lembut mengurangi *tendency* kapal untuk "menggigit" gelombang, yang dapat menyebabkan gerakan lateral yang tiba-tiba.
- c. Performa yang lebih baik pada kecepatan rendah: *Chine* yang lebih lembut membantu mempertahankan aliran laminar pada kecepatan rendah, meningkatkan efisiensi.

Namun, desainer harus menyeimbangkan ini dengan kebutuhan untuk menghasilkan *lift* dan stabilitas yang cukup pada kecepatan tinggi. Oleh karena itu, beberapa desain mungkin menggunakan *chine* yang sedikit lebih tajam di bagian belakang lambung untuk meningkatkan *lift* dan stabilitas direksional pada kecepatan tinggi.

5. Forefoot

Desain *forefoot* (bagian depan bawah lambung) pada *Round Bilge Semi-Displacement Hull* adalah hasil dari analisis dan optimasi yang ekstensif. Bagian ini memiliki peran krusial dalam menentukan bagaimana kapal berinteraksi dengan air, terutama pada kecepatan tinggi dan dalam kondisi bergelombang. *Forefoot* biasanya dirancang dengan bentuk yang sedikit melengkung atau memiliki sudut masuk (*entry angle*) yang halus. Ini memungkinkan kapal untuk membelah air dengan lebih efisien, mengurangi pembentukan gelombang dan meminimalkan fenomena *slamming* (benturan lambung dengan permukaan air).

Pada kecepatan tinggi, desain *forefoot* yang tepat dapat membantu dalam menciptakan "*pressure pad*" di bawah lambung, yang berkontribusi pada *lift* hidrodinamis. Hal ini membantu kapal untuk "naik" sedikit di atas permukaan air, mengurangi hambatan dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. Dalam kondisi bergelombang, *forefoot* yang dirancang dengan baik dapat membantu dalam menjaga *bow* tetap terangkat, mengurangi tendensi untuk "menukik" ke dalam gelombang. Ini meningkatkan *seakeeping* dan kenyamanan, serta mengurangi beban *impact* pada struktur lambung.

6. Transom

Transom, atau bagian belakang lambung, pada *Round Bilge Semi-Displacement Hull* dirancang untuk memfasilitasi aliran air yang

lancar dan mengurangi *wake* pada berbagai kecepatan operasi. Desain *transom* memiliki implikasi signifikan terhadap performa hidrodinamis kapal, terutama pada kecepatan tinggi.

Pada kecepatan rendah hingga menengah, *transom* biasanya terendam sebagian atau seluruhnya. Dalam kondisi ini, bentuk *transom* dirancang untuk meminimalkan pemisahan aliran dan pembentukan *vortex*, yang dapat meningkatkan hambatan.

Pada kecepatan tinggi, banyak desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull* menggunakan *transom* yang "kering" atau sebagian terangkat dari air. Ini membantu dalam mengurangi area basah lambung, yang pada gilirannya mengurangi gesekan permukaan. Selain itu, *transom* yang terangkat dapat membantu dalam menciptakan area bertekanan rendah di belakang kapal, yang dapat "menarik" kapal maju, mengurangi hambatan total.

Bentuk dan sudut *transom* juga mempengaruhi karakteristik *wake* kapal. Desain yang optimal dapat membantu dalam mengurangi tinggi dan energi *wake*, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari operasi kapal. Desain *transom* juga harus mempertimbangkan interaksi dengan sistem propulsi. Untuk kapal dengan *propeller* konvensional, *transom* harus dirancang untuk memastikan aliran air yang optimal ke *propeller*. Untuk sistem propulsi jet, desain *transom* mungkin perlu dimodifikasi untuk mengakomodasi saluran keluar jet.

3.2.2 Performa Hidrodinamika

Performa hidrodinamika *Round Bilge Semi-Displacement Hull* adalah hasil dari interaksi kompleks antara berbagai elemen desain dan prinsip-prinsip fisika fluida. Berikut adalah aspek-aspek kunci dari performa hidrodinamika jenis lambung ini:

1. Transisi Mode Operasi

Salah satu keunggulan utama *Round Bilge Semi-Displacement Hull* adalah kemampuannya untuk beroperasi secara efisien dalam berbagai mode. Transisi antara mode-mode ini terjadi secara bertahap dan halus, yang merupakan karakteristik kunci dari desain ini.

Pada kecepatan rendah (*Froude number* < 0.4), lambung beroperasi dalam mode *displacement* murni. Dalam mode ini, hampir semua gaya angkat berasal dari daya apung statis, dan kapal memindahkan volume air yang setara dengan beratnya. Resistensi dalam mode ini didominasi oleh gesekan permukaan dan pembentukan gelombang.

Ketika kecepatan meningkat (*Froude number* $0.4 - 0.6$), lambung mulai memasuki zona transisi. Dalam fase ini, *lift* dinamis mulai berperan, meskipun masih relatif kecil dibandingkan dengan daya apung. Kapal mulai naik sedikit di atas garis air statis, mengurangi volume air yang dipindahkan. Ini menghasilkan perubahan dalam karakteristik resistensi, dengan kontribusi *lift-induced drag* yang mulai muncul.

Pada kecepatan tinggi (*Froude number* > 0.6), lambung beroperasi dalam mode *semi-planing*. Dalam mode ini, *lift* dinamis menjadi signifikan, meskipun tidak sebesar yang dihasilkan oleh lambung *planing* murni. Kapal naik lebih jauh di atas garis air statis, lebih jauh mengurangi volume air yang dipindahkan. Resistensi dalam mode ini adalah kombinasi kompleks dari gesekan permukaan, pembentukan gelombang, dan *lift-induced drag*.

Transisi halus antara mode-mode ini adalah hasil dari desain yang cermat, terutama dalam hal bentuk *bilge* dan distribusi volume lambung. Hal ini memungkinkan kapal untuk beroperasi secara efisien dalam berbagai kondisi, memberikan fleksibilitas operasional yang signifikan.

2. Resistensi

Kurva resistensi *Round Bilge Semi-Displacement Hull* menunjukkan karakteristik yang unik, mencerminkan transisi halus antara berbagai mode operasi. Pada kecepatan rendah, resistensi didominasi oleh dua komponen utama: gesekan permukaan dan pembentukan gelombang. Gesekan permukaan adalah fungsi dari luas permukaan basah lambung dan kekasaran permukaannya. Pembentukan gelombang pada tahap ini relatif kecil, tetapi meningkat dengan cepat seiring bertambahnya kecepatan.

Ketika kapal memasuki zona transisi, karakteristik resistensi mulai berubah. Pembentukan gelombang meningkat secara signifikan, sering kali mencapai puncaknya dalam zona ini. Namun, pada saat yang sama, *lift* dinamis mulai berperan, mengurangi volume air yang dipindahkan dan konsekuensinya mengurangi komponen resistensi gelombang.

Pada kecepatan tinggi, dalam mode *semi-planing*, kurva resistensi menunjukkan perilaku yang menarik. Meskipun kecepatan meningkat, peningkatan resistensi total cenderung melambat. Ini adalah hasil dari beberapa faktor:

- a. Pengurangan volume air yang dipindahkan mengurangi resistensi gelombang.
- b. *Lift* dinamis mengurangi area basah lambung, mengurangi gesekan permukaan.
- c. Namun, *lift-induced drag* mulai menjadi faktor yang signifikan.

Pemahaman mendalam tentang karakteristik resistensi ini sangat penting dalam optimasi desain dan operasi kapal. Desainer dapat memanfaatkan informasi ini untuk mengoptimalkan bentuk lambung untuk kecepatan operasi tertentu atau untuk mencapai efisiensi yang baik dalam berbagai kondisi operasi.

3. *Lift* Hidrodinamis:

Lift hidrodinamis adalah salah satu aspek kunci yang membedakan *Round Bilge Semi-Displacement Hull* dari desain lambung konvensional. Generasi *lift* ini adalah hasil dari interaksi kompleks antara bentuk lambung dan aliran air di sekitarnya. Pada kecepatan rendah, *lift* hidrodinamis minimal, dan sebagian besar gaya angkat berasal dari daya apung statis. Namun, seiring meningkatnya kecepatan, beberapa fenomena mulai berperan:

- a. Efek Venturi: Ketika air mengalir di sepanjang bagian bawah lambung yang melengkung, kecepatannya meningkat. Sesuai dengan prinsip *Bernoulli*, ini menghasilkan area bertekanan rendah, menciptakan gaya angkat.
- b. *Spray Rails*: Banyak desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull* menggunakan *spray rails* atau *chine strips*. Elemen-elemen ini

membantu dalam mengarahkan aliran air, menciptakan area bertekanan tinggi yang berkontribusi pada *lift*.

- c. *Deadrise*: Sudut *deadrise* yang moderat membantu dalam mengarahkan aliran air untuk menghasilkan *lift*, sambil tetap mempertahankan stabilitas.
- d. *Transom*: Pada kecepatan tinggi, *transom* yang terangkat menciptakan area bertekanan rendah di belakang kapal, yang dapat "menarik" kapal ke atas dan mengurangi *draft*.

Lift hidrodinamis ini memiliki beberapa efek positif:

- a. Mengurangi volume air yang dipindahkan, mengurangi resistensi gelombang.
- b. Mengurangi area basah lambung, mengurangi gesekan permukaan.
- c. Meningkatkan stabilitas dinamis kapal.

Namun, generasi *lift* juga menghasilkan *lift-induced drag*, yang merupakan komponen resistensi tambahan. Desainer harus menyeimbangkan manfaat *lift* dengan *drag* tambahan ini untuk mencapai performa optimal.

4. Stabilitas

Stabilitas *Round Bilge Semi-Displacement Hull* adalah hasil dari interaksi kompleks antara bentuk lambung, distribusi berat, dan gaya-gaya hidrodinamis. Desain ini umumnya menawarkan karakteristik stabilitas yang baik pada berbagai kecepatan dan kondisi laut.

a. Stabilitas Statis:

Pada kecepatan rendah, stabilitas didominasi oleh faktor-faktor statis. Bentuk lambung yang melengkung memberikan momen penegak (*righting moment*) yang kuat. Distribusi volume yang tepat, dengan bagian tengah lambung yang lebih lebar, berkontribusi pada *metacentric height* (GM) yang baik, yang penting untuk stabilitas awal.

b. Stabilitas Dinamis:

Pada kecepatan tinggi, stabilitas kapal dipengaruhi oleh faktor-faktor dinamis:

- *Lift* Hidrodinamis: *lift* yang dihasilkan pada kecepatan tinggi cenderung meningkatkan stabilitas longitudinal. Ini membantu menjaga *bow* terangkat dan mengurangi *pitching* (gerakan naik-turun haluan).
 - Efek *Chine*: Meskipun lebih lembut dibandingkan lambung *planing*, *chine* pada *Round Bilge Semi-Displacement Hull* tetap berperan dalam stabilitas lateral. Ketika kapal miring, *chine* yang terendam menciptakan momen penegak tambahan.
 - *Spray Rails*: Jika ada, *spray rails* tidak hanya berkontribusi pada *lift* tetapi juga pada stabilitas lateral, terutama pada kecepatan tinggi.
 - Distribusi Tekanan Dinamis: Aliran air di sekitar lambung menciptakan distribusi tekanan yang berubah-ubah, yang dapat mempengaruhi stabilitas. Desain yang baik memanfaatkan efek ini untuk meningkatkan stabilitas keseluruhan.
- c. Stabilitas dalam Gelombang:

Round Bilge Semi-Displacement Hull umumnya menunjukkan karakteristik *seakeeping* yang baik. Bentuk lambung yang melengkung membantu dalam meredam gerakan, terutama dalam kondisi bergelombang. *Forefoot* yang dirancang dengan baik membantu dalam membelah gelombang, mengurangi *pitching* dan *slamming*.

5. **Wake dan Spray:**

Karakteristik *wake* dan *spray* adalah aspek penting dari performa hidrodinamika yang mempengaruhi efisiensi, kenyamanan, dan dampak lingkungan kapal.

a. *Wake*:

Round Bilge Semi-Displacement Hull cenderung menghasilkan *wake* yang lebih kecil dibandingkan dengan lambung *displacement* konvensional pada kecepatan tinggi. Ini disebabkan oleh beberapa faktor:

- Pengurangan volume air yang dipindahkan pada kecepatan tinggi mengurangi energi yang ditransfer ke pembentukan gelombang.

- Bentuk *transom* dan *afterbody* yang dioptimalkan membantu dalam "menutup" aliran air di belakang kapal, mengurangi turbulensi dan formasi gelombang.
- *Lift* hidrodinamis mengurangi "cekungan" pada permukaan air di sekitar kapal, yang berkontribusi pada pembentukan *wake*.

Wake yang lebih kecil tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga mengurangi dampak lingkungan, terutama penting di wilayah pesisir dan perairan dalam.

b. *Spray*:

Kontrol *spray* adalah aspek penting dari desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull*:

- Bentuk *bow* yang dioptimalkan membantu dalam membelah air dengan bersih, mengurangi pembentukan *spray*.
- *Chine*, meskipun lebih lembut, masih berperan dalam mengarahkan *spray* ke bawah dan keluar, menjaga dek dan superstruktur tetap kering.
- *Spray rails*, jika digunakan, sangat efektif dalam mengendalikan *spray*, terutama pada kecepatan tinggi dan dalam kondisi bergelombang.

Kontrol *spray* yang efektif meningkatkan visibilitas, kenyamanan, dan keamanan, serta mengurangi beban air pada dek dan superstruktur.

6. Performa dalam Gelombang:

Round Bilge Semi-Displacement Hull umumnya menunjukkan performa yang baik dalam kondisi bergelombang, yang merupakan salah satu keunggulan utamanya dibandingkan dengan lambung *planing* murni.

- a. *Pitching*: Bentuk *bow* yang dioptimalkan dan distribusi volume yang tepat sepanjang lambung membantu dalam mengurangi *pitching*. *Forefoot* yang dirancang dengan baik membantu dalam membelah gelombang, mengurangi tendensi *bow* untuk "menukik" ke dalam gelombang.
- b. *Heaving*: *lift* hidrodinamis yang dihasilkan pada kecepatan tinggi membantu dalam meredam gerakan *heaving* (naik-turun vertikal).

Ini memberikan perjalanan yang lebih halus dan mengurangi beban *impact* pada struktur kapal.

- c. *Rolling*: Bentuk *bilge* yang melengkung memberikan momen penegak yang kuat, membantu dalam menstabilkan kapal terhadap *rolling*. Pada kecepatan tinggi, efek hidrodinamis juga berkontribusi pada stabilitas roll.
- d. *Slamming*: *Deadrise* yang moderat dan bentuk *forefoot* yang tepat membantu dalam mengurangi *slamming*, terutama penting untuk kenyamanan dan integritas struktural pada kecepatan tinggi dalam kondisi bergelombang.

7. Efisiensi Propulsi

Efisiensi propulsi *Round Bilge Semi-Displacement Hull* adalah hasil dari interaksi yang kompleks antara bentuk lambung, karakteristik aliran, dan sistem propulsi.

- a. Aliran ke *Propeller*: Bentuk *afterbody* dan *transom* dirancang untuk mengoptimalkan aliran air ke *propeller*. Ini meningkatkan efisiensi *propeller* dan mengurangi kavitasi.
- b. Pengurangan *Wake*: *Wake* yang lebih kecil dan teratur meningkatkan efisiensi propulsi dengan mengurangi fluktuasi beban pada *propeller*.
- c. Trim Dinamis: *lift* hidrodinamis pada kecepatan tinggi membantu mempertahankan *trim* yang optimal, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi propulsi.
- d. Kompatibilitas dengan Berbagai Sistem Propulsi: Desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull* umumnya kompatibel dengan berbagai sistem propulsi, termasuk *propeller* konvensional, *azipod*, dan *waterjet*, memungkinkan optimasi lebih lanjut berdasarkan kebutuhan operasional spesifik.

Efisiensi propulsi yang tinggi ini, dikombinasikan dengan karakteristik resistensi yang baik, menghasilkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dan jangkauan operasional yang lebih luas dibandingkan dengan desain konvensional pada kecepatan operasi yang sebanding.

3.2.3 Aplikasi dan Contoh Kapal

Round Bilge Semi-Displacement Hull telah menemukan aplikasi yang luas dalam berbagai jenis kapal, terutama di mana fleksibilitas operasional, efisiensi, dan performa pada berbagai kecepatan menjadi prioritas. Berikut aplikasi dan contoh-contoh spesifik:

1. Kapal Patroli Pantai

Round Bilge Semi-Displacement Hull sangat cocok untuk kapal patroli pantai karena kemampuannya untuk beroperasi efisien pada berbagai kecepatan. Kapal patroli sering memerlukan kemampuan untuk melakukan pengawasan pada kecepatan rendah dan melakukan pengejaran pada kecepatan tinggi.

Contoh: *Damen Stan Patrol 5009*

- a. Panjang: 50,1 meter
- b. Kecepatan maksimum: 30 knot
- c. Jangkauan: 3000 nautical mile



Gambar 3. 1 *Damen Stan Patrol 5009* [65]

Kapal ini menggabungkan efisiensi bahan bakar yang baik pada kecepatan patroli dengan kemampuan mencapai kecepatan tinggi saat diperlukan. Desain *Sea Axe Bow*-nya, yang merupakan variasi

dari *Round Bilge Semi-Displacement Hull*, memberikan performa yang sangat baik dalam kondisi laut bergelombang.

2. Kapal Penyeberangan Cepat

Untuk rute penyeberangan pendek hingga menengah, *Round Bilge Semi-Displacement Hull* menawarkan keseimbangan yang baik antara kecepatan, efisiensi bahan bakar, dan kenyamanan penumpang.

Contoh: Austal Auto Express 109

- a. Panjang: 109 meter
- b. Kecepatan: 36 knot
- c. Kapasitas: 1000 penumpang dan 250 kendaraan



Gambar 3. 2 *Austal Auto Express 109* [66]

Meskipun ini adalah katamaran, setiap lambungnya menggunakan prinsip *Round Bilge Semi-Displacement*. Desain ini memungkinkan kapal untuk mencapai kecepatan tinggi sambil tetap mempertahankan efisiensi bahan bakar yang baik dan kenyamanan penumpang yang superior dalam berbagai kondisi laut.

3. *Yacht Mewah*

Industri *yacht* mewah telah mengadopsi desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull* untuk menggabungkan kecepatan tinggi dengan kenyamanan dan efisiensi.

Contoh: *Heesen YN 19150 Project Electra*

- a. Panjang: 50 meter
- b. Kecepatan maksimum: 16,3 knot
- c. Sistem propulsi: *Hybrid*



Gambar 3. 3 Heesen YN 19150 Project Electra [67]

Yacht ini menggunakan *Fast Displacement Hull Form (FDHF)*, sebuah variasi canggih dari *Round Bilge Semi-Displacement Hull* yang dikembangkan oleh *Van Oossanen Naval Architects*. FDHF memungkinkan yacht untuk beroperasi sangat efisien baik pada kecepatan rendah maupun tinggi, dengan transisi yang mulus di antara keduanya.

4. Kapal Penumpang Berukuran Menengah

Untuk rute pantai atau sungai, *Round Bilge Semi-Displacement Hull* menawarkan efisiensi operasional yang tinggi dan fleksibilitas.

Contoh: *Damen River Cruise Vessel 135*

- a. Panjang: 135 meter
- b. Kapasitas: 210 penumpang
- c. Kecepatan: 13 knot

Desain ini menggabungkan efisiensi bahan bakar yang tinggi dengan kemampuan manuver yang baik, penting untuk operasi di sungai dan perairan pantai. *Round Bilge Semi-Displacement Hull*

memungkinkan kapal ini untuk beroperasi dengan lancar di perairan dangkal dan dalam.

5. Kapal Riset Oseanografi

Kapal riset modern memerlukan stabilitas yang baik untuk operasi penelitian dan kemampuan untuk mencapai lokasi penelitian dengan cepat.

Contoh: RV Investigator (Australia)

- a. Panjang: 93,9 meter
- b. Kecepatan: 12 knot (*cruise*), 15 knot (maksimum)
- c. Jangkauan: 10.000 nautical mile

Desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull* memungkinkan RV Investigator untuk mempertahankan posisi yang stabil selama operasi penelitian, sambil tetap mampu melakukan perjalanan antar lokasi penelitian dengan efisien.

6. Kapal Dukungan Offshore

Dalam industri minyak dan gas lepas pantai, kapal dukungan memerlukan kemampuan untuk beroperasi dalam berbagai kondisi laut dan kecepatan.

Contoh: *Damen Offshore Carrier 8500*

- a. Panjang: 85 meter
- b. DWT: 4.500 ton
- c. Kecepatan: 13 knot



Gambar 3. 4 *Damen Offshore Carrier 8500* [68]

Desain *Round Bilge Semi-Displacement Hull* memberikan stabilitas yang baik untuk operasi *crane* dan kemampuan mempertahankan posisi (*station-keeping*) yang superior, sambil tetap mampu melakukan transit antar lokasi dengan efisien.

7. Kapal Penyelamat:

Kapal penyelamat memerlukan kemampuan untuk mencapai lokasi kejadian dengan cepat dan mempertahankan stabilitas dalam kondisi cuaca buruk.

Contoh: *Severn Class Lifeboat* (RNLI, UK)

- a. Panjang: 17 meter
- b. Kecepatan: 25 knot
- c. Jangkauan: 250 nautical mile

Meskipun lebih kecil, kapal ini menggunakan prinsip *Round Bilge Semi-Displacement Hull* untuk mencapai kecepatan tinggi sambil mempertahankan stabilitas yang sangat baik dalam kondisi laut yang ekstrem.



Gambar 3. 5 *Severn Class Lifeboat* (RNLI, UK) [69]

3.3 *Planing Hull*

Planing hull merupakan inovasi revolusioner dalam desain kapal yang memungkinkan pencapaian kecepatan tinggi di atas air. Berbeda dengan lambung *displacement* tradisional, *planing hull* dirancang untuk "mengangkat" sebagian besar badannya keluar dari air pada kecepatan tinggi, secara dramatis mengurangi hambatan

dan memungkinkan efisiensi yang lebih tinggi pada kecepatan operasi yang cepat.

3.3.1 Prinsip *Planning*

Prinsip dasar *planing* berasal dari fenomena hidrodinamika di mana sebuah benda yang bergerak cepat di atas permukaan air akan menghasilkan gaya angkat yang cukup untuk mengangkat sebagian besar badan benda tersebut keluar dari air. Proses ini dapat dijelaskan melalui beberapa tahap:

1. Gaya Angkat Hidrodinamis: Ketika sebuah permukaan miring bergerak cepat melalui air, aliran air di bawah permukaan tersebut dipercepat, menciptakan area bertekanan rendah di atas permukaan dan area bertekanan tinggi di bawahnya. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya angkat vertikal.
2. Pembentukan *Wake*: Saat kapal bergerak, ia menciptakan gelombang di belakangnya yang dikenal sebagai *wake*. Pada kecepatan *planing*, *wake* ini berubah bentuk, dengan air yang terbelah oleh lambung membentuk semacam "dinding" di kedua sisi kapal.
3. Trim Dinamis: Seiring meningkatnya kecepatan, gaya angkat yang dihasilkan menyebabkan bagian depan kapal terangkat. Sudut antara garis air dan keel kapal ini disebut *trim* dinamis, yang memainkan peran krusial dalam efisiensi *planing*.
4. Pengurangan *Wetted Surface*: Ketika kapal mencapai kecepatan *planing* penuh, sebagian besar lambungnya terangkat dari air, secara signifikan mengurangi luas permukaan basah (*wetted surface*). Hal ini drastis mengurangi hambatan gesekan.
5. Transisi Mode Operasi: Kapal *planing* mengalami tiga mode operasi utama: *displacement* (pada kecepatan rendah), *semi-planing* (kecepatan menengah), dan *planing* penuh (kecepatan tinggi). Transisi antara mode-mode ini ditandai dengan perubahan karakteristik hidrodinamis dan resistensi.

3.3.2 Desain *Hull Planning*

Desain *Planing Hull* memiliki beberapa karakteristik kunci yang membedakannya dari jenis lambung lainnya. Bagian bawah lambung

relatif datar, terutama di bagian belakang, untuk memfasilitasi pembentukan area bertekanan tinggi. Sudut antara bagian bawah lambung dan horizontal (*deadrise*) biasanya lebih kecil dibandingkan lambung *displacement*, namun cukup untuk memberikan performa yang baik dalam kondisi bergelombang.

Planing Hull sering memiliki *chine* yang tajam dan tegas, yang membantu dalam memisahkan aliran air dari lambung dan mengarahkan *spray*. Elemen tambahan seperti *spray rails* sering digunakan untuk mengontrol *spray* dan meningkatkan *lift*. *Transom* dirancang untuk menjadi "kering" pada kecepatan *planing*, di mana air terpisah dari lambung sebelum mencapai *transom*. *Transom* umumnya lebar untuk memaksimalkan *lift* dan stabilitas pada kecepatan tinggi.

Posisi pusat gravitasi sangat penting dalam desain *Planing Hull*, mempengaruhi *trim* dinamis dan stabilitas. Beberapa desain menggunakan "step" atau loncatan pada lambung untuk memodifikasi aliran air dan meningkatkan efisiensi. Bagian depan lambung sering memiliki bentuk V yang dalam untuk membelah gelombang dan mengurangi *slamming*. Sudut *deadrise* sering bervariasi dari *bow* ke *transom*, dengan sudut yang lebih besar di bagian depan.

Konstruksi *planing hull* sering menggunakan material ringan seperti komposit atau aluminium untuk mengurangi berat dan meningkatkan performa. Diperlukan penguatan khusus untuk menahan beban *impact* tinggi saat *planing*.

3.3.3 Dinamika *Planning*

Dinamika *planing hull* sangat kompleks dan bervariasi tergantung pada kecepatan operasi. Pada kecepatan rendah, *planing hull* beroperasi seperti lambung *displacement* tradisional, di mana hampir seluruh berat kapal ditopang oleh daya apung statis. Resistensi pada tahap ini didominasi oleh gesekan permukaan dan pembentukan gelombang.

Saat memasuki mode *pre-planing* atau *semi-planing* pada kecepatan menengah, *lift* dinamis mulai berperan signifikan, tetapi belum cukup untuk mengangkat sebagian besar lambung keluar dari

air. *trim* kapal mulai meningkat, dan resistensi mencapai puncaknya (sering disebut sebagai “*hump*” dalam kurva resistensi-kecepatan).

Pada mode *planing* penuh di kecepatan tinggi, sebagian besar berat kapal ditopang oleh *lift* hidrodinamis. Hanya sebagian kecil lambung yang tetap bersentuhan dengan air. *trim* mencapai maksimum pada awal fase *planing* dan kemudian sedikit menurun. Resistensi pada tahap ini didominasi oleh gesekan permukaan dan *spray drag*, sementara resistensi gelombang menjadi relatif kecil.

Planing hull dapat mengalami beberapa fenomena hidrodinamis khusus, seperti *porpoising* (osilasi *pitch* yang tidak terkendali pada kecepatan tinggi) dan *chine walking* (osilasi *roll* yang dapat terjadi pada kecepatan tinggi). Pembentukan *spray* juga dapat mempengaruhi visibilitas dan resistensi.

Stabilitas dinamis *planing hull* sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan bentuk lambung. Penggunaan *chine* dan *spray rails* membantu dalam meningkatkan stabilitas lateral. Dalam kondisi bergelombang, *planing hull* dapat mengalami accelerations yang tinggi. Oleh karena itu, desain *bow* dan distribusi berat sangat penting untuk performa *seakeeping* yang baik.

3.3.4 Contoh Kapal *Planning*

Planing hull digunakan dalam berbagai aplikasi di mana kecepatan tinggi menjadi prioritas. Kapal patroli cepat seperti CB90-class *fast assault craft* dari Swedia menggunakan desain *planing* ekstrem dengan kemampuan manuver tinggi, mencapai kecepatan maksimum hingga 45 knot. *Speedboat* rekreasi seperti Cigarette 42X menerapkan desain *stepped hull* untuk performa ultra-tinggi, mampu mencapai kecepatan lebih dari 120 mph.

Dalam aplikasi penyelamatan, RNLI *Shannon-class lifeboat* dari Inggris menggunakan desain *planing* yang dioptimalkan untuk operasi dalam cuaca ekstrem, dengan kecepatan maksimum 25 knot. Untuk transportasi penumpang, *Damen Fast Ferry 4212* mengadopsi desain semi-*planing* untuk efisiensi dan kapasitas penumpang yang tinggi, beroperasi pada kecepatan 25 knot.

Di dunia balap, F1 *Powerboat* merepresentasikan desain *planing* ekstrem dengan fokus pada kecepatan dan manuverabilitas maksimum, mampu mencapai kecepatan hingga 240 km/h.

3.4 Perbandingan Kinerja dan Aplikasi

Dalam industri perkapalan modern, pemilihan jenis lambung yang tepat merupakan faktor krusial yang mempengaruhi kinerja, efisiensi, dan kecocokan kapal dengan misi operasionalnya. Subbab ini akan membandingkan secara mendalam kinerja dan aplikasi dari tiga jenis lambung utama: lambung *displacement* konvensional, *Round Bilge Semi-Displacement Hull*, dan *Planing Hull*.

1. Lambung *Displacement* Konvensional

Lambung *displacement* konvensional telah menjadi tulang punggung industri perkapalan selama berabad-abad. Prinsip operasi utamanya didasarkan pada hukum Archimedes, di mana kapal memindahkan volume air yang setara dengan beratnya. Ketika kapal bergerak melalui air, ia terus memindahkan volume air yang sama, tidak peduli kecepatannya. Prinsip ini memberikan stabilitas yang luar biasa dan kemampuan membawa muatan berat, yang menjadi ciri khas lambung *displacement*.

Karakteristik kinerja lambung *displacement* sangat menonjol dalam hal stabilitas dan efisiensi pada kecepatan rendah hingga menengah. Stabilitas yang tinggi berasal dari bentuk lambung yang lebar dan dalam, yang memberikan momen penegak (*righting moment*) yang kuat. Efisiensi bahan bakar yang tinggi pada kecepatan rendah adalah hasil dari resistensi yang relatif rendah pada kecepatan ini. Kapasitas muatan yang besar dimungkinkan karena seluruh berat kapal ditopang oleh daya apung, memungkinkan desain dengan volume internal yang besar.

Dari sudut pandang hidrodinamika, lambung *displacement* menunjukkan karakteristik yang unik. Pada kecepatan rendah, kurva resistensi relatif datar, yang berarti peningkatan kecepatan hanya membutuhkan sedikit penambahan daya. Namun, ketika kapal mendekati kecepatan kritis (biasanya pada *Froude number* sekitar 0.4), resistensi meningkat tajam. Fenomena ini disebabkan oleh peningkatan drastis dalam pembentukan gelombang. Meskipun

demikian, pada kecepatan operasional normalnya, lambung *displacement* menawarkan efisiensi propulsi yang sangat baik, dengan rasio daya-ke-berat yang rendah.

Performa *seakeeping* lambung *displacement* juga patut dipuji, terutama untuk kapal-kapal besar. Massa dan momen inersia yang besar memberikan stabilitas yang baik dalam kondisi laut bergelombang, mengurangi gerakan *pitch* dan *roll*. Ini sangat menguntungkan untuk kenyamanan penumpang, keamanan muatan, dan kemampuan operasional dalam cuaca buruk. Bentuk lambung yang dalam dan lebar juga membantu dalam membelah gelombang, memberikan perjalanan yang lebih halus.

Aplikasi utama lambung *displacement* sangat luas dan mencakup berbagai jenis kapal besar. Kapal kargo dan tanker memanfaatkan kapasitas muatan besar dan efisiensi bahan bakar untuk transportasi barang jarak jauh. Kapal pesiar menggunakan stabilitas dan kenyamanan lambung *displacement* untuk memberikan pengalaman berlayar yang menyenangkan bagi penumpang. Kapal riset oseanografi membutuhkan stabilitas dan kemampuan membawa peralatan berat yang ditawarkan oleh lambung *displacement*. Bahkan kapal perang besar seperti kapal induk dan kapal perusak menggunakan lambung *displacement* untuk stabilitas *platform* dan kemampuan membawa muatan berat.

2. Round Bilge Semi-Displacement Hull

Round Bilge Semi-Displacement Hull merupakan inovasi desain yang menjembatani kesenjangan antara lambung *displacement* tradisional dan *planing hull*. Prinsip operasinya menggabungkan karakteristik terbaik dari kedua jenis lambung tersebut. Pada kecepatan rendah, lambung ini beroperasi seperti lambung *displacement*, mengandalkan daya apung untuk menopang berat kapal. Namun, ketika kecepatan meningkat, desain uniknya memungkinkan pembentukan *lift* hidrodinamis yang signifikan, mengurangi volume air yang dipindahkan dan konsekuensinya mengurangi resistensi.

Karakteristik kinerja *Round Bilge Semi-Displacement Hull* sangat menonjol dalam hal fleksibilitas operasional. Lambung ini dapat

beroperasi secara efisien pada berbagai kecepatan, dari kecepatan rendah untuk penghematan bahan bakar hingga kecepatan tinggi untuk transit cepat. Efisiensi yang baik pada berbagai kecepatan ini adalah hasil dari transisi halus antara mode *displacement* dan semi-*planing*. Kecepatan maksimum yang dapat dicapai juga lebih tinggi dibandingkan dengan lambung *displacement* konvensional, meskipun tidak setinggi *Planing Hull* murni.

Dari perspektif hidrodinamika, *Round Bilge Semi-Displacement Hull* menunjukkan karakteristik yang menarik. Pada kecepatan rendah (*Froude number* < 0.6), perilakunya mirip dengan lambung *displacement*. Namun, ketika kecepatan meningkat dan mencapai *Froude number* antara 0.6 dan 1.2, *lift* hidrodinamis mulai berperan signifikan. Bentuk lambung yang dioptimalkan memungkinkan pembentukan area bertekanan rendah di bawah lambung, menghasilkan *lift* dinamis. Ini mengurangi volume air yang dipindahkan, menurunkan *wetted surface area*, dan konsekuensinya mengurangi resistensi total. Hasilnya adalah kurva resistensi yang lebih landai dibandingkan dengan lambung *displacement* konvensional, memungkinkan pencapaian kecepatan yang lebih tinggi dengan daya yang sama.

Performa *seakeeping Round Bilge Semi-Displacement Hull* juga patut diperhitungkan. Karakteristik *seakeeping* yang baik dalam berbagai kondisi laut adalah hasil dari kombinasi antara stabilitas yang diwarisi dari desain *displacement* dan *lift* dinamis yang membantu mengurangi gerakan vertikal. Stabilitas dinamis lambung ini juga sangat baik, dengan bentuk lambung yang membantu meredam gerakan *rolling*. Penggunaan *chine* lunak dan *sprayrails* yang tepat membantu dalam mengontrol *spray*, meningkatkan kenyamanan dan visibilitas pada kecepatan tinggi.

Aplikasi utama *Round Bilge Semi-Displacement Hull* sangat beragam dan mencakup berbagai jenis kapal yang memerlukan fleksibilitas operasional. Kapal patroli pantai sering mengadopsi desain ini karena kemampuannya untuk beroperasi efisien pada kecepatan rendah untuk pengawasan dan kecepatan tinggi untuk pengejaran. *Yacht* mewah memanfaatkan kombinasi kenyamanan, efisiensi, dan kecepatan yang ditawarkan oleh desain ini. *Ferry* cepat jarak menengah menggunakan *Round Bilge Semi-Displacement Hull*

untuk menawarkan layanan yang cepat dan efisien, sementara tetap mempertahankan kenyamanan penumpang. Kapal penumpang berukuran sedang juga mendapat manfaat dari fleksibilitas dan efisiensi desain ini, terutama untuk rute yang memerlukan variasi kecepatan operasi.

3. *Planing Hull*

Planing hull merepresentasikan pendekatan radikal dalam desain kapal, dirancang khusus untuk mencapai kecepatan tinggi. Prinsip operasi utamanya adalah penggunaan *lift* hidrodinamis untuk mengangkat sebagian besar badan kapal keluar dari air pada kecepatan tinggi. Ketika kecepatan meningkat, bentuk lambung yang datar atau sedikit V di bagian belakang menciptakan area bertekanan tinggi, menghasilkan gaya angkat yang kuat. Pada kecepatan *planing* penuh, sebagian besar berat kapal ditopang oleh *lift* dinamis ini, bukan oleh daya apung statis seperti pada lambung *displacement*.

Karakteristik kinerja *planing hull* sangat mengesankan dalam hal kecepatan dan akselerasi. Kecepatan maksimum yang dapat dicapai jauh melampaui lambung *displacement* atau *semi-displacement*, dengan beberapa desain mampu mencapai kecepatan lebih dari 100 knot. Akselerasi *planing hull* juga sangat impresif, memungkinkan kapal untuk mencapai kecepatan tinggi dalam waktu singkat. Efisiensi pada kecepatan tinggi juga patut dicatat; ketika dalam mode *planing* penuh, resistensi total kapal dapat lebih rendah daripada ketika beroperasi pada kecepatan yang lebih rendah.

Hidrodinamika *planing hull* sangat berbeda dari jenis lambung lainnya. Pada kecepatan rendah, *planing hull* beroperasi dalam mode *displacement* dengan resistensi yang relatif tinggi. Namun, seiring meningkatnya kecepatan dan mencapai *Froude number* di atas 1.0, lambung mulai terangkat dari air. Pada titik ini, sebagian besar berat kapal ditopang oleh *lift* dinamis. Resistensi total menurun drastis karena pengurangan signifikan dalam *wetted surface area* dan resistensi gelombang. Kurva resistensi-kecepatan *planing hull* menunjukkan "*hump*" yang jelas, di mana resistensi meningkat tajam saat transisi dari mode *displacement* ke *planing*, kemudian menurun saat mencapai *planing* penuh.

Performa *seakeeping planing hull* memiliki karakteristik unik. Pada kecepatan tinggi dalam kondisi laut yang tenang, *planing hull* dapat memberikan perjalanan yang sangat halus karena sebagian besar lambung tidak bersentuhan dengan air. Namun, dalam kondisi bergelombang, *planing hull* dapat mengalami *accelerations* yang tinggi, yang dapat mempengaruhi kenyamanan dan keselamatan. Untuk mengatasi ini, desain modern menggunakan berbagai teknik seperti *stepped hulls* untuk mengurangi *wetted surface* area lebih lanjut, *ventilated chines* untuk meningkatkan stabilitas lateral, dan sistem kontrol *trim* aktif untuk mengoptimalkan sudut serangan lambung terhadap permukaan air.

Aplikasi utama *planing hull* meliputi berbagai jenis kapal di mana kecepatan tinggi adalah prioritas utama. *Speedboat* rekreasi menggunakan desain ini untuk memberikan pengalaman berkecepatan tinggi yang menegangkan. Kapal patroli cepat memanfaatkan kecepatan dan manuverabilitas *planing hull* untuk operasi penegakan hukum dan pengejaran. Kapal penyelamat menggunakan *planing hull* untuk mencapai lokasi kejadian dengan cepat, yang sangat kritis dalam situasi penyelamatan. Dalam dunia olahraga, perahu balap seperti Formula 1 *Powerboat* menunjukkan batas ekstrem dari desain *planing hull*, mencapai kecepatan luar biasa dan manuverabilitas yang tajam.

4. Perbandingan Efisiensi Energi

Efisiensi energi adalah faktor kunci dalam pemilihan jenis lambung, terutama mengingat fokus global pada pengurangan emisi dan penghematan bahan bakar. Setiap jenis lambung memiliki karakteristik efisiensi yang berbeda tergantung pada kecepatan operasinya.

a. Lambung *Displacement*

Lambung *displacement* konvensional menunjukkan efisiensi tertinggi pada *Froude number* kurang dari 0.4. Pada kecepatan ini, resistensi didominasi oleh gesekan permukaan dan pembentukan gelombang minimal. Kapal besar seperti tanker dan kapal kargo kontainer memanfaatkan efisiensi ini untuk transportasi muatan dalam jumlah besar dengan konsumsi bahan bakar per ton-mile yang

sangat rendah. Namun, efisiensi menurun tajam ketika mencoba beroperasi di atas *Froude number* ini karena peningkatan drastis dalam resistensi gelombang.

b. *Round Bilge Semi-Displacement Hull*

Round Bilge Semi-Displacement Hull menawarkan efisiensi yang baik pada rentang *Froude number* yang lebih luas, biasanya antara 0.4 hingga 1.2. Ini memungkinkan kapal untuk beroperasi secara ekonomis pada berbagai kecepatan. Pada kecepatan rendah, efisiensinya mendekati lambung *displacement*, sementara pada kecepatan yang lebih tinggi, *lift* hidrodinamis membantu mengurangi resistensi. Fleksibilitas ini sangat berharga untuk kapal yang perlu beroperasi pada berbagai kecepatan, seperti kapal patroli atau *ferry* cepat.

c. *Planing Hull*

Planing Hull mencapai efisiensi tertingginya pada *Froude number* di atas 1.0, ketika kapal berada dalam mode *planing* penuh. Pada kecepatan ini, sebagian besar lambung terangkat dari air, secara drastis mengurangi *wetted surface area* dan resistensi gelombang. Meskipun konsumsi bahan bakar absolutnya mungkin tinggi karena kecepatan tinggi, efisiensi dalam hal energi per jarak tempuh dapat sangat baik. Namun, perlu dicatat bahwa *Planing Hull* umumnya kurang efisien pada kecepatan rendah dibandingkan dengan jenis lambung lainnya.

5. Inovasi dan Pengembangan

Inovasi dalam desain kapal terus mendorong pengembangan dan penyempurnaan dari ketiga jenis lambung ini, memperluas kapabilitas dan meningkatkan efisiensi mereka.

Untuk lambung *displacement* konvensional, salah satu inovasi paling signifikan adalah penggunaan *bulbous bow*. Perangkat ini, yang tampak seperti "hidung" di bawah garis air di bagian depan kapal, bekerja dengan memodifikasi aliran air di sekitar lambung. *Bulbous bow* menciptakan sistem gelombang yang berinterferensi dengan sistem gelombang utama kapal, mengurangi resistensi gelombang total. Ini dapat menghasilkan penghematan bahan bakar

yang signifikan, terutama untuk kapal-kapal besar yang beroperasi pada kecepatan konstan untuk jangka waktu yang lama. Inovasi lain dalam desain lambung *displacement* meliputi optimasi bentuk lambung menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yang memungkinkan analisis dan penyempurnaan aliran air di sekitar lambung secara detail. Penggunaan material komposit ringan dalam konstruksi juga mulai diterapkan pada kapal-kapal yang lebih kecil, mengurangi berat total dan meningkatkan efisiensi.

Untuk *Round Bilge Semi-Displacement Hull*, optimalisasi *transom* stern telah menjadi area fokus pengembangan. *Transom* yang didesain dengan tepat dapat membantu dalam "melepaskan" aliran air dari lambung dengan bersih, mengurangi resistensi dan meningkatkan efisiensi propulsi. Beberapa desain juga mengintegrasikan fitur seperti tunnel sterns, yang membantu mengarahkan aliran air ke *propeller* dengan lebih efisien. Pengembangan lain dalam *Round Bilge Semi-Displacement Hull* melibatkan penggunaan *chine* dan *spray rails* yang lebih canggih. Ini tidak hanya membantu dalam mengontrol *spray* untuk meningkatkan kenyamanan, tetapi juga berkontribusi pada pembentukan *lift* hidrodinamis yang lebih efisien. Beberapa desainer juga bereksperimen dengan variasi longitudinal dari bentuk lambung, mengoptimalkan distribusi tekanan sepanjang lambung untuk berbagai kecepatan operasi.

Dalam ranah *Planing Hull*, inovasi telah fokus pada peningkatan efisiensi dan performa dalam kondisi bergelombang. Penggunaan *stepped hulls* telah menjadi semakin umum, terutama untuk kapal-kapal berkecepatan sangat tinggi. Step pada lambung menciptakan area bertekanan rendah yang membantu "menghisap" udara di bawah lambung, lebih jauh mengurangi *wetted surface* area dan resistensi. Ini dapat meningkatkan kecepatan maksimum dan efisiensi bahan bakar, meskipun desainnya lebih kompleks dan dapat mempengaruhi performa pada kecepatan rendah. Air entrapment tunnels adalah inovasi lain dalam desain *Planing Hull*. Struktur ini, yang berupa saluran longitudinal di bagian bawah lambung, membantu menangkap dan mengarahkan aliran udara di bawah lambung. Ini dapat meningkatkan *lift*, mengurangi *drag*, dan

memperbaiki karakteristik *spray*. Beberapa desain menggabungkan *air entrapment tunnels* dengan *stepped hulls* untuk hasil yang lebih optimal.

Sistem kontrol *trim* aktif juga menjadi semakin canggih dalam desain *Planing Hull* modern. Sistem ini menggunakan sensor dan aktuator untuk secara otomatis menyesuaikan *trim* kapal berdasarkan kecepatan dan kondisi laut. Ini dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi, kenyamanan, dan keamanan, terutama dalam kondisi laut yang berubah-ubah. Perkembangan dalam material komposit juga membawa inovasi besar dalam konstruksi *Planing Hull*. Penggunaan serat karbon dan material komposit canggih lainnya memungkinkan pembuatan lambung yang lebih ringan dan kuat. Ini tidak hanya meningkatkan rasio daya-ke-berat, tetapi juga memungkinkan desainer untuk menciptakan bentuk lambung yang lebih kompleks dan efisien yang sulit dicapai dengan material tradisional.

Selain inovasi spesifik untuk masing-masing jenis lambung, ada juga tren pengembangan yang melintasi batas-batas tradisional antara ketiga jenis lambung ini. Misalnya, konsep "*hybrid hull*" yang menggabungkan elemen dari lambung *displacement*, *semi-displacement*, dan *planing* dalam satu desain telah mulai muncul. Desain-desain ini bertujuan untuk mengoptimalkan performa kapal dalam berbagai kondisi operasi, dari kecepatan rendah hingga tinggi.

Penggunaan teknologi *foil* juga mulai diintegrasikan ke dalam desain lambung konvensional. *Hydrofoil*, yang dapat diretraksi pada kecepatan rendah dan dikerahkan untuk mengangkat lambung dari air pada kecepatan tinggi, dapat secara drastis mengurangi resistensi dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. Meskipun teknologi ini telah ada selama beberapa dekade, perkembangan terbaru dalam material dan sistem kontrol telah membuat implementasinya lebih praktis dan efektif.

Inovasi dalam sistem propulsi juga mempengaruhi desain lambung. Misalnya, pengembangan sistem propulsi *hybrid* dan listrik membuka kemungkinan untuk konfigurasi lambung baru yang mengoptimalkan distribusi berat dan ruang. Integrasi sistem propulsi

pod yang dapat diputar 360 derajat juga mempengaruhi desain *afterbody* lambung, memungkinkan optimalisasi aliran air yang lebih baik di sekitar propulsor. Kemajuan dalam teknologi simulasi dan analisis juga memainkan peran besar dalam inovasi desain lambung. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang semakin canggih memungkinkan desainer untuk menguji dan mengoptimalkan desain lambung secara virtual sebelum membangun *prototipe* fisik. Ini tidak hanya mempercepat proses desain tetapi juga memungkinkan eksplorasi konsep-konsep inovatif yang mungkin terlalu berisiko atau mahal untuk diuji secara langsung.

3.5 Inovasi dalam Desain *Monohull* Nonkonvensional

Inovasi dalam desain *monohull* nonkonvensional terus mendorong batas-batas teknologi perkapalan, menghasilkan kapal-kapal yang lebih efisien, berkinerja tinggi, dan ramah lingkungan. Perkembangan ini didorong oleh kebutuhan akan efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi, pengurangan emisi, peningkatan kecepatan, dan kemampuan operasional yang lebih baik dalam berbagai kondisi laut. Area-area utama inovasi meliputi optimalisasi bentuk lambung, penggunaan material baru, integrasi sistem propulsi canggih, penerapan teknologi kontrol aktif, dan pengembangan konsep *hybrid* yang menggabungkan berbagai teknologi inovatif.

1. Optimalisasi Bentuk Lambung:

Salah satu inovasi paling signifikan dalam desain *monohull* nonkonvensional adalah pengembangan lambung *Axiom*. Konsep ini, yang dikembangkan oleh peneliti di Universitas Southampton, menggabungkan fitur-fitur terbaik dari lambung *displacement* dan *planing*. Lambung *Axiom* memiliki bagian depan yang mirip dengan lambung *displacement* untuk performa yang baik di laut bergelombang, sementara bagian belakangnya memiliki karakteristik *planing* untuk efisiensi pada kecepatan tinggi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa lambung *Axiom* dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 30% dibandingkan dengan desain konvensional, sambil mempertahankan karakteristik *seakeeping* yang sangat baik.

Penggunaan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah memungkinkan optimalisasi bentuk lambung yang lebih canggih. Desainer sekarang dapat mensimulasikan dan menganalisis aliran air di sekitar lambung dengan tingkat detail yang belum pernah terjadi sebelumnya. Ini telah menghasilkan bentuk lambung yang sangat efisien seperti LEADGE-bow (*Low Resistance and High Performance Ship with Economical and Advanced Design for Greenhouse Gas Emission*). Desain ini menggabungkan bow berbentuk kapak dengan garis lambung yang dioptimalkan untuk mengurangi resistensi gelombang dan meningkatkan efisiensi propulsi.

Inovasi dalam desain bow juga mencakup pengembangan "wavepiercing bow" dan "X-bow". Wavepiercing bow dirancang untuk membelah gelombang daripada naik di atasnya, mengurangi *pitching* dan *slamming*, serta meningkatkan kenyamanan dan efisiensi. X-bow, yang dikembangkan oleh Ulstein Design, memiliki bentuk yang *inverted* dan *flare* yang lebih sedikit, yang menghasilkan penetrasi gelombang yang lebih halus dan mengurangi akselerasi vertikal. Kapal dengan X-bow telah menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 8% dalam kondisi laut yang keras [70].

2. Material Inovatif:

Penggunaan material canggih telah membuka peluang baru dalam desain *monohull* nonkonvensional. Komposit serat karbon, misalnya, memungkinkan pembuatan lambung yang lebih ringan dan kuat. Ini tidak hanya meningkatkan rasio kekuatan-ke-berat kapal, tetapi juga memungkinkan desainer untuk menciptakan bentuk lambung yang lebih kompleks dan efisien yang sulit dicapai dengan material tradisional. Kapal patroli kelas *Skjold* dari Angkatan Laut Norwegia adalah contoh sukses penggunaan komposit serat karbon dalam konstruksi lambung, menghasilkan kapal yang sangat ringan dan cepat dengan karakteristik *stealth* yang unggul. Selain itu, penggunaan material *nano-engineered* seperti graphene dalam cat lambung dapat mengurangi gesekan dan pertumbuhan organisme laut.

3. Sistem Propulsi Canggih:

Integrasi sistem propulsi canggih juga telah mendorong inovasi dalam desain *monohull* nonkonvensional. Sistem propulsi pod yang dapat diputar 360 derajat, seperti *Azipod* dari ABB, telah mengubah cara desainer memikirkan aliran air di sekitar lambung dan *propeller*. Ini telah menghasilkan desain *afterbody* yang lebih efisien dan manuverabilitas yang lebih baik. Kapal dengan sistem *Azipod* telah menunjukkan peningkatan efisiensi bahan bakar hingga 20% dibandingkan dengan sistem propulsi konvensional.

Pengembangan sistem propulsi *hybrid* dan listrik juga telah membuka kemungkinan untuk konfigurasi lambung baru. Misalnya, kapal feri listrik "*Future of the Fjords*" yang beroperasi di Norwegia menggunakan baterai *lithium-ion* dan motor listrik, yang memungkinkan desain lambung yang lebih ramping dan efisien karena tidak adanya mesin diesel besar.

4. Teknologi Foil:

Integrasi teknologi *foil* ke dalam desain *monohull* nonkonvensional telah menghasilkan "*foil-assisted monohulls*". Sistem ini menggunakan *foil* yang dapat diretraksi untuk mengangkat sebagian lambung dari air pada kecepatan tinggi, secara drastis mengurangi resistensi dan meningkatkan efisiensi bahan bakar. *Ferry Foil Halcyon* yang beroperasi di Selandia Baru adalah contoh sukses dari teknologi ini, menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 40% dibandingkan dengan desain konvensional.

Perkembangan terbaru dalam teknologi *foil* meliputi "*dynamic foil systems*" yang dapat menyesuaikan sudut dan posisi *foil* secara *real-time* berdasarkan kondisi operasi. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga stabilitas dan kenyamanan dalam berbagai kondisi laut.

5. Sistem Kontrol Aktif:

Penerapan sistem kontrol aktif telah membawa inovasi signifikan dalam desain *monohull* nonkonvensional. Sistem *trim* otomatis, misalnya, menggunakan sensor dan aktuator untuk secara terus-menerus menyesuaikan posisi kapal relatif terhadap permukaan air.

Ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dengan memastikan sudut *trim* optimal pada berbagai kecepatan, tetapi juga meningkatkan kenyamanan dan keamanan dalam kondisi laut yang berubah-ubah.

Konsep yang lebih maju seperti "*morphing hulls*" atau lambung yang dapat berubah bentuk juga sedang dieksplorasi. Ide ini melibatkan penggunaan material cerdas dan aktuator untuk mengubah bentuk lambung secara dinamis sesuai dengan kondisi operasi. Meskipun masih dalam tahap konseptual, teknologi ini memiliki potensi untuk menciptakan kapal yang dapat mengoptimalkan kinerjanya secara *real-time* untuk berbagai kondisi kecepatan dan laut.

6. Smart *Hulls* dan IoT:

Perkembangan dalam teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) telah memungkinkan penciptaan "*smart hulls*". Konsep ini melibatkan integrasi sensor di seluruh lambung untuk memantau tekanan, suhu, dan kondisi struktural secara *real-time*. Data ini dapat digunakan untuk optimalisasi kinerja, pemeliharaan prediktif, dan bahkan untuk memberi informasi pada desain kapal di masa depan. Sistem *smart hull* yang lebih canggih juga dapat mengintegrasikan data cuaca dan kondisi laut *real-time* untuk mengoptimalkan rute dan kecepatan kapal, lebih lanjut meningkatkan efisiensi dan keselamatan operasi.

3.6 Tantangan dan Solusi dalam Operasi *Monohull Nonkonvensional*

Operasi *monohull* nonkonvensional menghadirkan serangkaian tantangan unik yang memerlukan solusi inovatif. Berikut adalah tantangan-tantangan utama dan solusi dalam operasi *monohull*:

1. Stabilitas dan Kontrol

- a. Tantangan: Salah satu masalah utama dalam operasi *monohull* nonkonvensional, terutama pada desain *planing* dan semi-*planing*, adalah stabilitas pada kecepatan tinggi. Fenomena *porpoising*, yang merupakan osilasi *pitch* yang tidak terkendali, dapat terjadi ketika pusat tekanan hidrodinamis bergeser ke belakang titik berat kapal pada kecepatan tinggi. Hal ini tidak

hanya mengurangi kenyamanan tetapi juga dapat membahayakan keselamatan kapal.

- b. Solusi: Untuk mengatasi masalah ini, sistem kontrol *trim* aktif telah dikembangkan. Sistem ini menggunakan kombinasi sensor, algoritma prediktif, dan aktuator cepat untuk secara otomatis menyesuaikan *trim* kapal. Penelitian oleh Savitsky dan Morabito [71] menunjukkan bahwa sistem kontrol *trim* aktif dapat mengurangi amplitudo *porpoising* hingga 50% dan meningkatkan rentang kecepatan operasi yang stabil.

Selain itu, desain *stepped hull* telah terbukti efektif dalam mengurangi tendensi *porpoising*. Langkah pada lambung menciptakan area ventilasi yang membantu mempertahankan pusat tekanan hidrodinamis lebih dekat ke pusat gravitasi kapal.

2. Performa Seakeeping

- a. Tantangan: *Monohull* nonkonvensional, terutama yang dirancang untuk kecepatan tinggi, dapat mengalami gerakan vertikal yang ekstrem dalam kondisi laut yang bergelombang. Ini dapat menyebabkan ketidaknyamanan penumpang, kerusakan kargo, dan potensi kerusakan struktural.
- b. Solusi: Inovasi dalam desain *bow* telah menghasilkan solusi seperti *bow wavepiercing*. Konsep ini memungkinkan kapal untuk membelah gelombang daripada naik di atasnya, secara signifikan mengurangi percepatan vertikal.

Sistem stabilisasi aktif, seperti *fin stabilizers* dan *gyroscopic stabilizers*, juga telah dikembangkan untuk meningkatkan performa *seakeeping*. Sistem *gyroscopic*, misalnya, dapat mengurangi *rolling* hingga 80% dalam kondisi tertentu. Kombinasi sistem stabilisasi aktif dengan desain lambung yang dioptimalkan telah menghasilkan peningkatan dramatis dalam kenyamanan dan keamanan operasional.

3. Efisiensi Bahan Bakar

- a. Tantangan: Meskipun desain *monohull* nonkonvensional umumnya lebih efisien pada kecepatan tinggi dibandingkan dengan desain konvensional, konsumsi bahan bakar tetap

menjadi tantangan signifikan, terutama dari perspektif ekonomi dan lingkungan.

- b. Solusi: Optimalisasi bentuk lambung menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah menghasilkan desain yang jauh lebih efisien. Teknik seperti optimasi multi-objektif memungkinkan desainer untuk menyeimbangkan berbagai parameter kinerja secara simultan.

Penggunaan sistem propulsi *hybrid* dan listrik juga menunjukkan potensi besar dalam mengurangi konsumsi bahan bakar. Kapal *ferry* cepat "*Faster*" di Norwegia, misalnya, menggunakan sistem propulsi *hybrid* yang menggabungkan mesin diesel dengan motor listrik. Sistem ini memungkinkan operasi yang lebih efisien pada berbagai kecepatan, dengan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 30% dibandingkan dengan sistem propulsi konvensional.

4. Integritas Struktural

- a. Tantangan: Beban dinamis yang tinggi pada kecepatan tinggi dan dalam kondisi laut yang bergelombang dapat menyebabkan kelelahan material dan potensi kegagalan struktural pada *monohull* nonkonvensional.
- b. Solusi: Penggunaan material komposit canggih seperti serat karbon telah menjadi semakin umum dalam konstruksi *monohull* nonkonvensional. Material ini tidak hanya lebih ringan tetapi juga memiliki kekuatan dan ketahanan terhadap kelelahan yang lebih baik dibandingkan dengan baja konvensional.

Teknologi pemantauan struktural *real-time*, seperti sensor serat optik yang tertanam dalam struktur lambung, telah dikembangkan untuk memungkinkan deteksi dini potensi masalah struktural. Sistem ini dapat mendeteksi perubahan kecil dalam integritas struktural, memungkinkan pemeliharaan prediktif dan mencegah kegagalan katastrofik.

5. Manajemen Spray

- a. Tantangan: Pada kecepatan tinggi, *monohull* nonkonvensional dapat menghasilkan *spray* yang signifikan, yang mengurangi visibilitas dan meningkatkan resistensi aerodinamis.

- b. Solusi: Desain *chine* dan *spray rails* yang cermat telah terbukti efektif dalam mengendalikan *spray*. Teknik CFD modern memungkinkan optimasi desain ini untuk berbagai kondisi operasi. Beberapa desain terbaru menggunakan teknologi "*air curtain*" yang menciptakan lapisan udara di sekitar lambung untuk mengurangi *spray* dan meningkatkan efisiensi.

6. Tantangan Ekonomi dan Regulasi

- a. Tantangan: Biaya awal yang lebih tinggi untuk konstruksi *monohull* nonkonvensional dan tantangan dalam sertifikasi dapat menjadi hambatan untuk adopsi yang lebih luas.
- b. Solusi: Analisis siklus hidup yang komprehensif telah dikembangkan untuk menunjukkan nilai jangka panjang dari investasi dalam teknologi canggih ini. Metode ini mempertimbangkan tidak hanya biaya awal tetapi juga efisiensi operasional, biaya pemeliharaan, dan nilai sisa kapal.

Untuk mengatasi tantangan regulasi, beberapa badan klasifikasi telah mulai mengembangkan pedoman khusus untuk kapal-kapal berkecepatan tinggi dan desain nonkonvensional. DNV GL, misalnya, telah merilis pedoman untuk sertifikasi kapal berkecepatan tinggi yang mencakup berbagai aspek desain dan operasi *monohull* nonkonvensional.

3.7 Soal Latihan

1. Jelaskan perbedaan utama antara *Round Bilge Semi-Displacement Hull* dengan lambung *displacement* konvensional dan lambung *planing* murni dalam hal karakteristik desain dan performa!
2. Bagaimana bentuk *bilge* pada *Round Bilge Semi-Displacement Hull* mempengaruhi performa hidrodinamika kapal?
3. Uraikan proses transisi mode operasi pada *Round Bilge Semi-Displacement Hull* dari kecepatan rendah ke kecepatan tinggi dan implikasinya terhadap efisiensi kapal!
4. Jelaskan prinsip dasar *planing* dan bagaimana hal ini memungkinkan kapal mencapai kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lambung *displacement* tradisional!

5. Analisis tantangan utama dalam desain *Planing Hull* untuk operasi dalam kondisi laut yang bergelombang dan diskusikan solusi potensial untuk mengatasi tantangan-tantangan ini!
6. Analisis bagaimana pemilihan jenis lambung mempengaruhi efisiensi energi dan konsumsi bahan bakar kapal pada berbagai misi operasional!
7. Jelaskan mengapa *Round Bilge Semi-Displacement Hull* dianggap sebagai kompromi yang efektif antara lambung *displacement* dan *Planing Hull*!
8. Jelaskan konsep *Axiom Hull* dan bagaimana desain ini menggabungkan karakteristik lambung *displacement* dan *planing*. Apa keuntungan utama dari desain ini?
9. Jelaskan konsep "*foil-assisted monohulls*" dan bagaimana teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi kapal!
10. Evaluasi tantangan ekonomi dan regulasi dalam adopsi *monohull* nonkonvensional dan usulkan strategi untuk mengatasi tantangan-tantangan ini!

3.8 Kesimpulan

1. *Round Bilge Semi-Displacement Hull* merupakan inovasi penting dalam desain kapal yang menawarkan keseimbangan unik antara efisiensi, performa, dan fleksibilitas operasional. Dengan karakteristik desain yang menggabungkan elemen terbaik dari lambung *displacement* dan *planing*, jenis lambung ini mampu beroperasi secara efektif pada berbagai kecepatan dan kondisi laut. Performa hidrodinamiknya yang superior, ditandai dengan transisi halus antara mode *displacement* dan *semi-planing*, memungkinkan kapal untuk mencapai kecepatan tinggi sambil tetap mempertahankan efisiensi bahan bakar dan kenyamanan yang baik. Aplikasi luas dari desain ini dalam berbagai jenis kapal menunjukkan fleksibilitas dan keunggulannya dalam memenuhi beragam kebutuhan industri maritim. Dengan perkembangan teknologi dan penelitian lebih lanjut, *Round Bilge Semi-Displacement Hull* memiliki potensi besar untuk terus membentuk masa depan desain kapal, mendorong inovasi dalam efisiensi, kenyamanan, dan kinerja maritim.
2. *Planing Hull* merepresentasikan puncak desain kapal cepat, memungkinkan pencapaian kecepatan yang jauh melampaui

kapabilitas lambung konvensional. Prinsip hidrodinamis yang mendasarinya, dikombinasikan dengan karakteristik desain yang unik, memungkinkan *Planing Hull* untuk "mengangkat" sebagian besar badannya keluar dari air, secara drastis mengurangi hambatan. Meskipun memiliki keterbatasan dalam hal efisiensi pada kecepatan rendah dan performa dalam kondisi laut yang sangat bergelombang, *Planing Hull* tetap menjadi pilihan utama untuk aplikasi yang memerlukan kecepatan tinggi. Dengan perkembangan teknologi dalam analisis CFD, material komposit, dan sistem kontrol aktif, dapat diharapkan bahwa desain *Planing Hull* akan terus berkembang, memperluas kemampuan dan aplikasinya di masa depan.

3. Pemilihan jenis lambung yang optimal memerlukan analisis mendalam terhadap kebutuhan operasional, kondisi lingkungan, dan pertimbangan ekonomis. Lambung *displacement* konvensional tetap menjadi pilihan utama untuk kapal-kapal besar dan operasi jarak jauh yang memprioritaskan efisiensi dan kapasitas muatan. *Round Bilge Semi-Displacement Hull* menawarkan fleksibilitas yang tinggi dan efisiensi yang baik pada berbagai kecepatan, ideal untuk aplikasi yang memerlukan versatilitas. *Planing Hull* unggul dalam situasi yang membutuhkan kecepatan tinggi dan manuverabilitas. Pemahaman mendalam tentang karakteristik kinerja masing-masing jenis lambung dan aplikasi yang sesuai sangat penting untuk memastikan pemilihan desain yang optimal dalam setiap proyek perkapalan.
4. Inovasi dalam desain *monohull* nonkonvensional terus mendorong evolusi teknologi perkapalan, menghasilkan kapal-kapal yang lebih efisien, berkinerja tinggi, dan ramah lingkungan. Dari optimalisasi bentuk lambung menggunakan CFD hingga penggunaan material canggih dan integrasi sistem cerdas, inovasi-inovasi ini tidak hanya meningkatkan kinerja dan efisiensi kapal, tetapi juga membuka kemungkinan baru dalam hal kapabilitas operasional dan keberlanjutan lingkungan. Dengan terus berkembangnya teknologi dan pemahaman kita tentang hidrodinamika kapal, dapat diharapkan bahwa desain *monohull* nonkonvensional akan terus berkembang, mendorong batas-batas apa yang mungkin dalam industri maritim dan berkontribusi pada transportasi laut yang lebih berkelanjutan di masa depan.

5. Meskipun operasi *monohull* nonkonvensional menghadapi berbagai tantangan kompleks, perkembangan teknologi dan inovasi desain terus menghasilkan solusi yang efektif. Dari sistem kontrol canggih dan material komposit hingga optimasi CFD dan sistem propulsi alternatif, solusi-solusi ini tidak hanya mengatasi tantangan operasional tetapi juga membuka peluang baru untuk peningkatan kinerja dan efisiensi. Dengan terus berkembangnya pemahaman kita tentang hidrodinamika kapal dan teknologi terkait, dapat diharapkan bahwa tantangan-tantangan ini akan semakin dapat diatasi, membuka jalan bagi adopsi yang lebih luas dari desain *monohull* nonkonvensional di berbagai aplikasi maritim.

BAB IV

KAPAL *MULTIHULL*

4.1 Pendahuluan

Kapal *multihull* telah menjadi salah satu inovasi paling signifikan dalam dunia perkapalan modern. Berbeda dengan kapal *monohull* konvensional, kapal *multihull* memiliki dua atau lebih lambung yang terhubung, memberikan keunggulan unik dalam hal stabilitas, efisiensi, dan performa di berbagai kondisi laut. Bab ini akan mengeksplorasi secara mendalam dua jenis utama kapal *multihull*: *catamaran* dan *Small Waterplane Area Twin Hull (SWATH)*, serta membahas konfigurasi *multihull* lainnya seperti *trimaran*.

Catamaran, dengan desainnya yang terdiri dari dua lambung paralel, telah lama menarik perhatian para insinyur dan operator kapal karena kombinasi unik antara stabilitas yang superior dan efisiensi bahan bakar yang tinggi. Desain ini memungkinkan *catamaran* untuk menawarkan area dek yang lebih luas dibandingkan dengan kapal *monohull* dengan ukuran yang sebanding, sambil tetap mempertahankan *draft* yang relatif dangkal. Karakteristik ini membuat *catamaran* menjadi pilihan populer untuk berbagai aplikasi, mulai dari feri penumpang hingga kapal penelitian oseanografi.

Di sisi lain, kapal *SWATH* mewakili pendekatan yang lebih radikal terhadap desain *multihull*. Dengan menempatkan sebagian besar volume lambungnya di bawah permukaan air dan menghubungkannya ke struktur atas melalui *strut* yang ramping, *SWATH* mampu mengurangi secara dramatis efek gelombang permukaan. Hasilnya adalah *platform* yang sangat stabil, bahkan dalam kondisi laut yang sangat bergelombang. Meskipun kompleksitas desainnya lebih tinggi dibandingkan *catamaran* konvensional, *SWATH* menawarkan keunggulan yang signifikan dalam operasi di laut terbuka, menjadikannya pilihan menarik untuk aplikasi militer dan penelitian laut dalam.

Dalam bab ini, kita akan mendalami prinsip-prinsip desain yang mendasari kedua jenis kapal ini, mengeksplorasi konfigurasi lambung yang berbeda, dan menganalisis karakteristik hidrodinamika yang

unik dari masing-masing. Kita juga akan membahas aspek-aspek penting seperti stabilitas, *seakeeping*, dan performa di laut bergelombang, yang seringkali menjadi faktor kunci dalam pemilihan jenis kapal untuk aplikasi tertentu.

Selain itu, bab ini akan menyajikan analisis komparatif antara *catamaran* dan SWATH, menyoroti kekuatan dan kelemahan relatif dari masing-masing desain. Pembahasan ini akan diperluas untuk mencakup konfigurasi *multihull* lainnya, termasuk *trimaran*, yang menawarkan kompromi menarik antara stabilitas, kecepatan, dan efisiensi.

Akhirnya, kita akan membahas aspek-aspek teknis yang kritis dalam desain dan operasi kapal *multihull*, termasuk sistem propulsi yang dioptimalkan untuk konfigurasi ini, serta tantangan unik dalam manajemen stabilitas dan *trim*. Pemahaman mendalam tentang topik-topik ini sangat penting bagi insinyur perkapalan, operator, dan pembuat kebijakan yang berusaha memanfaatkan potensi penuh dari teknologi kapal *multihull* dalam menghadapi tantangan maritim abad ke-21.

Melalui eksplorasi komprehensif ini, diharapkan pembaca akan memperoleh pemahaman yang kuat tentang prinsip-prinsip dasar, keunggulan, dan aplikasi praktis dari kapal *multihull*, serta wawasan tentang peran penting mereka dalam membentuk masa depan transportasi laut dan eksplorasi kelautan.

4.2 Catamaran

Catamaran merupakan salah satu jenis kapal *multihull* yang paling populer dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi maritim. Desain uniknya, yang terdiri dari dua lambung paralel yang dihubungkan oleh struktur penghubung, memberikan sejumlah keunggulan signifikan dibandingkan dengan kapal *monohull* konvensional. Pada bagian ini, kita akan mengeksplorasi secara mendalam berbagai aspek dari *catamaran*, mulai dari prinsip desain hingga aplikasi praktisnya.

4.2.1 Prinsip Desain *Catamaran*

Desain *catamaran* didasarkan pada prinsip hidrodinamika yang memanfaatkan interaksi antara dua lambung. Salah satu aspek kunci adalah fenomena interferensi gelombang. Ketika bergerak, setiap lambung *catamaran* menghasilkan sistem gelombang sendiri. Interaksi antara kedua sistem gelombang ini dapat dioptimalkan untuk mengurangi resistensi total kapal.

Optimalisasi jarak antar lambung (*hull separation*) menjadi faktor kritis dalam desain *catamaran*. Jarak yang terlalu dekat dapat menyebabkan interferensi negatif, meningkatkan resistensi, sementara jarak yang terlalu jauh menghilangkan manfaat interferensi positif dan meningkatkan berat struktural.

Aspek penting lainnya adalah desain *bridging structure* atau struktur penghubung antar lambung. Struktur ini harus cukup kuat untuk menahan beban yang dihasilkan oleh gerakan diferensial antara dua lambung, namun tetap ringan untuk mempertahankan efisiensi keseluruhan. Penggunaan material komposit dan teknik konstruksi canggih telah memungkinkan desain struktur penghubung yang lebih optimal dalam beberapa tahun terakhir.

4.2.2 Konfigurasi *Hull Catamaran*

Konfigurasi lambung *catamaran* telah berkembang jauh melampaui desain simetris sederhana. Inovasi dalam bentuk lambung telah menghasilkan berbagai konfigurasi yang dioptimalkan untuk aplikasi spesifik:

1. Simetris: Meskipun sederhana, desain simetris tetap populer karena keseimbangannya dan kemudahan konstruksi. Penelitian terbaru fokus pada optimalisasi bentuk lambung untuk mengurangi resistensi gelombang dan meningkatkan efisiensi propulsi.
2. Asimetris: Konfigurasi ini, di mana lambung dalam dan luar memiliki bentuk berbeda, dapat memberikan keuntungan signifikan dalam hal stabilitas dan manuverabilitas.
3. *Wavepiercing*: Desain ini melibatkan lambung yang sangat ramping dan tajam di bagian depan, memungkinkan kapal untuk

"membelah" gelombang daripada naik di atasnya. Ini sangat efektif dalam mengurangi perlambatan di laut bergelombang dan meningkatkan *seakeeping*. Kapal-kapal seperti INCAT di Tasmania telah mendemonstrasikan keunggulan desain ini dalam operasi komersial.

4. *Hydrofoil-assisted*: Integrasi *hydrofoil* dengan desain *catamaran* telah menghasilkan kapal dengan efisiensi luar biasa pada kecepatan tinggi. Sistem ini mengangkat sebagian besar badan kapal keluar dari air, secara dramatis mengurangi resistensi.

4.2.3 Stabilitas dan *Seakeeping Catamaran*

Stabilitas *catamaran* dipengaruhi oleh beberapa faktor kunci:

1. *Metacentric height* (GM): *Catamaran* umumnya memiliki GM yang lebih besar dibandingkan *monohull*, menghasilkan momen pemulihan yang kuat dan stabilitas melintang yang superior.
2. *Waterplane area*: Area permukaan air yang lebih kecil relatif terhadap perpindahan menghasilkan gerakan *pitch* dan *heave* yang lebih lembut.
3. *Roll damping*: Separasi lambung memberikan efek peredaman yang signifikan terhadap gerakan *rolling*.

Meskipun memiliki keunggulan dalam stabilitas melintang, *catamaran* dapat menghadapi tantangan dalam kondisi laut tertentu. Fenomena "*wet-deck slamming*" - di mana struktur penghubung membentur permukaan air - dapat terjadi dalam gelombang besar. Untuk mengatasi ini, desainer mengimplementasikan berbagai strategi:

1. *Wet deck clearance* yang optimal: Meningkatkan jarak antara struktur penghubung dan permukaan air pada kondisi beban penuh.
2. Bentuk lambung yang dioptimalkan: Menggunakan *software* CFD canggih untuk merancang bentuk lambung yang meminimalkan *slamming* dan meningkatkan *seakeeping* secara keseluruhan.
3. Sistem stabilisasi aktif: Penggunaan *fin stabilizer* atau sistem *gyroscopic* untuk lebih mengurangi gerakan yang tidak diinginkan.

4.2.4 Aplikasi Komersial dan Militer

Keunggulan *catamaran* telah mendorong adopsinya dalam berbagai aplikasi:

1. Feri Penumpang Cepat: *Catamaran* mendominasi pasar feri cepat karena kombinasi kecepatan tinggi dan efisiensi bahan bakar. Contoh terkenal termasuk seri 86m dari Austal yang beroperasi di berbagai rute di seluruh dunia, mencapai kecepatan hingga 40 knot.
2. Kapal Pesiar: Stabilitas superior *catamaran* telah menyebabkan peningkatan popularitasnya dalam industri kapal pesiar kecil hingga menengah. Perusahaan seperti Sunreef *Yachts* telah mengembangkan *catamaran* mewah yang menggabungkan stabilitas dengan kemewahan.
3. Kapal Penelitian: Stabilitas *platform catamaran* sangat berharga untuk operasi penelitian laut. Kapal seperti RV Sikuliaq, meskipun bukan *catamaran* murni, menggunakan *hull* form SWATH yang merupakan evolusi dari konsep *catamaran* untuk stabilitas yang luar biasa dalam kondisi laut yang sulit.
4. Aplikasi Militer: Angkatan laut di seluruh dunia telah mengadopsi desain *catamaran* untuk berbagai peran. US Navy's *Independence-class Littoral Combat Ships*, yang dibangun oleh Austal, adalah contoh *catamaran* berperforma tinggi yang dirancang untuk operasi dekat pantai.
5. Energi Terbarukan Lepas Pantai: Industri energi angin lepas pantai telah mulai mengadopsi desain *catamaran* untuk kapal pemasangan dan pemeliharaan. Stabilitasnya memungkinkan operasi yang lebih aman dalam kondisi laut yang menantang.

4.3 Small Waterplane Area Twin Hull Ship (SWATH)

Small Waterplane Area Twin Hull (SWATH) adalah sebuah inovasi desain kapal yang menggabungkan prinsip-prinsip *catamaran* dengan konsep minimalisasi area garis air. Dikembangkan sebagai evolusi dari desain *catamaran* konvensional, SWATH bertujuan untuk mengatasi beberapa keterbatasan *catamaran* tradisional sambil mempertahankan keunggulan stabilitas dan efisiensi yang ditawarkan oleh konfigurasi *multihull*.

Konsep dasar SWATH melibatkan penggunaan dua lambung silindris atau torpedo yang terendam sepenuhnya di bawah permukaan air. Lambung-lambung ini dihubungkan ke struktur atas kapal melalui *strut* vertikal yang ramping, yang secara signifikan mengurangi area garis air kapal. Pengurangan area garis air ini adalah kunci dari keunggulan SWATH dalam hal stabilitas dan performa di laut bergelombang.

Sejarah pengembangan SWATH dapat ditelusuri kembali ke tahun 1960-an dan 1970-an, dengan paten awal yang diajukan oleh Frederick G. Creed dan kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh *Netherlands Ship Model Basin* (NSMB) dan US Navy. Salah satu implementasi awal yang signifikan adalah kapal riset oceanografi Kaiyo, yang diluncurkan oleh Jepang pada tahun 1985.

Prinsip kerja SWATH didasarkan pada pengurangan gaya eksitasi gelombang pada kapal. Dengan menempatkan sebagian besar volume lambung di bawah permukaan air, di mana gerakan orbital gelombang berkurang secara eksponensial dengan kedalaman, SWATH mampu meminimalkan pengaruh gelombang permukaan terhadap gerakan kapal. Hal ini menghasilkan *platform* yang sangat stabil, bahkan dalam kondisi laut yang sangat bergelombang.

1. Karakteristik Hidrodinamika SWATH

Karakteristik hidrodinamika SWATH sangat berbeda dari kapal konvensional dan bahkan dari *catamaran* tradisional. Beberapa aspek kunci meliputi:

- a. Resistensi: SWATH umumnya memiliki resistensi yang lebih tinggi pada kecepatan rendah dibandingkan dengan kapal *monohull* atau *catamaran* konvensional dengan ukuran yang sebanding. Hal ini disebabkan oleh peningkatan luas permukaan basah akibat lambung yang terendam sepenuhnya. Namun, pada kecepatan yang lebih tinggi, terutama dalam kondisi laut bergelombang, SWATH dapat mengungguli desain konvensional karena kemampuannya untuk mempertahankan kecepatan dengan lebih baik.

- b. Stabilitas: SWATH menawarkan stabilitas yang luar biasa, terutama dalam hal gerakan *pitch* dan *roll*. Ini adalah hasil dari kombinasi antara area garis air yang kecil, yang mengurangi momen eksitasi gelombang, dan momen inersia yang besar akibat distribusi massa yang luas.
- c. *Seakeeping*: Karakteristik *seakeeping* SWATH sangat unggul, terutama dalam hal pengurangan percepatan vertikal. Ini membuat SWATH sangat cocok untuk operasi di laut terbuka di mana stabilitas *platform* adalah prioritas utama.
- d. Manuverabilitas: Karena konfigurasi uniknya, SWATH umumnya memiliki karakteristik manuver yang berbeda dari kapal konvensional. Radius putar cenderung lebih besar, dan responnya terhadap kendali kemudi mungkin lebih lambat. Namun, penggunaan sistem propulsi ganda dan *thruster* tambahan dapat meningkatkan manuverabilitas secara signifikan.

2. Desain Struktural SWATH

Desain struktural SWATH menghadirkan tantangan unik karena konfigurasinya yang tidak konvensional. Beberapa aspek kunci dalam desain struktural SWATH meliputi:

- a. Distribusi Beban: Struktur SWATH harus mampu menahan beban yang signifikan pada *strut* penghubung antara lambung bawah air dan struktur atas. Analisis elemen hingga (FEA) menjadi alat yang sangat penting dalam optimalisasi desain struktural ini.
- b. Pemilihan Material: Penggunaan material ringan namun kuat, seperti aluminium atau komposit, sering kali diperlukan untuk mengimbangi berat tambahan yang dihasilkan oleh konfigurasi SWATH. Hal ini penting untuk mempertahankan *draft* yang diinginkan dan karakteristik performa.
- c. Konfigurasi *Strut*: Desain dan penempatan *strut* adalah aspek kritis dalam performa SWATH. *Strut* harus cukup ramping untuk meminimalkan area garis air, namun cukup kuat untuk menahan beban hidrodinamis dan struktural. Beberapa desain SWATH menggunakan konfigurasi *strut* ganda untuk distribusi beban yang lebih baik.

- d. Integrasi Sistem: Ruang internal yang terbatas dalam lambung bawah air dan *strut* menghadirkan tantangan dalam hal penempatan mesin, tangki, dan sistem lainnya. Inovasi dalam desain sistem dan manajemen ruang menjadi sangat penting.
- e. Analisis Kelelahan: Karena sifat beban siklik yang dialami oleh struktur SWATH, analisis kelelahan menjadi aspek kritis dalam desain. Metode spektral dan pendekatan tegangan-umur (S-N) umumnya digunakan untuk mengevaluasi umur kelelahan komponen struktural kritis.

3. Performa di Laut Bergelombang

Performa SWATH di laut bergelombang adalah salah satu keunggulan utamanya dan menjadi alasan utama di balik pengembangan dan adopsi desain ini. Beberapa aspek kunci dari performa SWATH di laut bergelombang meliputi:

- a. Reduksi Gerakan: SWATH mampu mengurangi amplitudo gerakan *pitch* dan *heave* secara signifikan dibandingkan dengan desain konvensional.
- b. Mempertahankan Kecepatan: Kemampuan SWATH untuk mempertahankan kecepatan dalam kondisi laut yang buruk adalah salah satu keunggulan utamanya. Sementara kapal konvensional mungkin harus mengurangi kecepatan secara signifikan untuk alasan keamanan dan kenyamanan, SWATH dapat beroperasi pada kecepatan yang lebih tinggi dalam kondisi yang sama.
- c. Stabilitas *Platform*: Stabilitas *platform* yang superior membuat SWATH sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan permukaan kerja yang stabil. Hal ini telah mendorong adopsi SWATH dalam berbagai aplikasi, termasuk:
 - Kapal survei seismik, di mana stabilitas *platform* sangat penting untuk kualitas data.
 - Kapal pendukung operasi penanganan kargo di laut.
 - *Platform* untuk instalasi dan pemeliharaan turbin angin lepas pantai
- d. Tantangan Operasional: Meskipun memiliki banyak keunggulan, SWATH juga menghadapi beberapa tantangan operasional:

- *Draft* yang lebih dalam dibandingkan dengan kapal konvensional dapat membatasi aksesibilitas ke pelabuhan dangkal.
 - Karakteristik manuver yang unik mungkin memerlukan pelatihan khusus untuk kru.
 - Biaya konstruksi yang lebih tinggi karena kompleksitas struktural.
 - Sensitivitas terhadap perubahan beban dan *trim* , yang memerlukan sistem manajemen *ballast* yang canggih.
- e. Inovasi Terbaru: Penelitian terkini dalam teknologi SWATH fokus pada beberapa area:
- Pengembangan desain *hybrid* yang menggabungkan keunggulan SWATH dengan fitur kapal konvensional.
 - Implementasi sistem kontrol aktif untuk lebih meningkatkan stabilitas dan manuverabilitas.
 - Penggunaan teknologi material maju untuk mengurangi berat dan meningkatkan efisiensi.

4.4 Analisis Komparatif *Catamaran* dan SWATH

Catamaran dan *Small Waterplane Area Twin Hull* (SWATH) merupakan dua jenis desain kapal *multihull* yang telah mendapatkan perhatian signifikan dalam industri maritim. Meskipun keduanya berbagi beberapa karakteristik umum sebagai kapal *multihull*, mereka memiliki perbedaan mendasar dalam desain dan performa yang mempengaruhi aplikasi dan efektivitas mereka dalam berbagai kondisi operasional. Analisis komparatif ini akan meninjau aspek-aspek kunci dari kedua desain, menyoroti kekuatan dan kelemahan relatif mereka.

1. Konsep Dasar dan Evolusi Desain

Catamaran dan *Small Waterplane Area Twin Hull* (SWATH) merepresentasikan dua pendekatan berbeda dalam desain kapal *multihull*. Keduanya telah berkembang sebagai *respons* terhadap kebutuhan akan performa yang lebih baik di laut, namun dengan filosofi desain yang berbeda.

Catamaran, dengan sejarahnya yang dapat ditelusuri kembali ke budaya Polinesia kuno, telah mengalami evolusi signifikan dalam desain modernnya. Prinsip dasarnya melibatkan dua lambung paralel yang dihubungkan oleh struktur penghubung atau *deck*. Evolusi

desain *catamaran* modern dimulai pada 1960-an dan 1970-an, dengan fokus pada optimalisasi jarak antar lambung dan bentuk lambung untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamis [72].

SWATH, di sisi lain, adalah inovasi yang relatif lebih baru, dengan konsep dasarnya dipatenkan oleh Frederick G. Creed pada 1946 dan pengembangan praktisnya dimulai pada 1960-an dan 1970-an. SWATH mengadopsi pendekatan radikal dengan menempatkan sebagian besar volume lambungnya jauh di bawah permukaan air, dihubungkan ke struktur atas melalui *strut* ramping yang meminimalkan area garis air.

Perkembangan terbaru dalam desain kedua jenis kapal ini melibatkan penggunaan teknologi komputasi fluid *dynamics* (CFD) dan optimasi berbasis algoritma genetik untuk menyempurnakan bentuk lambung dan karakteristik hidrodinamis. Misalnya, penelitian oleh Zaghi et al. (2019) mendemonstrasikan penggunaan algoritma optimasi multi-objektif untuk mengoptimalkan bentuk lambung *catamaran*, menghasilkan pengurangan resistensi hingga 15% dibandingkan dengan desain konvensional [73].

2. Performa Hidrodinamis

Analisis performa hidrodinamis *catamaran* dan SWATH melibatkan beberapa aspek kunci:

- a. Resistensi: Pada kecepatan rendah hingga sedang, *catamaran* umumnya memiliki resistensi yang lebih rendah dibandingkan SWATH karena luas permukaan basah yang lebih kecil. Namun, pada kecepatan tinggi, terutama dalam kondisi laut bergelombang, SWATH dapat mengungguli *catamaran*.
- b. Efisiensi Propulsi: *Catamaran* umumnya memiliki efisiensi propulsi yang lebih baik pada kecepatan rendah hingga sedang karena interaksi yang menguntungkan antara sistem gelombang dari kedua lambungnya. SWATH, meskipun mungkin memerlukan daya yang lebih besar pada kecepatan rendah, dapat mempertahankan efisiensi propulsi yang lebih konsisten dalam berbagai kondisi laut. Penelitian oleh Molland et al. (2004) menunjukkan bahwa efisiensi propulsi *catamaran* dapat ditingkatkan hingga 10% melalui optimalisasi jarak antar lambung

dan bentuk lambung [74]. Sementara itu, SWATH mengambil keuntungan dari berkurangnya interaksi antara badan kapal dan sistem propulsi, yang dapat menghasilkan efisiensi propulsi yang lebih stabil dalam berbagai kondisi operasional.

- c. *Seakeeping*: SWATH unggul dalam karakteristik *seakeeping*, terutama dalam hal pengurangan gerakan *pitch* dan *heave*. Penelitian oleh Papanikolaou et al. menunjukkan bahwa amplitudo gerakan SWATH dapat berkurang hingga 80% dibandingkan dengan *catamaran* dalam kondisi laut yang sama [75]. Untuk mengkuantifikasi hal ini, kita dapat menggunakan *Response Amplitude Operator* (RAO), yang menggambarkan *respons* kapal terhadap gelombang pada berbagai frekuensi. SWATH umumnya menunjukkan nilai RAO yang jauh lebih rendah untuk gerakan *heave* dan *pitch* dibandingkan dengan *catamaran*, terutama pada frekuensi gelombang yang lebih tinggi.

3. Stabilitas dan Keselamatan

Stabilitas adalah area di mana SWATH menunjukkan keunggulan yang signifikan atas *catamaran*:

- a. Stabilitas Statis: *Catamaran* memiliki stabilitas melintang yang baik karena jarak antara kedua lambungnya, tetapi masih rentan terhadap gerakan *pitch*. SWATH, dengan pusat gravitasi yang rendah dan area garis air yang minimal, menawarkan stabilitas yang superior dalam semua mode gerakan.
- b. Stabilitas Dinamis: Dalam kondisi laut bergelombang, SWATH mempertahankan stabilitas yang jauh lebih baik dibandingkan *catamaran*. Ini menghasilkan pengurangan percepatan vertikal dan gerakan angular, meningkatkan kenyamanan penumpang dan keamanan operasional.
- c. Keselamatan: Meskipun kedua desain menawarkan keamanan yang tinggi karena konfigurasi *multihull* mereka, SWATH memiliki keunggulan dalam operasi di laut ekstrem. Kemampuannya untuk mempertahankan stabilitas dalam gelombang tinggi meningkatkan margin keselamatan untuk operasi di laut terbuka.

4. Kapasitas dan Fleksibilitas Ruang

Catamaran umumnya menawarkan area *deck* yang lebih luas dan volume internal yang lebih besar dibandingkan dengan SWATH dengan panjang keseluruhan yang sama:

- a. Area *Deck*: *Catamaran* dapat menyediakan area *deck* yang sangat luas, membuatnya ideal untuk aplikasi seperti feri penumpang atau kapal survei yang memerlukan ruang kerja yang besar. SWATH, meskipun memiliki *deck* yang stabil, umumnya menawarkan area yang lebih kecil karena konfigurasi *strut* rampingnya.
- b. Volume Internal: *Catamaran* memiliki keunggulan dalam hal volume internal karena sebagian besar lambungnya berada di atas atau dekat permukaan air. SWATH, dengan lambung terendamnya, memiliki tantangan dalam menyediakan ruang internal yang luas, terutama untuk akomodasi dan penyimpanan.
- c. Fleksibilitas Konfigurasi: *Catamaran* menawarkan fleksibilitas yang lebih besar dalam hal konfigurasi internal dan penataan ruang. SWATH memiliki batasan yang lebih besar karena kebutuhan untuk menjaga stabilitas dan distribusi berat yang tepat.

5. Aplikasi dan Penggunaan

Perbedaan karakteristik antara *catamaran* dan SWATH menyebabkan mereka cocok untuk aplikasi yang berbeda:

- a. Transportasi Penumpang: *Catamaran* dominan dalam aplikasi feri penumpang cepat karena kombinasi kecepatan tinggi, kapasitas besar, dan *draft* yang relatif dangkal. Contoh sukses termasuk feri 86m dari Austal yang beroperasi di berbagai rute di seluruh dunia, mencapai kecepatan hingga 40 knot.
- b. Kapal Riset dan Survei: SWATH memiliki keunggulan untuk operasi yang memerlukan *platform* yang sangat stabil, seperti survei seismik atau operasi ROV. Kapal penelitian RV Kilo Moana, sebuah SWATH berukuran 57 meter, telah mendemonstrasikan kemampuan luar biasa dalam melakukan penelitian oseanografi di laut bergelombang.

- c. Aplikasi Militer: Kedua desain telah diadopsi untuk aplikasi militer. *Catamaran* sering digunakan untuk kapal patroli cepat dan kapal pendaratan, sementara SWATH telah digunakan untuk kapal pengintai dan *platform* sensor karena stabilitasnya yang superior. US Navy's *Independence-class Littoral Combat Ships*, yang dibangun oleh Austal, adalah contoh *catamaran* berperforma tinggi yang dirancang untuk operasi dekat pantai.
- d. Industri Lepas Pantai: SWATH memiliki keunggulan dalam operasi pendukung lepas pantai di laut bergelombang, seperti transfer personel atau kargo. *Catamaran* lebih cocok untuk operasi di perairan yang lebih tenang atau sebagai kapal pendukung yang memerlukan kapasitas muatan besar.

6. Ekonomi dan Pemeliharaan

Aspek ekonomi dan pemeliharaan juga perlu dipertimbangkan dalam perbandingan kedua desain:

- a. Biaya Konstruksi: *Catamaran* umumnya memiliki biaya konstruksi yang lebih rendah karena desainnya yang lebih sederhana dan teknologi yang lebih mapan. SWATH, dengan kompleksitas strukturalnya, cenderung lebih mahal untuk dibangun.
- b. Efisiensi Bahan Bakar: Pada kecepatan operasional normal, *catamaran* sering kali lebih efisien dalam konsumsi bahan bakar. Namun, SWATH dapat lebih efisien dalam kondisi laut yang buruk karena kemampuannya untuk mempertahankan kecepatan.
- c. Pemeliharaan: *Catamaran* umumnya memerlukan pemeliharaan yang lebih sederhana karena aksesibilitas yang lebih baik ke semua bagian kapal. SWATH mungkin memerlukan prosedur pemeliharaan yang lebih kompleks, terutama untuk komponen di bawah air.

4.5 Trimaran dan Konfigurasi Multihull Lainnya

Trimaran merupakan inovasi penting dalam desain kapal *multihull*, menggabungkan keunggulan *catamaran* dengan stabilitas dan efisiensi tambahan yang diberikan oleh lambung ketiga. Konsep dasar *trimaran* melibatkan penggunaan tiga lambung: satu lambung utama (*main hull*) di tengah dan dua lambung samping (*side hulls* atau *outriggers*) yang lebih kecil.

Sejarah modern *trimaran* dapat ditelusuri kembali ke tahun 1960-an, dengan pengembangan signifikan terjadi pada 1990-an dan 2000-an. Victor Tchetchet, seorang imigran Ukraina di Amerika Serikat, sering dianggap sebagai pelopor *trimaran* modern dengan patennya pada tahun 1951. Namun, inovator seperti Nigel Irens dan Dick Newick yang membawa *trimaran* ke era modern dengan desain-desain yang memecahkan rekor kecepatan dan menawarkan performa luar biasa.

Prinsip hidrodinamis *trimaran* didasarkan pada pengurangan resistensi gelombang melalui distribusi *displacement* yang optimal antara lambung utama dan lambung samping. Lambung utama, yang merupakan komponen terbesar, dirancang untuk efisiensi maksimum dan biasanya memiliki bentuk yang ramping untuk meminimalkan resistensi. Lambung samping, di sisi lain, memiliki fungsi ganda: memberikan stabilitas tambahan dan memungkinkan desain lambung utama yang lebih ramping tanpa mengorbankan stabilitas keseluruhan kapal.

Evolusi desain *trimaran* telah menghasilkan beberapa variasi konfigurasi:

1. *Symmetric trimaran*: Konfigurasi klasik dengan lambung samping identik di kedua sisi lambung utama.
2. *Asymmetric trimaran*: Satu lambung samping lebih besar dari yang lain, atau ditempatkan pada posisi longitudinal yang berbeda.
3. *Telescopic trimaran*: Lambung samping dapat diperpanjang untuk stabilitas tambahan atau ditarik masuk untuk mengurangi lebar saat bersandar.
4. *Hybrid trimaran*: Menggabungkan fitur *trimaran* dengan teknologi lain seperti *hydrofoil* atau *air cushion*.

Interaksi hidrodinamis antara ketiga lambung memainkan peran kunci dalam kinerja *trimaran*. Ketika bergerak, setiap lambung menghasilkan sistem gelombangnya sendiri. Dengan menempatkan lambung samping pada posisi yang tepat relatif terhadap lambung utama, desainer kapal dapat menciptakan interferensi yang menguntungkan antara sistem gelombang ini. Interferensi positif ini

dapat secara signifikan mengurangi resistensi gelombang total kapal, terutama pada kecepatan tinggi.

Selain itu, konfigurasi *trimaran* memungkinkan fleksibilitas yang lebih besar dalam distribusi volume dan berat kapal. Ini memberikan desainer lebih banyak kebebasan dalam mengoptimalkan stabilitas, kapasitas muatan, dan karakteristik *seakeeping*. Misalnya, dengan menempatkan sebagian besar volume di lambung utama, *trimaran* dapat mempertahankan *draft* yang relatif dangkal sambil tetap menawarkan stabilitas yang unggul

1. Karakteristik Kinerja *trimaran*

Trimaran menunjukkan beberapa karakteristik kinerja yang unik yang membuatnya menonjol dalam berbagai aplikasi maritim:

- a. Resistensi: Pada kecepatan tinggi, *trimaran* dapat mencapai efisiensi yang luar biasa dibandingkan dengan *monohull* konvensional. Hal ini terutama disebabkan oleh pengurangan resistensi gelombang yang signifikan. Lambung utama yang ramping menghasilkan sistem gelombang yang lebih kecil, sementara lambung samping, jika ditempatkan dengan benar, dapat menciptakan interferensi yang menguntungkan dengan sistem gelombang lambung utama. Akibatnya, pada angka Froude yang lebih tinggi (biasanya di atas 0,5), *trimaran* dapat mempertahankan kecepatan dengan daya yang lebih rendah dibandingkan dengan *monohull* atau bahkan *catamaran* dengan *displacement* yang sama.
- b. Stabilitas: *trimaran* menawarkan stabilitas melintang yang sangat baik karena jarak lateral yang besar antara lambung samping. Ini menghasilkan momen pemulih yang kuat, yang berarti *trimaran* memiliki resistensi yang lebih besar terhadap kemiringan lateral. Stabilitas yang ditingkatkan ini memiliki beberapa keuntungan praktis: mengurangi gerakan *rolling*, meningkatkan kenyamanan penumpang, dan memungkinkan penggunaan area dek yang lebih efektif. Dalam aplikasi militer, stabilitas yang lebih baik dapat meningkatkan akurasi sistem senjata dan memperluas jendela operasional untuk peluncuran dan pengambilan pesawat atau kendaraan bawah air.

- c. *Seakeeping*: Karakteristik *seakeeping trimaran* umumnya lebih baik daripada *monohull*, terutama dalam hal pengurangan gerakan *rolling*. Hal ini disebabkan oleh kombinasi antara stabilitas melintang yang tinggi dan efek peredaman dari lambung samping. Namun, performa *pitch* dan *heave* dapat bervariasi tergantung pada desain spesifik dan kondisi laut. Dalam beberapa kasus, *trimaran* mungkin mengalami gerakan *pitch* yang lebih besar daripada *monohull* karena distribusi panjang *waterline* yang berbeda. Meski demikian, dengan optimalisasi yang tepat, *trimaran* dapat mencapai karakteristik *seakeeping* yang sangat baik di berbagai kondisi laut, menjadikannya pilihan yang menarik untuk operasi di laut terbuka.
- d. *Manuverabilitas*: *trimaran* dapat menawarkan manuverabilitas yang baik karena kemampuan untuk menggunakan diferensial *thrust* antara lambung utama dan lambung samping. Dengan menempatkan propulsor di masing-masing lambung, *trimaran* dapat mencapai tingkat kontrol yang tinggi, terutama dalam operasi kecepatan rendah seperti bersandar atau manuver di pelabuhan yang padat. Namun, karena lebar keseluruhan yang lebih besar, *trimaran* mungkin memiliki radius putar yang lebih besar dibandingkan dengan *monohull*. Ini dapat diatasi dengan penggunaan sistem propulsi dan kemudi yang inovatif, seperti *azimuthing thrusters* atau *waterjet*.

2. Aplikasi dan Penggunaan *Trimaran*

Trimaran telah menemukan aplikasi dalam berbagai sektor maritim, memanfaatkan keunggulan uniknya dalam stabilitas, efisiensi, dan fleksibilitas desain:

- a. *Kapal Perang*: *Trimaran* telah menarik perhatian signifikan dalam aplikasi militer. Contoh terkenal adalah USS *Independence* (LCS-2), kapal tempur pesisir kelas *Independence* untuk Angkatan Laut AS. Dengan panjang 127,4 meter dan lebar 31,6 meter, kapal ini mendemonstrasikan keunggulan desain *trimaran* untuk aplikasi militer. Konfigurasi *trimaran* memungkinkan area dek yang luas, yang sangat berharga untuk operasi helikopter, peluncuran kendaraan tanpa awak, dan penempatan sistem senjata.

Stabilitas yang ditingkatkan juga berarti akurasi yang lebih baik untuk sistem senjata dan kemampuan untuk beroperasi dalam kondisi laut yang lebih berat. Kecepatan tinggi yang dapat dicapai oleh *trimaran* (lebih dari 40 knot untuk USS *Independence*) adalah keuntungan signifikan dalam operasi militer, memungkinkan *respons* cepat dan fleksibilitas taktis.

- b. Kapal Feri Cepat: *trimaran* telah terbukti efektif sebagai *platform* untuk feri penumpang berkecepatan tinggi. Kombinasi antara kecepatan tinggi, stabilitas yang baik, dan kapasitas penumpang yang besar membuat *trimaran* menjadi pilihan menarik untuk rute feri jarak menengah hingga jauh. Contoh sukses dari aplikasi ini adalah *Benchijigua Express*, feri *trimaran* yang dioperasikan oleh *Fred. Olsen Express* di Kepulauan Canary. Dengan panjang 126,7 meter, kapal ini mampu mengangkut 1350 penumpang dan 341 mobil dengan kecepatan operasional 40 knot. Stabilitas yang lebih baik yang ditawarkan oleh desain *trimaran* mengurangi mabuk laut di antara penumpang, sementara efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi pada kecepatan operasional memungkinkan operasi yang lebih ekonomis.
- c. Kapal Yacht dan Rekreasi: Dalam industri *yacht*, *trimaran* telah mendapatkan popularitas karena kombinasi unik antara kinerja, stabilitas, dan ruang hidup yang luas. Untuk kapal layar, konfigurasi *trimaran* memungkinkan area layar yang lebih besar dengan stabilitas yang tetap tinggi, menghasilkan performa berlayar yang impresif. Untuk kapal motor, *trimaran* menawarkan efisiensi bahan bakar yang lebih baik dan kenyamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan desain *monohull* tradisional. Ruang dek yang luas juga sangat dihargai dalam aplikasi rekreasi, menyediakan area yang lebih besar untuk berjemur, hiburan, dan aktivitas lainnya.
- d. Kapal Riset dan Survei: Stabilitas *platform* yang ditawarkan oleh *trimaran* membuatnya cocok untuk aplikasi riset dan survei. Pengurangan gerakan kapal, terutama *rolling*, sangat berharga dalam operasi yang memerlukan penggunaan peralatan sensitif atau peluncuran dan pengambilan kendaraan bawah air. RV

Triton, sebuah kapal riset *trimaran* yang dibangun untuk *Defence Evaluation and Research Agency* (DERA) Inggris, adalah contoh penggunaan *trimaran* untuk penelitian ilmiah dan teknologi kelautan. Kapal ini telah digunakan untuk berbagai penelitian, termasuk studi tentang hidrodinamika kapal dan pengembangan teknologi maritim baru.

3. Konfigurasi *Multihull* Lainnya

Selain *trimaran*, beberapa konfigurasi *multihull* lainnya telah dikembangkan, masing-masing menawarkan karakteristik unik dan potensi aplikasi spesifik:

- a. *Quadrimaran*: Konsep ini melibatkan penggunaan empat lambung, biasanya dengan dua lambung utama yang lebih besar dan dua lambung samping yang lebih kecil. Ide di balik *quadrimaran* adalah untuk lebih meningkatkan stabilitas dan mengurangi resistensi gelombang dibandingkan dengan *trimaran*. Dengan empat lambung, *quadrimaran* dapat mendistribusikan *displacement* dengan cara yang sangat efisien, potensial mengurangi resistensi gelombang lebih jauh. Namun, kompleksitas desain dan konstruksi yang lebih tinggi telah membatasi adopsi luas dari konfigurasi ini.
- b. *Pentamaran*: Desain ini menambahkan lambung kelima ke konfigurasi *quadrimaran*, biasanya di bagian belakang kapal. Tujuan utama dari lambung kelima adalah untuk lebih meningkatkan stabilitas dan memberikan kontrol tambahan atas *trim* kapal. *Pentamaran* telah diusulkan untuk aplikasi seperti kapal perang masa depan, di mana stabilitas *platform* yang sangat tinggi diperlukan untuk sistem senjata canggih dan operasi pesawat. Namun, seperti *quadrimaran*, kompleksitas dan biaya yang lebih tinggi telah membatasi pengembangan praktis dari konsep ini.
- c. *Small Waterplane Area Quadruple Hull* (SWAQH): Ini adalah pengembangan dari konsep SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*), menggunakan empat *strut* ramping untuk menghubungkan badan kapal terendam ke struktur atas. SWAQH bertujuan untuk menggabungkan stabilitas luar biasa dari SWATH

dengan kapasitas muatan yang lebih besar dan fleksibilitas operasional. Dengan empat *strut*, SWAQH dapat mendistribusikan beban dengan lebih efisien dan potensial menawarkan karakteristik *seakeeping* yang lebih baik dalam berbagai kondisi laut. Namun, seperti SWATH, SWAQH menghadapi tantangan dalam hal *draft* yang dalam dan kompleksitas struktural.

- d. *Hydrofoil-Assisted Multihulls*: Integrasi teknologi hidrofoil dengan desain *multihull* telah menghasilkan konfigurasi *hybrid* yang menarik. Konsep ini melibatkan penambahan *foil* ke lambung *catamaran* atau *trimaran*. Pada kecepatan tinggi, *foil* mengangkat sebagian badan kapal keluar dari air, secara drastis mengurangi resistensi hidrodinamis. Hal ini memungkinkan kecepatan yang lebih tinggi dan efisiensi bahan bakar yang lebih baik dibandingkan dengan desain *multihull* konvensional. *Hydrofoil-assisted catamarans* telah berhasil diimplementasikan dalam beberapa feri penumpang cepat, sementara konsep serupa untuk *trimaran* sedang dalam pengembangan.
- e. *Wave-Piercing Multihulls*: Konsep ini menggabungkan desain lambung *Wave-Piercing* dengan konfigurasi *multihull*. *Wave-Piercing hulls* dirancang untuk "memotong" melalui gelombang daripada naik di atasnya, mengurangi *pitching* dan *slamming*. Ketika dikombinasikan dengan desain *multihull*, hasilnya adalah kapal dengan karakteristik *seakeeping* yang sangat baik bahkan dalam kondisi laut yang berat. *Wave-Piercing catamarans* telah sukses digunakan dalam aplikasi feri cepat dan kapal patroli, menawarkan kombinasi kecepatan tinggi dan kinerja yang baik dalam cuaca buruk.

Setiap konfigurasi *multihull* ini mewakili upaya untuk mengoptimalkan aspek tertentu dari kinerja kapal, apakah itu stabilitas, efisiensi, atau kemampuan untuk beroperasi dalam kondisi laut tertentu. Sementara beberapa konsep tetap eksperimental, yang lain telah menemukan aplikasi praktis dalam berbagai sektor maritim. Perkembangan lebih lanjut dalam teknologi material, metode analisis,

dan teknik konstruksi kemungkinan akan membuka peluang baru untuk inovasi dalam desain *multihull* di masa depan.

4.6 Desain Sistem Propulsi untuk Kapal *Multihull*

Desain sistem propulsi untuk kapal *multihull* memerlukan pendekatan yang berbeda dibandingkan dengan kapal *monohull* konvensional, karena adanya interaksi hidrodinamis yang kompleks antara lambung-lambung dan sistem propulsi. Beberapa pertimbangan kritis meliputi:

1. Interaksi Hidrodinamis: Pada *catamaran* dan *trimaran*, aliran air di sekitar lambung dapat sangat berbeda dari *monohull*. Fenomena seperti interferensi gelombang antara lambung dan efek saluran (*channeling effect*) antara lambung ganda dapat mempengaruhi kinerja *propeller* secara signifikan.
2. Distribusi Berat: Penempatan mesin dan sistem propulsi harus dioptimalkan untuk mempertahankan stabilitas dan *trim* yang tepat. Pada *trimaran*, misalnya, penempatan mesin di lambung utama atau lambung samping dapat memiliki implikasi besar terhadap distribusi berat dan performa kapal secara keseluruhan.
3. Efisiensi pada Kecepatan Tinggi: Banyak kapal *multihull* dirancang untuk operasi kecepatan tinggi, di mana resistensi gelombang menjadi dominan. Oleh karena itu, sistem propulsi harus mampu memberikan daya dorong yang efisien pada rentang kecepatan yang luas. Ini sering kali memerlukan desain *propeller* khusus atau penggunaan sistem propulsi alternatif seperti *waterjet*.
4. *Wake Field*: Karakteristik *wake field* pada *multihull* dapat sangat berbeda dari *monohull*. Pada *catamaran*, misalnya, *wake field* di antara dua lambung dapat memiliki karakteristik yang unik yang mempengaruhi desain *propeller*. Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dilakukan oleh Haase et al. [76] menunjukkan bahwa optimalisasi desain *propeller* berdasarkan karakteristik *wake field* spesifik *multihull* dapat meningkatkan efisiensi propulsi hingga 7% dibandingkan dengan desain *propeller* standar.

5. Kavitasi: Risiko kavitasi dapat lebih tinggi pada kapal *multihull* berkecepatan tinggi karena kecepatan aliran air yang tinggi di sekitar *propeller*. Ini memerlukan perhatian khusus dalam desain *propeller*, termasuk pertimbangan penggunaan material tahan kavitasi atau desain *blade* khusus untuk mengurangi risiko kavitasi.

4.6.2 Jenis Sistem Propulsi untuk Kapal *Multihull*

Berbagai jenis sistem propulsi telah diterapkan pada kapal *multihull*, masing-masing dengan keunggulan dan tantangannya sendiri:

1. *Propeller* Konvensional:

Meskipun sederhana, *propeller* tetap menjadi pilihan populer untuk banyak kapal *multihull*. Pada *catamaran*, penggunaan dua *propeller* (satu di setiap lambung) adalah konfigurasi umum. Ini memberikan redundansi dan maneuverability yang baik. Untuk *trimaran*, konfigurasi dapat bervariasi, dengan *propeller* di lambung utama saja atau kombinasi antara lambung utama dan lambung samping. Inovasi dalam desain *propeller* untuk *multihull* meliputi:

- a. *Propeller* dengan *Skew* Tinggi: Mengurangi fluktuasi beban *blade* dan menurunkan tingkat getaran dan kebisingan.
- b. *Propeller* dengan *Tip Loaded*: Meningkatkan efisiensi dengan mendistribusikan beban lebih ke ujung *blade*.
- c. *Contra-Rotating Propellers* (CRP): Dua *propeller* yang berputar berlawanan arah pada satu poros, meningkatkan efisiensi dengan memanfaatkan energi rotasional dalam aliran air.

2. *Waterjet*:

Sistem propulsi *waterjet* sering digunakan pada kapal *multihull* berkecepatan tinggi. *Waterjet* menawarkan efisiensi yang baik pada kecepatan tinggi (biasanya di atas 30 knot) dan tidak memiliki appendage yang menonjol di bawah lambung, mengurangi *draft* dan risiko kerusakan pada perairan dangkal. Keunggulan *waterjet* pada *multihull* meliputi:

- a. Efisiensi tinggi pada kecepatan tinggi (dapat mencapai 90% pada kecepatan optimal).

- b. Kemampuan manuver yang sangat baik, terutama pada kecepatan rendah.
- c. Pengurangan getaran dan kebisingan dibandingkan dengan sistem *propeller*.

Namun, *waterjet* juga memiliki tantangan, termasuk efisiensi yang lebih rendah pada kecepatan rendah dan biaya awal yang lebih tinggi.

3. Azimuthing Thrusters:

Sistem ini menawarkan maneuverability yang sangat baik dan sering digunakan pada kapal *multihull* yang memerlukan kemampuan manuver yang presisi, seperti kapal survei atau kapal pendukung lepas pantai. *Azimuthing thrusters* dapat diputar 360 derajat, memberikan kontrol penuh atas arah daya dorong. Keunggulan *azimuthing thrusters* pada *multihull* meliputi:

- a. Kemampuan manuver yang luar biasa, terutama bermanfaat untuk operasi dinamis *positioning*.
- b. Fleksibilitas dalam penempatan, yang dapat mengoptimalkan penggunaan ruang internal kapal.
- c. Efisiensi propulsi yang baik karena kemampuan untuk mengarahkan *thrust* secara optimal.

4. Podded Propulsion:

Sistem propulsi *pod*, di mana motor listrik dan *propeller* terintegrasi dalam satu unit di luar lambung, telah diterapkan pada beberapa desain *multihull* besar. Sistem ini menawarkan efisiensi yang baik dan fleksibilitas dalam penempatan. Keunggulan *podded propulsion* pada *multihull* meliputi:

- a. Pengurangan ruang yang dibutuhkan di dalam lambung untuk sistem propulsi.
- b. Peningkatan efisiensi hidrodinamis karena eliminasi poros dan *strut*.
- c. Fleksibilitas dalam desain lambung karena tidak ada kebutuhan untuk shaft line konvensional.

5. *Hybrid dan Electric Propulsion*:

Sistem propulsi *hybrid* dan listrik menjadi semakin populer di kapal *multihull*, terutama untuk aplikasi yang memerlukan operasi yang senyap dan ramah lingkungan. Konfigurasi *multihull* sering menawarkan ruang yang cukup untuk penempatan baterai dan sistem listrik, membuat opsi ini semakin *feasible*. Keunggulan sistem propulsi listrik pada *multihull* meliputi:

- a. Pengurangan emisi dan kebisingan, ideal untuk operasi di area yang sensitif secara lingkungan.
- b. Fleksibilitas dalam manajemen daya, memungkinkan optimalisasi efisiensi pada berbagai kondisi operasional.
- c. Potensi untuk integrasi dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya atau turbin angin.

4.6.2 Optimalisasi Propulsi untuk Kapal *Multihull*

Optimalisasi sistem propulsi untuk kapal *multihull* melibatkan beberapa aspek kunci:

1. Analisis *Computational Fluid Dynamics (CFD)*:

Penggunaan CFD telah menjadi alat penting dalam optimalisasi interaksi antara lambung dan sistem propulsi. Simulasi CFD memungkinkan desainer untuk memprediksi aliran air di sekitar lambung dan propulsor, membantu dalam optimalisasi bentuk dan penempatan propulsor. Contoh penggunaan CFD dalam optimalisasi propulsi *multihull*:

- a. Analisis *wake field* untuk optimalisasi desain *propeller*.
- b. Simulasi interaksi antara multiple propulsors pada *catamaran* atau *trimaran*.
- c. Optimalisasi bentuk *intake* dan *nozzle* untuk sistem *waterjet*.

2. Model Testing:

Pengujian model tetap menjadi metode penting dalam validasi desain propulsi *multihull*. Pengujian di tangki percobaan dapat memberikan data berharga tentang interaksi lambung-propulsor dan kinerja sistem propulsi dalam berbagai kondisi operasional. Jenis pengujian yang sering dilakukan meliputi:

- a. Uji tahanan dan propulsi untuk mengukur koefisien *thrust* dan *torque propeller*.
- b. Uji kavitas untuk mengevaluasi risiko dan karakteristik kavitas *propeller*.
- c. Uji *seakeeping* untuk menilai kinerja propulsi dalam kondisi bergelombang.

3. Optimalisasi *Propeller*:

Untuk sistem berbasis *propeller*, desain *propeller* yang dioptimalkan khusus untuk aliran air *multihull* dapat meningkatkan efisiensi secara signifikan. Ini mungkin melibatkan:

- a. Penggunaan *propeller* dengan *pitch variable* untuk mengakomodasi variasi beban pada berbagai kecepatan.
- b. Desain *blade* yang disesuaikan untuk karakteristik *wake field* spesifik *multihull*.
- c. Implementasi teknologi tip *vortex reduction* untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi kavitas.

4. Integrasi Sistem Kontrol:

Sistem kontrol canggih yang mengintegrasikan propulsi dengan sistem navigasi dan stabilisasi dapat meningkatkan efisiensi operasional kapal *multihull* secara keseluruhan. Contohnya meliputi:

- a. Sistem *dynamic positioning* yang terintegrasi dengan *azimuthing thrusters* untuk operasi presisi.
- b. Sistem manajemen daya untuk optimalisasi konsumsi bahan bakar pada sistem propulsi *hybrid*.
- c. Kontrol adaptif untuk optimalisasi *pitch propeller* atau kecepatan *waterjet* berdasarkan kondisi operasional.

4.6.3 Inovasi Terbaru dalam Propulsi *Multihull*

Beberapa inovasi terbaru dalam propulsi *multihull* mencakup:

1. *Surface-Piercing Propellers*:

Jenis *propeller* ini, yang beroperasi sebagian di atas permukaan air, telah menunjukkan efisiensi yang baik pada kapal *multihull* berkecepatan tinggi. Mereka dapat mengurangi *drag* dan meningkatkan efisiensi pada kecepatan tinggi. Keunggulan *surface-piercing propellers* meliputi:

- a. Pengurangan *drag* karena berkurangnya area basah.
- b. Peningkatan efisiensi pada kecepatan tinggi (dapat mencapai 15% lebih tinggi dibandingkan *propeller* konvensional pada kecepatan di atas 45 knot).
- c. Kemampuan untuk beroperasi di perairan yang relatif dangkal.

2. Rim-driven propulsors:

Teknologi ini, di mana *blade propeller* dipasang pada rim yang berputar, telah diterapkan pada beberapa desain *multihull*. Mereka menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dan tingkat kebisingan yang lebih rendah dibandingkan dengan *propeller* konvensional. Keunggulan *rim-driven propulsors* meliputi:

- a. Pengurangan kavitasi tip *blade*.
- b. Peningkatan efisiensi hidrodinamis karena eliminasi hub *propeller*.
- c. Pengurangan kebisingan dan getaran.

3. Contra-Rotating Propellers (CRP):

Penggunaan dua *propeller* yang berputar berlawanan arah pada satu poros telah menunjukkan peningkatan efisiensi pada beberapa desain *multihull*. Sistem ini dapat memanfaatkan energi rotasional dalam aliran air dengan lebih baik. Keunggulan CRP meliputi:

- a. Peningkatan efisiensi propulsi hingga 15% dibandingkan dengan *single propeller*.
- b. Pengurangan torsi reaksi, yang dapat meningkatkan stabilitas direksional kapal.
- c. Potensi untuk pengurangan diameter *propeller*, yang bermanfaat untuk kapal dengan *draft* terbatas.

4. Foil-Assisted Propulsion:

Integrasi *hydrofoil* dengan sistem propulsi konvensional telah menghasilkan desain *hybrid* yang menarik. Pada kecepatan tinggi, *foil* mengangkat sebagian lambung keluar dari air, mengurangi resistensi dan meningkatkan efisiensi propulsi. Keunggulan *foil-assisted propulsion* meliputi:

- a. Pengurangan resistensi hingga 40% pada kecepatan tinggi.
- b. Peningkatan stabilitas dan kenyamanan penumpang.

- c. Potensi untuk pengurangan konsumsi bahan bakar yang signifikan.

5. *Advanced Materials in Propulsion Systems:*

Penggunaan material maju seperti komposit karbon *fiber* dalam komponen sistem propulsi telah membuka peluang baru dalam desain propulsor untuk *multihull*. Material ini menawarkan pengurangan berat, peningkatan kekuatan, dan resistensi terhadap korosi yang lebih baik dibandingkan dengan material konvensional. Aplikasi material maju meliputi:

- a. *Propeller* komposit yang dapat mengurangi berat hingga 50% dibandingkan dengan *propeller* logam.
- b. *Shaft propeller* dari material komposit yang dapat mengurangi getaran dan meningkatkan efisiensi transmisi daya.
- c. Komponen *waterjet* dari material tahan kavitasi untuk meningkatkan umur pakai dan kinerja.

4.7 Manajemen Stabilitas dan Trim pada Multihull

Kapal *multihull*, seperti *catamaran* dan *trimaran*, memiliki karakteristik stabilitas yang berbeda secara signifikan dari kapal *monohull* konvensional. Perbedaan utama terletak pada geometri lambung mereka yang unik, yang memberikan beberapa keunggulan dalam hal stabilitas:

- a. Stabilitas Melintang: Kapal *multihull* umumnya memiliki stabilitas melintang yang sangat baik karena jarak lateral yang besar antara lambung-lambungannya. Ini menghasilkan momen penegak (*righting moment*) yang besar, yang berarti kapal memiliki resistensi yang lebih tinggi terhadap kemiringan lateral. Kurva stabilitas statis (*GZ curve*) untuk *multihull* biasanya menunjukkan lengan penegak yang lebih besar pada sudut kemiringan yang lebih luas dibandingkan dengan *monohull*. Namun, penting untuk dicatat bahwa meskipun *multihull* memiliki stabilitas awal yang sangat baik, mereka juga dapat mengalami *capsize* yang lebih tiba-tiba jika kemiringan melebihi sudut kritis tertentu. Fenomena ini dikenal sebagai "*angle of vanishing stability*" atau AVS, yang

biasanya terjadi pada sudut kemiringan yang lebih besar dibandingkan *monohull*.

- b. Stabilitas Memanjang: Stabilitas memanjang *multihull* umumnya lebih sensitif dibandingkan *monohull* karena distribusi berat yang lebih terpusat dan panjang garis air yang relatif lebih pendek. Ini dapat mengakibatkan perubahan *trim* yang lebih besar sebagai *respons* terhadap pergeseran beban atau kondisi gelombang.
- c. Stabilitas Dinamis: Dalam kondisi laut bergelombang, *multihull* umumnya menunjukkan gerakan *rolling* yang lebih kecil dibandingkan *monohull*. Namun, mereka mungkin mengalami gerakan *pitching* yang lebih besar, terutama pada *catamaran* dengan jarak antar lambung yang lebar.

1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi *trim* pada *Multihull*

Trim pada kapal *multihull* dipengaruhi oleh beberapa faktor kunci:

- a. Distribusi Berat: Penempatan beban pada kapal *multihull* sangat kritis dalam menentukan *trim*. Karena sifat geometris mereka, pergeseran berat longitudinal dapat memiliki efek yang lebih besar pada *trim* dibandingkan dengan *monohull*.
- b. Kecepatan dan Kondisi Laut: Pada kecepatan tinggi, beberapa desain *multihull* dapat mengalami perubahan *trim* yang signifikan karena efek hidrodinamis. Misalnya, *catamaran* mungkin mengalami "*bow-up*" *trim* pada kecepatan tinggi karena tekanan hidrodinamis pada bagian belakang lambung.
- c. Konfigurasi Lambung: Desain lambung, termasuk bentuk dan posisi relatif lambung-lambung, mempengaruhi karakteristik *trim*. Misalnya, *trimaran* dengan lambung samping yang ditempatkan lebih ke belakang mungkin memiliki karakteristik *trim* yang berbeda dari yang lambung sampingnya ditempatkan di tengah.
- d. Sistem Propulsi: Penempatan dan jenis sistem propulsi dapat mempengaruhi *trim*, terutama pada kecepatan tinggi. Misalnya, *waterjet* yang ditempatkan tinggi dapat menghasilkan momen yang cenderung mengangkat bagian belakang kapal.

2. Metode Manajemen Stabilitas dan *trim*

Manajemen stabilitas dan *trim* pada kapal *multihull* melibatkan beberapa metode dan teknologi:

- a. *Sistem Ballast Aktif*: Sistem *ballast* yang dapat dikontrol secara dinamis sangat efektif dalam mengelola *trim* dan stabilitas *multihull*. Sistem ini memungkinkan transfer air atau cairan *ballast* antara tangki-tangki untuk menyesuaikan *trim* dan meningkatkan stabilitas. Pada beberapa desain canggih, sistem *ballast* dapat diintegrasikan dengan sistem kontrol otomatis yang menyesuaikan distribusi *ballast* berdasarkan kondisi operasional.
- b. *Foil Stabil*: Penggunaan *foil* yang dapat disesuaikan, baik di bagian depan maupun belakang kapal, dapat membantu mengontrol *trim* dan meningkatkan stabilitas dinamis. *Foil* ini dapat diatur secara aktif untuk mengoptimalkan kinerja kapal pada berbagai kecepatan dan kondisi laut.
- c. *Sistem Ride Control*: Sistem *ride control*, yang sering digunakan pada feri cepat *multihull*, menggunakan kombinasi *foil*, *fins*, atau *interceptor* yang dikendalikan secara aktif untuk mengurangi gerakan kapal dan mengoptimalkan *trim*. Sistem ini dapat secara signifikan meningkatkan kenyamanan penumpang dan efisiensi operasional.
- d. *Distribusi Beban yang Dioptimalkan*: Perencanaan yang cermat dalam distribusi beban, termasuk kargo, bahan bakar, dan persediaan, sangat penting untuk mempertahankan *trim* dan stabilitas yang optimal. Ini mungkin melibatkan penggunaan *software* manajemen beban yang canggih yang dapat menghitung distribusi beban optimal berdasarkan berbagai parameter operasional.
- e. *Desain Lambung Adaptif*: Beberapa konsep inovatif melibatkan desain lambung yang dapat disesuaikan, di mana geometri lambung dapat dimodifikasi selama operasi untuk mengoptimalkan stabilitas dan *trim*. Meskipun masih dalam tahap eksperimental, teknologi ini menawarkan potensi untuk peningkatan kinerja yang signifikan.

3. Tantangan dan Solusi dalam Operasi Kapal *Multihull*

Beberapa tantangan utama dalam manajemen stabilitas dan *trim* pada kapal *multihull* meliputi:

- a. *Sensitivitas terhadap Distribusi Beban*: *Multihull* sangat sensitif terhadap perubahan dalam distribusi beban. Solusi untuk ini

melibatkan pelatihan yang tepat untuk kru dalam manajemen beban dan penggunaan sistem pemantauan beban *real-time*.

- b. Performa di Laut Bergelombang: Meskipun memiliki stabilitas melintang yang baik, beberapa desain *multihull* dapat mengalami gerakan *pitching* yang signifikan di laut bergelombang. Penggunaan sistem *ride control* dan desain lambung yang dioptimalkan dapat membantu mengatasi masalah ini.
- c. Risiko *Capsize*: Meskipun jarang terjadi, *multihull* memiliki risiko *capsize* yang berbeda dari *monohull*. Edukasi kru tentang batas-batas operasional kapal dan penggunaan sistem peringatan stabilitas canggih adalah kunci untuk mengelola risiko ini.
- d. Manajemen Energi untuk Sistem Kontrol Aktif: Sistem manajemen stabilitas dan *trim* aktif dapat memerlukan input energi yang signifikan. Integrasi sistem ini dengan manajemen energi kapal secara keseluruhan adalah penting untuk efisiensi operasional.

4.8 Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip interferensi gelombang pada *catamaran* dan bagaimana hal ini mempengaruhi resistensi kapal!
2. Analisis bagaimana desain *catamaran* dapat dioptimalkan untuk meningkatkan performa *seakeeping*, terutama dalam mengurangi efek *slamming*!
3. Evaluasi potensi penggunaan *catamaran* dalam industri energi terbarukan lepas pantai, dengan fokus pada keuntungan dan tantangan yang mungkin dihadapi!
4. Jelaskan prinsip dasar di balik konsep *Small Waterplane Area Twin Hull* (SWATH) dan bagaimana hal ini berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas kapal di laut bergelombang!
5. Analisis keunggulan dan keterbatasan SWATH dalam konteks aplikasi spesifik seperti kapal survei seismik atau kapal pendukung instalasi turbin angin lepas pantai!
6. Analisis keunggulan SWATH dalam hal stabilitas dan *seakeeping* dibandingkan dengan *catamaran*. Bagaimana keunggulan ini mempengaruhi aplikasi potensial SWATH dalam industri maritim?
7. Jelaskan bagaimana interaksi hidrodinamis antara lambung pada kapal *multihull* mempengaruhi desain sistem propulsi. Berikan

- contoh spesifik tentang bagaimana desainer dapat mengoptimalkan sistem propulsi untuk mengatasi tantangan ini!
8. Jelaskan inovasi terbaru dalam teknologi propulsi *multihull*, seperti *surface-piercing propellers* atau *foil-assisted propulsion*. Pilih satu inovasi dan jelaskan bagaimana teknologi ini dapat mengubah desain dan kinerja kapal *multihull* di masa depan!
 9. Jelaskan perbedaan utama antara karakteristik stabilitas melintang kapal *multihull* dan *monohull*. Bagaimana perbedaan ini mempengaruhi desain dan operasi kapal *multihull*?
 10. Jelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi *trim* pada kapal *multihull* dan bagaimana faktor-faktor ini berinteraksi pada kecepatan tinggi!

4.9 Kesimpulan

1. *Catamaran* mewakili langkah maju yang signifikan dalam desain kapal, menawarkan kombinasi unik stabilitas, efisiensi, dan fleksibilitas. Keunggulan mereka dalam hal stabilitas melintang, area dek yang luas, dan efisiensi bahan bakar telah mendorong adopsi luas di berbagai sektor maritim. Namun, desain *catamaran* juga menghadirkan tantangan unik, terutama dalam hal kompleksitas struktural dan perilaku di laut bergelombang. Kemajuan dalam teknik pemodelan dan simulasi, bersama dengan inovasi dalam material dan sistem propulsi, terus mendorong evolusi desain *catamaran*. Dengan penelitian berkelanjutan dan aplikasi praktis yang semakin luas, *catamaran* diposisikan untuk memainkan peran penting dalam membentuk masa depan transportasi laut dan eksplorasi kelautan.
2. *Small Waterplane Area Twin Hull* (SWATH) mewakili langkah maju yang signifikan dalam teknologi perkapalan, menawarkan solusi unik untuk operasi di laut bergelombang. Keunggulan utamanya dalam hal stabilitas dan performa *seakeeping* telah mendorong adopsinya dalam berbagai aplikasi, dari penelitian ilmiah hingga operasi militer dan komersial. Meskipun SWATH menghadapi tantangan dalam hal kompleksitas desain dan biaya konstruksi, potensinya untuk meningkatkan operabilitas dalam kondisi laut yang menantang tetap menjadikannya pilihan menarik untuk banyak aplikasi maritim. Perkembangan teknologi material,

teknik analisis struktural, dan sistem kontrol terus mendorong evolusi desain SWATH, memperluas kemampuan dan aplikasinya. Saat industri maritim terus mencari solusi untuk operasi yang lebih aman dan efisien di lingkungan laut yang semakin menantang, SWATH dan variasinya kemungkinan akan memainkan peran yang semakin penting dalam masa depan teknologi perkapalan.

3. *Catamaran* dan SWATH masing-masing memiliki kekuatan dan kelemahan yang unik. *Catamaran* unggul dalam hal kecepatan, kapasitas, dan fleksibilitas untuk berbagai aplikasi, terutama di perairan yang relatif tenang. SWATH, dengan stabilitasnya yang luar biasa, menawarkan solusi unggul untuk operasi di laut bergelombang dan aplikasi yang memerlukan *platform* yang sangat stabil. Pilihan antara *catamaran* dan SWATH akan sangat bergantung pada persyaratan operasional spesifik, kondisi lingkungan, dan pertimbangan ekonomi. Perkembangan teknologi terus mendorong inovasi dalam kedua desain, dengan tren terbaru mengarah pada desain *hybrid* yang berusaha menggabungkan kekuatan keduanya. Dalam konteks evolusi desain kapal, baik *catamaran* maupun SWATH mewakili langkah signifikan dalam upaya mengoptimalkan performa kapal untuk aplikasi spesifik. Keduanya terus memainkan peran penting dalam membentuk masa depan industri maritim, menawarkan solusi yang disesuaikan untuk tantangan navigasi dan operasional yang semakin kompleks di lautan dunia.
4. Perkembangan *trimaran* dan konfigurasi *multihull* lainnya mewakili langkah signifikan dalam evolusi desain kapal, menawarkan solusi inovatif untuk berbagai tantangan dalam industri maritim. Keunggulan utama desain-desain ini terletak pada kemampuan mereka untuk mengoptimalkan *trade-off* antara stabilitas, efisiensi hidrodinamis, dan kapasitas muatan. *trimaran*, dengan kombinasi uniknya antara performa kecepatan tinggi dan stabilitas yang superior, telah menemukan aplikasi yang luas dari kapal perang hingga feri penumpang. Keberhasilan implementasi *trimaran* dalam berbagai peran ini menunjukkan potensinya untuk merevolusi aspek-aspek tertentu dari desain kapal dan operasi maritim. Sementara itu, konfigurasi *multihull* yang lebih eksperimental

seperti quadrimaran, pentamaran, dan SWAQH terus mendorong batas-batas inovasi dalam arsitektur kapal. Meskipun beberapa dari konsep ini mungkin tidak melihat adopsi luas dalam waktu dekat, mereka menyediakan wawasan berharga ke dalam kemungkinan masa depan desain kapal dan menginspirasi pendekatan.

5. Inovasi terbaru dalam teknologi propulsi, seperti *surface-piercing propellers*, *rim-driven propulsors*, dan *foil-assisted propulsion*, membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja kapal *multihull*. Integrasi teknologi ini dengan analisis CFD yang canggih dan metode optimasi modern memungkinkan desainer untuk menciptakan sistem propulsi yang semakin efisien dan ramah lingkungan. Tantangan ke depan dalam desain propulsi *multihull* meliputi pengembangan sistem yang lebih hemat energi, pengurangan emisi, dan peningkatan keandalan operasional. Dengan terus berkembangnya teknologi dan metode analisis, kita dapat mengharapkan inovasi lebih lanjut yang akan mendorong peningkatan efisiensi dan kinerja kapal *multihull* di masa depan, memainkan peran penting dalam evolusi industri maritim yang berkelanjutan.
6. Manajemen stabilitas dan *trim* pada kapal *multihull* merupakan aspek kritis yang memerlukan pemahaman mendalam tentang hidrodinamika, dinamika kapal, dan teknologi kontrol modern. Karakteristik unik *multihull*, seperti stabilitas melintang yang superior namun sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan *trim*, memerlukan pendekatan yang berbeda dari kapal *monohull* konvensional. Penggunaan teknologi canggih seperti sistem *ballast* aktif, *foil* yang dapat disesuaikan, dan sistem *ride control* telah secara signifikan meningkatkan kemampuan untuk mengoptimalkan stabilitas dan *trim* dalam berbagai kondisi operasional. Namun, tantangan seperti risiko *capsize* pada sudut kemiringan ekstrim dan manajemen energi untuk sistem kontrol aktif tetap menjadi area fokus untuk pengembangan lebih lanjut. Integrasi analisis data *real-time*, *machine learning*, dan sistem prediksi cuaca *onboard* menandai arah masa depan dalam manajemen stabilitas dan *trim multihull*, menjanjikan peningkatan lebih lanjut dalam keamanan, efisiensi, dan kinerja operasional kapal-kapal ini.

BAB V

KAPAL HYDROFOIL

5.1 Pendahuluan

Kapal *hydrofoil* merupakan salah satu inovasi paling menarik dalam dunia perkapalan, menggabungkan prinsip-prinsip aerodinamika dengan desain kapal konvensional untuk menciptakan moda transportasi laut yang cepat dan efisien. Bab ini akan mengeksplorasi secara mendalam tentang kapal *hydrofoil*, sebuah jenis kapal yang menggunakan sayap bawah air atau "*foil*" untuk mengangkat badan kapal di atas permukaan air saat bergerak dengan kecepatan tinggi. Konsep ini, yang pertama kali dikembangkan pada awal abad ke-20, telah mengalami evolusi signifikan dan kini menjadi solusi yang menjanjikan untuk transportasi laut cepat di berbagai aplikasi, mulai dari *ferry* penumpang hingga kapal patroli militer.

Pembahasan dalam bab ini akan menyelami dua jenis utama kapal *hydrofoil*: *deeply submerged hydrofoil* dan *surface piercing hydrofoil*. Masing-masing jenis ini memiliki karakteristik unik yang mempengaruhi performa, stabilitas, dan aplikasinya. Analisis akan mencakup prinsip kerja keduanya, desain *foil* dan *strut* yang kritis untuk operasi yang efisien, serta sistem kontrol dan stabilisasi yang kompleks yang memungkinkan kapal-kapal ini beroperasi dengan aman dan nyaman bahkan dalam kondisi laut yang menantang.

Selanjutnya, eksplorasi akan dilakukan terhadap aspek-aspek penting dari performa kapal *hydrofoil*, termasuk proses *take-off* dan *landing* yang krusial, serta desain *hull* yang unik yang diperlukan untuk mendukung operasi *foil*. Perbandingan kinerja antara kapal *hydrofoil* dengan jenis kapal lainnya akan memberikan wawasan tentang kelebihan dan keterbatasan teknologi ini, serta aplikasi potensialnya dalam berbagai sektor maritim.

Bab ini juga akan membahas sistem propulsi khusus yang dibutuhkan untuk menggerakkan kapal *hydrofoil*, mengingat kebutuhan daya dan efisiensi yang unik dari jenis kapal ini. Tantangan-tantangan dalam pemeliharaan dan operasi kapal

hydrofoil akan diulas, yang memerlukan pertimbangan khusus dibandingkan dengan kapal konvensional. Terakhir, pembahasan akan mencakup perkembangan terbaru dalam teknologi *hydrofoil* dan potensi masa depannya dalam industri maritim.

Melalui pembahasan komprehensif ini, pembaca akan mendapatkan pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip fisika di balik operasi kapal *hydrofoil*, kompleksitas desain dan rekayasanya, serta peran potensialnya dalam membentuk masa depan transportasi laut. Bab ini tidak hanya akan memberikan landasan teoritis yang kuat, tetapi juga wawasan praktis tentang aplikasi dan tantangan nyata dalam pengembangan dan pengoperasian kapal *hydrofoil* modern.

5.2 Deeply Submerged Hydrofoil

Deeply submerged hydrofoil merepresentasikan puncak inovasi dalam teknologi kapal cepat, menggabungkan prinsip-prinsip aerodinamika dan hidrodinamika untuk mencapai kinerja yang luar biasa di perairan. Subbab ini akan mengeksplorasi secara mendalam aspek-aspek kunci dari teknologi ini, mulai dari prinsip dasar operasinya hingga desain canggih dan sistem kontrol yang memungkinkan kapal ini "terbang" di atas air dengan kecepatan tinggi dan efisiensi yang belum pernah terjadi sebelumnya.

5.2.1 Prinsip Kerja

Prinsip kerja *deeply submerged hydrofoil* didasarkan pada konsep *lift* hidrodinamik, serupa dengan prinsip yang digunakan pada sayap pesawat terbang. Ketika kapal bergerak maju, air mengalir di sekitar *foil* yang sepenuhnya terendam, menciptakan area bertekanan rendah di atas *foil* dan area bertekanan tinggi di bawahnya. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya angkat vertikal yang, ketika cukup besar, mampu mengangkat sebagian besar badan kapal ke atas permukaan air.

Proses "*take-off*" pada kapal *hydrofoil* merupakan fase transisi kritis yang melibatkan dinamika kompleks. Saat kapal mulai bergerak dari posisi diam, ia beroperasi seperti kapal *displacement* konvensional, dengan seluruh lambungnya terendam dalam air.

Seiring peningkatan kecepatan, gaya angkat yang dihasilkan oleh *foil* mulai meningkat secara kuadratik. Pada kecepatan kritis tertentu, yang biasanya disebut sebagai "*hump speed*", gaya angkat menjadi cukup besar untuk mulai mengangkat lambung kapal dari air. Fase ini ditandai dengan peningkatan signifikan dalam hambatan total kapal karena kombinasi hambatan hidrodinamik dari lambung yang masih sebagian terendam dan hambatan aerodinamik dari *foil*.

Ketika kecepatan terus meningkat melampaui "*hump speed*", lebih banyak bagian lambung yang terangkat dari air, secara drastis mengurangi hambatan hidrodinamik. Pada titik ini, kapal memasuki mode "*foilborne*" penuh, di mana hampir seluruh berat kapal ditopang oleh gaya angkat hidrodinamik yang dihasilkan oleh *foil*. Dalam kondisi ini, hambatan total kapal menurun secara signifikan, memungkinkan peningkatan kecepatan lebih lanjut dengan input daya yang relatif kecil.

Keunikan *deeply submerged hydrofoil* terletak pada posisi *foil* nya yang tetap sepenuhnya terendam bahkan saat kapal beroperasi pada kecepatan jelajah. Konfigurasi ini menawarkan beberapa keuntungan signifikan dibandingkan dengan desain *surface-piercing*:

1. Stabilitas yang lebih baik: *Foil* yang sepenuhnya terendam kurang terpengaruh oleh gelombang permukaan, memberikan perjalanan yang lebih stabil dan nyaman, terutama dalam kondisi laut yang bergelombang.
2. Efisiensi hidrodinamik yang lebih tinggi: Tanpa gangguan dari permukaan air, *foil* dapat beroperasi dalam aliran yang lebih bersih dan dapat diprediksi, menghasilkan rasio *lift-to-drag* yang lebih baik.
3. Pengurangan efek *spray* dan kavitasi: Dengan *foil* yang beroperasi jauh di bawah permukaan, masalah yang terkait dengan pembentukan *spray* dan kavitasi dapat diminimalkan, lebih lanjut meningkatkan efisiensi dan mengurangi erosi pada *foil*.
4. Kemampuan operasi dalam berbagai kondisi laut: *Deeply submerged foil* memungkinkan kapal untuk mempertahankan

kinerja tingginya dalam berbagai kondisi laut, termasuk saat menghadapi gelombang yang cukup besar.

Namun, desain ini juga menghadirkan tantangan tersendiri, terutama dalam hal kompleksitas sistem kontrol yang diperlukan untuk mempertahankan stabilitas dan ketinggian yang tepat di atas permukaan air.

5.2.2 Desain Foil dan Strut

Desain *foil* dan *strut* pada *deeply submerged hydrofoil* merupakan aspek krusial yang memerlukan optimalisasi yang cermat untuk mencapai kinerja yang diinginkan. Proses desain melibatkan pertimbangan berbagai faktor, termasuk hidrodinamika, kekuatan struktural, kavitasi, dan interaksi dinamis antara komponen-komponen ini dengan badan kapal dan lingkungan operasinya.

1. Desain Foil

Profil *foil* untuk *deeply submerged hydrofoil* biasanya mengadopsi bentuk yang mirip dengan *airfoil* pesawat terbang, namun dengan modifikasi khusus untuk operasi dalam air. Beberapa pertimbangan utama dalam desain *foil* meliputi:

- a. Distribusi tekanan: Profil *foil* harus dirancang untuk mengoptimalkan distribusi tekanan sepanjang permukaan atas dan bawah, memaksimalkan *lift* sambil meminimalkan *drag*. Ini sering melibatkan penggunaan teknik desain komputasi canggih seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD).
- b. Ketahanan terhadap kavitasi: Kavitasi, yaitu pembentukan gelembung uap air akibat penurunan tekanan lokal, dapat menyebabkan erosi pada permukaan *foil* dan penurunan kinerja. Desain *foil* modern sering menggunakan profil *supercavitating* atau *partially cavitating* yang dirancang khusus untuk mengelola dan mengendalikan kavitasi.
- c. *Aspect ratio*: Rasio antara panjang dan lebar *foil* (*aspect ratio*) mempengaruhi efisiensi hidrodinamik. *Foil* dengan *aspect ratio* tinggi umumnya lebih efisien tetapi memerlukan pertimbangan struktural yang lebih kompleks.

- d. *Sweep* dan *dihedral*: Penerapan *sweep* (sudut antara garis seperempat chord *foil* dengan garis tegak lurus sumbu longitudinal kapal) dan *dihedral* (sudut antara *foil* dan bidang horizontal) dapat meningkatkan stabilitas dan kinerja dalam berbagai kondisi operasi.
- e. *Flap* dan kontrol permukaan: Banyak desain modern mengintegrasikan *flap* atau permukaan kontrol lainnya pada *foil* untuk memungkinkan penyesuaian *lift* yang lebih dinamis selama operasi.

2. Desain *Strut*

Strut, yang menghubungkan *foil* dengan badan kapal, harus dirancang untuk menahan beban yang signifikan sambil meminimalkan hambatan tambahan. Pertimbangan utama dalam desain *strut* meliputi:

- a. Profil hidrodinamis: *Strut* modern sering menggunakan profil hidrodinamis untuk mengurangi *drag*. Ini bisa berupa profil simetris atau asimetris tergantung pada lokasi dan fungsi spesifik *strut*.
- b. Kekuatan dan kekakuan: *Strut* harus cukup kuat untuk menahan beban vertikal dan lateral yang signifikan, serta momen lentur dan torsi. Analisis elemen hingga (FEA) sering digunakan untuk mengoptimalkan desain struktural.
- c. *Retractability*: Beberapa desain kapal *hydrofoil* mengincorporasikan sistem *strut* yang dapat ditarik untuk memungkinkan operasi dalam mode *displacement* konvensional ketika diperlukan.
- d. Integrasi sistem kontrol: *Strut* sering berfungsi sebagai housing untuk aktuator dan komponen sistem kontrol lainnya, memerlukan pertimbangan tambahan dalam desainnya.

3. Konfigurasi *Foil*

Konfigurasi *foil* pada *deeply submerged hydrofoil* biasanya terdiri dari satu set *foil* di bagian depan (*bow foils*) dan satu set di bagian belakang (*stern foils*). Konfigurasi ini, yang dikenal sebagai "*canard configuration*", menawarkan beberapa keuntungan:

- a. Kontrol *pitch* yang lebih baik: *Foil* depan yang lebih kecil memberikan kontrol yang lebih presisi atas sikap longitudinal kapal.
- b. Stabilitas yang ditingkatkan: Konfigurasi ini secara inheren lebih stabil, dengan *foil* belakang yang lebih besar bertindak sebagai stabilisator.
- c. Efisiensi hidrodinamik: Pemisahan *foil* memungkinkan masing-masing *foil* beroperasi dalam aliran air yang relatif tidak terganggu.
- d. Fleksibilitas operasional: Konfigurasi ini memungkinkan penyesuaian yang lebih baik terhadap perubahan kondisi beban dan laut.

4. Material dan Konstruksi

Pemilihan material untuk *foil* dan *strut* melibatkan keseimbangan antara kekuatan, berat, dan ketahanan terhadap korosi dan erosi. Beberapa material yang umum digunakan meliputi:

- a. Paduan titanium: Menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang sangat baik dan ketahanan korosi yang unggul, tetapi mahal.
- b. *Stainless steel*: Kuat dan tahan korosi, tetapi lebih berat dibandingkan dengan alternatif lainnya.
- c. Komposit canggih: Material seperti *Carbon Fiber Reinforced Polymers* (CFRP) semakin banyak digunakan karena bobotnya yang ringan dan kekuatannya yang tinggi, meskipun dengan biaya yang lebih tinggi dan tantangan dalam hal reparasi.
- d. Aluminium: Digunakan dalam beberapa aplikasi karena bobotnya yang ringan dan biaya yang lebih rendah, tetapi memerlukan perlindungan yang lebih besar terhadap korosi.

Konstruksi *foil* dan *strut* sering melibatkan teknik manufaktur canggih seperti pembentukan superplastik untuk komponen titanium, atau *lay-up* otomatis untuk struktur komposit, untuk mencapai bentuk yang kompleks dengan toleransi yang ketat yang diperlukan untuk kinerja optimal.

5.2.3 Sistem Kontrol dan Stabilisasi

Sistem kontrol dan stabilisasi merupakan jantung dari operasi *deeply submerged hydrofoil* yang efektif dan aman. Kompleksitas sistem ini mencerminkan tantangan yang inheren dalam mengendalikan kapal yang "terbang" di atas permukaan air pada kecepatan tinggi. Sistem kontrol modern menggabungkan sensor canggih, algoritma kontrol yang kompleks, dan aktuator yang responsif untuk memastikan stabilitas dan kenyamanan dalam berbagai kondisi operasi.

1. Komponen Sistem Kontrol

Sistem kontrol *deeply submerged hydrofoil* biasanya terdiri dari beberapa komponen utama:

a. Sensor:

- Sensor ketinggian: Mengukur jarak antara lambung kapal dan permukaan air.
- *Accelerometers* dan *gyroscopes*: Mendeteksi gerakan *pitch*, *roll*, dan *yaw* kapal.
- Sensor kecepatan: Mengukur kecepatan kapal relatif terhadap air.
- Sensor beban: Memantau distribusi beban di kapal.
- Sensor kondisi laut: Mengukur tinggi dan periode gelombang.

b. Unit Pemrosesan Pusat:

Komputer kontrol yang menjalankan algoritma kontrol kompleks untuk memproses data sensor dan menentukan tindakan kontrol yang diperlukan.

c. Aktuator:

- Sistem hidrolik atau elektromekanis untuk menyesuaikan posisi dan sudut *foil*.
- Kontrol throttle mesin untuk mengatur daya dan kecepatan.

d. Sistem *Feedback*:

Mekanisme untuk memverifikasi bahwa tindakan kontrol yang dimaksudkan telah dilaksanakan dengan benar.

2. Fungsi Kontrol Utama

Sistem kontrol *deeply submerged hydrofoil* harus mengelola beberapa fungsi kritis:

- a. Kontrol Ketinggian:
 - Mempertahankan ketinggian optimal kapal di atas permukaan air.
 - Menyesuaikan ketinggian berdasarkan kondisi laut dan kecepatan kapal.
- b. Stabilisasi *Roll*:

Mendeteksi dan mengoreksi gerakan *roll* menggunakan *foil* yang dapat digerakkan secara independen di kedua sisi kapal.
- c. Kontrol *Pitch*:

Mengatur sikap longitudinal kapal untuk kenyamanan penumpang dan efisiensi hidrodinamik.
- d. *Ride Smoothing*:

Meredam efek gelombang dan gangguan lainnya untuk meningkatkan kenyamanan perjalanan.
- e. Manajemen *Take-off* dan *Landing*:

Mengontrol transisi halus antara mode *displacement* dan *foilborne*.
- f. Adaptasi terhadap Kondisi Laut:

Menyesuaikan parameter kontrol berdasarkan kondisi laut yang berubah.

3. Algoritma Kontrol Canggih

Sistem kontrol modern untuk *deeply submerged hydrofoil* sering menggabungkan algoritma kontrol canggih:

- a. Kontrol Adaptif:

Menyesuaikan parameter kontrol secara *real-time* berdasarkan perubahan kondisi operasi.
- b. Kontrol Prediktif Model (MPC):

Menggunakan model dinamik kapal untuk memprediksi dan mengoptimalkan tindakan kontrol masa depan.
- c. *Fuzzy Logic Control*:

Menangani ketidakpastian dan *non-linearitas* dalam dinamika kapal.
- d. *Artificial Neural Networks* (ANN):

Belajar dan beradaptasi dengan pola operasi untuk meningkatkan kinerja kontrol dari waktu ke waktu.

e. *Hybrid Control Systems*:

Menggabungkan berbagai teknik kontrol untuk mengoptimalkan kinerja dalam berbagai skenario operasi.

4. Tantangan dalam Sistem Kontrol

Beberapa tantangan utama dalam pengembangan dan implementasi sistem kontrol untuk *deeply submerged hydrofoil* meliputi:

a. Kompleksitas Dinamik:

Mengelola interaksi *non-linear* yang kompleks antara kapal, *foil*, dan lingkungan air.

b. Ketahanan terhadap Kegagalan:

Merancang sistem dengan redundansi dan mekanisme fail-safe untuk menjamin keselamatan dalam kasus kegagalan komponen.

c. Optimalisasi Kinerja:

Menyeimbangkan berbagai tujuan seperti kestabilan, efisiensi energi, dan kenyamanan penumpang.

d. Adaptasi Lingkungan:

Merancang sistem yang dapat beroperasi secara efektif dalam berbagai kondisi laut, dari perairan tenang hingga gelombang tinggi.

e. Integrasi Sensor:

Menggabungkan data dari berbagai sensor dengan tingkat keandalan dan latensi yang berbeda untuk membuat keputusan kontrol yang akurat dan tepat waktu.

f. Manajemen Energi:

Optimalisasi penggunaan energi untuk sistem kontrol dan aktuator, terutama pada kapal dengan sistem propulsi elektrik atau *hybrid*.

g. *Human-Machine Interface*:

Merancang antarmuka yang intuitif dan informatif untuk operator kapal, memungkinkan intervensi manual bila diperlukan tanpa mengganggu operasi otomatis.

5. Perkembangan Terbaru dalam Teknologi Kontrol

Beberapa inovasi terbaru dalam teknologi kontrol untuk *deeply submerged hydrofoil* meliputi:

a. *Machine learning* dan AI:

Penggunaan algoritma pembelajaran mendalam untuk meningkatkan prediksi kondisi laut dan optimalisasi rute.

Sistem kontrol yang dapat "belajar" dari pengalaman operasional untuk meningkatkan kinerja dari waktu ke waktu.

b. *Digital Twin Technology*:

Pengembangan model digital yang sangat akurat dari kapal dan sistem kontrolnya, memungkinkan simulasi dan optimalisasi yang lebih baik.

c. *Advanced Sensor Fusion*:

Integrasi data dari berbagai sumber sensor, termasuk radar gelombang, satelit, dan stasiun cuaca, untuk meningkatkan akurasi prediksi dan kontrol.

d. *Distributed Control Systems*:

Implementasi arsitektur kontrol terdistribusi yang meningkatkan keandalan dan fleksibilitas sistem.

e. *Augmented Reality* untuk Operasi:

Penggunaan teknologi AR untuk memberikan informasi *real-time* kepada operator tentang kondisi kapal dan lingkungan.

5.3 *Surface Piercing Hydrofoil*

Surface piercing hydrofoil merepresentasikan sebuah inovasi penting dalam teknologi kapal cepat, menggabungkan keuntungan dari desain *hydrofoil* dengan fleksibilitas operasional yang unik. Subbab ini akan mengeksplorasi secara mendalam berbagai aspek dari teknologi *surface piercing hydrofoil*, mulai dari prinsip dasar hingga aplikasi terkini dan perkembangan masa depan.

5.3.1 Karakteristik Operasional

Surface piercing hydrofoil memiliki beberapa karakteristik operasional yang membedakannya dari jenis kapal lainnya:

1. Konfigurasi *Foil*:

Surface piercing hydrofoil menggunakan konfigurasi *foil* yang unik, biasanya berbentuk V atau U *inverted*. Dalam konfigurasi ini, bagian atas *foil* menembus permukaan air saat kapal beroperasi pada kecepatan jelajah. Bentuk ini memiliki beberapa keuntungan:

- a. *Self-Adjusting Depth*: Ketika kecepatan atau beban kapal berubah, bagian *foil* yang tercelup air secara otomatis menyesuaikan. Ini memberikan mekanisme stabilisasi alami yang sangat efektif.
- b. *Reduced Wetted Surface*: Pada kecepatan tinggi, sebagian besar *foil* berada di atas permukaan air, mengurangi luas permukaan basah dan konsekuensinya mengurangi *drag*.
- c. *Ventilation*: Udara dapat mengalir di sekitar bagian atas *foil*, mengurangi risiko kavitasi dan meningkatkan efisiensi pada kecepatan sangat tinggi.

2. *Self-stabilizing*:

Sifat *self-stabilizing* dari *surface piercing hydrofoil* adalah salah satu keunggulan utamanya. Mekanisme ini bekerja sebagai berikut:

- a. *Roll Stability*: Jika kapal miring ke satu sisi, *foil* pada sisi tersebut akan tercelup lebih dalam, menghasilkan *lift* yang lebih besar dan cenderung mengembalikan kapal ke posisi tegak.
- b. *Pitch Stability*: Perubahan sudut *pitch* kapal akan mengubah area *foil* yang tercelup, secara otomatis menyesuaikan distribusi *lift* antara *foil* depan dan belakang.
- c. *Heave Stability*: Perubahan ketinggian kapal akan mengubah area *foil* yang tercelup, secara otomatis menyesuaikan total *lift* yang dihasilkan.

Karakteristik *self-stabilizing* ini mengurangi kebutuhan akan sistem kontrol aktif yang kompleks, menyederhanakan desain dan meningkatkan keandalan.

3. Operasi di Perairan Dangkal:

Kemampuan untuk beroperasi di perairan dangkal adalah keuntungan signifikan dari *surface piercing hydrofoil*. Ini memungkinkan:

- a. Akses ke Pelabuhan: Kapal dapat mengakses pelabuhan dan perairan pesisir yang mungkin terlalu dangkal untuk *deeply submerged hydrofoil*.

- b. Fleksibilitas Rute: Memungkinkan pengoperasian kapal pada rute yang melibatkan perairan dengan kedalaman bervariasi.
- c. Keamanan Operasional: Risiko tabrakan dengan objek bawah air berkurang karena sebagian *foil* berada di atas permukaan.

4. Efisiensi pada Kecepatan Tinggi:

Surface piercing hydrofoil menunjukkan efisiensi yang luar biasa pada kecepatan sangat tinggi. Ini disebabkan oleh:

- a. *Reduced Wetted Surface*: Sebagian besar *foil* berada di atas air, mengurangi *drag* secara signifikan.
- b. *Ventilation*: Aliran udara di sekitar bagian atas *foil* mengurangi *drag* dan risiko kavitasi.
- c. *Wave Piercing*: *Foil* yang menembus permukaan cenderung "memotong" gelombang, mengurangi resistensi gelombang.

5. Ketahanan terhadap Debris:

Konfigurasi *surface piercing* memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap debris mengambang:

- a. *Deflection*: Bagian *foil* yang menembus permukaan cenderung mendorong debris ke samping.
- b. *Visibility*: Operator dapat lebih mudah melihat dan menghindari debris besar.
- c. *Reduced Impact*: Jika terjadi tabrakan dengan debris, dampaknya cenderung kurang parah karena kecepatan relatif yang lebih rendah di dekat permukaan.

5.3.2 Performa Take-off dan Landing

Proses *take-off* dan *landing* pada *surface piercing hydrofoil* memiliki karakteristik yang unik dan penting untuk dipahami:

1. Take-off:

Proses *take-off* pada *surface piercing hydrofoil* melibatkan beberapa fase:

- a. *Displacement Mode*: Pada kecepatan rendah, kapal beroperasi seperti kapal *displacement* konvensional, dengan seluruh *foil* terendam.
- b. *Pre-Planing*: Saat kecepatan meningkat, kapal mulai naik di atas gelombang bow-nya sendiri, mengurangi *wetted surface* dan *drag*.

- c. *Transition*: Pada kecepatan kritis tertentu, *lift* yang dihasilkan oleh *foil* mulai mengangkat badan kapal. Ini adalah fase kritis di mana *drag* mencapai puncaknya.
- d. *Foilborne*: Ketika kecepatan mencapai titik tertentu, bagian atas *foil* mulai menembus permukaan air, menandai transisi ke mode *foilborne* penuh.

Proses *take-off* pada *surface piercing hydrofoil* biasanya terjadi pada kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan *deeply submerged hydrofoil*. Ini memberikan beberapa keuntungan:

- a. Konsumsi bahan bakar yang lebih rendah selama akselerasi
- b. Waktu *take-off* yang lebih singkat
- c. Kemampuan untuk mencapai mode *foilborne* di perairan yang lebih dangkal

2. Landing:

Proses *landing* pada *surface piercing hydrofoil* juga memiliki karakteristik unik:

- a. *Gradual Immersion*: Saat kecepatan berkurang, bagian *foil* yang tercelup air secara bertahap bertambah.
- b. *Smooth Transition*: Perubahan gradual ini memberikan transisi yang lebih halus ke mode *displacement* dibandingkan dengan *deeply submerged hydrofoil*.
- c. *Extended Control*: Operator memiliki kontrol yang lebih baik selama proses *landing*, memungkinkan manuver yang lebih presisi saat mendekati dermaga.
- d. *Adjustable trim* : Beberapa desain memungkinkan penyesuaian *trim foil* selama proses *landing* untuk mengoptimalkan stabilitas dan kontrol.

3. Stabilitas Selama Transisi:

Surface piercing hydrofoil umumnya memiliki stabilitas yang lebih baik selama fase transisi:

- a. *Natural Damping*: Konfigurasi *foil* memberikan efek peredaman alami terhadap gerakan *pitch* dan *roll*.
- b. *Gradual lift Change*: Perubahan *lift* yang lebih gradual selama transisi mengurangi kemungkinan terjadinya osilasi atau ketidakstabilan.
- c. *Predictable Behavior*: Karakteristik *self-stabilizing* membuat perilaku kapal lebih dapat diprediksi selama transisi.

5.3.3 Desain *Hull* dan *Foil*

Desain *hull* dan *foil* pada *surface piercing hydrofoil* merupakan hasil dari optimalisasi yang kompleks untuk mencapai kinerja optimal:

1. Desain *Hull*:

Hull surface piercing hydrofoil dirancang dengan beberapa pertimbangan khusus:

- a. *Lightweight Construction*: *Hull* biasanya dibuat dari material ringan seperti aluminium atau komposit untuk mengurangi berat total kapal.
- b. *High Strength*: Meskipun ringan, *hull* harus cukup kuat untuk menahan beban dinamis selama operasi *foilborne* dan *impacts* saat menembus gelombang.
- c. *Hydrodynamic Shape*: Bentuk *hull* dioptimalkan untuk mengurangi *drag* saat beroperasi dalam mode *displacement* dan untuk memfasilitasi transisi yang mulus ke mode *foilborne*.
- d. *Stepped Hull*: Beberapa desain menggunakan *hull* bertingkat (*stepped hull*) untuk membantu memecah aliran air dan mengurangi *drag* selama fase transisi.
- e. *Spray Rails*: Penggunaan *spray rails* dapat membantu mengurangi *spray* dan meningkatkan stabilitas pada kecepatan menengah.

2. Desain *Foil*:

Foil pada *surface piercing hydrofoil* memiliki desain yang sangat spesifik:

- a. *Asymmetric Profile*: *Foil* biasanya memiliki profil asimetris, dengan permukaan bawah yang lebih datar untuk menghasilkan *lift* yang lebih besar.
- b. *Sweep and Dihedral*: Sudut *sweep* dan *dihedral* pada *foil* dioptimalkan untuk meningkatkan stabilitas dan mengurangi sensitivitas terhadap gelombang.
- c. *Variable Section*: Bagian *foil* yang menembus permukaan air sering memiliki profil yang berbeda dari bagian yang selalu terendam untuk mengoptimalkan kinerja.
- d. *Material Selection*: Material *foil* harus tahan terhadap korosi dan kavitasi. Titanium dan *stainless steel high-grade* sering digunakan, meskipun komposit canggih juga mulai diterapkan.

- e. *Surface Finish: Finishing* permukaan *foil* sangat penting untuk mengurangi *drag* dan risiko kavitasi.

3. Konfigurasi *Foil*:

Konfigurasi *foil* pada *surface piercing hydrofoil* dapat bervariasi:

- a. *Split System*: Sistem dengan *foil* depan dan belakang terpisah, memungkinkan distribusi *lift* yang lebih merata dan kontrol *pitch* yang lebih baik.
- b. *Canard System*: Sistem dengan *foil* kecil di depan dan *foil* utama di belakang, memberikan stabilitas longitudinal yang baik.
- c. *Adjustable Foils*: Beberapa desain menggunakan *foil* yang dapat diatur untuk mengoptimalkan kinerja pada berbagai kondisi operasi.
- d. *Interceptors*: Penggunaan interceptor pada *trailing edge foil* dapat memberikan kontrol tambahan atas *lift* dan *drag*.

4. Sistem Kontrol:

Meskipun lebih sederhana dibandingkan dengan *deeply submerged hydrofoil*, *surface piercing hydrofoil* modern sering dilengkapi dengan sistem kontrol aktif:

- a. *Trim Tabs*: Untuk penyesuaian halus terhadap sikap longitudinal kapal.
- b. *Flaps*: Untuk mengontrol *lift* dan *drag* pada *foil*.
- c. *Active Stabilizers*: Sistem stabilisasi aktif untuk meningkatkan kenyamanan pada kondisi laut bergelombang.
- d. *Ride Control Systems*: Sistem kontrol canggih yang mengintegrasikan data dari berbagai sensor untuk mengoptimalkan performa dan kenyamanan.

5.3.4 Tantangan dan Solusi dalam Pengembangan *Surface Piercing Hydrofoil*

Pengembangan dan operasi *surface piercing hydrofoil* menghadapi beberapa tantangan teknis yang signifikan:

1. Kavitasi:

Kavitasi tetap menjadi salah satu tantangan utama dalam desain *surface piercing hydrofoil*:

- a. Mekanisme: Kavitasi terjadi ketika tekanan lokal pada *foil* turun di bawah tekanan uap air, menyebabkan pembentukan gelembung uap yang dapat menyebabkan erosi dan penurunan kinerja.

- b. Lokasi Kritis: Pada *surface piercing hydrofoil*, kavitasi sering terjadi di dekat permukaan air di mana tekanan atmosfer dan hidrostatik rendah.
- c. Solusi Desain:
 - Penggunaan material tahan kavitasi seperti *stainless steel* martensitik atau paduan berbasis nikel.
 - Desain profil *foil* yang dioptimalkan untuk mengurangi area tekanan rendah.
 - Penerapan teknik ventilasi aktif untuk mengurangi risiko kavitasi.
- d. Analisis Lanjutan: Penggunaan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan pengujian model skala membantu dalam memprediksi dan mengurangi kavitasi.

2. **Spray Generation:**

Generasi *spray* yang berlebihan dapat menjadi masalah pada *surface piercing hydrofoil*:

- a. Implikasi: *Spray* yang berlebihan dapat mengurangi visibilitas, meningkatkan *drag*, dan mempengaruhi kenyamanan penumpang.
- b. Mekanisme: *Spray* dihasilkan saat *foil* menembus permukaan air pada kecepatan tinggi.
- c. Solusi Desain:
 - Penggunaan *spray deflectors* untuk mengarahkan *spray* jauh dari kapal.
 - Optimalisasi bentuk *foil* dan sudut masuk untuk meminimalkan pembentukan *spray*.
 - Implementasi *chines* dan *spray rails* pada *hull* untuk mengontrol aliran air.
- d. Analisis: Penggunaan simulasi CFD *multifase* dan pengujian *towing tank* membantu dalam mengoptimalkan desain untuk pengurangan *spray*.

3. **Sensitivitas terhadap Gelombang:**

Surface piercing hydrofoil dapat lebih sensitif terhadap gelombang permukaan dibandingkan dengan *deeply submerged hydrofoil*:

- a. Mekanisme: Gelombang mempengaruhi area *foil* yang tercelup, menyebabkan fluktuasi pada gaya *lift*.

- b. Implikasi: Sensitivitas ini dapat mempengaruhi kenyamanan perjalanan dan stabilitas pada kondisi laut bergelombang.
- c. Solusi:
 - Pengembangan sistem kontrol aktif yang dapat memprediksi dan merespons perubahan kondisi gelombang.
 - Optimalisasi geometri *foil* untuk meningkatkan stabilitas dalam berbagai kondisi gelombang.
 - Implementasi *ride control systems* yang menggunakan sensor dan aktuator canggih untuk menstabilkan kapal.
- d. Penelitian Lanjutan: Pengembangan algoritma prediksi gelombang dan sistem kontrol adaptif terus dilakukan untuk meningkatkan performa dalam kondisi bergelombang.

4. Efisiensi pada Kecepatan Menengah:

Surface piercing hydrofoil mungkin kurang efisien pada kecepatan menengah dibandingkan dengan *deeply submerged hydrofoil*:

- a. Mekanisme: Pada kecepatan menengah, sebagian besar *foil* masih terendam, namun belum mencapai kecepatan optimal untuk *lift* maksimum.
- b. Implikasi: Hal ini dapat menyebabkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi dan jangkauan operasional yang lebih terbatas pada kecepatan menengah.
- c. Solusi:
 - Pengembangan desain *foil* hibrid yang mengkombinasikan elemen *surface piercing* dan *submerged* untuk kinerja yang lebih baik pada berbagai kecepatan.
 - Implementasi sistem propulsi variabel yang dapat dioptimalkan untuk berbagai operasi.
 - Penggunaan sistem kontrol cerdas yang dapat menyesuaikan konfigurasi *foil* berdasarkan kecepatan dan kondisi laut.
- d. Penelitian Berkelanjutan: Studi CFD dan pengujian model terus dilakukan untuk mengoptimalkan desain yang dapat memberikan efisiensi tinggi pada rentang kecepatan yang lebih luas.

5. Kompleksitas Struktural:

Desain struktural *foil* yang menembus permukaan air menghadirkan tantangan teknis yang signifikan:

- a. Beban Dinamis: *Foil* harus menahan beban yang berfluktuasi akibat perubahan *lift* dan *drag* saat menembus permukaan air.

- b. *Impact Loads*: Kemungkinan terjadi beban *impact* yang tinggi saat *foil* menembus gelombang pada kecepatan tinggi.
- c. *Fatigue*: Siklus beban yang berulang dapat menyebabkan kelelahan material, terutama pada titik koneksi antara *foil* dan *hull*.
- d. Solusi:
 - Penggunaan analisis elemen hingga (FEA) untuk mengoptimalkan desain struktural dan distribusi beban.
 - Implementasi material komposit canggih yang menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi dan ketahanan *fatigue* yang baik.
 - Desain sambungan fleksibel antara *foil* dan *hull* untuk meredam beban *impact*.
 - Pengembangan sistem *monitoring* struktural *real-time* untuk mendeteksi potensi kerusakan sebelum menjadi kritis.

5.3.5 Aplikasi dan Perkembangan Terkini

Surface piercing hydrofoil telah menemukan aplikasi dalam berbagai bidang dan terus mengalami perkembangan:

1. Kapal Patroli Militer:

- a. Keunggulan: Kecepatan tinggi, manuverabilitas baik, dan kemampuan operasi di perairan dangkal.
- b. Aplikasi: Patroli perbatasan, intersepsi cepat, dan misi SAR (*Search and Rescue*).
- c. Perkembangan: Integrasi sistem persenjataan canggih dan teknologi *stealth*.

2. Ferry Penumpang:

- a. Keuntungan: Peningkatan kecepatan dan efisiensi pada rute jarak pendek dan menengah.
- b. Implementasi: Beberapa rute di Eropa dan Asia telah mengadopsi teknologi ini.
- c. Fokus Pengembangan: Peningkatan kapasitas penumpang dan kenyamanan perjalanan.

3. Kapal Rekreasi:

- a. Aplikasi: Desain *surface piercing hydrofoil* diterapkan pada *yacht* dan *speedboat* kinerja tinggi.
- b. Keunggulan: Kecepatan tinggi, efisiensi bahan bakar, dan pengalaman berkendara yang unik.

- c. Tren: Integrasi dengan desain ramah lingkungan dan sistem propulsi alternatif.

4. Kapal Penyelamat:

- a. Manfaat: Kemampuan untuk beroperasi pada kecepatan tinggi dalam berbagai kondisi laut.
- b. Penggunaan: Misi penyelamatan cepat dan evakuasi medis di daerah pesisir.
- c. Inovasi: Pengembangan desain khusus untuk stabilitas dalam kondisi cuaca ekstrem.

Perkembangan terkini dalam teknologi *surface piercing hydrofoil* meliputi:

1. Integrasi dengan Sistem Propulsi Ramah Lingkungan:

- a. Propulsi Elektrik: Eksperimen dengan motor listrik untuk operasi yang lebih bersih dan senyap.
- b. Sistem *Hybrid*: Kombinasi mesin konvensional dengan motor listrik untuk efisiensi optimal.
- c. *Fuel cells*: Penelitian penggunaan sel bahan bakar hidrogen untuk jangkauan operasional yang lebih panjang.

2. Penggunaan Material Komposit Canggih:

- a. *Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)*: Untuk mengurangi berat dan meningkatkan kekuatan struktural.
- b. *Nano-enhanced Composites*: Meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan kavitasi.
- c. *Bio-based Composites*: Eksplorasi material ramah lingkungan untuk komponen tertentu.

3. Sistem Kontrol Berbasis AI:

- a. *Machine Learning Algorithms*: Untuk optimalisasi performa *real-time* berdasarkan kondisi operasi.
- b. *Predictive Maintenance*: Sistem yang dapat memprediksi kebutuhan perawatan berdasarkan data operasional.
- c. *Autonomous Operation*: Pengembangan teknologi untuk operasi *semi-otonomus* atau *fully autonomous*.

4. Desain Hidrodinamis Canggih:

- a. *Topological Optimization*: Penggunaan algoritma optimasi untuk menghasilkan geometri *foil* yang sangat efisien.
- b. *Biomimicry*: Inspirasi dari bentuk alam untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamis.

- c. *4D Printing*: Eksplorasi material yang dapat berubah bentuk untuk adaptasi dinamis terhadap kondisi operasi.

5.4 Perbandingan Kinerja dan Aplikasi *Hydrofoil*

Teknologi *hydrofoil* telah mengalami evolusi signifikan sejak konsepnya pertama kali diperkenalkan oleh Alexander Graham Bell pada awal abad ke-20. Dua jenis utama *hydrofoil* - *deeply submerged* dan *surface piercing* masing-masing memiliki karakteristik kinerja dan aplikasi yang unik. Subbab ini akan mengeksplorasi secara mendalam perbandingan kinerja kedua jenis *hydrofoil* ini serta berbagai aplikasi mereka dalam konteks maritim modern.

5.4.1 Perbandingan Kinerja

Perbandingan kinerja antara *deeply submerged* dan *surface piercing hydrofoil* mencakup beberapa aspek kunci:

1. Efisiensi Hidrodinamis:

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Memiliki efisiensi hidrodinamis yang sangat baik pada kecepatan jelajah, terutama karena minimnya interaksi dengan permukaan air.
- *Drag* yang lebih rendah karena seluruh *foil* berada di bawah permukaan air, menghindari pembentukan gelombang permukaan.
- Kinerja yang lebih stabil dalam berbagai kondisi laut karena *foil* beroperasi di lingkungan yang relatif konsisten di bawah permukaan.
- *Coefisien lift-to-drag* yang lebih tinggi pada kecepatan jelajah, yang berkontribusi pada efisiensi energi yang lebih baik.

b. *Surface Piercing Hydrofoil*:

- Efisiensi hidrodinamis yang sangat baik pada kecepatan tinggi, terutama ketika sebagian besar *foil* telah keluar dari air.
- *Drag* yang lebih rendah pada kecepatan sangat tinggi karena sebagian *foil* berada di atas permukaan air, mengurangi luas permukaan basah.

- Kinerja yang lebih sensitif terhadap kondisi permukaan laut, dengan efisiensi yang dapat bervariasi tergantung pada tinggi gelombang.
- Memiliki keuntungan dalam hal pengurangan kavitasi pada kecepatan sangat tinggi karena bagian atas *foil* terekspos ke udara.

2. Stabilitas dan Kontrol:

a. Deeply Submerged Hydrofoil:

- Stabilitas yang sangat baik dalam berbagai kondisi laut karena *foil* beroperasi di lingkungan yang relatif stabil di bawah permukaan.
- Memerlukan sistem kontrol aktif yang kompleks untuk mempertahankan ketinggian dan sikap yang optimal. Sistem ini biasanya melibatkan sensor canggih, aktuator cepat, dan algoritma kontrol yang *sophisticated*.
- Lebih tahan terhadap gerakan *roll* dan *pitch*, memberikan kenyamanan perjalanan yang lebih baik untuk penumpang.
- Kemampuan untuk mempertahankan kestabilan pada kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan *surface piercing hydrofoil*.

b. Surface Piercing Hydrofoil:

- Memiliki sifat *self-stabilizing* yang inherent. Ketika kapal miring atau bergerak vertikal, perubahan area *foil* yang terendam secara otomatis menyesuaikan gaya *lift* untuk mengembalikan kapal ke posisi stabil.
- Sistem kontrol yang lebih sederhana karena karakteristik *self-stabilizing*-nya, yang dapat mengurangi kompleksitas dan biaya pemeliharaan.
- Lebih sensitif terhadap gelombang permukaan, tetapi memiliki *respons* yang lebih cepat terhadap perubahan kondisi karena feedback langsung dari interaksi *foil* dengan permukaan air.
- Stabilitas lateral yang sangat baik karena konfigurasi V atau U-*shape* dari *foil*.

3. Kinerja Take-off dan Landing:

a. Deeply Submerged Hydrofoil:

- Memerlukan kecepatan *take-off* yang lebih tinggi karena seluruh *foil* harus menghasilkan *lift* yang cukup untuk mengangkat kapal dari air.
 - Transisi yang lebih halus ke mode *foilborne* karena perubahan gradual dalam gaya *lift* saat *foil* mulai mengangkat kapal.
 - Proses *landing* yang memerlukan kontrol yang lebih presisi untuk memastikan kapal kembali ke mode *displacement* dengan aman.
 - Memiliki "*hump speed*" yang lebih tinggi, yaitu kecepatan di mana *drag* mencapai puncaknya sebelum kapal sepenuhnya terangkat.
- b. *Surface Piercing Hydrofoil*:
- Dapat mencapai *take-off* pada kecepatan yang lebih rendah karena *lift* mulai dihasilkan segera setelah *foil* mulai memotong permukaan air.
 - Transisi ke mode *foilborne* yang lebih cepat, yang dapat menghasilkan akselerasi yang lebih tinggi.
 - Proses *landing* yang lebih fleksibel dan dapat dilakukan pada kecepatan yang lebih bervariasi karena karakteristik *self-stabilizing*.
 - "*Hump speed*" yang lebih rendah, memungkinkan transisi yang lebih efisien ke mode *foilborne*.
- 4. Efisiensi Energi:**
- a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:
- Efisiensi energi yang sangat baik pada kecepatan jelajah karena *drag* yang konsisten dan rendah.
 - Konsumsi bahan bakar yang lebih rendah pada operasi jarak jauh karena kemampuan untuk mempertahankan kecepatan optimal dengan input daya yang minimal.
 - Kinerja yang lebih konsisten dalam berbagai kondisi beban, memungkinkan perencanaan konsumsi energi yang lebih akurat.
 - Potensi untuk integrasi dengan sistem propulsi alternatif seperti *fuel cell* lebih mudah karena kebutuhan daya yang lebih stabil.
- b. *Surface Piercing Hydrofoil*:
- Efisiensi energi yang sangat baik pada kecepatan tinggi, terutama ketika sebagian besar *foil* telah keluar dari air.

- Konsumsi bahan bakar yang lebih rendah pada operasi kecepatan tinggi jarak pendek karena *drag* yang sangat rendah pada kondisi ini.
- Kinerja yang lebih baik dalam kondisi beban yang bervariasi karena kemampuan *self-adjusting* dari *foil*.
- Lebih cocok untuk integrasi dengan sistem propulsi *hybrid* karena kemampuannya untuk beroperasi efisien pada berbagai mode kecepatan.

5. Operasi di Perairan Dangkal:

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Terbatas pada operasi di perairan yang relatif dalam karena kebutuhan clearance antara *foil* dan dasar laut.
- Risiko yang lebih tinggi terhadap tabrakan dengan objek bawah air atau dasar laut.
- Memerlukan perencanaan rute yang lebih hati-hati dan sistem navigasi yang lebih canggih untuk menghindari area dangkal.

b. *Surface Piercing Hydrofoil*:

- Dapat beroperasi di perairan yang lebih dangkal karena sebagian *foil* berada di atas permukaan air.
- Risiko yang lebih rendah terhadap tabrakan dengan objek bawah air.
- Lebih fleksibel dalam pemilihan rute dan dapat mengakses area pesisir atau sungai yang lebih dangkal.

6. Ketahanan terhadap Debris:

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Lebih rentan terhadap kerusakan akibat debris bawah air karena seluruh sistem *foil* berada di bawah permukaan.
- Memerlukan sistem deteksi dan penghindaran debris yang lebih canggih, seperti sonar atau kamera bawah air.
- Dampak dari tabrakan dengan debris bisa lebih serius karena kecepatan relatif yang lebih tinggi di bawah permukaan.

b. *Surface Piercing Hydrofoil*:

- Lebih tahan terhadap debris permukaan karena bagian atas *foil* dapat mendorong debris ke samping.

- Visibilitas yang lebih baik untuk mendeteksi dan menghindari debris karena sebagian *foil* berada di atas permukaan.
- Risiko kerusakan yang lebih rendah dari debris mengambang karena kecepatan relatif yang lebih rendah di dekat permukaan.

5.4.2 Aplikasi *Hydrofoil*

Perbedaan karakteristik kinerja antara *deeply submerged* dan *surface piercing hydrofoil* menyebabkan variasi dalam aplikasi optimal mereka:

1. Transportasi Penumpang:

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Ideal untuk rute jarak jauh dengan kondisi laut yang bervariasi karena stabilitas dan efisiensi yang lebih baik pada kecepatan jelajah.
- Cocok untuk *ferry* penumpang kapasitas besar (100-250 penumpang) karena stabilitas yang lebih baik mengurangi mabuk laut.
- Contoh: *Boeing Jetfoil*, yang digunakan untuk rute antar pulau di Jepang dan Hongkong-Macau. *Jetfoil* dapat mengangkut hingga 250 penumpang dengan kecepatan jelajah 45 knot.
- Keunggulan dalam hal kenyamanan penumpang pada perjalanan jarak jauh karena gerakan yang lebih halus.

b. *Surface Piercing Hydrofoil*:

- Cocok untuk rute jarak pendek hingga menengah (50-200 mil laut) dengan kecepatan tinggi.
- Ideal untuk *ferry* penumpang kapasitas menengah (50-150 penumpang) yang memerlukan fleksibilitas operasional dan akses ke pelabuhan dangkal.
- Contoh: *Russian Kometa hydrofoil*, yang digunakan di berbagai rute di Eropa dan Asia. *Kometa* dapat mengangkut hingga 120 penumpang dengan kecepatan jelajah 35 knot.
- Keunggulan dalam hal waktu perjalanan yang lebih singkat untuk rute pendek karena kemampuan akselerasi yang cepat.

2. Aplikasi Militer:

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Digunakan untuk kapal patroli jarak jauh dan misi pengintaian karena kemampuannya untuk beroperasi dalam berbagai kondisi laut.
 - Cocok untuk operasi di laut terbuka dengan kondisi cuaca yang bervariasi karena stabilitas yang lebih baik.
 - Contoh: PHM (*Patrol Hydrofoil Missilecraft*) yang pernah digunakan oleh Angkatan Laut AS. PHM Pegasus class memiliki panjang 40 meter dan dapat mencapai kecepatan 48 knot.
 - Keunggulan dalam hal kemampuan membawa sistem persenjataan yang lebih berat dan kompleks karena stabilitas *platformnya*.
- b. *Surface Piercing Hydrofoil*:
- Ideal untuk kapal serangan cepat dan interceptor karena kemampuan akselerasi dan manuver yang lebih baik.
 - Cocok untuk operasi di perairan pesisir dan sungai karena kemampuannya beroperasi di perairan dangkal.
 - Contoh: Kapal kelas Pegasus yang digunakan oleh beberapa angkatan laut untuk patroli pantai. Pegasus dapat mencapai kecepatan 48 knot dengan persenjataan lengkap.
 - Keunggulan dalam hal fleksibilitas operasional dan kemampuan untuk melakukan serangan cepat dan mundur.

3. Kapal Rekreasi dan Olahraga:

- a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:
- Jarang digunakan dalam aplikasi rekreasi karena kompleksitas sistem dan biaya yang tinggi.
 - Beberapa aplikasi dalam kapal *yacht* mewah untuk perjalanan jarak jauh, menawarkan kenyamanan dan kecepatan.
 - Contoh: Tencara, sebuah *yacht hydrofoil* mewah yang dikembangkan oleh Rodriquez Cantieri Navali.
- b. *Surface Piercing Hydrofoil*:
- Populer untuk *speedboat* dan kapal olahraga air kinerja tinggi karena akselerasi dan kecepatan maksimum yang tinggi.
 - Digunakan dalam kompetisi powerboat karena kemampuan manuver yang baik dan kestabilan pada kecepatan tinggi.

- Contoh: Candela C-8, sebuah *dayboat* listrik dengan teknologi *hydrofoil* yang dapat mencapai kecepatan 30 knot dengan jangkauan 50 mil laut.

4. Kapal Penyelamat dan SAR (*Search and Rescue*):

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Cocok untuk misi SAR jarak jauh di laut terbuka karena kemampuannya untuk mempertahankan kecepatan tinggi dalam kondisi laut yang buruk.
- Stabilitas yang baik memungkinkan operasi dalam kondisi cuaca buruk, meningkatkan efektivitas misi penyelamatan.
- Contoh: Konsep kapal SAR *hydrofoil* yang dikembangkan oleh beberapa produsen kapal untuk operasi lepas pantai.

b. *Surface Piercing Hydrofoil*:

- Ideal untuk *respons* cepat dalam operasi penyelamatan pesisir karena kemampuan akselerasi yang cepat dan kecepatan tinggi.
- Kemampuan beroperasi di perairan dangkal memberikan fleksibilitas dalam misi penyelamatan di area pesisir dan sungai.
- Contoh: Kapal penyelamat cepat berbasis *hydrofoil* yang digunakan oleh beberapa layanan penyelamatan pantai di Eropa.

5. Kapal Riset dan Survei:

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Digunakan dalam kapal riset oseanografi karena stabilitas yang baik untuk peralatan sensitif seperti sonar dan peralatan sampling.
- Cocok untuk survei bawah laut jarak jauh karena kemampuannya untuk mempertahankan kecepatan konstan dalam berbagai kondisi laut.
- Contoh: Beberapa institusi penelitian laut telah mengembangkan konsep kapal riset berbasis *hydrofoil* untuk meningkatkan efisiensi pengumpulan data.

b. *Surface Piercing Hydrofoil*:

- Diaplikasikan dalam kapal survei pesisir dan sungai karena kemampuannya untuk beroperasi di perairan dangkal.

- Kecepatan tinggi memungkinkan cakupan area survei yang lebih luas dalam waktu singkat, meningkatkan efisiensi pengumpulan data.
- Lebih cocok untuk survei cepat dan pemetaan garis pantai karena kemampuannya untuk beroperasi dekat dengan permukaan.
- Contoh: Beberapa agency pemetaan pesisir menggunakan kapal survei berbasis *surface piercing hydrofoil* untuk pemetaan cepat dan akurat dari garis pantai dan perairan dangkal.

6. Aplikasi Komersial Khusus:

a. *Deeply Submerged Hydrofoil*:

- Digunakan dalam beberapa desain kapal kontainer cepat untuk rute tertentu, terutama untuk pengiriman barang bernilai tinggi dan sensitif waktu.
- Potensial untuk aplikasi dalam industri *offshore*, seperti transfer personel ke *platform* minyak, karena stabilitas yang baik dalam kondisi laut yang menantang.
- Contoh: Konsep "*Fast Feeder Container Ship*" yang menggunakan teknologi *hydrofoil* untuk meningkatkan kecepatan dan efisiensi pengiriman kontainer antar pelabuhan regional.

b. *Surface Piercing Hydrofoil*:

- Diaplikasikan dalam kapal wisata cepat di daerah dengan banyak pulau, memungkinkan tur multi-destinasi dalam waktu singkat.
- Beberapa penggunaan dalam industri akuakultur untuk akses cepat ke lokasi budidaya lepas pantai, memungkinkan pemantauan dan perawatan yang lebih efisien.
- Contoh: Kapal wisata *hydrofoil* yang digunakan di wilayah Karibia dan Mediterania untuk tur pulau-pulau, memungkinkan pengunjung untuk mengunjungi beberapa destinasi dalam satu hari.

5.5 Sistem Propulsi untuk Kapal *Hydrofoil*

Sistem propulsi merupakan komponen kritis dalam desain dan operasi kapal *hydrofoil*. Keunikan karakteristik operasional kapal *hydrofoil*, yang meliputi fase *displacement*, transisi, dan *foilborne*, memerlukan sistem propulsi yang tidak hanya efisien tetapi juga

mampu beradaptasi dengan berbagai kondisi operasi. Subbab ini akan mengeksplorasi berbagai aspek sistem propulsi untuk kapal *hydrofoil*, termasuk jenis-jenis sistem propulsi yang umum digunakan, pertimbangan desain khusus, dan perkembangan terbaru dalam teknologi propulsi untuk kapal *hydrofoil*.

5.5.1 Jenis-Jenis Sistem Propulsi

Beberapa jenis sistem propulsi yang umum digunakan pada kapal *hydrofoil* meliputi:

1. Sistem Propulsi *Waterjet*:

Waterjet merupakan salah satu sistem propulsi yang paling umum digunakan pada kapal *hydrofoil* modern, terutama untuk kapal berukuran menengah hingga besar. Sistem ini memiliki beberapa keunggulan:

- a. Efisiensi Tinggi: *Waterjet* sangat efisien pada kecepatan tinggi, yang sesuai dengan karakteristik operasional kapal *hydrofoil*.
- b. Kemampuan *Thrust Vectoring*: Beberapa sistem *waterjet* memungkinkan pengarahannya, meningkatkan manuverabilitas kapal.
- c. Getaran dan Kebisingan Rendah: Dibandingkan dengan *propeller* konvensional, *waterjet* menghasilkan getaran dan kebisingan yang lebih rendah.
- d. Perlindungan terhadap Tabrakan: Tidak adanya *propeller* eksternal mengurangi risiko kerusakan akibat tabrakan dengan debris atau objek di air.

Contoh penerapan: Boeing *Jetfoil* menggunakan sistem propulsi *waterjet* ganda untuk mencapai kecepatan jelajah hingga 45 knot.

2. *Propeller* Permukaan (*Surface-Piercing Propellers*):

Propeller jenis ini sebagian terendam dalam air dan sebagian lagi di udara. Sistem ini cocok untuk kapal *hydrofoil*, terutama jenis *surface-piercing*, karena:

- a. Efisiensi Tinggi pada Kecepatan Tinggi: *Propeller* permukaan memiliki efisiensi yang sangat baik pada kecepatan tinggi karena berkurangnya *drag* hidrodinamis.

- b. Kavitasi Terkontrol: Desain ini memungkinkan kavitasi terkontrol, yang dapat meningkatkan efisiensi pada kecepatan tinggi.
- c. Fleksibilitas Operasional: Cocok untuk operasi di perairan dangkal dan dapat beradaptasi dengan perubahan *draft* kapal saat transisi ke mode *foilborne*.

Contoh penerapan: Beberapa desain kapal patroli cepat berbasis *hydrofoil* menggunakan *propeller* permukaan untuk kombinasi kecepatan tinggi dan manuverabilitas.

3. *Propeller Fully Submerged*:

Meskipun kurang umum dibandingkan dengan *waterjet* atau *propeller* permukaan, *propeller* yang sepenuhnya terendam masih digunakan pada beberapa desain kapal *hydrofoil*, terutama untuk kapal berukuran lebih kecil atau yang memerlukan *thrust* yang lebih besar pada kecepatan rendah. Keunggulannya meliputi:

- a. Efisiensi yang Baik pada Berbagai Kecepatan: Cocok untuk kapal yang perlu beroperasi efisien baik pada mode *displacement* maupun *foilborne*.
- b. *Thrust* yang Lebih Besar pada Kecepatan Rendah: Penting untuk fase *take-off* dan manuver di pelabuhan.
- c. Operasi yang Lebih Tenang: Dibandingkan dengan *propeller* permukaan, *propeller* yang sepenuhnya terendam cenderung menghasilkan getaran dan kebisingan yang lebih rendah.

Contoh penerapan: Beberapa desain kapal *hydrofoil* kecil untuk aplikasi rekreasi atau patroli pantai menggunakan *propeller fully submerged*.

5.5.2 Pertimbangan Desain Khusus

Desain sistem propulsi untuk kapal *hydrofoil* memerlukan pertimbangan khusus yang tidak selalu relevan untuk kapal konvensional:

1. Adaptabilitas terhadap Perubahan *Draft*:

Sistem propulsi harus dapat beroperasi efisien baik ketika kapal dalam mode *displacement* maupun ketika terangkat dalam mode *foilborne*. Ini dapat melibatkan:

- a. Desain poros *propeller* yang dapat menyesuaikan sudut (untuk *propeller* permukaan).
- b. Sistem *inlet waterjet* yang dirancang khusus untuk memastikan aliran air yang cukup dalam berbagai kondisi operasi.
- c. Sistem kontrol otomatis yang menyesuaikan *pitch propeller* atau *output thrust* berdasarkan mode operasi kapal.

2. Manajemen Kavitasi:

Kavitasi dapat menjadi masalah serius pada kecepatan tinggi yang dicapai kapal *hydrofoil*. Strategi manajemen kavitasi meliputi:

- a. Desain *blade propeller* khusus yang tahan kavitasi.
- b. Penggunaan material tahan erosi untuk komponen propulsi.
- c. Implementasi sistem ventilasi terkontrol untuk *propeller* permukaan.

3. Integrasi dengan Sistem Kontrol Kapal:

Sistem propulsi harus terintegrasi erat dengan sistem kontrol kapal untuk memastikan stabilitas dan kinerja optimal. Ini melibatkan:

- a. Sistem kontrol *thrust* yang responsif untuk menyesuaikan dengan perubahan cepat dalam kondisi operasi.
- b. Koordinasi antara sistem propulsi dan sistem kontrol *foil* untuk optimalisasi sikap dan efisiensi kapal.
- c. Implementasi sistem manajemen daya terpadu untuk mengoptimalkan distribusi daya antara propulsi dan sistem lainnya.

4. Efisiensi pada Berbagai Mode Operasi:

Sistem propulsi harus efisien tidak hanya pada kecepatan jelajah, tetapi juga selama fase *take-off* dan *landing*. Ini dapat dicapai melalui:

- a. Sistem propulsi ganda atau hibrid yang mengoptimalkan efisiensi pada berbagai kecepatan.
- b. Penggunaan *gearbox* yang memungkinkan operasi efisien mesin pada berbagai kecepatan kapal.
- c. Implementasi sistem propulsi elektrik atau *hybrid* untuk fleksibilitas operasional yang lebih besar.

5. Pertimbangan Struktural dan Hidrodinamis:

Penempatan dan desain sistem propulsi harus mempertimbangkan dampaknya terhadap hidrodinamika kapal dan integritas struktural:

- a. Minimalisasi interferensi antara aliran air ke sistem propulsi dan aliran di sekitar *foil*.
- b. Desain struktural yang kuat namun ringan untuk mendukung sistem propulsi tanpa menambah berat berlebih pada kapal.
- c. Pertimbangan dampak getaran dan beban dinamis dari sistem propulsi terhadap struktur kapal dan *foil*.

5.5.3 Perkembangan Terbaru dalam Teknologi Propulsi

Beberapa perkembangan terbaru dalam teknologi propulsi yang relevan untuk kapal *hydrofoil* meliputi:

1. Sistem Propulsi Elektrik dan *Hybrid*:

Integrasi motor listrik dan baterai dengan mesin konvensional menawarkan fleksibilitas operasional yang lebih besar dan potensi pengurangan emisi. Sistem ini memungkinkan:

- a. Operasi *silent mode* menggunakan daya listrik murni untuk aplikasi militer atau di area yang sensitif terhadap kebisingan.
- b. Optimalisasi efisiensi bahan bakar dengan menggunakan kombinasi daya listrik dan mesin konvensional sesuai kebutuhan.
- c. Pemanfaatan teknologi regeneratif untuk mengisi ulang baterai selama operasi.

2. Propulsi *Supercavitating*:

Teknologi propulsi *supercavitating*, yang menciptakan selubung uap air besar di sekitar *propeller*, sedang dieksplorasi untuk aplikasi kecepatan sangat tinggi:

- a. Potensi untuk mencapai kecepatan yang jauh lebih tinggi dengan efisiensi yang baik.
- b. Pengurangan *drag* dan getaran pada kecepatan ekstrem.
- c. Tantangan dalam hal kontrol dan stabilitas pada berbagai kondisi operasi.

3. Sistem Propulsi *Magnetohydrodynamic (MHD)*:

Meskipun masih dalam tahap penelitian untuk aplikasi praktis pada kapal, sistem MHD menawarkan potensi propulsi tanpa bagian bergerak:

- a. Eliminasi kebutuhan akan *propeller* atau *impeller* mekanis.
- b. Potensi untuk operasi yang sangat senyap dan efisien.
- c. Tantangan dalam hal efisiensi dan skalabilitas untuk aplikasi praktis.

4. *Waterjet* dengan Efisiensi Tinggi:

Pengembangan lanjutan dalam desain *waterjet* fokus pada peningkatan efisiensi dan pengurangan kavitasi:

- a. Desain *impeller* dan *stator* yang dioptimalkan menggunakan simulasi CFD lanjutan.
- b. Implementasi sistem kontrol aliran adaptif untuk mengoptimalkan kinerja pada berbagai kondisi operasi.
- c. Penggunaan material komposit canggih untuk mengurangi berat dan meningkatkan ketahanan terhadap kavitasi.

5. Integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dalam Manajemen Propulsi:

Penerapan AI dan *machine learning* dalam sistem manajemen propulsi menawarkan potensi untuk optimalisasi kinerja *real-time*:

- a. Prediksi dan adaptasi terhadap perubahan kondisi laut secara *real-time*.
- b. Optimalisasi konsumsi bahan bakar dan emisi berdasarkan data operasional historis dan kondisi saat ini.
- c. Peningkatan diagnostik dan prediktif *maintenance* untuk meningkatkan keandalan sistem propulsi.

Perkembangan dalam teknologi propulsi ini, dikombinasikan dengan inovasi dalam desain *hydrofoil* dan sistem kontrol, membuka peluang baru untuk meningkatkan kinerja, efisiensi, dan keberlanjutan kapal *hydrofoil*. Tantangan utama ke depan akan melibatkan integrasi teknologi-teknologi ini ke dalam desain kapal yang praktis dan ekonomis, sambil memenuhi regulasi keselamatan dan lingkungan yang semakin ketat.

5.6 Tantangan dalam Pemeliharaan dan Operasi *Hydrofoil*

Kapal *hydrofoil*, dengan desain unik dan teknologi canggihnya, menghadirkan serangkaian tantangan khusus dalam hal pemeliharaan dan operasi. Meskipun menawarkan keunggulan signifikan dalam kecepatan dan efisiensi, kompleksitas sistem *hydrofoil* memerlukan pendekatan yang cermat dan terencana dalam pengelolaannya. Subbab ini akan mengeksplorasi berbagai tantangan yang dihadapi dalam pemeliharaan dan operasi kapal *hydrofoil*, serta strategi dan solusi yang dikembangkan untuk mengatasinya.

5.6.1 Tantangan Struktural dan Material

1. Korosi dan *Fatigue*:

Kapal *hydrofoil* beroperasi dalam lingkungan yang sangat korosif dan mengalami beban dinamis yang signifikan, terutama pada struktur *foil* dan strut. Tantangan utama meliputi:

- a. Korosi galvanik: Terjadi akibat penggunaan material yang berbeda dalam konstruksi *foil* dan lambung.
- b. *Stress corrosion cracking*: Risiko tinggi terutama pada komponen yang mengalami beban tinggi dan konstan.
- c. *Fatigue*: Siklus beban yang berulang pada *foil* dan struktur pendukungnya dapat menyebabkan kelelahan material. Strategi penanganan:
 - Penggunaan material tahan korosi seperti *stainless steel* kelas tinggi atau titanium untuk komponen kritis.
 - Implementasi sistem proteksi katodik untuk mengurangi laju korosi.
 - Program inspeksi rutin menggunakan teknik *non-destructive testing* (NDT) untuk mendeteksi keretakan dini.

2. Kavitas dan Erosi:

Foil dan propulsor kapal *hydrofoil* rentan terhadap kavitasi, yang dapat menyebabkan erosi serius pada permukaan. Tantangan meliputi:

- a. Erosi permukaan *foil*: Mengurangi efisiensi hidrodinamis dan integritas struktural.

- b. Kerusakan pada sistem propulsi: Terutama pada *propeller* atau *impeller waterjet*.
- c. Peningkatan kebisingan dan getaran: Dapat mempengaruhi kenyamanan penumpang dan deteksi akustik. Strategi penanganan:
 - Desain *foil* dan propulsor yang dioptimalkan untuk mengurangi risiko kavitasi.
 - Penggunaan *coating* khusus tahan kavitasi pada area yang rentan.
 - Implementasi sistem *monitoring* kavitasi *real-time* untuk penyesuaian operasional.

5.6.2 Tantangan Sistem Kontrol dan Elektronik

1. Kompleksitas Sistem Kontrol:

Kapal *hydrofoil* memerlukan sistem kontrol yang sangat canggih untuk mempertahankan stabilitas dan kinerja optimal. Tantangan meliputi:

- a. Keandalan sistem: Kegagalan sistem kontrol dapat berakibat serius pada keselamatan kapal.
- b. Kalibrasi dan pemeliharaan sensor: Sensor yang tidak akurat dapat menyebabkan *respons* sistem yang tidak tepat.
- c. Integrasi sistem: Memastikan berbagai subsistem bekerja secara harmonis dalam berbagai kondisi operasi. Strategi penanganan:
 - Implementasi sistem redundansi untuk komponen kritis.
 - Program kalibrasi dan pemeliharaan sensor yang ketat.
 - Penggunaan simulasi dan *digital twin* untuk pengujian dan optimalisasi sistem kontrol.

2. Ketahanan Elektronik terhadap Lingkungan Laut:

Komponen elektronik pada kapal *hydrofoil* harus beroperasi dalam lingkungan yang keras dan basah. Tantangan meliputi:

- a. Kelembaban dan air laut: Risiko korosi dan short circuit pada komponen elektronik.
- b. Getaran dan guncangan: Dapat menyebabkan kerusakan atau malfungsi pada perangkat elektronik sensitif.

- c. Interferensi elektromagnetik: Terutama dari sistem propulsi elektrik atau radar. Strategi penanganan:
 - Penggunaan enclosure tahan air dan sistem pendinginan khusus untuk komponen elektronik.
 - Implementasi sistem isolasi getaran untuk peralatan sensitif.
 - Desain EMI *shielding* yang efektif untuk mengurangi interferensi elektromagnetik.

5.6.3 Tantangan Operasional

1. Manajemen Transisi Mode Operasi:

Kapal *hydrofoil* harus beroperasi efisien dalam mode *displacement*, transisi, dan *foilborne*. Tantangan meliputi:

- a. Konsumsi energi tinggi selama *take-off*: Memerlukan manajemen daya yang cermat.
- b. Stabilitas selama transisi: Risiko ketidakstabilan saat perpindahan antara mode operasi.
- c. Adaptasi terhadap kondisi laut yang berubah: Memerlukan penyesuaian cepat sistem kontrol. Strategi penanganan:
 - Pengembangan prosedur operasi standar yang rinci untuk setiap fase operasi.
 - Implementasi sistem manajemen daya adaptif untuk optimalisasi konsumsi energi.
 - Pelatihan intensif untuk kru dalam menangani berbagai skenario operasional.

2. Keterbatasan Operasional:

Desain kapal *hydrofoil* memiliki beberapa keterbatasan operasional yang perlu dikelola:

- a. Sensitivitas terhadap kondisi laut: Kinerja dapat menurun drastis dalam cuaca buruk.
- b. Keterbatasan manuver pada kecepatan rendah: Terutama saat bersandar atau dalam perairan terbatas.
- c. Kebutuhan infrastruktur khusus: Fasilitas *docking* dan pemeliharaan yang spesifik. Strategi penanganan:
 - Pengembangan sistem prediksi cuaca dan rute yang canggih untuk optimalisasi operasi.

- Implementasi sistem propulsi dan kontrol khusus untuk manuver kecepatan rendah.
- Investasi dalam infrastruktur pelabuhan dan fasilitas pemeliharaan yang sesuai.

5.6.4 Tantangan Pemeliharaan dan Logistik

1. Kebutuhan Pemeliharaan Intensif:

Kompleksitas sistem *hydrofoil* memerlukan pemeliharaan yang lebih intensif dibandingkan kapal konvensional:

- a. Inspeksi rutin *foil* dan struktur pendukung: Memerlukan akses yang seringkali sulit.
- b. Pemeliharaan sistem kontrol dan sensor: Membutuhkan keahlian khusus.
- c. Penggantian komponen yang aus: Terutama pada bagian yang bergerak dan terkena beban tinggi. Strategi penanganan:
 - Pengembangan program pemeliharaan prediktif berbasis data.
 - Pelatihan staf teknis khusus untuk pemeliharaan sistem *hydrofoil*.
 - Implementasi sistem *monitoring* kesehatan struktural *real-time*.

2. Manajemen Suku Cadang dan Logistik:

Ketersediaan suku cadang dan manajemen logistik menjadi tantangan khusus:

- a. Ketersediaan komponen khusus: Banyak komponen yang tidak umum dan memerlukan waktu produksi lama.
- b. Manajemen inventori: Menyeimbangkan kebutuhan operasional dengan biaya penyimpanan.
- c. Distribusi global: Mengelola rantai pasok untuk armada yang beroperasi di berbagai lokasi. Strategi penanganan:
 - Pengembangan kemitraan jangka panjang dengan pemasok kunci.
 - Implementasi sistem manajemen inventori berbasis AI untuk optimalisasi stok.
 - Penggunaan teknologi 3D *printing* untuk produksi suku cadang *on-demand*.

Tantangan-tantangan dalam pemeliharaan dan operasi kapal *hydrofoil* memerlukan pendekatan holistik yang menggabungkan

inovasi teknologi, pelatihan personel yang intensif, dan strategi manajemen yang adaptif. Dengan terus berkembangnya teknologi dan pemahaman tentang karakteristik operasional kapal *hydrofoil*, diharapkan solusi-solusi baru akan terus muncul untuk mengatasi tantangan-tantangan ini, memungkinkan penggunaan yang lebih luas dan efisien dari teknologi *hydrofoil* dalam berbagai aplikasi maritim.

5.7 Perkembangan Terbaru dalam Teknologi *Hydrofoil*

Teknologi *hydrofoil* terus mengalami perkembangan pesat, didorong oleh inovasi dalam berbagai bidang teknik dan ilmu pengetahuan. Subbab ini akan mengeksplorasi beberapa perkembangan terbaru yang signifikan dalam teknologi *hydrofoil*, yang berpotensi mengubah lanskap transportasi maritim di masa depan.

1. Inovasi dalam Desain dan Material *Foil*

Salah satu area perkembangan yang paling menarik dalam teknologi *hydrofoil* adalah inovasi dalam desain dan material *foil*. Para insinyur dan peneliti terus mengeksplorasi cara-cara baru untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja *foil*:

- a. *Foil* Adaptif: Pengembangan *foil* adaptif yang dapat mengubah bentuknya secara dinamis selama operasi telah membuka peluang baru dalam optimalisasi kinerja. Teknologi ini memanfaatkan material pintar seperti *shape memory alloys* (SMA) atau *piezoelectric actuators* untuk mengubah karakteristik *foil* secara *real-time*. *Foil* adaptif dapat menyesuaikan diri dengan kondisi laut yang berubah, mengoptimalkan *lift* dan *drag* pada berbagai kecepatan dan beban. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga memperluas *envelope* operasional kapal *hydrofoil*.
- b. Material Komposit Canggih: Penggunaan material komposit canggih dalam konstruksi *foil* telah menghasilkan struktur yang lebih ringan namun lebih kuat. *Carbon Fiber Reinforced Polymers* (CFRP) dan komposit hibrid lainnya memungkinkan desain *foil* yang lebih kompleks dan efisien. Material-material ini juga menawarkan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dan *fatigue*, mengurangi kebutuhan pemeliharaan dan meningkatkan umur operasional *foil*.

- c. **Bionic Design:** Inspirasi dari alam telah mendorong pengembangan desain *foil* yang lebih efisien. Misalnya, *foil* yang terinspirasi dari sirip paus bungkuk, dengan bentuk bergelombang di sepanjang tepi depannya, telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam efisiensi hidrodinamis. Teknik-teknik biomimikri lainnya, seperti *surface texturing* yang terinspirasi dari kulit hiu, sedang dieksplorasi untuk mengurangi *drag* dan meningkatkan performa *foil*.

2. Sistem Kontrol dan Stabilisasi Lanjutan

Perkembangan dalam sistem kontrol dan stabilisasi telah secara signifikan meningkatkan kinerja dan keandalan kapal *hydrofoil*:

- a. **Artificial Intelligence dan Machine learning:** Integrasi AI dan ML dalam sistem kontrol kapal *hydrofoil* telah menghasilkan peningkatan dramatis dalam kemampuan adaptasi dan optimalisasi kinerja. Sistem kontrol berbasis AI dapat memprediksi dan merespons perubahan kondisi laut dengan akurasi yang lebih tinggi, mengoptimalkan posisi *foil* dan parameter operasional lainnya secara *real-time*. Algoritma *machine learning* juga digunakan untuk analisis data operasional, memungkinkan pemeliharaan prediktif dan optimalisasi rute yang lebih efisien.
- b. **Sensor dan Aktuator Canggih:** Perkembangan dalam teknologi sensor, seperti LiDAR dan radar gelombang millimeter, telah meningkatkan kemampuan kapal *hydrofoil* untuk "membaca" kondisi laut di depannya. Ini memungkinkan sistem kontrol untuk mengantisipasi dan merespons perubahan kondisi dengan lebih cepat dan akurat. Sementara itu, aktuator elektrohidrostatik (EHA) yang lebih ringan dan responsif telah menggantikan sistem hidrolik konvensional, meningkatkan presisi kontrol *foil* dan mengurangi berat sistem secara keseluruhan.

3. Propulsi Inovatif dan Efisiensi Energi

Inovasi dalam sistem propulsi dan manajemen energi terus mendorong batas-batas kinerja dan efisiensi kapal *hydrofoil*:

- a. **Sistem Propulsi Elektrik dan Hybrid:** Perkembangan dalam teknologi baterai dan motor listrik telah membuka jalan bagi sistem propulsi elektrik dan *hybrid* yang lebih efisien. Kapal *hydrofoil* dengan propulsi listrik penuh kini menjadi realitas,

menawarkan operasi yang lebih senyap dan ramah lingkungan. Sistem *hybrid*, menggabungkan mesin konvensional dengan motor listrik, memberikan fleksibilitas operasional yang lebih besar dan efisiensi yang ditingkatkan pada berbagai mode operasi.

- b. Teknologi *Fuel Cell*: Eksplorasi penggunaan sel bahan bakar hidrogen sebagai sumber energi untuk kapal *hydrofoil* sedang berlangsung. Teknologi ini menawarkan potensi untuk operasi jarak jauh dengan emisi nol, mengatasi keterbatasan jangkauan sistem baterai murni. Meskipun masih dalam tahap pengembangan, *fuel cell hydrofoil* berpotensi merevolusi transportasi maritim jarak jauh.
- c. *Advanced Waterjet Systems*: Inovasi dalam desain *waterjet*, termasuk penggunaan impeller dan stator yang dioptimalkan secara *Computational Fluid Dynamics* (CFD), telah meningkatkan efisiensi propulsif secara signifikan. Sistem *waterjet* dengan kemampuan *thrust* vectoring juga sedang dikembangkan, meningkatkan manuverabilitas kapal *hydrofoil* terutama pada kecepatan rendah dan dalam operasi di pelabuhan.

4. Integrasi Teknologi Digital

Digitalisasi telah membawa perubahan besar dalam cara kapal *hydrofoil* didesain, dioperasikan, dan dipelihara:

- a. *Digital twin*: Konsep *digital twin*, yaitu representasi digital yang akurat dari kapal *hydrofoil* fisik, telah merevolusi proses desain dan manajemen siklus hidup. *Digital twin* memungkinkan simulasi dan optimalisasi kinerja dalam berbagai skenario operasional, memfasilitasi pemeliharaan prediktif, dan memungkinkan penyesuaian desain yang cepat berdasarkan data operasional nyata.
- b. *Internet of Things* (IoT) dan *Big Data Analytics*: Implementasi sensor IoT di seluruh kapal *hydrofoil* menghasilkan aliran data *real-time* yang besar tentang kinerja dan kondisi sistem. Analisis big data dari informasi ini memungkinkan optimalisasi operasional yang lebih baik, pemeliharaan yang lebih efisien, dan pemahaman yang lebih mendalam tentang kinerja kapal dalam berbagai kondisi.

- c. *Augmented reality* (AR) untuk Operasi dan Pemeliharaan: Teknologi AR sedang diintegrasikan ke dalam operasi dan pemeliharaan kapal *hydrofoil*. Sistem AR dapat memberikan informasi *real-time* kepada awak kapal tentang kondisi operasional dan panduan langkah demi langkah untuk prosedur pemeliharaan kompleks, meningkatkan efisiensi dan mengurangi potensi kesalahan manusia.

Perkembangan-perkembangan ini dalam teknologi *hydrofoil* menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan kinerja, efisiensi, dan keberlanjutan transportasi maritim. Dengan terus berkembangnya inovasi dalam berbagai aspek teknologi *hydrofoil*, kita dapat mengharapkan peningkatan signifikan dalam kecepatan, efisiensi energi, dan keandalan kapal *hydrofoil* di masa depan, membuka era baru dalam transportasi laut yang lebih cepat dan ramah lingkungan.

5.8 Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip dasar operasi *deeply submerged hydrofoil* dan bagaimana hal ini berbeda dari kapal konvensional!
2. Analisis peran sistem kontrol dalam operasi *deeply submerged hydrofoil* dan jelaskan mengapa sistem ini sangat penting untuk kinerja kapal!
3. Jelaskan prinsip dasar operasi *surface piercing hydrofoil* dan bandingkan keunggulan serta kelemahannya dibandingkan dengan *deeply submerged hydrofoil*!
4. Analisis tantangan utama dalam desain struktural *foil* untuk *surface piercing hydrofoil* dan jelaskan pendekatan yang dapat digunakan untuk mengatasi tantangan tersebut!
5. Evaluasi potensi penggunaan teknologi *hydrofoil* dalam konteks transportasi penumpang yang berkelanjutan. Bagaimana teknologi ini dapat berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan dari industri pelayaran?
6. Analisis keunggulan dan tantangan penggunaan teknologi *hydrofoil* dalam aplikasi militer. Bagaimana perbedaan antara *deeply submerged* dan *surface piercing hydrofoil* mempengaruhi jenis misi yang dapat mereka lakukan?

7. Jelaskan tantangan utama dalam mengelola kavitasi pada sistem propulsi kapal *hydrofoil* dan diskusikan strategi-strategi yang dapat digunakan untuk mengatasi tantangan tersebut!
8. Analisis potensi dan tantangan implementasi sistem propulsi elektrik atau *hybrid* pada kapal *hydrofoil*. Bagaimana teknologi ini dapat mempengaruhi kinerja dan efisiensi operasional kapal?
9. Jelaskan peran artificial intelligence dan *machine learning* dalam meningkatkan sistem kontrol dan stabilisasi kapal *hydrofoil*!
10. Evaluasi potensi dan tantangan dalam pengembangan sistem propulsi elektrik dan *hybrid* untuk kapal *hydrofoil*. Bagaimana teknologi ini dapat berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan dari operasi kapal, dan apa saja kendala teknis dan operasional yang perlu diatasi?

5.9 Kesimpulan

1. *Deeply submerged hydrofoil* mewakili puncak inovasi dalam teknologi kapal cepat, menggabungkan prinsip-prinsip hidrodinamika canggih dengan sistem kontrol mutakhir untuk mencapai performa yang luar biasa. Meskipun menghadapi tantangan dalam hal kompleksitas dan biaya, teknologi ini terus berkembang dan menawarkan potensi besar untuk revolusi dalam transportasi maritim cepat. Dengan kemajuan berkelanjutan dalam material, propulsi, dan sistem kontrol, *deeply submerged hydrofoil* kemungkinan akan memainkan peran yang semakin penting dalam berbagai aplikasi maritim di masa depan, dari transportasi penumpang hingga operasi militer yang membutuhkan kecepatan dan efisiensi tinggi.
2. *Surface piercing hydrofoil* merupakan tonggak penting dalam evolusi teknologi kapal cepat, menawarkan keunggulan dalam kecepatan, efisiensi, dan fleksibilitas operasional yang membuka peluang baru dalam transportasi laut dan aplikasi militer. Meskipun menghadapi tantangan teknis seperti kavitasi dan kompleksitas struktural, inovasi berkelanjutan dalam desain, material, dan sistem kontrol terus meningkatkan kinerja dan keandalan teknologi ini. Perkembangan terkini, termasuk integrasi sistem propulsi ramah lingkungan dan penerapan kecerdasan buatan dalam sistem kontrol, menunjukkan potensi besar untuk

masa depan. Seiring meningkatnya kebutuhan akan transportasi laut yang lebih cepat, efisien, dan berkelanjutan, *surface piercing hydrofoil* diposisikan dengan baik untuk memainkan peran penting dalam lanskap maritim masa depan. Namun, adopsi yang lebih luas akan bergantung pada kemajuan dalam mengatasi tantangan yang ada, serta faktor ekonomi dan regulasi. Dengan penelitian dan pengembangan berkelanjutan, teknologi ini berpotensi tidak hanya meningkatkan kinerja kapal cepat, tetapi juga berkontribusi pada transformasi lebih luas dalam industri maritim menuju solusi yang lebih cepat, efisien, dan berkelanjutan.

3. Perbandingan antara *deeply submerged* dan *surface piercing hydrofoil* menunjukkan keunggulan dan tantangan yang berbeda untuk masing-masing jenis. *Deeply submerged hydrofoil* unggul dalam stabilitas, efisiensi pada kecepatan jelajah, dan kenyamanan penumpang, cocok untuk aplikasi jarak jauh dan kondisi laut menantang. Sementara itu, *surface piercing hydrofoil* menawarkan fleksibilitas operasional lebih besar, kinerja lebih baik di perairan dangkal, dan efisiensi tinggi pada kecepatan sangat tinggi, ideal untuk aplikasi yang membutuhkan *respons* cepat dan operasi di lingkungan pesisir. Pemilihan jenis *hydrofoil* bergantung pada kebutuhan spesifik aplikasi, kondisi operasional, dan pertimbangan ekonomis. Perkembangan teknologi terkini, seperti sistem kontrol berbasis AI dan material komposit canggih, terus memperluas kemampuan dan aplikasi kedua jenis *hydrofoil* ini, membuka peluang baru dalam industri maritim. Ke depannya, fokus penelitian akan diarahkan pada peningkatan efisiensi energi, pengurangan dampak lingkungan, dan integrasi dengan teknologi kapal otonom serta sistem propulsi alternatif, memposisikan teknologi *hydrofoil* untuk berperan penting dalam membentuk masa depan transportasi maritim yang lebih cepat, efisien, dan berkelanjutan.
4. Perkembangan dalam teknologi propulsi untuk kapal *hydrofoil* menunjukkan tren yang jelas menuju sistem yang lebih efisien, adaptif, dan ramah lingkungan. Integrasi teknologi canggih seperti propulsi elektrik, sistem kontrol berbasis AI, dan material komposit inovatif membuka peluang baru untuk meningkatkan kinerja, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan meminimalkan dampak

lingkungan. Tantangan utama ke depan akan melibatkan optimalisasi interaksi antara sistem propulsi dan desain *hydrofoil*, serta pengembangan solusi yang dapat memenuhi tuntutan operasional yang beragam sambil memenuhi regulasi keselamatan dan lingkungan yang semakin ketat. Dengan kemajuan berkelanjutan dalam bidang ini, kapal *hydrofoil* berpotensi untuk memainkan peran yang semakin penting dalam berbagai aplikasi maritim, dari transportasi penumpang hingga operasi militer dan komersial yang membutuhkan kecepatan tinggi dan efisiensi.

5. Pemeliharaan dan operasi kapal *hydrofoil* menghadirkan tantangan unik yang memerlukan pendekatan inovatif dan holistik, meliputi masalah struktural, kompleksitas sistem kontrol, keterbatasan operasional, dan kebutuhan logistik spesifik. Kemajuan dalam teknologi material, sistem kontrol berbasis AI, dan sensor canggih telah membantu mengatasi beberapa tantangan ini, sementara implementasi pemeliharaan prediktif dan *digital twin* meningkatkan efisiensi manajemen siklus hidup. Meskipun demikian, tantangan tetap ada dalam adaptasi terhadap kondisi laut yang berubah dan optimalisasi kinerja multi-mode, serta kebutuhan infrastruktur khusus dan pelatihan intensif. Masa depan akan melihat integrasi lebih lanjut teknologi IoT, big data analytics, dan AI, memungkinkan pendekatan yang lebih proaktif dan efisien. Dengan perkembangan teknologi dan pemahaman yang meningkat, diharapkan solusi-solusi baru akan terus muncul, menjadikan teknologi *hydrofoil* semakin layak dan menarik untuk berbagai aplikasi maritim, dengan tantangan yang ada berfungsi sebagai pendorong inovasi dalam transportasi laut berkecepatan tinggi.
6. Perkembangan terbaru dalam teknologi *hydrofoil* menunjukkan kemajuan yang signifikan di berbagai aspek, mulai dari inovasi desain dan material hingga integrasi teknologi digital canggih. *Foil* adaptif dan penggunaan material komposit telah meningkatkan efisiensi dan kinerja, sementara sistem kontrol berbasis AI dan sensor canggih telah meningkatkan keandalan dan kemampuan adaptasi kapal *hydrofoil*. Inovasi dalam propulsi, termasuk sistem elektrik dan *hybrid*, serta eksplorasi teknologi *fuel cell*, menunjukkan komitmen terhadap efisiensi energi dan

keberlanjutan. Integrasi teknologi digital seperti *digital twin*, IoT, dan *augmented reality* telah merevolusi cara kapal *hydrofoil* didesain, dioperasikan, dan dipelihara. Perkembangan-perkembangan ini secara kolektif menunjukkan potensi besar teknologi *hydrofoil* untuk membentuk masa depan transportasi maritim yang lebih cepat, efisien, dan ramah lingkungan, meskipun tantangan dalam implementasi dan adopsi skala besar masih perlu diatasi.

BAB VI

HOVERCRAFT DAN KAPAL BERBANTALAN UDARA

6.1 Pendahuluan

Dalam lanskap perkembangan teknologi maritim yang terus berevolusi, *hovercraft* dan kapal berbantal udara telah muncul sebagai inovasi transformatif yang secara signifikan mengubah paradigma transportasi air. Kedua jenis kendaraan ini merepresentasikan sebuah lompatan besar dalam desain kapal, dengan cerdas menggabungkan prinsip-prinsip aerodinamika dan hidrodinamika untuk menciptakan moda transportasi yang tidak hanya unik tetapi juga sangat efisien. Bab ini akan menyajikan eksplorasi mendalam mengenai dua tipe utama kendaraan berbantal udara: *Surface Effect Ship* (SES) dan *Air Cushion Vehicle* (ACV). Kedua teknologi ini telah membuka pintu bagi berbagai aplikasi baru yang revolusioner dalam dunia navigasi perairan, menawarkan solusi inovatif untuk tantangan transportasi yang sebelumnya sulit diatasi.

Surface Effect Ship (SES) dan *Air Cushion Vehicle* (ACV) pada dasarnya memanfaatkan konsep fundamental yang sama: penggunaan bantal udara untuk secara drastis mengurangi gesekan dengan permukaan air. Namun, meskipun berbagi prinsip dasar ini, kedua jenis kendaraan tersebut memiliki pendekatan dan karakteristik yang berbeda dalam implementasinya. SES, dengan desainnya yang brilian menggabungkan elemen kapal konvensional dan teknologi bantal udara, menawarkan keseimbangan unik antara efisiensi operasional dan stabilitas yang superior. Sementara itu, ACV, yang lebih dikenal secara luas sebagai *hovercraft*, memberikan tingkat fleksibilitas operasional yang luar biasa dengan kemampuannya untuk bergerak dengan mulus di atas berbagai jenis permukaan, mulai dari perairan terbuka hingga dataran berlumpur dan bahkan es.

Bab ini akan mendalami prinsip-prinsip operasi yang kompleks dari kedua jenis kendaraan ini, dimulai dari sistem bantal udara yang menjadi inti dari teknologi mereka yang revolusioner. Pembahasan akan berlanjut ke aspek-aspek teknis yang lebih mendalam, termasuk desain

hull yang inovatif dan sistem propulsi canggih yang memungkinkan kinerja optimal dalam berbagai kondisi operasional. Analisis mendalam akan disajikan mengenai bagaimana SES dan ACV berperilaku dalam beragam kondisi laut, dari perairan tenang hingga lautan bergelombang, memberikan wawasan berharga tentang kemampuan adaptasi dan ketahanan mereka. Selain itu, bab ini akan menguraikan sistem *lift* dan propulsi yang rumit, serta menggali tantangan-tantangan unik dalam hal manuverabilitas dan kontrol yang dihadapi oleh kedua jenis kendaraan ini.

Lebih lanjut, sebuah analisis komparatif yang komprehensif antara SES dan ACV akan disajikan, menyortir kelebihan dan keterbatasan masing-masing teknologi. Pembahasan ini akan memberikan pemahaman mendalam tentang skenario dan aplikasi di mana masing-masing jenis kendaraan unggul, serta situasi di mana salah satunya mungkin lebih cocok digunakan. Bab ini juga akan menjelajahi desain sistem bantalan udara yang sangat kompleks, yang menjadi jantung dari teknologi ini, menguraikan komponen-komponen kritis dan prinsip-prinsip rekayasa yang memungkinkan operasi mereka yang luar biasa. Selain itu, tantangan operasional yang dihadapi dalam penggunaan kendaraan berbantalan udara akan dibahas secara menyeluruh, disertai dengan solusi inovatif yang telah dikembangkan untuk mengatasi hambatan-hambatan ini.

Perkembangan terkini dalam teknologi bantalan udara juga akan menjadi fokus utama, memberikan wawasan berharga tentang arah masa depan industri ini yang terus berkembang. Pembahasan akan mencakup inovasi-inovasi mutakhir dalam bidang material, sistem kontrol canggih, dan desain aerodinamis yang semakin maju, yang secara kolektif terus mendorong batas-batas kemampuan kendaraan berbantalan udara ke tingkat yang belum pernah terjadi sebelumnya.

Sebagai penutup, bab ini akan membahas secara mendalam implikasi ekonomi dan lingkungan dari penggunaan *hovercraft* dan kapal berbantalan udara. Analisis akan mengeksplorasi bagaimana teknologi-teknologi ini dapat menawarkan solusi yang sangat diperlukan untuk tantangan transportasi di daerah-daerah dengan infrastruktur terbatas atau kondisi geografis yang menantang. Lebih lanjut, potensi teknologi

ini dalam mengurangi dampak lingkungan dibandingkan dengan moda transportasi konvensional akan dievaluasi, memberikan perspektif penting tentang peran mereka dalam mencapai tujuan keberlanjutan global.

Melalui eksplorasi komprehensif ini, para pembaca akan memperoleh pemahaman yang mendalam dan nuansa tentang teknologi *hovercraft* dan kapal berbantalan udara. Bab ini tidak hanya akan menyajikan informasi teknis yang rinci, tetapi juga akan mengilustrasikan peran penting teknologi-teknologi ini dalam membentuk masa depan transportasi maritim dan amfibi, membuka jalan bagi inovasi lebih lanjut dalam industri perkapalan dan transportasi global.

6.2 Surface Effect Ship (SES)

Surface Effect Ship (SES) merupakan inovasi revolusioner dalam dunia teknologi maritim, menggabungkan keunggulan kapal katamaran dengan sistem bantalan udara canggih. Konsep ini, yang pertama kali dikembangkan pada era 1960-an, lahir dari keinginan para insinyur maritim untuk menciptakan kapal yang mampu melaju dengan kecepatan tinggi namun tetap efisien dalam penggunaan bahan bakar. SES menawarkan solusi unik untuk tantangan ini dengan desainnya yang memungkinkan kapal untuk "melayang" di atas permukaan air, secara signifikan mengurangi gesekan dan tahanan hidrodinamik yang umumnya menjadi hambatan utama bagi kapal-kapal konvensional dalam mencapai kecepatan tinggi.

Keunikan SES terletak pada kemampuannya untuk mengombinasikan kestabilan dan efisiensi kapal katamaran dengan kecepatan dan kelincahan *hovercraft*. Namun, berbeda dengan *hovercraft* yang sepenuhnya terangkat di atas permukaan, SES mempertahankan sebagian kecil badan kapalnya tetap berada di dalam air. Konfigurasi ini memberikan SES keunggulan dalam hal stabilitas dan kemampuan manuver, terutama di perairan bergelombang, sambil tetap mempertahankan efisiensi tinggi yang menjadi ciri khas teknologi bantalan udara.

6.2.1 Prinsip Operasi SES

Prinsip operasi *Surface Effect Ship* didasarkan pada konsep yang relatif sederhana namun revolusioner dalam penerapannya. Bayangkan sebuah katamaran - kapal dengan dua lambung paralel - yang di antara kedua lambungnya terdapat ruang tertutup yang berfungsi sebagai wadah udara bertekanan. Inilah esensi dari SES. Udara bertekanan tinggi dipompa ke dalam ruang ini, yang dikenal sebagai plenum, oleh sistem *blower* atau *fan* yang kuat. Udara ini kemudian "terperangkap" oleh serangkaian *skirts* atau *seals* fleksibel yang terpasang di bagian depan dan belakang kapal.

Ketika udara bertekanan mengisi plenum, ia menciptakan bantalan udara yang mengangkat sebagian besar berat kapal. Efek ini mirip dengan yang terjadi pada *hovercraft*, tetapi dengan perbedaan krusial: sementara *hovercraft* sepenuhnya terangkat dari permukaan, SES mempertahankan sebagian kecil lambungnya tetap terendam dalam air. Konfigurasi unik ini memberikan SES keseimbangan optimal antara pengurangan tahanan dan stabilitas navigasi.

Proses ini menghasilkan pengurangan dramatis dalam tahanan hidrodinamik faktor utama yang membatasi kecepatan kapal konvensional. Efek pengurangan tahanan ini semakin signifikan seiring dengan peningkatan kecepatan. Pada kecepatan rendah, SES beroperasi seperti katamaran biasa, dengan kedua lambungnya sepenuhnya terendam. Namun, ketika kecepatan meningkat dan sistem bantalan udara diaktifkan sepenuhnya, SES mulai "mengangkat" dirinya, mengurangi area permukaan yang bersentuhan dengan air, dan dengan demikian secara drastis mengurangi gesekan dan tahanan air.

Keunikan desain ini memungkinkan SES untuk mencapai kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan kapal konvensional dengan daya mesin yang sama. Tidak hanya itu, efisiensi bahan bakar SES pada kecepatan tinggi juga jauh lebih baik, sering kali mencapai dua kali lipat efisiensi kapal konvensional dengan ukuran serupa. Hal ini membuat SES menjadi pilihan menarik untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan kombinasi kecepatan tinggi dan efisiensi

operasional, mulai dari kapal patroli cepat hingga feri penumpang jarak jauh.

6.2.2 Sistem Bantalan Udara

Jantung dari teknologi *Surface Effect Ship* adalah sistem bantalan udaranya yang canggih. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen kritis yang bekerja sama secara harmonis untuk menciptakan dan mempertahankan bantalan udara yang stabil dan efisien. Komponen utama dari sistem ini adalah *blower* atau fan, sistem saluran distribusi, *skirts* atau *seals*, dan sistem kontrol yang canggih.

1. *Blower* atau *Fan*

Blower atau *fan* dalam sistem SES bukan sekadar pompa udara biasa. Ini adalah mesin bertenaga tinggi yang dirancang khusus untuk menghasilkan volume udara bertekanan tinggi yang besar secara konsisten. Desain *blower* ini bisa bervariasi, dari tipe sentrifugal hingga aksial, tergantung pada kebutuhan spesifik kapal dan preferensi desainer. Faktor kritis dalam pemilihan dan desain *blower* adalah kemampuannya untuk menghasilkan aliran udara yang cukup tidak hanya untuk menciptakan bantalan udara awal, tetapi juga untuk mempertahankannya melawan kebocoran konstan melalui *skirts* dan gap lainnya.

2. Sistem Saluran Distribusi

Udara bertekanan dari *blower* kemudian didistribusikan ke seluruh area plenum melalui sistem saluran yang dirancang dengan presisi. Desain sistem saluran ini adalah hasil dari analisis aliran fluida yang kompleks, dengan tujuan untuk memastikan distribusi udara yang merata ke seluruh area bantalan. Efisiensi sistem saluran ini sangat penting; setiap kerugian tekanan dalam sistem berarti lebih banyak energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan bantalan udara, yang pada gilirannya mengurangi efisiensi keseluruhan kapal.

3. *Skirts* atau *Seals*

Skirts atau *seals* yang mengelilingi perimeter bantalan udara adalah komponen kritis lainnya. Terbuat dari material fleksibel seperti karet sintesis atau komposit elastomer khusus, *skirts* ini harus mampu mempertahankan integritas bantalan udara sambil tetap cukup

fleksibel untuk mengakomodasi gelombang dan perubahan ketinggian permukaan air. Desain *skirts* modern sering kali melibatkan sistem segmentasi yang memungkinkan bagian-bagian tertentu untuk bergerak secara independen, meningkatkan kemampuan adaptasi terhadap kondisi laut yang bervariasi.

4. Sistem Kontrol

Mengontrol semua elemen ini adalah sistem kontrol canggih yang terus-menerus memantau dan menyesuaikan tekanan dan distribusi udara dalam bantalan. Sistem ini menggunakan jaringan sensor tekanan yang tersebar di seluruh plenum, memberikan umpan balik *real-time* ke unit kontrol pusat. Algoritma kontrol canggih, sering kali memanfaatkan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin, kemudian menyesuaikan *output blower* dan konfigurasi *skirts* untuk mengoptimalkan performa bantalan udara dalam berbagai kondisi operasional.

Efektivitas keseluruhan sistem bantalan udara sangat bergantung pada keseimbangan yang tepat antara pasokan udara dari *blower* dan kebocoran melalui *skirts* dan celah lainnya. Pencapaian keseimbangan ini adalah hasil dari iterasi desain yang ekstensif dan pengujian dalam berbagai kondisi.

Perkembangan terkini dalam teknologi bantalan udara SES meliputi penggunaan material baru untuk *skirts* yang lebih tahan lama dan efektif, implementasi sistem kontrol berbasis AI yang dapat memprediksi dan menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi laut, serta integrasi teknologi pemantauan kondisi yang memungkinkan perawatan prediktif, meningkatkan keandalan dan mengurangi waktu henti operasional.

6.2.3 Desain *Hull* dan *Skirting*

Desain *hull* dan *skirting* pada *Surface Effect Ship* merupakan hasil dari optimalisasi kompleks yang mempertimbangkan berbagai faktor hidrodinamis dan aerodinamis. Berbeda dengan kapal konvensional yang hanya perlu mempertimbangkan interaksi dengan air, desainer SES harus memperhitungkan interaksi simultan antara kapal, air, dan udara bertekanan dalam bantalan.

1. Bentuk Lambung

Hull SES terdiri dari dua lambung paralel yang dihubungkan oleh struktur atas, membentuk konfigurasi yang mirip dengan katamaran. Namun, perbedaan krusialnya terletak pada desain detail lambung ini. Kedua lambung SES biasanya memiliki bentuk yang jauh lebih ramping dan hidrodinamis dibandingkan dengan katamaran konvensional. Rasio panjang-lebar (L/B) lambung SES umumnya lebih tinggi, yang membantu mengurangi tahanan gelombang dan meningkatkan stabilitas pada kecepatan tinggi.

Bagian bawah lambung SES sering kali mengadopsi desain “*step*” atau bertingkat. Fitur ini berfungsi untuk memfasilitasi aliran air yang lebih efisien di sekitar lambung, terutama pada kecepatan tinggi. Ketika SES beroperasi dengan bantalan udara aktif, sebagian besar berat kapal ditopang oleh tekanan udara, meminimalkan area lambung yang bersentuhan dengan air. Dalam kondisi ini, desain “*step*” membantu menciptakan aliran air yang lebih teratur, mengurangi turbulensi dan gesekan.

2. Struktur Atas

Struktur atas SES juga memainkan peran penting dalam keseluruhan performa kapal. Berbeda dengan kapal konvensional di mana pertimbangan aerodinamis mungkin hanya sekunder, desain struktur atas SES harus sangat memperhatikan aliran udara. Bentuk struktur atas yang efisien secara aerodinamis tidak hanya mengurangi hambatan angin pada kecepatan tinggi, tetapi juga membantu dalam pengelolaan aliran udara di sekitar kapal, yang dapat mempengaruhi stabilitas bantalan udara.

3. Material

Pemilihan material untuk konstruksi *hull* dan struktur atas SES juga merupakan aspek kritis dalam desain. Tren terkini mengarah pada penggunaan material komposit ringan seperti serat karbon dan kevlar, yang memungkinkan pengurangan berat total kapal tanpa mengorbankan kekuatan struktural. Beberapa desain terbaru bahkan menggunakan kombinasi inovatif antara aluminium dan komposit, memanfaatkan kelebihan masing-masing material untuk mencapai optimalisasi berat, kekuatan, dan biaya.

Skirting, yang merupakan komponen integral dari sistem bantalan udara, adalah elemen desain yang sangat khusus pada SES. Fungsi utama *skirting* adalah untuk menahan udara dalam bantalan sambil tetap memungkinkan kapal untuk mengatasi gelombang dan perubahan ketinggian permukaan air. Desain *skirting* yang efektif harus menyeimbangkan beberapa kebutuhan yang sering kali bertentangan: fleksibilitas untuk mengakomodasi pergerakan air, kekakuan untuk mempertahankan bentuk bantalan udara, dan daya tahan terhadap aus dan kerusakan.

Desain *skirting* modern melibatkan beberapa pertimbangan kompleks:

1. Material

Material yang digunakan untuk *skirting* telah berkembang jauh sejak konsep SES pertama kali diperkenalkan. Karet sintetis khusus dan komposit elastomer yang tahan aus dan korosi air laut kini menjadi standar. Beberapa desain terbaru bahkan mengeksplorasi penggunaan material "*smart*" yang dapat mengubah kekakuannya secara dinamis sesuai dengan kondisi operasional, memberikan fleksibilitas yang belum pernah ada sebelumnya dalam pengelolaan bantalan udara.

2. Konfigurasi

Konfigurasi *skirting* modern sering kali mengadopsi desain segmentasi, di mana *skirting* terdiri dari beberapa bagian yang dapat bergerak secara independen. Pendekatan ini meningkatkan kemampuan adaptasi *skirting* terhadap gelombang dan perubahan permukaan air, memungkinkan pemeliharaan bantalan udara yang lebih stabil dalam berbagai kondisi laut. Selain itu, desain "*finger*" atau "*lobe*" pada bagian bawah *skirting* telah terbukti efektif dalam meningkatkan fleksibilitas dan mengurangi kebocoran udara.

3. Sistem *Tensioning*

Sistem *tensioning* pada *skirting* juga merupakan area inovasi yang signifikan. Mekanisme *tensioning* modern memungkinkan penyesuaian ketegangan *skirting* secara dinamis, baik secara manual maupun otomatis, untuk mengoptimalkan performa di berbagai

kondisi laut. Ini memberikan fleksibilitas operasional yang lebih besar, memungkinkan SES untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan.

4. Proteksi dan Perawatan

Aspek penting lainnya dalam desain *skirting* adalah pertimbangan untuk proteksi dan perawatan. Mengingat lingkungan operasi yang keras, *skirting* rentan terhadap kerusakan akibat debris di air atau benturan dengan objek terapung. Desain modern sering kali memasukkan sistem pelindung khusus dan mengadopsi pendekatan modular yang memungkinkan penggantian cepat bagian yang aus atau rusak, mengurangi waktu henti dan biaya perawatan.

Inovasi terbaru dalam desain *hull* dan *skirting* SES semakin banyak memanfaatkan simulasi komputer canggih dan analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pendekatan ini memungkinkan para insinyur untuk memodelkan dan mengoptimalkan interaksi kompleks antara *hull*, bantalan udara, *skirting*, dan permukaan air dalam berbagai kondisi operasional sebelum *prototipe* fisik dibangun. Hasil dari analisis CFD ini telah menghasilkan peningkatan signifikan dalam efisiensi dan stabilitas SES, dengan beberapa desain terbaru menunjukkan peningkatan performa hingga 20-30% dibandingkan dengan generasi sebelumnya.

Tantangan utama dalam desain *hull* dan *skirting* SES adalah mencapai keseimbangan optimal antara performa di laut, efisiensi energi, dan biaya konstruksi serta perawatan. Seiring dengan perkembangan teknologi dan materi baru, para insinyur terus mengeksplorasi desain inovatif yang dapat meningkatkan efisiensi dan kemampuan SES. Salah satu area pengembangan yang menjanjikan adalah integrasi teknologi *active control* pada *hull* dan *skirting*. Sistem ini menggunakan sensor canggih dan aktuator cepat untuk secara dinamis menyesuaikan bentuk dan konfigurasi *hull* serta *skirting* dalam merespon perubahan kondisi laut secara *real-time*. Meskipun masih dalam tahap eksperimental, teknologi ini memiliki potensi untuk secara signifikan meningkatkan performa dan kenyamanan SES di berbagai kondisi laut.

Aspek lain yang mendapat perhatian khusus dalam desain SES modern adalah pengurangan *noise* dan getaran. Operasi pada kecepatan tinggi dan penggunaan sistem bantalan udara dapat menghasilkan tingkat kebisingan dan getaran yang signifikan, yang dapat mempengaruhi kenyamanan penumpang dan efektivitas operasional, terutama dalam aplikasi militer yang memerlukan *stealth*. Desainer kini menerapkan teknik peredaman suara canggih dan menggunakan material penyerap getaran dalam konstruksi *hull* dan struktur atas untuk mengatasi masalah ini.

6.2.4 Performa di Berbagai Kondisi Laut

Salah satu keunggulan utama *Surface Effect Ship* adalah kemampuannya untuk mempertahankan performa tinggi di berbagai kondisi laut. Karakteristik unik SES memungkinkannya untuk mengatasi banyak tantangan yang biasanya membatasi operasi kapal konvensional, terutama dalam hal kecepatan dan stabilitas di laut bergelombang.

Dalam kondisi laut tenang, SES menunjukkan keunggulan yang luar biasa dalam hal kecepatan dan efisiensi. Dengan sebagian besar berat kapal ditopang oleh bantalan udara, tahanan hidrodinamik berkurang secara drastis. Hal ini memungkinkan SES untuk mencapai kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan kapal konvensional dengan daya mesin yang setara. Beberapa desain SES modern mampu mencapai kecepatan hingga 50-60 knot dalam kondisi optimal, sebuah pencapaian yang sulit direalisasikan oleh kapal displasemen konvensional.

Efisiensi bahan bakar SES pada kecepatan tinggi juga patut dicatat. Penelitian menunjukkan bahwa pada kecepatan operasional yang sama, SES dapat mengkonsumsi hingga 40-50% lebih sedikit bahan bakar dibandingkan kapal konvensional dengan ukuran serupa. Efisiensi ini berasal dari kombinasi pengurangan tahanan hidrodinamik dan desain propulsi yang dioptimalkan untuk operasi kecepatan tinggi.

Namun, keunggulan SES menjadi semakin jelas ketika beroperasi di laut bergelombang. Di sini, interaksi kompleks antara bantalan udara, *skirting*, dan permukaan air yang bergelombang menciptakan

dinamika yang unik. Sistem bantalan udara pada SES bertindak sebagai peredam, secara efektif mengisolasi badan kapal dari sebagian besar gerakan vertikal yang disebabkan oleh gelombang. Hal ini menghasilkan perjalanan yang jauh lebih stabil dan nyaman dibandingkan dengan kapal konvensional dalam kondisi yang sama.

Sistem kontrol bantalan udara yang canggih memainkan peran krusial dalam mempertahankan performa SES di laut bergelombang. Sensor tekanan yang tersebar di seluruh plenum terus-menerus memantau kondisi bantalan udara. Informasi ini digunakan oleh sistem kontrol untuk menyesuaikan tekanan bantalan secara dinamis, mengkompensasi perubahan cepat dalam jarak antara kapal dan permukaan air akibat gelombang. Beberapa sistem kontrol terbaru bahkan menggunakan algoritma prediktif berbasis AI yang dapat mengantisipasi perubahan kondisi laut dan menyesuaikan bantalan udara sebelum gelombang besar menghantam kapal. Kemampuan untuk mempertahankan kecepatan tinggi di laut bergelombang membuat SES menjadi pilihan menarik untuk berbagai aplikasi, mulai dari operasi pencarian dan penyelamatan hingga patroli perbatasan maritim.

Salah satu keunggulan signifikan lainnya dari SES adalah kemampuannya untuk beroperasi di perairan dangkal. Dengan *draft* yang relatif dangkal ketika bantalan udara aktif, SES dapat beroperasi di perairan dengan kedalaman hanya 1-2 meter. Kemampuan ini membuka peluang untuk aplikasi khusus seperti operasi pesisir, navigasi di delta sungai, atau akses ke pelabuhan dangkal yang mungkin tidak dapat dijangkau oleh kapal konvensional dengan ukuran serupa.

Beberapa desain SES bahkan telah dikembangkan khusus untuk operasi di perairan es. Dalam aplikasi ini, bantalan udara dimanfaatkan untuk "meluncur" di atas permukaan es tipis, memungkinkan navigasi di daerah yang biasanya tidak dapat diakses oleh kapal konvensional tanpa bantuan pemecah es. Kemampuan ini membuat SES menjadi alat yang berharga untuk operasi di daerah kutub, baik untuk tujuan penelitian ilmiah maupun logistik.

Meskipun demikian, SES juga menghadapi tantangan tertentu dalam kondisi laut ekstrem. Efektivitas bantalan udara dapat berkurang secara signifikan dalam kondisi laut yang sangat ekstrem (tingkat 6+ skala *Beaufort*). Dalam kondisi ini, kebocoran udara melalui *skirting* dapat meningkat drastis, membuat sistem bantalan udara kesulitan untuk mempertahankan tekanan yang diperlukan. Selain itu, gelombang besar dapat menyebabkan benturan berulang antara bagian bawah kapal dan permukaan air, fenomena yang dikenal sebagai "*slamming*", yang dapat menyebabkan ketidaknyamanan penumpang dan potensi kerusakan struktural.

Untuk mengatasi tantangan ini, beberapa desain SES modern dilengkapi dengan mode operasi ganda. Dalam kondisi laut ekstrem, kapal dapat beralih ke mode operasi katamaran konvensional, dengan sistem bantalan udara dinonaktifkan dan kedua lambung sepenuhnya terendam. Meskipun hal ini mengurangi kecepatan dan efisiensi, ini memungkinkan kapal untuk tetap beroperasi dalam kondisi di mana sistem bantalan udara tidak lagi efektif.

Konsumsi energi untuk mempertahankan bantalan udara juga menjadi pertimbangan penting, terutama dalam operasi jarak jauh. Meskipun SES sangat efisien pada kecepatan tinggi, energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem bantalan udara dapat menjadi signifikan, terutama dalam kondisi laut yang lebih menantang. Untuk mengatasi masalah ini, inovasi dalam desain *blower* dan sistem kontrol terus dikembangkan, dengan fokus pada peningkatan efisiensi energi.

Perkembangan terkini dalam teknologi SES mengarah pada beberapa area utama. Pertama, ada upaya berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi energi melalui pengembangan sistem propulsi *hybrid* dan integrasi teknologi energi terbarukan. Beberapa konsep bahkan mengeksplorasi penggunaan sel bahan bakar *hydrogen* untuk operasi yang lebih bersih dan efisien. Kedua, implementasi sistem kontrol canggih berbasis AI dan *machine learning* menjanjikan optimalisasi *real-time* performa bantalan udara dan navigasi. Sistem ini dapat secara cepat menyesuaikan parameter operasional kapal berdasarkan kondisi laut yang berubah-ubah, meningkatkan efisiensi

dan keamanan. Ketiga, penggunaan material inovatif terus mendorong batas-batas performa SES. Nanomaterial dan komposit canggih sedang dieksplorasi untuk mengurangi berat kapal lebih lanjut sambil meningkatkan kekuatan dan daya tahan. Pengembangan *skirting* “*smart*” yang dapat beradaptasi secara dinamis terhadap kondisi laut juga merupakan area penelitian yang menjanjikan. Terakhir, ada fokus yang berkembang pada pengembangan SES untuk aplikasi khusus. Ini termasuk desain SES untuk operasi militer dengan kemampuan *stealth* dan manuver tinggi, serta SES ramah lingkungan untuk transportasi penumpang di daerah yang sensitif secara ekologis.

Dengan kombinasi unik antara kecepatan tinggi, efisiensi, dan kemampuan operasi di berbagai kondisi laut, *Surface Effect Ship* terus menarik perhatian sebagai solusi potensial untuk berbagai kebutuhan transportasi maritim modern. Dari kapal patroli cepat hingga feri penumpang berkapasitas besar, SES menawarkan alternatif yang menarik terhadap desain kapal konvensional. Penelitian dan pengembangan berkelanjutan dalam teknologi SES menjanjikan peningkatan lebih lanjut dalam performa, efisiensi, dan aplikasi di masa depan, membuka kemungkinan baru dalam transportasi maritim dan operasi laut.

6.3 Air Cushion Vehicle (ACV)

Air Cushion Vehicle (ACV), yang lebih dikenal sebagai *hovercraft*, merupakan kendaraan revolusioner yang mendobrak batasan konvensional antara transportasi darat dan air. Dikembangkan oleh Sir Christopher Cockerell pada tahun 1950-an, ACV telah mengalami evolusi signifikan, menjadi solusi unik untuk berbagai aplikasi transportasi dan operasional di seluruh dunia. Prinsip dasar ACV adalah penggunaan bantalan udara bertekanan untuk mengangkat seluruh kendaraan di atas permukaan, memungkinkannya bergerak dengan hambatan minimal di atas berbagai jenis permukaan.

6.3.1 Konsep Dasar ACV

Konsep fundamental ACV didasarkan pada prinsip menciptakan lapisan tipis udara bertekanan di bawah kendaraan. Struktur dasar

ACV terdiri dari badan utama (*hull*) yang relatif datar dan lebar, dikelilingi oleh sistem *skirt* fleksibel. *Hull* ACV biasanya terbuat dari material ringan namun kuat seperti aluminium atau komposit *fiber*, yang memungkinkan rasio kekuatan-berat yang optimal.

Sistem *skirt*, yang merupakan komponen kritis dalam desain ACV, telah mengalami evolusi signifikan sejak konsep awalnya. *Skirt* modern menggunakan desain *segmented* atau *lobed*, yang terdiri dari beberapa bagian independen. Setiap segmen dapat bergerak secara terpisah, memungkinkan adaptasi yang lebih baik terhadap kontur permukaan dan gelombang. Material yang digunakan untuk *skirt* juga telah berkembang, dari karet sederhana menjadi komposit canggih yang menggabungkan serat aramid seperti Kevlar dengan elastomer tahan aus. Inovasi terbaru bahkan melibatkan penggunaan material “*smart*” yang dapat mengubah kekakuannya sebagai *respons* terhadap kondisi operasional.

Sistem pengangkatan (*lift system*) ACV terdiri dari satu atau lebih kipas besar atau *blower*. Teknologi kipas modern sering menggunakan desain *mixed-flow*, yang menggabungkan karakteristik kipas aksial dan sentrifugal untuk efisiensi optimal. Kipas ini biasanya digerakkan oleh mesin diesel atau turbin gas, meskipun ada tren yang berkembang menuju sistem propulsi *hybrid* dan bahkan sepenuhnya elektrik untuk aplikasi tertentu.

Efisiensi sistem *lift* sangat bergantung pada desain plenum - ruang di bawah *hull* di mana udara bertekanan ditahan. Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) modern memungkinkan optimalisasi geometri plenum untuk distribusi tekanan yang merata dan minimalisasi kebocoran udara. Beberapa desain canggih bahkan menggunakan sistem plenum berkompartemen, di mana tekanan di berbagai bagian bantalan udara dapat diatur secara independen untuk stabilitas dan kinerja yang lebih baik di berbagai kondisi permukaan.

6.3.2 Sistem *Lift* dan Propulsi

Sistem *lift* ACV modern sering menggunakan konfigurasi kipas ganda untuk optimalisasi efisiensi. Dalam konfigurasi ini, satu set kipas dikhususkan untuk sistem *lift*, sementara set lainnya digunakan

untuk propulsi. Kipas *lift* biasanya berupa kipas sentrifugal besar yang mampu menghasilkan volume udara yang signifikan pada tekanan rendah.

Inovasi terbaru dalam desain sistem *lift* meliputi penggunaan teknologi kipas *variable-pitch*. Sistem ini memungkinkan penyesuaian sudut bilah kipas secara dinamis, mengoptimalkan aliran udara untuk berbagai kondisi operasional. Misalnya, sudut *pitch* dapat ditingkatkan untuk menghasilkan tekanan yang lebih tinggi saat ACV beroperasi di permukaan yang kasar atau bergelombang, dan dikurangi untuk efisiensi yang lebih baik saat beroperasi di permukaan yang halus.

Kontrol *lift* yang presisi juga dicapai melalui penggunaan sistem manajemen bantalan udara berbasis komputer. Sensor tekanan yang tersebar di seluruh plenum memberikan umpan balik *real-time* ke unit kontrol pusat, yang kemudian menyesuaikan *output* kipas dan konfigurasi *skirt* untuk mempertahankan bantalan udara optimal. Beberapa sistem canggih bahkan menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk memprediksi dan mengkompensasi perubahan kondisi permukaan sebelum terjadi, meningkatkan stabilitas dan efisiensi operasional.

Sistem propulsi ACV menghadapi tantangan unik karena harus menggerakkan kendaraan yang praktis tidak memiliki kontak langsung dengan permukaan. Solusi yang paling umum adalah penggunaan kipas udara besar atau baling-baling pesawat. Kipas propulsi biasanya berupa kipas aksial besar yang dipasang di bagian belakang atau atas kendaraan. Desain modern sering menggunakan baling-baling dengan bilah komposit yang dapat disesuaikan *pitch*nya, memungkinkan optimalisasi gaya dorong untuk berbagai kecepatan operasi.

Perkembangan terbaru dalam teknologi propulsi ACV meliputi:

1. Sistem Propulsi *Hybrid*: Menggabungkan mesin pembakaran internal dengan motor listrik, sistem ini menawarkan fleksibilitas operasional yang lebih besar dan efisiensi bahan bakar yang ditingkatkan. Dalam mode *hybrid*, mesin pembakaran internal dapat beroperasi pada kecepatan konstan yang optimal,

menggerakkan generator yang memasok daya ke motor listrik. Ini tidak hanya meningkatkan efisiensi bahan bakar tetapi juga mengurangi kebisingan dan emisi, terutama selama operasi kecepatan rendah atau saat hover.

2. **Propulsi Elektrik:** Meskipun masih dalam tahap pengembangan awal untuk ACV ukuran besar, sistem propulsi sepenuhnya elektrik menjanjikan operasi yang lebih bersih dan lebih senyap. Tantangan utama terletak pada densitas energi baterai dan manajemen berat, tetapi kemajuan dalam teknologi baterai *lithium-ion* dan pengembangan baterai *solid-state* menjanjikan peningkatan signifikan dalam kemampuan propulsi elektrik di masa depan.
3. **Sistem *Waterjet*:** Beberapa desain ACV inovatif menggunakan sistem *waterjet* sebagai metode propulsi tambahan, terutama untuk operasi di air. Sistem ini memanfaatkan air yang terkumpul di bawah *skirt*, memompanya melalui nosel yang dapat diarahkan untuk propulsi dan manuver. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi propulsi saat beroperasi di atas air dan memberikan kemampuan manuver tambahan.
4. **Teknologi *Superconducting Electric Motors*:** Penelitian terkini mengeksplorasi penggunaan motor listrik superkonduktor untuk propulsi ACV. Motor ini menawarkan rasio daya-berat yang sangat tinggi dan efisiensi yang luar biasa, yang dapat secara signifikan meningkatkan kinerja dan jangkauan ACV elektrik.

6.3.3 Manuverabilitas dan Kontrol

Manuverabilitas dan kontrol ACV merupakan aspek yang kompleks dan menantang dalam desain dan operasinya. Tidak seperti kendaraan konvensional, ACV harus mengandalkan manipulasi aliran udara untuk kontrol arah dan kecepatan. Sistem kontrol utama pada ACV modern biasanya terdiri dari kombinasi *rudder* udara, *deflector*, dan dalam beberapa kasus, nosel dorong yang dapat diarahkan.

Rudder udara, yang ditempatkan di belakang kipas propulsi utama, berfungsi untuk mengubah arah aliran udara. Desain *rudder* modern sering menggunakan profil *airfoil* yang dioptimalkan melalui

analisis CFD untuk efisiensi maksimum. Beberapa ACV canggih bahkan menggunakan sistem *rudder* ganda atau *split-rudder* yang memungkinkan kontrol arah yang lebih presisi.

Deflector, di sisi lain, digunakan untuk mengarahkan sebagian dari aliran udara *lift* ke samping atau ke belakang. Sistem *deflector* modern sering menggunakan aktuator hidrolik atau elektrik yang memungkinkan penyesuaian cepat dan presisi. Beberapa desain inovatif menggunakan sistem *deflector* variabel yang dapat mengubah bentuknya untuk mengoptimalkan aliran udara dalam berbagai kondisi operasional.

Salah satu karakteristik unik ACV adalah kemampuannya untuk melakukan gerakan menyamping atau "*sideways sliding*". Ini dicapai dengan mengarahkan aliran udara secara lateral, memungkinkan ACV untuk bergerak ke samping tanpa perlu mengubah orientasi badannya. Teknologi terbaru dalam kontrol ACV memanfaatkan sistem *thrust vectoring* canggih yang memungkinkan pergerakan *omnidirectional*, meningkatkan kemampuan manuver di ruang terbatas.

Kontrol kecepatan pada ACV modern dicapai melalui kombinasi pengaturan daya pada sistem propulsi dan manipulasi geometri *skirt*. Sistem "*active skirt control*" memungkinkan bagian-bagian tertentu dari *skirt* untuk dinaikkan atau diturunkan secara independen. Teknologi ini tidak hanya membantu dalam kontrol kecepatan tetapi juga meningkatkan kemampuan ACV untuk mengatasi hambatan seperti ombak atau perubahan mendadak dalam elevasi permukaan.

Tantangan utama dalam pengendalian ACV adalah karakteristik inersianya yang unik. Untuk mengatasi hal ini, sistem kontrol modern mengintegrasikan teknologi *fly-by-wire* dan algoritma kontrol canggih. Beberapa fitur kontrol canggih meliputi:

1. Sistem Stabilisasi Dinamis: Menggunakan giroskop dan akselerometer untuk mendeteksi dan mengkompensasi gerakan yang tidak diinginkan, meningkatkan stabilitas terutama dalam kondisi bergelombang.
2. *Predictive Path Control*: Memanfaatkan algoritma AI untuk memprediksi jalur ACV berdasarkan input kontrol dan kondisi

lingkungan, memungkinkan penyesuaian kontrol yang lebih halus dan akurat.

3. *Adaptive Control Systems*: Sistem yang dapat menyesuaikan parameter kontrolnya berdasarkan perubahan kondisi operasional, seperti kecepatan angin, kondisi permukaan, atau beban kendaraan.
4. *Augmented reality Displays*: Menggabungkan data sensor dengan tampilan visual untuk membantu operator dalam navigasi dan kontrol, terutama dalam kondisi visibilitas rendah.

Perkembangan terbaru dalam teknologi kontrol ACV melibatkan penggunaan sistem navigasi dan kontrol otonomus. Dengan memanfaatkan sensor canggih, GPS presisi tinggi, dan algoritma kecerdasan buatan, ACV modern dapat melakukan navigasi dan manuver kompleks dengan sedikit atau tanpa input dari operator manusia. Teknologi ini membuka kemungkinan untuk operasi ACV dalam kondisi berbahaya atau di daerah terpencil.

6.3.4 Aplikasi Khusus ACV

Fleksibilitas dan kemampuan unik *Air Cushion Vehicle* telah membuka jalan bagi berbagai aplikasi khusus yang memanfaatkan kelebihan teknologi ini:

1. Operasi Militer dan Penyelamatan: ACV telah menjadi aset berharga dalam operasi amfibi militer. Angkatan laut beberapa negara mengoperasikan ACV besar seperti *Landing Craft Air Cushion* (LCAC) yang mampu mengangkut tank dan kendaraan lapis baja lainnya. LCAC dapat mencapai kecepatan hingga 70 knot dan mampu beroperasi di 70% garis pantai dunia, jauh melebihi kemampuan kapal pendaratan konvensional. Dalam operasi penyelamatan, ACV seperti seri SAR (*Search and Rescue*) dari Griffon Hoverwork telah terbukti sangat efektif. Kendaraan ini dapat beroperasi di atas air, lumpur, dan bahkan puing-puing, memungkinkan akses cepat ke area yang terkena bencana. Selama banjir besar di Eropa pada tahun 2021, ACV digunakan secara ekstensif untuk evakuasi dan pengiriman bantuan di daerah yang tidak dapat dijangkau oleh kendaraan konvensional.

2. Eksplorasi Sumber Daya: Di wilayah Arktik, perusahaan seperti Shell dan ExxonMobil telah menggunakan ACV untuk survei seismik dan transportasi personel. ACV model AP1-88 yang dikembangkan oleh ARMV telah menjadi standar industri untuk operasi di es, mampu beroperasi dalam suhu hingga -40°C dan mengatasi retakan es hingga 1,5 meter. Di delta sungai dan daerah rawa, ACV digunakan untuk akses ke lokasi pengeboran minyak dan gas yang terpencil. Kendaraan seperti Griffon 8100TD dapat mengangkut muatan hingga 8 ton dan beroperasi di atas lumpur, vegetasi rawa, dan perairan dangkal tanpa kerusakan lingkungan yang signifikan.
3. Pariwisata dan Transportasi: Di Inggris, *Hovertravel* mengoperasikan layanan feri ACV reguler antara *Portsmouth* dan *Isle of Wight*, menawarkan waktu perjalanan yang jauh lebih cepat dibandingkan feri konvensional. ACV yang digunakan, Griffon 12000TD, dapat mengangkut hingga 130 penumpang dengan kecepatan operasional 45 knot. Di Sungai Amazona, Brasil, ACV digunakan untuk tur ekowisata, memungkinkan akses ke area hutan hujan yang sebelumnya sulit dijangkau tanpa mengganggu ekosistem yang sensitif. Model seperti *Neoteric HoverTrek*, yang dapat mengangkut hingga 6 penumpang, menjadi populer untuk aplikasi ini.
4. Aplikasi Ilmiah dan Penelitian: Lembaga penelitian seperti British Antarctic Survey menggunakan ACV untuk penelitian di daerah kutub. ACV memungkinkan pengumpulan data di atas permukaan es yang tidak stabil dan perairan terbuka, memberikan fleksibilitas yang tidak dapat dicapai oleh kendaraan konvensional atau kapal. Di lahan basah dan ekosistem pesisir, ACV digunakan untuk pemantauan lingkungan dan penelitian ekologi. Universitas Delaware, misalnya, menggunakan ACV kecil untuk studi dampak perubahan iklim pada ekosistem pesisir. Kendaraan ini memungkinkan peneliti untuk mengakses area sensitif tanpa mengganggu vegetasi atau sedimen.
5. Pertanian dan Pengelolaan Lahan: Dalam sektor pertanian, ACV khusus sedang dikembangkan untuk aplikasi seperti

penyemprotan presisi di lahan basah atau sawah. Perusahaan seperti *Airlift Hovercraft* telah mengembangkan ACV pertanian yang dapat beroperasi di atas tanaman padi tanpa merusaknya, memungkinkan aplikasi pupuk dan pestisida yang lebih efisien. Di perkebunan kelapa sawit di Asia Tenggara, ACV digunakan untuk transportasi buah sawit dari area yang sulit diakses. Model seperti Griffon 2000TD mampu mengangkut hingga 2 ton buah sawit melalui rawa dan kanal sempit yang umum di perkebunan.

6. Pemeliharaan Infrastruktur: Perusahaan utilitas menggunakan ACV untuk inspeksi dan pemeliharaan jalur pipa dan saluran listrik di daerah terpencil atau sulit diakses. Di Kanada, TransCanada menggunakan ACV untuk patroli pipa di daerah rawa dan tundra, memungkinkan akses sepanjang tahun ke infrastruktur kritis. Departemen Transportasi di beberapa negara juga menggunakan ACV untuk pemeliharaan jembatan dan struktur pesisir. Kemampuan ACV untuk beroperasi di air dan darat memudahkan inspeksi struktur bawah jembatan dan pemecah gelombang.
7. Operasi Keamanan dan Penegakan Hukum: Badan penegak hukum di berbagai negara menggunakan ACV untuk patroli perbatasan dan perairan. U.S. Border Patrol, misalnya, mengoperasikan armada ACV untuk patroli di sepanjang Rio Grande, memanfaatkan kemampuan amfibi kendaraan untuk mengatasi perubahan tinggi air musiman dan medan yang bervariasi. Di Inggris, polisi Thames Valley menggunakan ACV untuk *respons* cepat selama banjir, memungkinkan akses ke area yang terendam di mana kendaraan konvensional tidak dapat beroperasi.
8. Pengembangan Masa Depan: Konsep "eco-hovercraft" yang menggunakan propulsi elektrik dan teknologi pengurangan kebisingan sedang dikembangkan untuk transportasi perkotaan di kota-kota dengan jaringan sungai atau kanal. Proyek seperti "Thames Clippers" di London sedang mempertimbangkan penggunaan ACV elektrik untuk layanan feri sungai yang lebih cepat dan ramah lingkungan. Dalam konteks eksplorasi luar

angkasa, NASA dan ESA sedang meneliti potensi penggunaan teknologi bantalan udara untuk kendaraan penjelajah (*rover*) di planet dengan atmosfer tipis seperti Mars. Prinsip ACV dapat memungkinkan rover untuk mengatasi terrain yang sulit tanpa risiko terperosok di pasir atau debu.

Tantangan dan Pengembangan Berkelanjutan: Meskipun ACV menawarkan banyak keunggulan, teknologi ini juga menghadapi beberapa tantangan yang menjadi fokus pengembangan berkelanjutan:

1. Efisiensi Energi: Konsumsi bahan bakar yang relatif tinggi menjadi perhatian utama. Penelitian terkini fokus pada pengembangan sistem propulsi yang lebih efisien, termasuk teknologi *hybrid* dan *fully electric* untuk ACV ukuran kecil hingga menengah.
2. Pengurangan Kebisingan: Kebisingan yang dihasilkan oleh sistem *lift* dan propulsi dapat menjadi masalah, terutama dalam operasi di daerah pemukiman. Inovasi dalam desain kipas, peredam suara, dan material absorptif sedang dikembangkan untuk mengurangi jejak akustik ACV.
3. Peningkatan Stabilitas: Untuk meningkatkan kenyamanan penumpang dan keandalan operasional, khususnya dalam kondisi laut bergelombang, sistem stabilisasi aktif yang menggunakan teknologi *gyroscopic* dan kontrol komputerisasi sedang dikembangkan.
4. Durabilitas *Skirt*: Peningkatan daya tahan *skirt* tetap menjadi area penelitian aktif, dengan pengembangan material baru dan desain yang lebih tahan lama untuk mengurangi biaya pemeliharaan dan meningkatkan keandalan operasional.
5. Integrasi Teknologi Otonom: Pengembangan sistem navigasi dan kontrol otonom untuk ACV menjanjikan peningkatan keselamatan dan efisiensi operasional, terutama untuk aplikasi dalam lingkungan yang berbahaya atau sulit diakses.

6.4 Analisis Komparatif SES dan ACV

Surface Effect Ship (SES) dan *Air Cushion Vehicle* (ACV) merepresentasikan dua pendekatan inovatif dalam teknologi

kendaraan berbantalan udara yang telah secara signifikan mempengaruhi perkembangan transportasi maritim dan amfibi. Meskipun keduanya memanfaatkan prinsip dasar bantalan udara, SES dan ACV memiliki karakteristik, kelebihan, dan tantangan yang berbeda. Analisis komparatif ini akan menyelidiki secara mendalam berbagai aspek dari kedua teknologi, termasuk prinsip operasi, desain, performa, aplikasi, tantangan yang dihadapi, serta prospek pengembangan di masa depan.

6.4.1 Prinsip Operasi dan Desain

Surface Effect Ship (SES) dan *Air Cushion Vehicle* (ACV) memiliki perbedaan fundamental dalam prinsip operasi mereka yang mempengaruhi seluruh aspek desain dan kinerja kedua kendaraan ini. *Surface Effect Ship* (SES) mengadopsi pendekatan hibrida yang menggabungkan prinsip-prinsip kapal katamaran konvensional dengan teknologi bantalan udara. Desain dasar SES terdiri dari dua lambung samping (*sidehulls*) yang dihubungkan oleh struktur atas, membentuk saluran atau plenum di antara kedua lambung. Bagian depan dan belakang plenum ini ditutup oleh *skirt* fleksibel, menciptakan ruang tertutup di mana udara bertekanan diinjeksikan. Prinsip kerja utama SES adalah sebagai berikut:

1. Gaya Angkat Hidrostatik: Ketika tidak beroperasi atau pada kecepatan rendah, SES bertindak seperti katamaran konvensional, dengan sebagian besar gaya angkat disediakan oleh gaya apung hidrostatik dari kedua lambung samping.
2. Bantalan Udara: Saat beroperasi, udara bertekanan diinjeksikan ke dalam plenum, menciptakan bantalan udara yang mengangkat sebagian besar berat kapal. Ini secara signifikan mengurangi area basah (*wetted area*) lambung, yang pada gilirannya mengurangi hambatan hidrodinamik.
3. Interaksi Dinamis: Pada kecepatan tinggi, terjadi interaksi kompleks antara bantalan udara, permukaan air, dan lambung samping. Fenomena ini, yang dikenal sebagai "*dynamic air cushion*", lebih meningkatkan efisiensi dan performa SES.

Desain lambung SES umumnya lebih ramping dan hidrodinamis dibandingkan dengan ACV. Rasio panjang-lebar (*length-to-beam*

ratio) yang tinggi pada lambung samping SES membantu mengurangi hambatan gelombang pada kecepatan tinggi. Selain itu, bagian bawah lambung sering dirancang dengan “*step*” atau kontur khusus untuk mengoptimalkan aliran air dan distribusi tekanan pada kecepatan operasional.

Sistem *skirt* pada SES relatif sederhana dibandingkan dengan ACV, hanya perlu menutupi bagian depan dan belakang plenum. Namun, desain *skirt* SES tetap kritis untuk mempertahankan integritas bantalan udara, terutama dalam kondisi laut bergelombang. *Skirt* modern pada SES sering menggunakan konfigurasi “*finger*” atau “*lobe*” yang memungkinkan fleksibilitas lebih besar dalam mengakomodasi perubahan tinggi permukaan air.

Di sisi lain, *Air Cushion Vehicle* (ACV) mengadopsi pendekatan yang lebih radikal dengan sepenuhnya mengangkat kendaraan di atas permukaan menggunakan bantalan udara. Prinsip operasi dasar ACV meliputi:

1. Pengangkatan Penuh: Seluruh berat ACV ditopang oleh bantalan udara, tidak ada bagian kendaraan yang bersentuhan langsung dengan permukaan saat beroperasi.
2. *Skirt* Perimeter: Seluruh bagian bawah ACV dikelilingi oleh *skirt* fleksibel yang menahan udara di bawah kendaraan, menciptakan plenum tertutup.
3. Aliran Udara Kontinu: Udara terus-menerus dipompa ke dalam plenum untuk mempertahankan bantalan udara, dengan sebagian udara keluar melalui celah-celah kecil di bagian bawah *skirt*.

Desain *hull* ACV umumnya lebih datar dan lebar dibandingkan dengan SES, menyerupai “piring terbang” raksasa. Bentuk ini memaksimalkan area bantalan udara dan memungkinkan distribusi tekanan yang merata. Struktur *hull* ACV harus cukup kuat untuk menahan tekanan internal dari bantalan udara sambil tetap seringan mungkin. Penggunaan material komposit canggih seperti serat karbon dan kevlar semakin umum dalam konstruksi *hull* ACV modern.

Sistem *skirt* ACV jauh lebih kompleks dan kritis dibandingkan dengan SES. *Skirt* harus mengelilingi seluruh perimeter kendaraan dan mampu mengakomodasi variasi ketinggian permukaan yang

signifikan. Desain *skirt* modern pada ACV sering menggunakan konfigurasi *multi-lobe* atau *segmented*, yang memungkinkan bagian-bagian tertentu dari *skirt* untuk bergerak secara independen. Ini meningkatkan kemampuan ACV untuk mengatasi hambatan dan mempertahankan integritas bantalan udara di berbagai kondisi permukaan.

Perbedaan mendasar dalam prinsip operasi dan desain antara SES dan ACV memiliki implikasi signifikan terhadap performa, efisiensi, dan aplikasi masing-masing teknologi. SES, dengan kontak parsialnya dengan air, umumnya menawarkan stabilitas yang lebih baik di perairan bergelombang dan efisiensi yang lebih tinggi pada kecepatan tinggi di air. ACV, di sisi lain, menawarkan fleksibilitas operasional yang luar biasa, mampu bergerak dengan mulus di berbagai jenis permukaan tanpa modifikasi.

6.4.2 Performa dan Efisiensi

Performa dan efisiensi SES dan ACV sangat dipengaruhi oleh desain dasar dan prinsip operasi mereka, dengan masing-masing teknologi menunjukkan keunggulan dalam kondisi operasional yang berbeda.

Surface Effect Ship (SES) unggul dalam hal kecepatan dan efisiensi di perairan terbuka. Beberapa karakteristik kinerja utama SES meliputi:

1. Kecepatan Tinggi: SES mampu mencapai kecepatan yang sangat tinggi di air, dengan beberapa desain dapat melebihi 100 knot dalam kondisi optimal.
2. Efisiensi Hidrodinamis: Pada kecepatan tinggi, SES menunjukkan efisiensi hidrodinamis yang superior dibandingkan dengan kapal konvensional dan bahkan ACV. Pengurangan area basah lambung berkat bantalan udara, dikombinasikan dengan desain lambung yang hidrodinamis, menghasilkan pengurangan signifikan dalam hambatan total.
3. Stabilitas di Laut Bergelombang: SES mempertahankan performa yang baik di laut bergelombang berkat interaksi dinamis antara lambung samping, bantalan udara, dan permukaan air. Sistem kontrol bantalan udara modern pada SES dapat secara aktif

menyesuaikan tekanan bantalan untuk mengkompensasi gelombang, mempertahankan stabilitas dan kenyamanan penumpang.

4. Efisiensi Bahan Bakar: Pada kecepatan operasional, SES umumnya menunjukkan efisiensi bahan bakar yang lebih baik dibandingkan dengan kapal konvensional ukuran serupa. Sebagai contoh, SES komersial *T-Craft* yang beroperasi di Jepang melaporkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 50% dibandingkan dengan kapal cepat konvensional pada rute yang sama.
5. *Payload Capacity*: SES umumnya dapat mengakomodasi *payload* yang lebih besar dibandingkan dengan ACV ukuran serupa, berkat kombinasi gaya angkat dari bantalan udara dan gaya apung dari lambung samping.

Di sisi lain, *Air Cushion Vehicle* (ACV) menunjukkan karakteristik performa yang berbeda:

1. Kecepatan Konsisten di Berbagai Permukaan: Meskipun umumnya tidak secepat SES di air, ACV mampu mempertahankan kecepatan yang konsisten di berbagai jenis permukaan. Kecepatan operasional ACV biasanya berkisar antara 40-60 knot, baik di air, darat, es, atau rawa [77].
2. Kemampuan Amfibi Superior: ACV unggul dalam kemampuannya untuk bergerak mulus antara air dan darat. Sebagai contoh, LCAC (*Landing Craft Air Cushion*) yang digunakan oleh Angkatan Laut AS dapat bergerak dari kapal ke pantai dengan kecepatan hingga 70 knot, membawa *payload* hingga 60 ton.
3. Manuverabilitas: ACV umumnya lebih lincah dibandingkan SES, terutama pada kecepatan rendah atau saat diam. Kemampuan untuk melakukan gerakan menyamping (*sideways motion*) dan berputar di tempat (*zero-radius turn*) memberikan keunggulan dalam operasi di ruang terbatas.
4. Operasi di Perairan dangkal: ACV dapat beroperasi di perairan yang sangat dangkal atau bahkan di atas lumpur dan rawa, di mana SES atau kapal konvensional tidak dapat beroperasi.

5. Efisiensi Energi Bervariasi: Efisiensi energi ACV sangat bervariasi tergantung pada kondisi operasi. Di air, ACV umumnya kurang efisien dibandingkan SES karena seluruh berat kendaraan harus ditopang oleh bantalan udara. Namun, di atas es atau permukaan datar, ACV dapat sangat efisien karena hambatan permukaan yang minimal.

6.4.3 Aplikasi dan Fleksibilitas Operasional

SES dan ACV masing-masing memiliki keunggulan dalam aplikasi spesifik berdasarkan karakteristik unik mereka:

1. *Surface Effect Ship (SES)*:

- a. Patroli Maritim: SES sangat efektif untuk patroli perbatasan laut dan zona ekonomi eksklusif. Kecepatan tinggi dan jangkauan operasional yang luas memungkinkan pemantauan area yang lebih besar. Contohnya, Penjaga Pantai Norwegia mengoperasikan kapal patroli kelas *Skjold*, sebuah SES yang mampu mencapai kecepatan 60 knot.
- b. Operasi SAR Jarak Jauh: Kemampuan SES untuk mempertahankan kecepatan tinggi dalam kondisi laut moderat membuatnya ideal untuk operasi pencarian dan penyelamatan (SAR) jarak jauh. SES dapat mencapai lokasi kejadian lebih cepat dan beroperasi lebih lama di lokasi dibandingkan kapal konvensional.
- c. Transportasi Penumpang Antar-Pulau: SES telah terbukti efektif untuk layanan feri cepat antar-pulau. Di Jepang, *Techno Superliner* (TSL), sebuah SES besar, digunakan untuk transportasi kargo dan penumpang antar-pulau, menawarkan waktu perjalanan yang jauh lebih singkat dibandingkan kapal konvensional.
- d. Operasi Militer: SES digunakan dalam berbagai operasi militer, termasuk pengawasan maritim, penyebaran cepat pasukan, dan dukungan logistik. Kapal perang kelas *Skjold* Norwegia, yang merupakan SES, adalah salah satu kapal perang tercepat di dunia.
- e. Eksplorasi Lepas Pantai: Dalam industri minyak dan gas, SES telah digunakan untuk transportasi personel dan peralatan ke

platform lepas pantai, terutama di daerah dengan kondisi laut yang menantang.

2. Air Cushion Vehicle (ACV):

- a. Operasi Amfibi Militer: ACV sangat efektif dalam operasi pendaratan amfibi. LCAC (*Landing Craft Air Cushion*) yang digunakan oleh Angkatan Laut AS dan Jepang dapat mengangkut tank dan kendaraan lapis baja dari kapal ke pantai dengan cepat, bahkan di pantai yang tidak memiliki fasilitas pelabuhan.
- b. Penyelamatan Bencana: Kemampuan ACV untuk beroperasi di atas air, lumpur, dan puing-puing membuatnya sangat berharga dalam operasi penyelamatan bencana. Selama banjir besar di Eropa pada tahun 2021, ACV digunakan secara ekstensif untuk evakuasi dan pengiriman bantuan di daerah yang terendam di mana kendaraan konvensional tidak dapat beroperasi.
- c. Eksplorasi Arktik: Di wilayah kutub, ACV digunakan untuk transportasi personel dan peralatan di atas permukaan es yang tidak stabil. Kendaraan seperti *Arctic Hovertrain* yang dikembangkan oleh perusahaan Kanada Arktos Developments Ltd. dapat beroperasi di atas es, air terbuka, dan di antara keduanya, menjadikannya alat yang berharga untuk eksplorasi dan operasi penyelamatan di Arktik.
- d. Ekowisata: ACV telah menjadi populer untuk tur di lingkungan sensitif seperti rawa-rawa dan laguna. Kemampuannya untuk bergerak di atas air tanpa menciptakan gelombang atau mengganggu sedimen dasar membuatnya ideal untuk observasi satwa liar dan tur ekologi. Di Everglades, Florida, *tur hovercraft* telah menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan airboat tradisional.
- e. Transportasi di Daerah Terpencil: Di daerah dengan infrastruktur terbatas, ACV dapat menjadi solusi transportasi yang efektif. Di Sungai Amazon, misalnya, ACV digunakan untuk menghubungkan komunitas terpencil, beroperasi di atas air dan dataran banjir dengan mudah.
- f. Pemeliharaan Infrastruktur: ACV digunakan untuk inspeksi dan pemeliharaan infrastruktur seperti jalur pipa, saluran listrik, dan

jembatan di daerah yang sulit diakses. Kemampuannya untuk beroperasi di berbagai jenis terrain memungkinkan akses yang lebih mudah ke lokasi-lokasi terpencil.

Fleksibilitas operasional adalah salah satu perbedaan kunci antara SES dan ACV. SES, meskipun sangat efisien di air, memiliki keterbatasan dalam operasi di darat atau es. ACV, di sisi lain, menawarkan fleksibilitas yang jauh lebih besar, mampu beroperasi di hampir semua jenis permukaan tanpa modifikasi. Namun, fleksibilitas ini datang dengan *trade-off* dalam hal efisiensi dan kapasitas *payload* di air.

6.4.4 Tantangan Teknis dan Operasional

Baik SES maupun ACV menghadapi tantangan teknis dan operasional yang unik:

1. Surface Effect Ship (SES):

- a. Pemeliharaan Integritas Bantalan Udara: Salah satu tantangan utama SES adalah mempertahankan integritas bantalan udara pada kecepatan tinggi dan dalam kondisi laut yang berubah-ubah. Ini memerlukan sistem kontrol bantalan udara yang sangat responsif dan desain *skirt* yang efektif.
- b. *Cobblestone Effect*: SES dapat mengalami fenomena "*cobblestone effect*" getaran yang terjadi pada kecepatan tertentu karena interaksi antara bantalan udara dan permukaan air. Ini dapat mempengaruhi kenyamanan penumpang dan, dalam kasus ekstrem, integritas struktural kapal.
- c. Kompleksitas Sistem: Sistem bantalan udara dan kontrol yang diperlukan untuk operasi SES yang efisien menambah kompleksitas desain dan pemeliharaan dibandingkan dengan kapal konvensional.
- d. Keterbatasan dalam Kondisi Ekstrem: Meskipun SES dapat beroperasi dalam kondisi laut yang lebih kasar dibandingkan dengan ACV, kinerjanya dapat terdegradasi secara signifikan dalam kondisi laut yang sangat ekstrem.

2. Air Cushion Vehicle (ACV):

- a. Stabilitas: ACV menghadapi tantangan dalam hal stabilitas, terutama dalam kondisi angin kencang atau saat bermanuver

pada kecepatan tinggi. Desain *hull* dan sistem kontrol yang canggih diperlukan untuk mengatasi hal ini.

- b. Kontrol dan Manuver: Pengendalian ACV memerlukan keterampilan khusus karena karakteristik pengendaliannya sangat berbeda dari kendaraan konvensional. ACV juga lebih rentan terhadap "*momentum effects*" yang dapat mempengaruhi kemampuan untuk berhenti atau bermanuver dengan cepat.
- c. Kebisingan: ACV umumnya menghasilkan tingkat kebisingan yang lebih tinggi dibandingkan dengan SES atau kapal konvensional karena penggunaan kipas besar untuk sistem pengangkatan dan propulsi.
- d. Keterbatasan *Payload*: Dibandingkan dengan SES, ACV umumnya memiliki kapasitas *payload* yang lebih rendah karena seluruh berat kendaraan harus ditopang oleh bantalan udara.
- e. Konsumsi Energi: Mempertahankan bantalan udara memerlukan energi yang signifikan, yang dapat membatasi jangkauan operasional ACV, terutama dalam misi jarak jauh.

6.4.5 Perkembangan Teknologi dan Prospek Masa Depan

Perkembangan teknologi terkini membuka peluang menarik untuk kedua jenis kendaraan ini:

1. *Surface Effect Ship (SES)*:

- a. Sistem Kontrol Canggih: Implementasi sistem kontrol berbasis AI dan *machine learning* untuk optimalisasi *real-time* performa bantalan udara dan navigasi dalam berbagai kondisi laut.
- b. Material Komposit Lanjutan: Penggunaan material komposit canggih untuk mengurangi berat dan meningkatkan efisiensi bahan bakar, sambil mempertahankan kekuatan struktural.
- c. Propulsi *Hybrid*: Pengembangan sistem propulsi *hybrid* yang menggabungkan mesin konvensional dengan motor listrik untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi.
- d. Desain *Hull* Inovatif: Penelitian tentang desain *hull* baru yang lebih efisien, termasuk konsep "*Wave-Piercing*" untuk meningkatkan performa di laut bergelombang.

2. Air Cushion Vehicle (ACV):

- a. Sistem Propulsi Elektrik: Pengembangan ACV dengan sistem propulsi sepenuhnya elektrik untuk operasi yang lebih bersih dan senyap, terutama untuk aplikasi di lingkungan yang sensitif.
- b. *Skirt* Cerdas: Inovasi dalam desain *skirt*, termasuk penggunaan material “*smart*” yang dapat mengubah kekakuannya secara dinamis untuk mengoptimalkan performa di berbagai kondisi permukaan.
- c. Teknologi *Stealth*: Untuk aplikasi militer, pengembangan ACV dengan teknologi *stealth* untuk mengurangi deteksi radar dan inframerah.
- d. Sistem Otonom: Integrasi teknologi otonom dan sistem navigasi canggih untuk operasi ACV yang lebih aman dan efisien di lingkungan yang kompleks.

Kedua teknologi juga mengeksplorasi potensi penggunaan energi terbarukan, seperti integrasi panel surya atau penggunaan bahan bakar hidrogen, untuk operasi yang lebih ramah lingkungan.

6.5 Desain Sistem Bantalan Udara

Sistem bantalan udara merupakan inti dari teknologi *Surface Effect Ship* (SES) dan *Air Cushion Vehicle* (ACV), memungkinkan kendaraan-kendaraan ini untuk “melayang” di atas permukaan dengan mengurangi gesekan secara drastis. Prinsip dasar sistem ini melibatkan penciptaan area bertekanan tinggi di bawah kendaraan, yang menghasilkan gaya angkat untuk menopang beratnya.

Dalam konteks SES, bantalan udara berada di antara dua lambung samping (*sidehulls*), membentuk sebuah plenum tertutup. Udara bertekanan tinggi diinjeksikan ke dalam plenum ini, menciptakan bantalan yang mengangkat sebagian besar berat kapal. Sementara itu, pada ACV, bantalan udara mencakup seluruh area bawah kendaraan, dengan *skirt* fleksibel yang mengelilingi perimeter untuk menahan udara.

Efektivitas sistem bantalan udara sangat bergantung pada kemampuannya untuk mempertahankan tekanan yang cukup sambil

meminimalkan kebocoran udara. Ini melibatkan keseimbangan kompleks antara berbagai parameter, termasuk:

1. Volume udara yang diinjeksikan
2. Tekanan operasional bantalan
3. Desain dan konfigurasi *skirt*
4. Geometri plenum
5. Kecepatan kendaraan
6. Kondisi permukaan operasi

Misalnya, pada SES berukuran menengah (panjang 40 meter), sistem bantalan udara tipikal mungkin memerlukan injeksi udara sebesar 200-300 m³/s pada tekanan 3-5 kPa untuk mengangkat beban 100 ton. Tekanan ini harus dipertahankan melawan kebocoran konstan melalui celah di bawah *skirt* dan efek dinamis dari gelombang dan gerakan kendaraan.

6.5.1 Komponen Utama

Sistem bantalan udara terdiri dari beberapa komponen kritis yang bekerja secara sinergis:

1. Sistem Penghasil Udara

Jantung dari sistem bantalan udara adalah perangkat penghasil udara, biasanya berupa kipas atau *blower* sentrifugal. Desain dan pemilihan sistem ini kritis untuk efisiensi keseluruhan kendaraan.

Kipas sentrifugal modern untuk aplikasi bantalan udara sering menggunakan desain *airfoil backward-curved* untuk efisiensi maksimum. Misalnya, sebuah kipas berdiameter 1,5 meter dengan kecepatan rotasi 1800 RPM dapat menghasilkan aliran udara hingga 100 m³/s pada tekanan statis 5 kPa, dengan efisiensi total mencapai 85%.

Inovasi terbaru dalam desain kipas meliputi:

- a. Penggunaan material komposit ringan untuk mengurangi berat dan inersia
- b. Implementasi sistem *blade variable-pitch* untuk optimalisasi performa di berbagai kondisi operasional
- c. Integrasi motor elektrik langsung (*direct-drive*) untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi kompleksitas mekanis

2. Sistem Distribusi Udara

Sistem distribusi udara, yang mencakup saluran dan plenum, berperan crucial dalam mengarahkan dan mendistribusikan udara bertekanan ke seluruh area bantalan. Desain yang efisien harus memastikan distribusi tekanan yang merata dan meminimalkan kerugian aliran.

Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah menjadi alat yang sangat berharga dalam optimalisasi desain ini. Misalnya, studi CFD pada sebuah SES berukuran 50 meter menunjukkan bahwa optimalisasi geometri saluran dapat mengurangi kerugian tekanan hingga 20% dan meningkatkan keseragaman distribusi tekanan bantalan sebesar 15%.

Inovasi dalam desain sistem distribusi meliputi:

- a. Penggunaan saluran dengan penampang variabel untuk mengoptimalkan aliran
- b. Implementasi *vanes* dan *diffuser* untuk mengurangi turbulensi dan meningkatkan efisiensi
- c. Pengembangan sistem distribusi adaptif yang dapat menyesuaikan aliran udara berdasarkan kondisi operasional

3. Skirt atau Seal

Skirt atau *seal* merupakan komponen kritis yang berfungsi untuk menahan udara dalam bantalan dan memungkinkan kendaraan untuk mengakomodasi variasi ketinggian permukaan. Desain *skirt* modern sering menggunakan konfigurasi *segmented* atau *lobed*, yang terdiri dari beberapa bagian independen.

Material yang digunakan untuk *skirt* telah berkembang dari karet sederhana menjadi komposit canggih. Misalnya, penggunaan komposit *aramid-elastomer* telah menunjukkan peningkatan ketahanan aus hingga 300% dibandingkan dengan material karet konvensional, sambil mengurangi berat hingga 40%.

Inovasi terbaru dalam desain *skirt* meliputi:

- a. Pengembangan *skirt* dengan kekakuan variabel yang dapat menyesuaikan karakteristiknya berdasarkan kondisi operasional

- b. Implementasi sistem aktif kontrol *skirt* yang dapat mengubah geometri *skirt* secara *real-time* untuk mengoptimalkan performa
- c. Penggunaan *coating* nanopartikel untuk meningkatkan ketahanan terhadap abrasi dan korosi

6.5.2 Pertimbangan Desain dan Optimalisasi

Desain sistem bantalan udara yang efektif memerlukan pertimbangan berbagai faktor:

- a. Manajemen Aliran Udara dan Tekanan: Sistem kontrol canggih diperlukan untuk memantau dan menyesuaikan tekanan bantalan secara *real-time*. Implementasi sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin telah menunjukkan potensi dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem bantalan udara.
- b. Efisiensi Energi: Optimalisasi efisiensi energi merupakan fokus utama, melibatkan peningkatan efisiensi komponen individual dan sistem secara keseluruhan. Pendekatan holistik dalam desain telah menghasilkan inovasi seperti sistem regeneratif yang memanfaatkan energi dari udara yang keluar.
- c. Pengurangan Kebisingan: Upaya pengurangan kebisingan melibatkan desain aerodinamis yang dioptimalkan dan penggunaan material peredam suara canggih. Implementasi desain akustik terpadu telah berhasil mengurangi tingkat kebisingan tanpa mengorbankan performa.

6.5.3 Sistem Kontrol dan Manajemen Bantalan Udara

Manajemen efektif bantalan udara memerlukan sistem kontrol yang canggih untuk memantau dan menyesuaikan tekanan bantalan secara *real-time*. Sistem modern menggunakan jaringan sensor terdistribusi yang mengukur parameter seperti:

1. Tekanan bantalan di berbagai titik
2. Ketinggian kendaraan dari permukaan
3. Kecepatan dan akselerasi kendaraan
4. Kondisi lingkungan (gelombang, angin, dll.)

Data dari sensor-sensor ini diolah oleh sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin. Misalnya, sebuah sistem kontrol AI dapat menganalisis pola gelombang yang akan

datang dan menyesuaikan tekanan bantalan secara proaktif untuk mempertahankan stabilitas optimal.

Implementasi sistem kontrol prediktif *model-based* (MPC) telah menunjukkan peningkatan stabilitas bantalan hingga 40% dalam kondisi laut bergelombang dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional PID.

6.5.4 Inovasi Terbaru dan Arah Pengembangan Masa Depan

Perkembangan teknologi terkini membuka peluang untuk evolusi lebih lanjut sistem bantalan udara:

- a. Sistem *Hybrid* Bantalan Udara-Magnetik: Konsep ini menggabungkan bantalan udara dengan teknologi *magnetic levitation*, menawarkan potensi untuk mengatasi beberapa keterbatasan sistem konvensional. Sistem *hybrid* ini dapat mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi dan stabilitas yang lebih baik, terutama pada kecepatan rendah dan saat hover.
- b. Integrasi dengan Propulsi Alternatif: Eksplorasi integrasi sistem bantalan udara dengan teknologi propulsi elektrik atau *hybrid* membuka kemungkinan untuk desain kendaraan yang lebih ramah lingkungan dan efisien. Konsep ini menjanjikan pengurangan emisi karbon dan peningkatan efisiensi operasional.
- c. Material Cerdas dan Nanokomposit: Pengembangan material cerdas dan nanokomposit membuka peluang baru dalam desain komponen sistem bantalan udara. Material ini dapat meningkatkan daya tahan, memiliki sifat *self-healing*, dan bahkan dapat mengubah sifat fisiknya sebagai *respons* terhadap kondisi operasional.
- d. Sistem Kontrol Otonom dan Prediktif: Kemajuan dalam kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin membuka jalan bagi pengembangan sistem kontrol yang lebih canggih dan otonom. Sistem ini dapat memprediksi dan mengantisipasi perubahan kondisi, memungkinkan optimalisasi performa yang berkelanjutan.
- e. Desain Biomimetik: Inspirasi dari alam telah membuka perspektif baru dalam desain sistem bantalan udara, terutama dalam pengembangan *skirt* yang lebih fleksibel dan adaptif.

6.6 Tantangan Operasional dan Solusinya

Kendaraan berbantalan udara, termasuk *Surface Effect Ship* (SES) dan *Air Cushion Vehicle* (ACV), menawarkan keunggulan unik dalam hal kecepatan, fleksibilitas, dan kemampuan operasional di berbagai jenis permukaan. Namun, teknologi inovatif ini juga menghadapi serangkaian tantangan operasional yang kompleks. Pemahaman mendalam tentang tantangan-tantangan ini dan pengembangan solusi yang efektif menjadi kunci untuk memaksimalkan potensi dan memperluas aplikasi kendaraan berbantalan udara dalam berbagai sektor.

1. Stabilitas dan Kontrol

Salah satu tantangan utama dalam operasi kendaraan berbantalan udara adalah mempertahankan stabilitas dan kontrol, terutama dalam kondisi lingkungan yang dinamis. Di perairan bergelombang atau dalam kondisi angin kencang, mempertahankan integritas bantalan udara menjadi sangat menantang. Gelombang dan angin dapat menyebabkan fluktuasi tekanan dalam bantalan udara, yang dapat mengakibatkan ketidakstabilan kendaraan dan mengurangi efisiensi operasional.

Solusi untuk masalah ini melibatkan pengembangan sistem kontrol bantalan udara yang canggih. Sistem ini menggunakan jaringan sensor presisi tinggi yang tersebar di seluruh kendaraan untuk memantau berbagai parameter seperti tekanan bantalan, ketinggian kendaraan, kecepatan, dan kondisi lingkungan. Data dari sensor-sensor ini diproses oleh unit kontrol pusat yang menggunakan algoritma kontrol adaptif dan prediktif.

Algoritma kontrol adaptif memungkinkan sistem untuk menyesuaikan parameter operasional secara *real-time* berdasarkan kondisi yang terdeteksi. Misalnya, jika sensor mendeteksi peningkatan gelombang, sistem dapat secara otomatis meningkatkan tekanan bantalan udara atau mengubah distribusi tekanan untuk mempertahankan stabilitas. Sementara itu, algoritma prediktif menggunakan model matematis dan data historis untuk mengantisipasi perubahan kondisi dan menyiapkan *respons* yang sesuai sebelum gangguan aktual terjadi.

Selain itu, desain *skirt* yang lebih canggih telah dikembangkan untuk meningkatkan stabilitas. *Skirt* modern menggunakan konfigurasi *segmented* atau *lobed*, di mana setiap segmen dapat

bergerak secara independen. Ini memungkinkan *skirt* untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan kontur permukaan, mempertahankan *seal* yang efektif dan mencegah kebocoran udara yang berlebihan. Material *skirt* juga telah berkembang, dengan penggunaan komposit elastomer canggih yang menggabungkan fleksibilitas tinggi dengan ketahanan terhadap abrasi dan kelelahan material.

Untuk SES, pengembangan sistem stabilisasi aktif telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Sistem ini menggunakan kombinasi sensor inersia dan aktuator hidrolis atau pneumatik untuk mengendalikan gerakan *pitch* dan *roll* kendaraan. Dengan memanipulasi distribusi tekanan dalam bantalan udara dan menggerakkan permukaan kontrol aerodinamis, sistem stabilisasi aktif dapat secara signifikan mengurangi gerakan yang tidak diinginkan dan meningkatkan kenyamanan penumpang.

2. Efisiensi Energi

Efisiensi energi merupakan tantangan signifikan dalam operasi kendaraan berbantalan udara. Sistem penghasil dan distribusi udara yang diperlukan untuk mempertahankan bantalan udara membutuhkan energi yang cukup besar, yang dapat membatasi jangkauan operasional dan meningkatkan biaya operasi.

Upaya untuk meningkatkan efisiensi energi telah menghasilkan berbagai inovasi. Salah satu pendekatan utama adalah pengembangan sistem propulsi *hybrid*. Sistem ini menggabungkan mesin pembakaran internal konvensional dengan motor listrik, memungkinkan kendaraan untuk mengoptimalkan penggunaan energi berdasarkan kondisi operasional. Pada kecepatan rendah atau saat hover, di mana efisiensi mesin pembakaran internal cenderung rendah, sistem dapat beralih ke mode listrik, secara signifikan mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi. Saat beroperasi pada kecepatan tinggi, mesin pembakaran internal dapat mengambil alih untuk memberikan tenaga yang diperlukan sambil juga mengisi baterai untuk penggunaan listrik selanjutnya.

Optimalisasi aerodinamis kendaraan juga menjadi fokus utama dalam peningkatan efisiensi energi. Penggunaan analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang canggih memungkinkan desainer untuk memodelkan dan mengoptimalkan aliran udara di

sekitar kendaraan, mengurangi *drag* aerodinamis dan meningkatkan efisiensi keseluruhan. Ini termasuk desain ulang bentuk *hull*, optimalisasi konfigurasi *skirt*, dan pengembangan perangkat aerodinamis aktif yang dapat menyesuaikan posisinya berdasarkan kecepatan dan kondisi operasional untuk memaksimalkan efisiensi.

Penggunaan material ringan dalam konstruksi kendaraan juga berkontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi energi. Komposit canggih seperti serat karbon dan kevlar semakin banyak digunakan dalam struktur utama kendaraan, mengurangi berat keseluruhan tanpa mengorbankan kekuatan atau ketahanan. Pengurangan berat ini tidak hanya meningkatkan efisiensi bahan bakar tetapi juga memungkinkan peningkatan kapasitas muatan atau jangkauan operasional.

Implementasi sistem manajemen energi cerdas juga telah terbukti efektif dalam mengoptimalkan penggunaan energi. Sistem ini menggunakan algoritma kompleks yang mempertimbangkan berbagai faktor seperti profil misi, kondisi lingkungan, dan status sistem kendaraan untuk mengalokasikan energi secara optimal ke berbagai subsistem. Misalnya, sistem dapat secara dinamis menyesuaikan *output* sistem penghasil udara berdasarkan kondisi permukaan dan kecepatan kendaraan, memastikan bahwa bantalan udara dipertahankan dengan energi minimal yang diperlukan.

3. Pengurangan Kebisingan

Kebisingan yang dihasilkan oleh kendaraan berbantalan udara menjadi perhatian utama, terutama dalam operasi di dekat area pemukiman atau lingkungan yang sensitif. Sumber utama kebisingan termasuk sistem penghasil udara, interaksi antara *skirt* dan permukaan, serta turbulensi udara.

Upaya pengurangan kebisingan telah menghasilkan beberapa solusi inovatif. Desain kipas dan saluran udara yang lebih efisien secara aerodinamis telah berhasil mengurangi kebisingan yang dihasilkan oleh sistem penghasil udara. Ini melibatkan penggunaan desain bilah kipas yang lebih canggih, seperti konfigurasi *swept blade* yang dapat mengurangi pembentukan gelombang kejut pada ujung bilah, sumber utama kebisingan pada kecepatan tinggi. Selain itu, penggunaan material penyerap suara dalam saluran udara dan plenum telah terbukti efektif dalam mengurangi propagasi kebisingan.

Interaksi antara *skirt* dan permukaan juga merupakan sumber kebisingan yang signifikan, terutama pada kecepatan rendah atau saat beroperasi di permukaan yang kasar. Pengembangan material *skirt* yang lebih fleksibel dan desain yang lebih canggih telah membantu mengurangi kebisingan dari sumber ini. Beberapa desain terbaru menggunakan konfigurasi *multi-lobe* yang dapat mengurangi "*slap noise*" yang dihasilkan ketika *skirt* berinteraksi dengan gelombang atau permukaan yang tidak rata.

Penggunaan material peredam suara canggih dalam konstruksi kendaraan juga berkontribusi pada pengurangan tingkat kebisingan keseluruhan. Ini termasuk penggunaan bahan komposit dengan karakteristik peredaman suara yang baik dalam struktur utama kendaraan, serta penerapan lapisan peredam suara tambahan di area-area kritis.

Selain itu, pengembangan mode operasi "*low-noise*" untuk operasi di area sensitif telah menjadi fokus penelitian. Mode ini melibatkan pengurangan kecepatan dan modifikasi konfigurasi bantalan udara untuk meminimalkan kebisingan yang dihasilkan. Beberapa desain bahkan mengincorporasikan sistem *active noise control*, yang menggunakan *speaker* dan *mikrofon* untuk menghasilkan gelombang suara yang menetralkan kebisingan yang dihasilkan oleh kendaraan.

4. Operasi dalam Kondisi Ekstrem

Tantangan operasional lainnya termasuk keterbatasan dalam kondisi cuaca ekstrem dan kesulitan dalam manuver presisi, terutama untuk ACV. Dalam kondisi badai atau gelombang sangat tinggi, efektivitas bantalan udara dapat berkurang secara signifikan, membatasi operabilitas kendaraan.

Untuk mengatasi hal ini, pengembangan sistem prediksi cuaca terintegrasi dan algoritma pengambilan keputusan otomatis telah membantu operator dalam menentukan batas-batas operasional yang aman. Sistem ini mengintegrasikan data *real-time* dari sensor *on-board* dengan informasi cuaca dari sumber eksternal untuk memberikan penilaian risiko yang akurat dan rekomendasi operasional.

Dalam hal manuver, terutama pada kecepatan rendah atau saat berhenti, ACV dapat mengalami kesulitan karena kurangnya kontak langsung dengan permukaan. Solusi untuk masalah ini melibatkan

pengembangan sistem propulsi dan kontrol yang lebih canggih. Ini termasuk penggunaan *thruster omnidirectional* yang dapat menghasilkan gaya dorong dalam berbagai arah, memungkinkan manuver yang lebih presisi bahkan dalam kondisi angin kencang atau arus kuat.

Sistem kontrol vektor gaya dorong juga telah dikembangkan, memungkinkan arah gaya dorong utama diubah secara dinamis. Ini sangat meningkatkan kemampuan manuver kendaraan, terutama dalam operasi di ruang terbatas atau saat melakukan *docking*.

5. Pemeliharaan dan Perawatan

Pemeliharaan dan perawatan kendaraan berbantalan udara merupakan aspek operasional yang menantang. Komponen seperti *skirt* dan sistem penghasil udara mengalami tingkat keausan yang relatif tinggi dan memerlukan perawatan rutin serta penggantian berkala.

Untuk mengatasi hal ini, pengembangan material yang lebih tahan lama telah menjadi fokus utama. Ini termasuk penggunaan komposit canggih dan *coating* khusus yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap abrasi dan korosi. Desain modular yang memudahkan penggantian komponen juga telah dikembangkan, memungkinkan pemeliharaan yang lebih cepat dan efisien.

Implementasi sistem pemantauan kondisi terintegrasi telah membantu dalam mengoptimalkan jadwal pemeliharaan. Sistem ini menggunakan jaringan sensor yang memantau berbagai parameter operasional dan kondisi komponen kritis. Data dari sensor-sensor ini dianalisis menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk memprediksi keausan komponen dan mengidentifikasi potensi kegagalan sebelum terjadi.

Teknik perawatan prediktif berbasis data juga telah diterapkan, memungkinkan perencanaan pemeliharaan yang lebih efisien dan mengurangi waktu henti yang tidak direncanakan. Ini melibatkan analisis tren data historis dan penggunaan model prediktif untuk mengantisipasi kebutuhan pemeliharaan dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya.

6. Tantangan Regulasi dan Sertifikasi

Tantangan regulasi dan sertifikasi menjadi pertimbangan penting dalam operasi kendaraan berbantalan udara, terutama mengingat

sifat hibrida mereka yang beroperasi di antara domain maritim dan udara. Kurangnya kerangka regulasi yang seragam dan standar internasional yang diterima secara luas untuk kendaraan berbantalan udara dapat membatasi penggunaannya di beberapa wilayah.

Upaya untuk mengatasi tantangan ini melibatkan kolaborasi antara industri, badan regulasi, dan organisasi internasional untuk mengembangkan standar keselamatan dan operasional yang komprehensif. Ini termasuk pengembangan prosedur sertifikasi khusus yang mempertimbangkan karakteristik unik kendaraan berbantalan udara, serta harmonisasi standar antar negara untuk memfasilitasi operasi lintas batas.

Pelatihan khusus untuk operator dan kru pemeliharaan juga menjadi bagian integral dari solusi untuk memastikan operasi yang aman dan efisien. Program pelatihan yang dikembangkan mencakup tidak hanya aspek teknis pengoperasian kendaraan, tetapi juga pemahaman mendalam tentang dinamika bantalan udara, prosedur keselamatan khusus, dan manajemen risiko operasional.

7. Tantangan Lingkungan dan Keberlanjutan

Terakhir, tantangan lingkungan menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya kesadaran global akan keberlanjutan. Meskipun kendaraan berbantalan udara menawarkan beberapa keuntungan lingkungan, seperti kemampuan untuk beroperasi di atas permukaan air tanpa mengganggu sedimen dasar, mereka juga menghadapi kritik terkait konsumsi bahan bakar dan potensi dampak pada ekosistem sensitif.

Solusi untuk tantangan ini melibatkan pengembangan sistem propulsi yang lebih bersih. Ini termasuk eksplorasi penggunaan bahan bakar alternatif seperti biodiesel atau hidrogen, serta pengembangan sistem propulsi elektrik penuh untuk aplikasi tertentu. Beberapa proyek penelitian sedang mengeksplorasi potensi integrasi teknologi sel bahan bakar hidrogen untuk kendaraan berbantalan udara jarak jauh, menjanjikan operasi dengan emisi nol.

Desain yang lebih ramah lingkungan juga menjadi fokus, termasuk penggunaan material yang dapat didaur ulang dalam konstruksi kendaraan. Penelitian sedang dilakukan untuk mengembangkan komposit bio-based yang memiliki karakteristik kinerja setara dengan material sintetis tradisional namun dengan

jejak karbon yang lebih rendah. Pengurangan emisi kebisingan juga menjadi prioritas, tidak hanya untuk kenyamanan operasional tetapi juga untuk meminimalkan gangguan terhadap habitat laut dan pesisir.

Upaya juga dilakukan untuk mengoptimalkan profil operasional kendaraan berbantalan udara untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi dampak lingkungan. Ini melibatkan pengembangan algoritma rute yang canggih yang mempertimbangkan tidak hanya efisiensi bahan bakar tetapi juga faktor-faktor lingkungan seperti pola migrasi hewan laut dan area ekologis sensitif.

Selain itu, industri kendaraan berbantalan udara sedang mengeksplorasi konsep "*circular economy*" dalam desain dan manufaktur. Ini melibatkan perancangan kendaraan dengan mempertimbangkan siklus hidup penuh, dari produksi hingga daur ulang. Pendekatan ini bertujuan untuk memaksimalkan penggunaan kembali dan daur ulang komponen, mengurangi limbah, dan meminimalkan ekstraksi sumber daya baru.

Penelitian juga sedang dilakukan untuk memahami dan memitigasi dampak jangka panjang operasi kendaraan berbantalan udara pada ekosistem akuatik. Ini termasuk studi tentang efek gelombang yang dihasilkan oleh kendaraan pada erosi pantai dan habitat pesisir, serta pengembangan teknologi untuk meminimalkan dampak ini.

6.7 Perkembangan Terkini dalam Teknologi Bantalan Udara

Teknologi bantalan udara terus mengalami revolusi yang signifikan, didorong oleh kemajuan pesat dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknik. Inovasi-inovasi terbaru telah membuka jalan bagi peningkatan dramatis dalam efisiensi, kinerja, dan keberlanjutan kendaraan berbantalan udara. Perkembangan ini tidak hanya meningkatkan kapabilitas operasional *Surface Effect Ships* (SES) dan *Air Cushion Vehicles* (ACV) yang ada, tetapi juga memperluas cakupan aplikasi potensial teknologi ini ke area-area baru yang sebelumnya tidak terjangkau.

1. Inovasi Material Canggih

Salah satu area perkembangan yang paling menarik adalah dalam bidang material canggih untuk konstruksi *skirt* dan komponen bantalan udara lainnya. Penelitian terkini telah menghasilkan material komposit nano yang menggabungkan keunggulan fleksibilitas tinggi dengan ketahanan luar biasa terhadap abrasi dan kelelahan material.

Nanokomposit berbasis grafen, misalnya, telah menunjukkan potensi luar biasa dalam meningkatkan kinerja *skirt*. Grafen, dengan kekuatan tariknya yang luar biasa dan sifat konduktif yang unggul, ketika diintegrasikan ke dalam matriks polimer, menghasilkan material yang tidak hanya sangat tahan terhadap keausan tetapi juga memiliki kemampuan disipasi panas yang superior. Uji coba lapangan menunjukkan bahwa *skirt* yang menggunakan nanokomposit grafen dapat meningkatkan umur pakai hingga 50% dibandingkan dengan material konvensional, sambil juga mengurangi berat keseluruhan hingga 30%.

Lebih lanjut, pengembangan material "*self-healing*" sedang dalam tahap uji coba lanjutan. Material ini menggunakan mikrokapsul yang berisi agen penyembuh yang akan pecah ketika terjadi keretakan atau kerusakan kecil, melepaskan agen tersebut untuk memperbaiki kerusakan secara otomatis. Dalam uji laboratorium, material *self-healing* ini telah menunjukkan kemampuan untuk memperbaiki kerusakan mikro dalam hitungan jam, secara signifikan memperpanjang umur komponen dan mengurangi kebutuhan pemeliharaan rutin.

Pengembangan material adaptif juga sedang berlangsung, dengan fokus pada *skirt* yang dapat mengubah kekakuannya secara dinamis sebagai *respons* terhadap kondisi operasional. Material ini menggunakan polimer elektroaktif yang dapat mengubah sifat mekaniknya ketika diberi stimulus listrik. Dengan kemampuan ini, *skirt* dapat menyesuaikan fleksibilitasnya secara *real-time*, mengoptimalkan performa bantalan udara dalam berbagai kondisi laut dan kecepatan operasi.

2. Revolusi Sistem Penghasil dan Distribusi Udara

Inovasi dalam sistem penghasil dan distribusi udara telah mengalami kemajuan besar, dengan fokus pada peningkatan efisiensi dan kontrol yang lebih presisi. Desain kipas dan *blower*

terbaru menggunakan teknologi *blade variable-pitch* yang canggih, memungkinkan penyesuaian dinamis karakteristik aliran udara untuk mengoptimalkan efisiensi di berbagai kondisi operasional.

Teknologi *blade variable-pitch* ini menggunakan aktuator elektromekanis canggih yang dapat mengubah sudut bilah kipas dalam milidetik. Sistem kontrol terpadu menganalisis data dari sensor tekanan bantalan udara, kecepatan kendaraan, dan kondisi lingkungan untuk terus-menerus menyesuaikan *pitch* bilah, memastikan efisiensi maksimum dalam segala kondisi. Uji coba menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 25% dibandingkan dengan sistem kipas konvensional.

Integrasi motor elektrik langsung ke dalam unit kipas, dikenal sebagai sistem "*electric ducted fan*" (EDF), telah menghasilkan sistem penghasil udara yang lebih kompak dan efisien. Teknologi EDF ini tidak hanya mengurangi kerugian transmisi daya tetapi juga memungkinkan kontrol yang lebih presisi atas tekanan dan volume udara yang dihasilkan. Sistem EDF terbaru menggunakan motor sinkron magnet permanen dengan efisiensi tinggi, yang dikombinasikan dengan inverter frekuensi variabel untuk kontrol kecepatan yang sangat akurat.

Perkembangan dalam desain saluran distribusi udara juga telah mencapai tingkat sofistikasi baru. Penggunaan analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang sangat detail telah memungkinkan optimalisasi geometri saluran untuk meminimalkan kerugian aliran dan memastikan distribusi tekanan yang merata di seluruh bantalan udara. Beberapa desain inovatif bahkan menggunakan saluran dengan geometri variabel yang dapat menyesuaikan bentuknya secara dinamis untuk mengoptimalkan aliran udara pada berbagai kecepatan dan kondisi operasional.

3. Kemajuan dalam Teknologi Sensor dan Sistem Kontrol

Perkembangan dalam teknologi sensor dan sistem kontrol telah membuka era baru dalam manajemen bantalan udara. Implementasi jaringan sensor *fiber* optik yang terintegrasi ke dalam struktur *skirt* dan plenum memungkinkan pemantauan *real-time* yang sangat akurat terhadap distribusi tekanan dan integritas bantalan udara.

Sensor *fiber* optik ini menggunakan teknologi *Fiber Bragg Grating* (FBG) yang dapat mengukur perubahan tekanan dan strain dengan akurasi tinggi tanpa terpengaruh oleh interferensi elektromagnetik. Jaringan sensor ini dapat mencakup ribuan titik pengukuran individual, memberikan gambaran yang sangat detail tentang kondisi bantalan udara. Data dari sensor-sensor ini diolah oleh sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan (AI) yang dapat memprediksi dan mengantisipasi perubahan kondisi operasional dalam milidetik.

Algoritma kontrol adaptif yang canggih, menggunakan teknik *deep learning* dan *reinforcement learning*, memungkinkan penyesuaian kontinyu parameter bantalan udara. Sistem ini tidak hanya merespons kondisi saat ini tetapi juga belajar dari pengalaman operasional untuk terus meningkatkan kinerjanya dari waktu ke waktu. Dalam uji coba, sistem kontrol AI ini telah menunjukkan kemampuan untuk meningkatkan stabilitas bantalan udara hingga 40% dalam kondisi laut bergelombang dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional.

Integrasi teknologi "*digital twin*" juga menjadi tren yang berkembang dalam manajemen bantalan udara. *Digital twin* menciptakan representasi virtual yang sangat akurat dari sistem bantalan udara, yang diperbarui secara *real-time* dengan data dari sensor *onboard*. Ini memungkinkan simulasi dan prediksi yang sangat akurat tentang perilaku sistem, memfasilitasi optimalisasi performa dan pemeliharaan prediktif.

4. Integrasi Teknologi Propulsi Alternatif

Integrasi teknologi propulsi alternatif dengan sistem bantalan udara merupakan area penelitian yang sangat aktif, dengan fokus pada peningkatan efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan. Konsep *hybrid* dan *full-electric* ACV telah bergerak melampaui tahap konseptual menuju *prototipe* operasional.

Sistem propulsi *hybrid* yang menggabungkan mesin pembakaran internal dengan motor listrik telah menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan. Dalam konfigurasi ini, mesin pembakaran internal dapat dioperasikan pada titik efisiensi optimalnya untuk menggerakkan generator listrik, sementara motor listrik digunakan untuk propulsi

langsung. Sistem manajemen daya canggih memungkinkan switching seamless antara mode operasi, mengoptimalkan penggunaan energi berdasarkan kondisi operasional. Uji coba lapangan telah menunjukkan peningkatan efisiensi bahan bakar hingga 30%, dengan pengurangan emisi CO₂ yang sebanding.

Sementara itu, proyek-proyek ACV bertenaga listrik penuh sedang mengeksplorasi penggunaan teknologi baterai terkini dan sel bahan bakar hidrogen. Baterai *lithium-ion* generasi terbaru dengan densitas energi tinggi dan kemampuan pengisian cepat sedang diuji untuk aplikasi jarak pendek dan menengah. Untuk operasi jarak jauh, sel bahan bakar hidrogen menawarkan potensi besar. *Prototype* ACV berbahan bakar hidrogen telah mendemonstrasikan jangkauan operasional hingga 500 km dengan pengisian bahan bakar cepat dalam waktu kurang dari 10 menit.

Pengembangan sistem propulsi elektrik juga telah mendorong inovasi dalam desain kendaraan secara keseluruhan. Tanpa kebutuhan untuk mesin pembakaran internal yang besar, desainer memiliki fleksibilitas lebih dalam konfigurasi layout kendaraan, memungkinkan optimalisasi lebih lanjut dalam hal distribusi berat dan aerodinamika.

5. Revolusi dalam Desain Aerodinamis

Perkembangan dalam desain aerodinamis kendaraan berbantalan udara telah mencapai tingkat sofistikasi baru dengan bantuan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang sangat canggih. Model CFD terbaru mampu mensimulasikan interaksi kompleks antara bantalan udara, struktur kendaraan, dan permukaan air dengan tingkat detail yang belum pernah ada sebelumnya.

Simulasi CFD terkini menggunakan teknik *multi-physics* yang menggabungkan analisis aliran fluida, transfer panas, dan interaksi struktur-fluida dalam satu model terintegrasi. Ini memungkinkan para insinyur untuk mengoptimalkan desain tidak hanya untuk efisiensi aerodinamis tetapi juga untuk stabilitas, kebisingan, dan efisiensi termal secara simultan.

Hasil dari analisis CFD ini telah mengarah pada desain *hull* dan superstruktur yang secara signifikan mengurangi *drag* aerodinamis. Inovasi seperti penggunaan permukaan superhydrophobic pada

bagian bawah *hull* telah terbukti dapat mengurangi *drag* hingga 15% pada kecepatan tinggi. Desain superstruktur yang terinspirasi dari bentuk-bentuk aerodinamis di alam, seperti profil sayap burung albatros, telah menghasilkan pengurangan koefisien *drag* hingga 25% dibandingkan dengan desain konvensional.

Inovasi seperti sistem aktif *flow control*, yang menggunakan jet udara atau permukaan yang dapat bergerak untuk memanipulasi aliran udara di sekitar kendaraan, sedang dalam tahap pengembangan lanjut. *Prototipe* yang menggunakan sistem ini telah menunjukkan kemampuan untuk mengurangi *drag* hingga 10% tambahan pada kondisi operasional tertentu, sambil juga meningkatkan stabilitas dalam angin silang.

6. Aplikasi Baru dan Konsep Inovatif

Aplikasi teknologi bantalan udara juga telah memperluas cakupannya ke area-area baru yang inovatif. Konsep "*ground effect aircraft*" yang menggabungkan prinsip-prinsip bantalan udara dengan desain pesawat konvensional sedang dikembangkan untuk transportasi pesisir jarak jauh. Kendaraan ini, sering disebut sebagai "*Wing-In-Ground effect*" (WIG) *craft*, beroperasi pada ketinggian rendah di atas permukaan air, memanfaatkan efek *ground* untuk menghasilkan *lift* tambahan dan mengurangi konsumsi bahan bakar.

Prototipe WIG terbaru telah mendemonstrasikan kemampuan untuk mengangkut muatan hingga 100 ton dengan kecepatan mencapai 200 knot, sambil mengkonsumsi 30-40% lebih sedikit bahan bakar dibandingkan dengan pesawat konvensional pada jarak yang sama. Pengembangan lebih lanjut sedang fokus pada integrasi teknologi bantalan udara hibrid yang dapat meningkatkan performa *take-off* dan *landing* di berbagai kondisi permukaan.

Dalam konteks *urban mobility*, penelitian sedang dilakukan pada "*hover taxis*" kendaraan berbantalan udara kecil untuk transportasi perkotaan yang dapat beroperasi di atas jalur air perkotaan atau bahkan jalan raya khusus. Konsep ini menggabungkan teknologi bantalan udara dengan sistem propulsi elektrik dan kontrol otonomus, menjanjikan solusi transportasi perkotaan yang cepat, senyap, dan bebas emisi.

Prototipe hover taxi yang sedang dikembangkan dapat mengangkut 4-6 penumpang dengan kecepatan hingga 70 km/jam dan jangkauan operasional sekitar 50 km. Sistem navigasi otonomus yang canggih memungkinkan operasi yang aman di lingkungan perkotaan yang kompleks, dengan kemampuan untuk menghindari obstacle dan mengoptimalkan rute secara *real-time*.

7. Manufaktur Aditif dan Customisasi

Perkembangan dalam teknologi manufaktur aditif (*3D printing*) membuka kemungkinan baru dalam desain dan produksi komponen bantalan udara. Teknik *3D printing* canggih memungkinkan pembuatan struktur kompleks dengan optimasi topologi, menghasilkan komponen yang lebih ringan namun lebih kuat.

Penggunaan teknik seperti *Selective Laser Sintering* (SLS) dan *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) memungkinkan produksi komponen logam dengan geometri kompleks yang sulit atau tidak mungkin diproduksi dengan metode konvensional. Ini telah menghasilkan desain saluran distribusi udara yang sangat efisien dan *skirt* dengan struktur internal yang kompleks untuk performa optimal.

Manufaktur aditif juga memfasilitasi *rapid prototyping* dan *customisasi* untuk aplikasi spesifik. Ini memungkinkan iterasi desain yang lebih cepat dan produksi ekonomis untuk kendaraan berbantalan udara khusus dalam jumlah kecil, membuka peluang baru untuk aplikasi *niche* dan kendaraan yang sangat terspesialisasi.

8. Keberlanjutan dan Efisiensi Energi

Dalam upaya meningkatkan keberlanjutan, penelitian intensif sedang dilakukan pada sistem bantalan udara yang dapat memanfaatkan energi terbarukan. Konsep inovatif seperti integrasi panel surya fleksibel ke dalam struktur atas kendaraan sedang dieksplorasi untuk menyediakan daya tambahan bagi sistem elektrik dan bahkan sistem propulsi.

Panel surya film tipis terbaru, dengan efisiensi konversi mencapai 25%, sedang diuji untuk aplikasi pada permukaan atas kendaraan berbantalan udara. Simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi cuaca cerah, panel-panel ini dapat menyuplai hingga 15% dari kebutuhan

energi total kendaraan untuk operasi sehari penuh. Teknologi penyimpanan energi canggih, seperti baterai *solid-state* dan *supercapacitor*, juga sedang diintegrasikan untuk menyimpan energi surya yang dihasilkan dan menyediakannya saat dibutuhkan.

Selain itu, pengembangan sistem regeneratif yang dapat menangkap dan menggunakan kembali energi dari udara yang keluar dari bantalan sedang dalam tahap uji coba lanjut. Sistem ini menggunakan turbin kecil yang ditempatkan di titik-titik strategis di sekitar *skirt* untuk mengkonversi aliran udara keluar menjadi energi listrik. *Prototipe* awal menunjukkan potensi untuk mereklaim hingga 10% dari energi yang digunakan untuk mempertahankan bantalan udara, menjanjikan peningkatan signifikan dalam efisiensi energi keseluruhan.

Inovasi dalam desain sistem pendingin dan manajemen termal juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi. Sistem pendingin berbasis termoelektrik yang memanfaatkan efek *Peltier* sedang dikembangkan untuk menggantikan sistem pendingin konvensional yang berat dan tidak efisien. Sistem ini tidak hanya lebih ringan tetapi juga dapat beroperasi secara reversibel, berfungsi sebagai pemanas ketika diperlukan, meningkatkan fleksibilitas operasional kendaraan di berbagai kondisi lingkungan.

9. Keselamatan dan Keandalan Operasional

Perkembangan terkini juga mencakup peningkatan signifikan dalam aspek keselamatan dan keandalan operasional. Sistem diagnostik *onboard* yang canggih, menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan analitik *big data*, memungkinkan pemantauan kondisi *real-time* dan perawatan prediktif.

Jaringan sensor terintegrasi yang mencakup seluruh kendaraan mengumpulkan data secara kontinyu tentang berbagai parameter operasional. Data ini diolah menggunakan algoritma *machine learning* yang dapat mengidentifikasi pola dan anomali yang menunjukkan potensi masalah sebelum terjadi kegagalan. Sistem ini dapat memprediksi kebutuhan pemeliharaan dengan akurasi tinggi, memungkinkan penjadwalan perawatan yang lebih efisien dan mengurangi waktu henti yang tidak direncanakan.

Teknologi realitas augmentasi (AR) juga sedang diintegrasikan ke dalam sistem operasional dan pemeliharaan. Operator dan teknisi pemeliharaan dapat menggunakan perangkat AR untuk mendapatkan informasi *real-time* tentang status sistem, panduan langkah demi langkah untuk prosedur pemeliharaan, dan akses langsung ke database teknis. Ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemeliharaan tetapi juga mengurangi risiko kesalahan manusia.

Dalam aspek keselamatan, pengembangan sistem navigasi dan penghindaran tabrakan otomatis telah mencapai tingkat kecanggihan baru. Menggunakan kombinasi radar, lidar, dan kamera optik, sistem ini dapat mendeteksi dan menghindari *obstacles* dengan tingkat akurasi yang tinggi, bahkan dalam kondisi visibilitas rendah. Algoritma AI canggih memungkinkan sistem untuk memprediksi pergerakan objek lain dan mengambil keputusan manuver yang optimal dalam milidetik.

6.8 Implikasi Ekonomi dan Lingkungan

Perkembangan dan implementasi teknologi bantalan udara dalam berbagai aplikasi transportasi memiliki implikasi ekonomi dan lingkungan yang signifikan. Analisis mendalam terhadap aspek-aspek ini sangat penting untuk memahami peran dan potensi teknologi ini dalam konteks yang lebih luas dari pembangunan berkelanjutan dan pertumbuhan ekonomi global.

1. Analisis Ekonomi Komprehensif

Teknologi bantalan udara, yang diimplementasikan dalam *Surface Effect Ships* (SES) dan *Air Cushion Vehicles* (ACV), memiliki implikasi ekonomi yang kompleks dan multifaset. Analisis ekonomi komprehensif harus mempertimbangkan tidak hanya biaya langsung dan penghematan operasional, tetapi juga dampak ekonomi yang lebih luas pada industri terkait dan ekonomi regional.

Dari segi efisiensi operasional, kendaraan berbantalan udara menawarkan keunggulan signifikan dalam hal kecepatan dan fleksibilitas. Misalnya, dalam operasi patroli perbatasan maritim, penggunaan SES dapat meningkatkan cakupan area patroli hingga 40% dibandingkan dengan kapal konvensional dengan biaya operasional yang setara. Ini tidak hanya meningkatkan efektivitas

operasional tetapi juga dapat menghasilkan penghematan biaya jangka panjang dalam bentuk pengurangan jumlah kendaraan dan personel yang diperlukan untuk mencakup area yang sama.

Dalam konteks transportasi penumpang, analisis ekonomi menunjukkan bahwa rute feri SES jarak menengah (100-300 km) dapat mencapai titik impas finansial dalam waktu 3-5 tahun operasi, tergantung pada volume penumpang dan struktur tarif. Peningkatan kecepatan yang ditawarkan oleh SES (hingga 50% lebih cepat dari feri konvensional) memungkinkan peningkatan frekuensi layanan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan utilisasi aset dan pendapatan per kendaraan.

Namun, biaya awal yang tinggi untuk akuisisi kendaraan berbantalan udara tetap menjadi hambatan signifikan untuk adopsi yang lebih luas. Sebuah SES berukuran menengah (kapasitas 250 penumpang) dapat memiliki biaya akuisisi hingga 50% lebih tinggi dibandingkan dengan feri katamaran konvensional dengan kapasitas serupa. Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap biaya tinggi ini meliputi:

- a. Kompleksitas sistem bantalan udara dan propulsi
- b. Kebutuhan akan material khusus untuk konstruksi ringan namun kuat
- c. Biaya pengembangan dan sertifikasi yang tinggi karena sifat inovatif teknologi

Untuk mengatasi tantangan biaya ini, beberapa strategi sedang dieksplorasi oleh industri:

- a. Standardisasi desain dan komponen untuk memungkinkan produksi skala besar dan pengurangan biaya
- b. Pengembangan teknik manufaktur baru, termasuk penggunaan teknologi *3D printing* untuk komponen kompleks
- c. Kolaborasi industri untuk berbagi biaya penelitian dan pengembangan
- d. Skema pembiayaan inovatif, seperti leasing operasional berbasis kinerja

Analisis *Total Cost of Ownership* (TCO) menunjukkan bahwa meskipun biaya awal tinggi, kendaraan berbantalan udara dapat

menjadi lebih ekonomis dalam jangka panjang untuk aplikasi tertentu. Misalnya, untuk operasi logistik di daerah terpencil dengan infrastruktur terbatas, ACV dapat menghasilkan penghematan TCO hingga 25% selama masa pakai 20 tahun dibandingkan dengan kombinasi transportasi darat dan air konvensional, terutama karena pengurangan kebutuhan infrastruktur dan peningkatan efisiensi operasional.

Dari perspektif ekonomi makro, pengembangan industri teknologi bantalan udara memiliki potensi untuk menciptakan ekosistem ekonomi baru. Ini meliputi:

- a. Penciptaan lapangan kerja berketerampilan tinggi dalam desain, manufaktur, dan pemeliharaan
- b. Pengembangan rantai pasokan khusus untuk komponen dan material khusus
- c. Stimulasi inovasi dalam teknologi terkait, seperti sistem propulsi dan material canggih
- d. Potensi untuk ekspor teknologi dan keahlian ke pasar global

Studi kasus di Norwegia, yang telah menjadi pemimpin dalam pengembangan SES untuk aplikasi militer dan komersial, menunjukkan bahwa industri ini telah berkontribusi sekitar 0,5% terhadap GDP nasional dan menciptakan lebih dari 5.000 pekerjaan langsung dan tidak langsung.

2. Implikasi Lingkungan yang Komprehensif

Implikasi lingkungan dari teknologi bantalan udara adalah kompleks dan multidimensi, mencakup aspek-aspek positif dan negatif yang perlu dievaluasi secara holistik.

Salah satu keunggulan utama kendaraan berbantalan udara dari perspektif lingkungan adalah kemampuannya untuk beroperasi dengan dampak fisik minimal terhadap lingkungan sekitar. Dalam operasi di perairan dangkal atau ekosistem sensitif, ACV dapat bergerak tanpa mengganggu sedimen dasar atau merusak vegetasi. Penelitian yang dilakukan di Delta Sungai Mekong menunjukkan bahwa penggunaan ACV untuk transportasi di wilayah lahan basah dapat mengurangi kerusakan habitat hingga 80% dibandingkan dengan penggunaan kapal konvensional atau konstruksi jalan.

Efisiensi energi kendaraan berbantalan udara bervariasi tergantung pada kondisi operasional. Pada kecepatan tinggi di atas air, SES dapat mencapai efisiensi bahan bakar hingga 30% lebih baik dibandingkan dengan kapal cepat konvensional untuk kapasitas muatan yang sama. Namun, pada kecepatan rendah atau saat hover, konsumsi energi untuk mempertahankan bantalan udara dapat signifikan. Analisis siklus hidup energi menunjukkan bahwa untuk rute dengan profil operasional yang tepat (misalnya, rute jarak menengah dengan sebagian besar waktu di kecepatan jelajah tinggi), SES dapat menghasilkan pengurangan emisi gas rumah kaca hingga 25% per penumpang-kilometer dibandingkan dengan alternatif transportasi lainnya.

Perkembangan dalam teknologi propulsi alternatif membuka peluang baru untuk meningkatkan profil lingkungan kendaraan berbantalan udara:

- a. Sistem Propulsi *Hybrid*: Menggabungkan mesin diesel dengan motor listrik, sistem ini telah menunjukkan pengurangan konsumsi bahan bakar hingga 30% dalam uji coba operasional, terutama efektif untuk operasi yang melibatkan banyak manuver dan perubahan kecepatan.
- b. Propulsi Elektrik Penuh: *Prototipe* ACV bertenaga listrik penuh untuk operasi jarak pendek telah mendemonstrasikan operasi tanpa emisi langsung. Tantangan utama terletak pada kapasitas baterai dan infrastruktur pengisian daya.
- c. Teknologi Sel Bahan Bakar Hidrogen: Sedang dalam pengembangan untuk aplikasi jangka panjang, menjanjikan jangkauan operasional yang lebih panjang dengan emisi nol.

Kebisingan tetap menjadi salah satu tantangan lingkungan utama untuk teknologi bantalan udara. Kendaraan berbantalan udara dapat menghasilkan tingkat kebisingan hingga 100 dB pada jarak dekat, yang dapat mengganggu kehidupan liar dan komunitas pesisir. Upaya mitigasi meliputi:

- a. Desain aerodinamis yang dioptimalkan untuk mengurangi turbulensi dan kebisingan
- b. Pengembangan sistem peredam suara canggih

- c. Perencanaan rute yang cermat untuk menghindari area sensitif
- d. Implementasi "mode operasi senyap" dengan pengurangan kecepatan dan modifikasi konfigurasi bantalan udara di area sensitif

Dalam konteks perubahan iklim, teknologi bantalan udara memiliki potensi peran ganda:

- a. Mitigasi: Melalui peningkatan efisiensi dan adopsi teknologi propulsi bersih, kendaraan berbantalan udara dapat berkontribusi pada pengurangan emisi sektor transportasi.
- b. Adaptasi: Kemampuan untuk beroperasi di berbagai kondisi permukaan menjadikan teknologi ini potensial untuk transportasi di daerah yang terkena dampak perubahan iklim, seperti wilayah pesisir yang rentan terhadap kenaikan permukaan laut atau daerah Arktik dengan kondisi es yang berubah-ubah.

3. Perspektif Kebijakan dan Regulasi

Implikasi ekonomi dan lingkungan teknologi bantalan udara memerlukan pendekatan kebijakan dan regulasi yang komprehensif dan seimbang. Beberapa aspek kunci yang perlu dipertimbangkan meliputi:

- a. Insentif Ekonomi: Skema insentif untuk mendorong adopsi teknologi bantalan udara yang efisien dan ramah lingkungan, seperti kredit pajak untuk investasi dalam kendaraan rendah emisi atau hibah untuk penelitian dan pengembangan.
- b. Standar Emisi dan Efisiensi: Pengembangan standar khusus untuk kendaraan berbantalan udara yang mencakup tidak hanya emisi gas buang tetapi juga efisiensi energi keseluruhan dalam berbagai mode operasi.
- c. Regulasi Kebisingan: Implementasi batas kebisingan yang ketat dan zonasi operasional untuk melindungi area sensitif, serupa dengan regulasi yang diterapkan pada industri penerbangan.
- d. Sertifikasi dan Keselamatan: Pengembangan kerangka kerja sertifikasi yang komprehensif yang mempertimbangkan karakteristik unik kendaraan berbantalan udara, termasuk aspek keselamatan dan kinerja lingkungan.

- e. Perencanaan Infrastruktur: Integrasi teknologi bantalan udara ke dalam perencanaan transportasi jangka panjang, termasuk pengembangan infrastruktur pendukung seperti terminal khusus dan fasilitas pemeliharaan.
- f. Harmonisasi Internasional: Upaya untuk menyelaraskan standar dan regulasi secara internasional untuk memfasilitasi operasi lintas batas dan pengembangan pasar global.

6.9 Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip dasar operasi *Surface Effect Ship* (SES) dan bagaimana hal ini berkontribusi pada pengurangan tahanan hidrodinamik dibandingkan dengan kapal konvensional!
2. Analisis komponen-komponen utama sistem bantalan udara pada SES dan jelaskan peran masing-masing dalam mempertahankan efisiensi operasional kapal!
3. Jelaskan prinsip dasar operasi *Air Cushion Vehicle* (ACV) dan bandingkan keunggulan serta kelemahannya dibandingkan dengan kendaraan konvensional dalam konteks operasi amfibi!
4. Analisis perkembangan teknologi sistem *lift* dan propulsi pada ACV modern. Bagaimana inovasi dalam area ini telah meningkatkan efisiensi dan kemampuan operasional ACV?
5. Jelaskan prinsip dasar operasi *Air Cushion Vehicle* (ACV) dan bandingkan keunggulan serta kelemahannya dibandingkan dengan kendaraan konvensional dalam konteks operasi amfibi!
6. Evaluasi penggunaan ACV dalam aplikasi militer dan penyelamatan. Bagaimana karakteristik unik ACV memberikan keuntungan dalam skenario operasional ini?
7. Analisis keunggulan dan kelemahan SES dan ACV dalam konteks operasi militer amfibi. Dalam skenario apa masing-masing kendaraan akan lebih unggul?
8. Jelaskan prinsip dasar sistem bantalan udara dan bagaimana komponen utamanya bekerja bersama untuk menciptakan dan mempertahankan bantalan udara yang efektif!
9. Analisis bagaimana teknologi modern telah mengubah pendekatan dalam desain dan optimalisasi sistem bantalan

udara. Berikan contoh peningkatan performa yang dapat dicapai melalui penerapan teknologi ini!

10. Analisis tantangan utama dalam mempertahankan stabilitas dan kontrol kendaraan berbantalan udara dalam kondisi lingkungan yang dinamis. Bagaimana inovasi dalam desain *skirt* dan sistem kontrol adaptif berkontribusi pada mengatasi tantangan ini?
11. Jelaskan peran teknologi sensor dan sistem kontrol berbasis AI dalam meningkatkan manajemen bantalan udara. Bagaimana inovasi ini dapat mengatasi tantangan operasional yang dihadapi oleh kendaraan berbantalan udara?
12. Evaluasi implikasi lingkungan dari penggunaan teknologi bantalan udara di ekosistem sensitif seperti lahan basah atau wilayah pesisir. Bagaimana teknologi ini dapat memberikan keuntungan dibandingkan dengan mode transportasi konvensional, dan apa tantangan lingkungan yang masih perlu diatasi?

6.10 Kesimpulan

1. *Surface Effect Ship* (SES) mewakili sebuah terobosan signifikan dalam teknologi kapal, menghadirkan solusi inovatif yang menggabungkan kecepatan tinggi, efisiensi operasional, dan fleksibilitas dalam berbagai kondisi laut. Melalui integrasi cerdas antara prinsip katamaran dan teknologi bantalan udara, SES mampu mengatasi banyak keterbatasan kapal konvensional, terutama dalam hal tahanan hidrodinamik dan efisiensi pada kecepatan tinggi. Meskipun menghadapi tantangan dalam hal kompleksitas sistem dan optimalisasi untuk kondisi laut ekstrem, perkembangan berkelanjutan dalam desain *hull*, teknologi *skirting*, sistem kontrol canggih, dan material inovatif terus mendorong evolusi SES. Dengan potensinya yang besar dalam aplikasi komersial, militer, dan khusus, *Surface Effect Ship* memposisikan diri sebagai komponen kunci dalam lanskap masa depan transportasi maritim, menjanjikan perjalanan yang lebih cepat, lebih efisien, dan lebih ramah lingkungan di perairan dunia.
2. *Air Cushion Vehicle* (ACV) mewakili sebuah inovasi yang unik dalam dunia transportasi, menggabungkan fleksibilitas operasional yang luar biasa dengan kemampuan untuk

beroperasi di berbagai jenis permukaan. Dari konsep awalnya yang sederhana, ACV telah berkembang menjadi kendaraan canggih yang memanfaatkan teknologi terdepan dalam aerodinamika, propulsi, dan kontrol. Keunggulan utamanya dalam mengatasi berbagai jenis terrain, termasuk transisi mulus antara air dan darat, telah membuka berbagai aplikasi yang tidak mungkin dilakukan oleh kendaraan konvensional. Meskipun menghadapi tantangan dalam hal efisiensi energi dan kompleksitas operasional, perkembangan berkelanjutan dalam teknologi ACV terus memperluas kemampuan dan aplikasinya. Dari operasi militer dan penyelamatan hingga eksplorasi ilmiah dan transportasi eco-friendly, ACV memainkan peran penting dalam mengatasi tantangan transportasi di wilayah yang sulit diakses atau sensitif secara lingkungan. Dengan kemajuan dalam teknologi material, sistem propulsi ramah lingkungan, dan kontrol otonomus, masa depan ACV tampak menjanjikan. Kendaraan ini akan terus berevolusi, menawarkan solusi inovatif untuk tantangan transportasi dan operasional di abad ke-21, sambil beradaptasi dengan tuntutan akan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan yang semakin meningkat.

3. *Surface Effect Ship (SES)* dan *Air Cushion Vehicle (ACV)* merupakan inovasi penting dalam teknologi kendaraan berbantalan udara, masing-masing dengan keunggulan tersendiri. SES unggul dalam kecepatan dan efisiensi di perairan terbuka, ideal untuk patroli maritim dan transportasi cepat antar-pulau, sementara ACV menawarkan fleksibilitas operasional luar biasa di berbagai permukaan, sangat berharga untuk operasi amfibi dan penyelamatan bencana. Perkembangan teknologi terus mendorong evolusi keduanya, fokus pada peningkatan efisiensi, pengurangan dampak lingkungan, dan perluasan kemampuan operasional. Masa depan kedua teknologi ini menjanjikan, dengan potensi aplikasi baru seiring kemajuan dalam material, sistem propulsi, dan teknologi kontrol. Pilihan antara SES dan ACV bergantung pada kebutuhan spesifik aplikasi, kondisi operasional, dan pertimbangan ekonomis, namun keduanya dipastikan akan terus berperan penting dalam evolusi transportasi maritim dan amfibi di abad ke-21.

4. Desain sistem bantalan udara terus berkembang, didorong oleh kemajuan dalam material, teknologi kontrol, dan metode analisis. Integrasi teknologi canggih membuka jalan bagi generasi baru kendaraan berbantalan udara yang lebih efisien, stabil, dan ramah lingkungan. Meskipun tantangan tetap ada, masa depan teknologi bantalan udara tampak menjanjikan. Dengan fokus berkelanjutan pada inovasi dan optimalisasi, sistem bantalan udara diperkirakan akan terus memainkan peran penting dalam evolusi transportasi maritim dan amfibi, menawarkan solusi unik untuk tantangan mobilitas di berbagai kondisi lingkungan.
5. Kendaraan berbantalan udara menghadapi berbagai tantangan operasional, mulai dari stabilitas dan kontrol, efisiensi energi, kebisingan, hingga isu-isu lingkungan dan regulasi. Meskipun tantangan ini signifikan, kemajuan teknologi telah menghasilkan solusi yang menjanjikan. Pengembangan sistem kontrol adaptif, desain *skirt* canggih, sistem propulsi *hybrid*, dan optimalisasi aerodinamis telah meningkatkan kinerja dan efisiensi. Upaya pengurangan kebisingan dan fokus pada desain ramah lingkungan menunjukkan komitmen terhadap keberlanjutan. Tantangan regulasi diatasi melalui kolaborasi internasional dan pengembangan standar komprehensif. Meskipun masih ada ruang untuk perbaikan, kemajuan yang dicapai menunjukkan potensi besar kendaraan berbantalan udara dalam transportasi maritim dan amfibi masa depan. Dengan fokus berkelanjutan pada inovasi dan keberlanjutan, teknologi ini diharapkan dapat menawarkan solusi transportasi yang semakin efisien, aman, dan ramah lingkungan, memainkan peran penting dalam evolusi transportasi modern.
6. Perkembangan terkini dalam teknologi bantalan udara menunjukkan lompatan besar dalam berbagai aspek, mulai dari material canggih dan sistem propulsi hingga kontrol berbasis AI dan aplikasi inovatif. Inovasi-inovasi ini tidak hanya meningkatkan kinerja dan efisiensi kendaraan berbantalan udara yang ada, tetapi juga membuka kemungkinan untuk aplikasi baru yang sebelumnya tidak terbayangkan. Integrasi teknologi terbaru, peningkatan efisiensi energi, dan fokus pada keberlanjutan menunjukkan komitmen industri terhadap pengembangan solusi transportasi yang lebih ramah lingkungan. Sementara itu,

kemajuan dalam keselamatan dan keandalan operasional membuka jalan bagi adopsi yang lebih luas dari teknologi ini di berbagai sektor. Dengan fokus berkelanjutan pada penelitian dan pengembangan, teknologi bantalan udara memiliki potensi untuk memainkan peran yang semakin penting dalam evolusi transportasi maritim, amfibi, dan bahkan urban di masa depan, menawarkan solusi yang lebih cepat, lebih efisien, dan lebih berkelanjutan untuk berbagai kebutuhan transportasi modern.

7. Teknologi bantalan udara menawarkan potensi signifikan untuk transformasi positif dalam sektor transportasi, dengan implikasi ekonomi dan lingkungan yang luas dan kompleks. Dari segi ekonomi, meskipun menghadapi tantangan biaya awal yang tinggi, teknologi ini menjanjikan efisiensi operasional yang lebih baik dan potensi untuk menciptakan ekosistem ekonomi baru. Dari perspektif lingkungan, kendaraan berbantalan udara menawarkan keunggulan dalam hal dampak fisik minimal terhadap ekosistem sensitif dan potensi untuk meningkatkan efisiensi energi, terutama dengan integrasi teknologi propulsi bersih. Namun, tantangan seperti kebisingan dan konsumsi energi pada mode operasi tertentu perlu terus diatasi. Keseimbangan antara manfaat ekonomi, efisiensi operasional, dan pertimbangan lingkungan, didukung oleh kebijakan dan regulasi yang tepat, akan menjadi kunci dalam menentukan peran teknologi ini dalam lanskap transportasi masa depan. Dengan pendekatan yang holistik dan berkelanjutan terhadap pengembangan dan implementasi, teknologi bantalan udara dapat menjadi komponen penting dalam transisi menuju sistem transportasi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap tantangan masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. L. Allison, "Propulsion Systems for High-Speed Marine Vehicles," in *High-Speed Marine Vehicles*, Springer, 2019, pp. 147-193.
- [2] "Bentley Yachts Photos," Foils.org. [Online]. Available: <https://foils.org/photos/bentley-yachts/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [3] T. Tezdogan et al., "Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming," *Ocean Engineering*, vol. 97, pp. 186-206, 2015.
- [4] International Maritime Organization, "International Code of Safety for High-Speed Craft, 2000 (2000 HSC Code)," IMO Publishing, 2000.
- [5] B. Finney, "Voyage to Polynesia's Land's End," *Antiquity*, vol. 75, no. 287, pp. 172-181, 2001.
- [6] M. Gannon, "Bell's HD-4: Faster than the Wind," *Invention & Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 56-63, 1990.
- [7] L. Yun and A. Bliault, *Theory and Design of Air Cushion Craft*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [8] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Vehicles*. John Wiley & Sons, 1978.
- [9] "NOAA Ship Thomas Jefferson Completes Productive Field Season in Great Lakes," NOAA Office of Marine and Aviation Operations. [Online]. Available: <https://www.oma.noaa.gov/oma/news-media/article/noaa-ship-thomas-jefferson-completes-productive-field-season-great-lakes>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [10] M. Traut et al., "Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 362-372, 2014.
- [11] "Inilah The Ampere, Kapal Ferry Pertama di Dunia dengan Tenaga Listrik," Kapal Aku. [Online]. Available: <https://www.kapalaku.com/index.php?threads/inilah-the->

- ampere-kapal-ferry-pertama-di-dunia-dengan-tenaga-listrik.3370/. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [12] "Yara Birkeland Press Kit," Yara International. [Online]. Available: <https://www.yara.com/news-and-media/media-library/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [13] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power. Cambridge University Press, 2017.
 - [14] J. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2018.
 - [15] Global Market Insights, "Offshore Support Vessel Market Size By Type," Technical Report, 2021.
 - [16] R. Bhattacharyya, Dynamics of Marine Vehicles. John Wiley & Sons, 1978.
 - [17] V. A. Dubrovsky and A. Lyakhovitsky, Multi-Hull Ships. Backbone Publishing Company, 2001.
 - [18] Det Norske Veritas (DNV), "Quantum: The Ship of the Future," Technical Report, 2020.
 - [19] Stena Line, "Stena Elektra - Our Future," Technical Report, 2021.
 - [20] R. G. Keane and B. F. Tibbitts, "A revolution in warship design: Navy-industry integrated product teams," Naval Engineers Journal, vol. 108, no. 2, pp. 59-73, 1996.
 - [21] "Quels sont les différents postes dans un navire," Surplus Militaires. [Online]. Available: <https://surplus-militaires.fr/blogs/news/quels-sont-les-differents-postes-dans-un-navire>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [22] U.S. Navy, "Landing Craft, Air Cushion (LCAC)," Fact File, 2021.
 - [23] HySeas III Consortium, "HySeas III: Realising the world's first sea-going hydrogen-powered RoPax ferry," Project Report, 2021.

- [24] B. Buck and R. Langan, *Aquaculture Perspective of Multi-Use Sites in the Open Ocean*. Springer, 2017.
- [25] WindEurope, "Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2020," Technical Report, 2021.
- [26] "Single blade installation," ResearchGate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Single-blade-installation_fig6_343714016. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [27] WindEurope, "Our energy, our future: How offshore wind will help Europe go carbon-neutral," Technical Report, 2019.
- [28] International Maritime Organization, "Regulatory scoping exercise for the use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS)," MSC.1/Circ.1638, 2021.
- [29] "High Speed Trimaran Ferry Begins Operations in Spain," PRWeb. [Online]. Available: <http://www.prweb.com/releases/2017/12/prweb15003379.htm>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [30] "*Benchijigua Express*," Ship Technology. [Online]. Available: <https://www.ship-technology.com/projects/benchijigua/#:~:text=Austal%E2%80%99s%20largest%20Trimaran,%20the%20Benchijigua%20Express,%20was>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [31] "Small waterplane area twin hull," Alchetron. [Online]. Available: <https://alchetron.com/Small-waterplane-area-twin-hull>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [32] M. Haase et al., "Hydrodynamic hull form design space exploration of large medium-speed catamarans using full-scale CFD," *Trans. RINA*, vol. 157, Part A2, *Int. J. Marit. Eng.*, pp. A-131-A-142, 2015.
- [33] "Virtu Ferries' High-Speed Wave-Piercing Catamaran," Ship Technology. [Online]. Available: <https://www.ship-technology.com/projects/virtu-ferries-high-speed-wave-piercing-catamaran/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [34] J. A. Keuning and J. Pinkster, "Optimisation of the seakeeping behaviour of a fast monohull," in *Proc. Fast '95*, Third

- International Conference on Fast Sea Transportation, Lübeck-Travemünde, Germany, 1995.
- [35] "First *Axe Bow* prototype at trails," ResearchGate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/First-AXE-Bow-prototype-at-trails_fig3_267693910. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [36] "World's Largest *E-Ferry Operating in Denmark*," Daily Scandinavian. [Online]. Available: <https://www.dailyscandinavian.com/worlds-largest-e-ferry-operating-in-denmark/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [37] "Maria Gallucci," Canary Media. [Online]. Available: <https://www.canarymedia.com/about/people/maria-gallucci>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [38] "*Color Hybrid*," Ferry Shipping News. [Online]. Available: <https://ferryshippingnews.com/color-hybrid/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [39] "BHC SR-N4 Mk.3 - największy na świecie poduszkowiec pasażerski," Ciekawy Ciekawostek. [Online]. Available: <https://ciekawyciekawostek.blogspot.com/2011/02/bhc-sr-n4-mk-3-najwiekszy-na-swiecie.html>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [40] "The USS Hercules hydroplanes off of Key West," Reddit. [Online]. Available: https://www.reddit.com/r/WarshipPorn/comments/1n7qfm/the_uss_hercules_hydroplanes_off_of_key_west/. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [41] "*Saipem 7000*," Ships and Oil. [Online]. Available: <https://www.shipsandoil.co.uk/Saipem-7000>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [42] "Removal and transport of 30,000 tonne decommissioned North Sea giant," Allseas. [Online]. Available: <https://allseas.com/news/removal-and-transport-of-30000-tonne-decommissioned-north-sea-giant/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
 - [43] "Gannet," Oliver Design. [Online]. Available: <http://oliverdesign.es/en/gannet/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].

- [44] International Maritime Organization, "International Code of Safety for High-Speed Craft, 2000 (2000 HSC Code)," IMO Publishing, 2000.
- [45] International Maritime Organization, "Code of Safety for Special Purpose Ships, 2008 (2008 SPS Code)," IMO Publishing, 2008.
- [46] International Maritime Organization, "International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code)," IMO Publishing, 2016.
- [47] International Maritime Organization, "International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)," IMO Publishing, 2016.
- [48] DNV GL, "Rules for Classification: High Speed and Light Craft," Technical Report, 2021.
- [49] International Maritime Organization, "International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)," Annex VI, IMO Publishing, 2021.
- [50] Lloyd's Register, University of Southampton, and QinetiQ, "Global Marine Technology Trends 2030," Technical Report, 2015.
- [51] R. A. Sielski, "Research needs in aluminum structure," *Ships and Offshore Structures*, vol. 3, no. 1, pp. 57-65, 2008.
- [52] O. M. Faltinsen, *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press, 2005.
- [53] "*Energy Observer* : le bateau laboratoire met le cap au Nord, propulsé par des ailes d'un genre nouveau," 20 Minutes. [Online]. Available: <https://www.20minutes.fr/planete/2476579-20190319-energy-observer-bateau-laboratoire-met-cap-nord-propulse-ailes-genre-nouveau>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [54] T. Perez and M. Blanke, "Ship roll damping control," *Annual Reviews in Control*, vol. 36, no. 1, pp. 129-147, 2012.
- [55] T. Cepowski, "The prediction of ship added resistance at the preliminary design stage," *Ocean Engineering*, vol. 166, pp. 186-194, 2018.

- [56] T. Perez, Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins. Springer Science & Business Media, 2006.
- [57] P. A. Wilson, Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2017.
- [58] S. Bhushan, T. Xing, P. Carrica, and F. Stern, "Model- and Full-Scale URANS Simulations of Athena Resistance, Powering, Seakeeping, and 5415 Maneuvering," Journal of Ship Research, vol. 53, no. 4, pp. 179-198, 2009.
- [59] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman, "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments," Applied Energy, vol. 194, pp. 30-54, 2017.
- [60] J. Ling-Chin and A. P. Roskilly, "Investigating the implications of a new-build hybrid power system for Roll-on/Roll-off cargo ships from a sustainability perspective – A life cycle assessment case study," Applied Energy, vol. 181, pp. 416-434, 2016.
- [61] M. P. Schultz et al., "Economic impact of biofouling on a naval surface ship," Biofouling, vol. 27, no. 1, pp. 87-98, 2011.
- [62] G. Shu et al., "A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 19, pp. 385-401, 2013.
- [63] M. Traut et al., "Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes," Applied Energy, vol. 113, pp. 362-372, 2014.
- [64] "World's Greenest Cruise Ship Brings New Horizons to Abu Dhabi's Sustainability Week," PRWeb. [Online]. Available: <http://ecoship-pb.com/worlds-greenest-cruise-ship-brings-new-horizons-to-abu-dhabis-sustainability-week/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [65] "Damen Stan Patrol 5009," Defesa Aérea & Naval. [Online]. Available: <https://www.defesaaereanaval.com.br/tag/damen-stan-patrol-5009>. [Accessed: Oct. 10, 2024].

- [66] "Construction Commences on Austal's Largest Ever Ferry," Austal. [Online]. Available: <https://www.austal.com/news/construction-commences-austals-largest-ever-ferry>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [67] "Heesen Electra Hybrid Superyacht," Luxurious Magazine. [Online]. Available: <https://www.luxuriousmagazine.com/heesen-electra-hybrid-superyacht/>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [68] "Offshore Carriers," Damen. [Online]. Available: <https://www.damen.com/vessels/offshore/offshore-carriers>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [69] "Severn Class Lifeboat," RNLI. [Online]. Available: <https://rnli.org/what-we-do/lifeboats-and-stations/our-lifeboat-fleet/severn-class-lifeboat>. [Accessed: Oct. 10, 2024].
- [70] U. D. Nielsen, J. J. Jensen, P. T. Pedersen, and Y. Ito, "Onboard monitoring of fatigue damage rates in the hull girder," *Marine Structures*, vol. 24, no. 2, pp. 182-206, 2011.
- [71] D. Savitsky and P. W. Brown, "Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water," *Marine Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 381-400, 1976.
- [72] M. Insel and A. F. Molland, "An investigation into the resistance components of high-speed displacement catamarans," *Trans. R. Inst. Nav. Archit.*, vol. 134, pp. 1-20, 1992.
- [73] S. Zaghi, R. Broglia, and A. Di Mascio, "Analysis of the interference effects for high-speed catamarans by model tests and numerical simulations," *Ocean Engineering*, vol. 38, no. 17-18, pp. 2110-2122, 2011.
- [74] A. F. Molland, P. A. Wilson, D. J. Taunton, S. Chandrababha, and P. A. Ghani, "Resistance and wash wave measurements on a series of high speed displacement monohull and catamaran forms in shallow water," *International Journal of Maritime Engineering*, vol. 146, pp. 19-38, 2004.
- [75] A. D. Papanikolaou, S. S. Zaraphonitis, and G. Androulakis, "Preliminary Design of a High-Speed SWATH Passenger/Car Ferry," *Marine Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 129-141, 1991.

- [76] M. Haase, G. Davidson, S. Friezer, J. Binns, G. Thomas, and N. Bose, "On the Macro Hydrodynamic Design of Highly Efficient Medium-Speed Catamarans with Minimum Resistance," *International Journal of Maritime Engineering*, vol. 157, no. A1, pp. A33-A52, 2015.
- [77] P. Mantle, "Air Cushion Craft Development," *Naval Engineers Journal*, vol. 92, no. 2, pp. 36-54, 1980.