

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Untuk mendukung kajian ini, dilakukan analisis terhadap penelitian-penelitian sebelumnya dijadikan dasar pembandingan antara penelitian ini dengan penelitian lain, sehingga penulis dapat terhindar dari tindakan plagiarisme. Beberapa contoh penelitian terkait disajikan pada bagian berikut :

1. De Marco et al. (2016) dengan judul *Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study*. Penelitian ini menunjukkan bahwa Flettner rotor mampu menghasilkan gaya dorong signifikan melalui efek Magnus sehingga dapat menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi kapal. Kajian ini menjadi dasar fundamental mengapa sail rotor layak dipertimbangkan sebagai propulsi tambahan pada kapal VLCC.
2. Lu & Ringsberg (2019) dengan judul *Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology*. Melakukan optimasi penempatan rotor pada kapal tanker dengan mempertimbangkan faktor performa energi, stabilitas, dan respons terhadap angin. Penelitian ini sangat relevan karena memberi acuan ilmiah tentang konfigurasi optimal rotor untuk kapal besar yang sekelas VLCC.
3. Bentin et al. (2018) dengan judul *Influence of Wind Assisted Propulsion Systems on Ship Motions*. Meneliti bagaimana penambahan sail rotor memengaruhi rolling dan stabilitas transversal kapal. Penelitian ini menunjukkan bahwa posisi rotor berpengaruh pada momen gulung dan karakteristik roll, sehingga sangat penting untuk penelitian ini yang membandingkan konfigurasi centerline, simetris, dan port side.
4. Ariani et al. (2025) melalui penelitian berjudul *Numerical Study of Advanced Sail Design Optimization Based on Environmental Conditions Towards Energy Efficiency Design Index (EEDI)* melakukan kajian numerik terhadap optimasi desain advanced sail dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan, seperti kecepatan dan arah angin,

guna meningkatkan kinerja Energy Efficiency Design Index (EEDI) kapal. Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan energi angin melalui desain sail yang dioptimalkan mampu memberikan kontribusi gaya dorong tambahan sehingga mengurangi beban mesin utama kapal, yang secara langsung berdampak pada penurunan konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>. Kajian ini menjadi landasan penting bagi penelitian terkait sistem propulsi berbantuan angin, karena menegaskan bahwa konfigurasi dan karakteristik sail harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan agar diperoleh efisiensi energi yang optimal sesuai regulasi IMO.

5. Penelitian berjudul *Seakeeping Performance and Passenger Comfort Assessment of a 300 GT Ro-Ro Ferry Using RAO, MSI, and MII Analyses* mengkaji kinerja olah gerak (seakeeping) dan tingkat kenyamanan penumpang pada kapal Ro-Ro 300 GT melalui pendekatan simulasi numerik. Studi ini menggunakan Response Amplitude Operator (RAO) untuk mengevaluasi respons gerakan kapal terhadap gelombang, serta indikator Motion Sickness Incidence (MSI) dan Motion Induced Interruptions (MII) untuk menilai dampak gerakan kapal terhadap kenyamanan manusia di atas kapal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik gerakan heave, pitch, dan roll memiliki pengaruh langsung terhadap nilai MSI dan MII, sehingga kondisi gelombang dan arah datang gelombang menjadi faktor penting dalam penentuan tingkat kenyamanan. Penelitian ini memperkuat penggunaan metode seakeeping berbasis RAO sebagai pendekatan yang komprehensif dalam mengevaluasi performa dinamis kapal, sekaligus relevan sebagai acuan dalam analisis pengaruh modifikasi desain atau penambahan sistem tertentu terhadap respon gerak kapal.
6. Penelitian berjudul *A Novel Sea State Classification Scheme of the Global CFOSAT Wind and Wave Observations* mengusulkan suatu skema klasifikasi kondisi laut (sea state) yang baru berdasarkan data pengamatan angin dan gelombang global dari satelit CFOSAT. Studi ini menggabungkan parameter gelombang dan angin untuk mengklasifikasikan kondisi laut secara lebih akurat, termasuk pemisahan

antara wind sea dan swell. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan klasifikasi ini mampu merepresentasikan variasi kondisi laut global dengan lebih baik dibandingkan metode konvensional. Penelitian ini relevan sebagai dasar penentuan kondisi gelombang representatif dalam analisis seakeeping, karena pemilihan sea state yang tepat sangat memengaruhi hasil simulasi respon gerak kapal, terutama pada analisis RAO dan evaluasi performa kapal di gelombang irregular.

7. Penelitian berjudul Pengaruh Penambahan Bilge Keel terhadap RAO (Response Amplitude Operator) Kapal Patroli Cepat mengkaji dampak pemasangan bilge keel terhadap respons gerak kapal dalam kondisi gelombang, khususnya pada kapal patroli cepat. Studi ini menganalisis perubahan nilai RAO gerakan roll, heave, dan pitch sebagai indikator kinerja olah gerak kapal sebelum dan sesudah penambahan bilge keel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bilge keel mampu meningkatkan redaman (damping) gerakan roll secara signifikan, yang tercermin dari penurunan amplitudo RAO roll pada rentang frekuensi gelombang tertentu. Temuan ini menegaskan bahwa penambahan bilge keel berperan penting dalam meningkatkan stabilitas dinamis dan kenyamanan operasional kapal patroli cepat, serta menjadi referensi relevan dalam penelitian yang membahas pengaruh modifikasi struktur tambahan terhadap karakteristik seakeeping kapal.

## **2.2 Transportasi Laut dan Kapal VLCC**

### **2.2.1 Peran Transportasi Laut dalam Logistik Global**

Transportasi laut merupakan komponen fundamental dalam sistem perdagangan internasional dan logistik global. Menurut International Maritime Organization (IMO, 2020), sekitar 80–90% volume perdagangan dunia diangkut melalui jalur laut, menjadikannya moda transportasi yang paling dominan dibandingkan moda udara, darat, maupun rel. Dominasi tersebut tidak hanya disebabkan oleh kapasitas muatan yang sangat besar, melainkan juga karena biaya operasional per satuan barang yang jauh lebih rendah.

Sebagai moda transportasi strategis, transportasi laut memiliki beberapa karakteristik utama, yaitu:

1. Efisiensi biaya pada skala besar, khususnya untuk pengiriman barang curah (bulk), cair, maupun produk manufaktur.
2. Kapasitas angkut yang tinggi, memungkinkan pengiriman puluhan hingga ratusan ribu ton dalam satu perjalanan.
3. Akses lintas benua, karena jalur laut menghubungkan hampir seluruh negara di dunia melalui pelabuhan-pelabuhan utama.
4. Fleksibilitas rute, yang memungkinkan penyesuaian terhadap permintaan pasar, kondisi politik, maupun situasi keamanan maritim.

Dalam konteks rantai pasok global (global supply chain), transportasi laut berperan sebagai tulang punggung distribusi berbagai komoditas penting, antara lain:

1. Komoditas energi seperti minyak mentah, LNG, LPG, dan batu bara.
2. Komoditas mineral seperti bijih besi, bauksit, dan tembaga.
3. Produk pertanian seperti gandum, jagung, kedelai, dan minyak nabati.
4. Produk manufaktur melalui sistem kontainerisasi (containerized cargo).

Keandalan moda laut sangat memengaruhi stabilitas ekonomi global, karena keterlambatan atau gangguan pada jalur pelayaran dapat berdampak langsung pada:

1. Ketersediaan barang di pasar internasional
2. Stabilitas harga energi dan pangan
3. Kontinuitas proses industri
4. Kerentanan rantai pasok global

Oleh sebab itu, efisiensi operasional transportasi laut menjadi fokus utama dalam industri maritim modern. Upaya peningkatan efisiensi tersebut meliputi:

1. Optimalisasi desain kapal
2. Penggunaan teknologi propulsi yang lebih hemat energi
3. Penerapan bahan bakar alternatif
4. Pengembangan sistem *wind-assisted propulsion* seperti sail rotor

Selain aspek efisiensi, isu keberlanjutan (sustainability) juga menjadi perhatian global. IMO telah mengeluarkan berbagai regulasi terkait pengurangan emisi gas rumah kaca (GHG), seperti IMO 2020 Sulphur Cap dan IMO GHG Strategy 2050,

yang menargetkan penurunan emisi CO<sub>2</sub> secara signifikan. Hal ini menuntut industri pelayaran untuk terus mengembangkan teknologi ramah lingkungan guna mendukung transportasi laut yang lebih berkelanjutan.

Secara keseluruhan, transportasi laut tidak hanya berfungsi sebagai moda angkut, tetapi juga sebagai elemen kunci yang memengaruhi:

1. stabilitas ekonomi internasional,
2. keberlanjutan industri maritim,
3. integrasi perdagangan global,
4. dan ketahanan energi dunia.

Perannya yang sangat strategis inilah yang menjadikan penelitian terkait efisiensi kapal, termasuk penggunaan sail rotor sebagai propulsi tambahan, menjadi penting untuk mendukung transformasi industri pelayaran menuju era yang lebih efisien dan rendah emisi.



**Gambar 2.1** Transportasi Laut dalam Logistik Global

(Sumber: <https://buguruku.com>)

### **2.2.2 Kapal VLCC sebagai Moda Pengangkut Minyak Mentah**

*Very Large Crude Carrier (VLCC)* merupakan kapal tanker berukuran raksasa yang dirancang khusus untuk mengangkut minyak mentah dalam jumlah besar. Kapal ini memiliki kapasitas muatan 200.000–320.000 DWT, panjang keseluruhan (LOA) lebih dari 300 meter, lebar sekitar 58 meter, dan tinggi hingga 30 meter dari lunas ke geladak.

Karakteristik umum VLCC antara lain:

1. Beroperasi pada rute jarak jauh, seperti Timur Tengah–Asia Timur, Eropa, atau Amerika Serikat.
2. Menggunakan mesin diesel besar dengan konsumsi bahan bakar tinggi.

xTidak dapat masuk ke pelabuhan kecil, sehingga sering beroperasi melalui terminal lepas pantai atau dengan kapal transshipment.

Keunggulan VLCC terletak pada efisiensi volume angkut dan biaya logistik per barel yang rendah. Namun, tantangan utamanya adalah tingginya konsumsi bahan bakar yang berimplikasi langsung terhadap emisi karbon sektor pelayaran.



Kapal VLCC

(Sumber: [www.gccports.com](http://www.gccports.com))

## **2.3 Sistem Propulsi Tambahan dan Energi Alternatif**

### **2.3.1 Propulsi Tambahan Berbasis Energi Angin (*Wind-Assisted Propulsion*)**

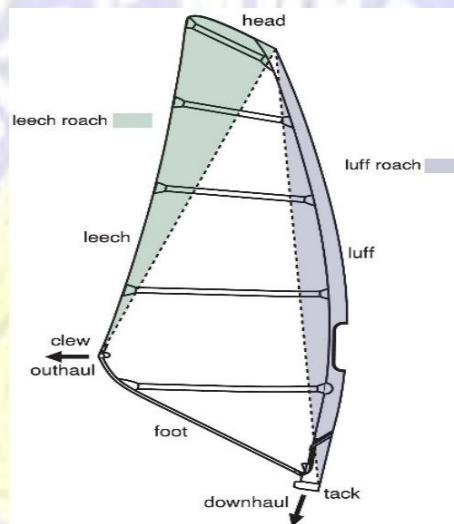
Upaya dekarbonisasi di sektor pelayaran mendorong munculnya berbagai inovasi sistem propulsi alternatif yang bertujuan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu pendekatan yang dinilai efektif dan berkelanjutan adalah propulsi tambahan berbasis angin (*wind-assisted propulsion system*). Teknologi ini memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan gaya dorong tambahan pada kapal, sehingga beban kerja mesin utama berkurang dan konsumsi bahan bakar serta emisi gas rumah kaca dapat ditekan secara signifikan.

Wind-assisted propulsion bukan teknologi baru prinsipnya telah digunakan sejak era kapal layar tradisional. Namun, dalam konteks pelayaran modern, teknologi ini dikembangkan kembali dengan pendekatan aerodinamika dan

rekayasa yang lebih maju agar kompatibel dengan desain kapal niaga besar seperti bulk carrier, tanker, dan kapal kontainer. Beberapa jenis teknologi propulsi berbasis angin yang saat ini banyak diteliti dan diterapkan meliputi:

a) Wing Sail

Wing sail merupakan layar kaku berbentuk profil aerodinamis yang menyerupai sayap pesawat. Struktur ini dapat menghasilkan gaya angkat (lift) lebih besar dibandingkan layar konvensional. Keunggulannya adalah efisiensi aerodinamis yang tinggi dan kemampuan operasi otomatis melalui kontrol elektronik. Wing sail digunakan pada kapal penumpang, ferry, dan kapal dagang kecil hingga menengah.



**Gambar 2.3** Winge Sail

(Sumber: [www.amazon.com](http://www.amazon.com))

b) Kite Sail

Kite sail bekerja dengan memanfaatkan layang-layang berukuran besar yang ditambatkan pada haluan kapal. Letaknya yang berada pada ketinggian puluhan hingga ratusan meter memungkinkan pemanfaatan angin lapisan atas yang lebih kuat dan stabil. Teknologi ini memiliki potensi besar dalam mengurangi konsumsi bahan bakar, namun memerlukan ruang operasi yang luas serta sistem kontrol dinamis yang kompleks.



**Gambar 2.4** Kite Sail

( Sumber: [www.amazon.com](http://www.amazon.com) )

c) Suction Wing

Teknologi ini merupakan bentuk lanjutan dari wing sail, namun dilengkapi dengan sistem hisap udara (boundary layer suction) yang memungkinkan peningkatan efisiensi aliran udara di permukaan sayap. Suction wing mampu menghasilkan gaya angkat lebih besar dibanding wing sail biasa dan memiliki stabilitas arah yang lebih baik. Namun, sistem ini relatif mahal dan membutuhkan perawatan intensif.



**Gambar 2.5** Suction Wings

( Sumber: [www.4coffshore.com](http://www.4coffshore.com) )

d) Sail Rotor (Flettner Rotor)

Sail rotor adalah silinder vertikal berputar yang mengandalkan Efek

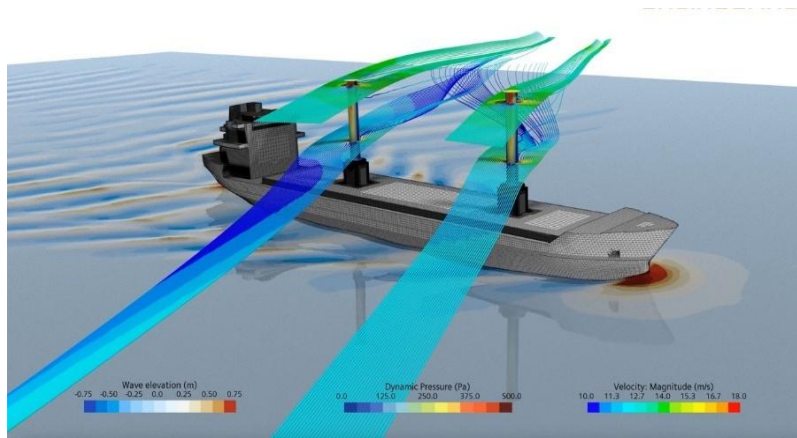
Magnus untuk menghasilkan gaya dorong. Rotor digerakkan oleh motor listrik berdaya rendah, sementara gaya yang dihasilkan dapat memberikan kontribusi thrust yang signifikan, terutama pada kapal besar. Kelebihan utama sail rotor adalah:

1. Struktur kokoh dan stabil, sehingga aman dipasang pada kapal berskala besar seperti VLCC.
2. Operasi otomatis dan minim perawatan, karena komponen mekanis relatif sederhana.
3. Tidak mengganggu ruang muat, karena dipasang di atas geladak.
4. Efektif pada berbagai kecepatan angin dan arah angin relatif.

Berdasarkan berbagai penelitian, sail rotor mampu memberikan penghematan bahan bakar antara 5–20%, tergantung kondisi angin, ukuran rotor, konfigurasi penempatan, serta kecepatan kapal. Selain itu, sail rotor memberikan keuntungan tambahan dalam hal keselamatan karena tidak memerlukan intervensi manual awak selama operasi, berbeda dengan teknologi layar konvensional. Dari seluruh teknologi wind-assisted propulsion yang tersedia, sail rotor dianggap paling optimal untuk diaplikasikan pada kapal tanker besar seperti VLCC karena:

1. Memiliki stabilitas struktural tinggi,
2. Mudah diintegrasikan pada desain kapal eksisting (retrofit),
3. Tidak menimbulkan pengurangan kapasitas muatan,
4. Tidak memengaruhi operasi bongkar-muat di atas tank deck,
5. Dan memberikan potensi penghematan energi yang signifikan pada rute jarak jauh.

Dengan demikian, sail rotor menjadi teknologi propulsi tambahan yang sangat relevan untuk mendukung peningkatan efisiensi energi dan pengurangan emisi pada kapal-kapal berbobot besar, sekaligus menjadi fokus utama dalam penelitian ini.



**Gambar 2.6** Wind-Assisted Propulsion

( Sumber: [www.linkedin.com](http://www.linkedin.com) )

## 2.4 Sail Rotor (Flettner Rotor)

### 2.4.1 Prinsip Kerja Sail Rotor

Sail rotor atau *Flettner rotor* merupakan perangkat propulsi tambahan berbentuk silinder vertikal yang dipasang di atas geladak kapal dan dioperasikan dengan cara diputar menggunakan motor listrik atau sistem penggerak mekanis. Teknologi ini memanfaatkan Efek Magnus, yaitu fenomena aerodinamika yang terjadi ketika suatu benda berputar di dalam aliran fluida dan menghasilkan gaya angkat (*lift force*) yang arahnya tegak lurus terhadap aliran udara bebas.

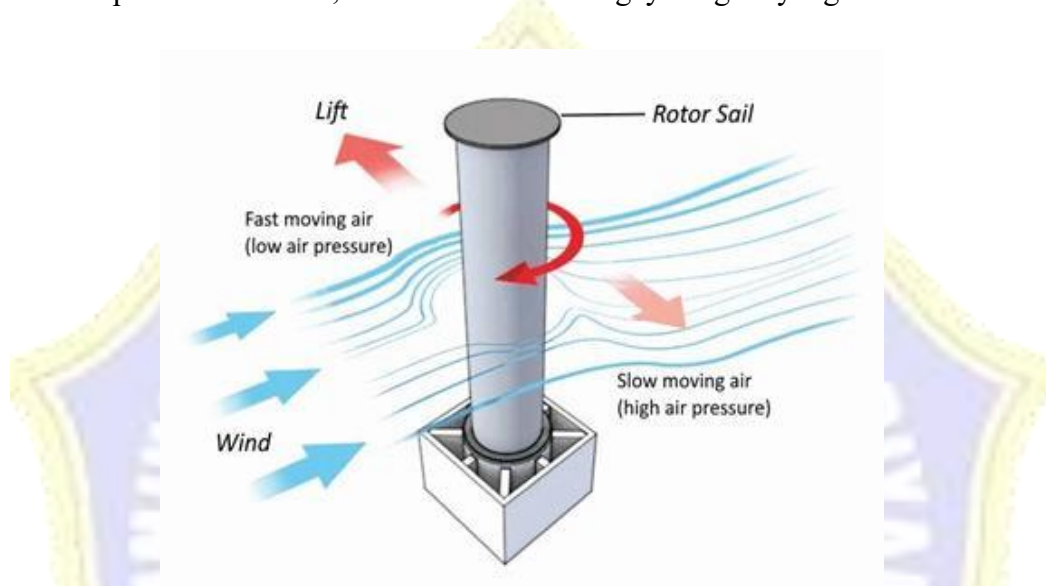
Ketika rotor berputar dan terkena angin relatif (*apparent wind*), aliran udara di sekitar rotor mengalami percepatan pada satu sisi dan perlambatan pada sisi lainnya. Kondisi ini menyebabkan perbedaan tekanan antara kedua sisi rotor, sehingga timbul gaya angkat lateral (*Magnus force*) yang kemudian dikonversi menjadi gaya dorong propulsi pada arah gerakan kapal. Dengan demikian, sail rotor bekerja sebagai sistem propulsi tambahan (*auxiliary propulsion*) yang membantu mengurangi beban kerja mesin utama tanpa menggantikannya secara penuh. Efek ini berkontribusi langsung pada penurunan konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca. Secara umum, fenomena Efek Magnus pada rotor dapat dijelaskan melalui persamaan gaya angkat:

$$F_L = \rho V \Gamma \quad (1)$$

di mana:

- $F_L$  = gaya angkat (N)
- $\rho$  = densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ )
- $V$  = kecepatan angin relatif terhadap rotor (m/s)
- $\Gamma$  = sirkulasi aliran udara akibat rotasi rotor

Persamaan tersebut memperlihatkan bahwa semakin besar kecepatan angin relatif dan kecepatan rotasi rotor, maka semakin besar gaya angkat yang dihasilkan.



**Gambar 2.7** Prinsip Kerja Sail Rotor

( Sumber: <https://media.cheggcdn.com>)

#### 2.4.2 Komponen dan Desain Sail Rotor

Sail rotor atau Flettner rotor terdiri atas beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan gaya dorong berbasis Efek Magnus. Desain rotor harus mempertimbangkan aspek aerodinamika, struktural, stabilitas kapal, serta operasional agar mampu berfungsi secara optimal pada kapal berukuran besar seperti *Very Large Crude Carrier (VLCC)*. Adapun komponen dan aspek desain yang menjadi perhatian utama dijelaskan sebagai berikut:

##### a) Silinder Utama (Rotor Drum)

Silinder utama merupakan bagian utama rotor yang berfungsi sebagai media pembangkitan Efek Magnus. Silinder ini umumnya dibuat dari material ringan namun memiliki kekuatan struktural tinggi, seperti:

1. Aluminium alloy,
2. Baja ringan (*high tensile steel*),
3. Material komposit seperti *glass fiber reinforced polymer (GFRP)* atau *carbon fiber reinforced polymer (CFRP)*.

Penggunaan material komposit menjadi semakin umum karena memiliki rasio kekuatan–berat yang tinggi, sehingga dapat mengurangi beban vertikal pada kapal dan meminimalkan pengaruh terhadap stabilitas kapal. Diameter dan tinggi silinder dirancang berdasarkan kebutuhan gaya dorong, kondisi operasi, serta batasan struktural dek.

b) Motor Penggerak (Drive System)

Motor penggerak berfungsi untuk memutar rotor dengan kecepatan tertentu.

Sistem penggerak dapat berupa:

1. motor listrik AC/DC,
2. sistem hidrolis (lebih jarang digunakan),
3. motor efisiensi tinggi dengan kontrol kecepatan variabel (VSD/VFD).

Output motor harus mampu menghasilkan kecepatan rotasi yang cukup untuk mendukung *spin ratio* optimal, yaitu perbandingan antara kecepatan rotasi rotor dan kecepatan angin relatif. Konsumsi energi motor merupakan salah satu parameter yang menentukan efektivitas energi keseluruhan rotor.

c) Sistem Kontrol Otomatis

Sistem kontrol berfungsi mengatur:

1. kecepatan rotasi rotor,
2. arah putaran rotor,
3. aktivasi dan penonaktifan rotor,
4. pemantauan kondisi angin,
5. perlindungan saat angin ekstrem (*storm mode*).

Sistem kontrol modern biasanya dilengkapi dengan integrasi sensor wind vane, anemometer, dan sistem navigasi kapal sehingga rotor dapat beroperasi

secara otomatis mengikuti kondisi angin paling optimal. Penggunaan sistem otomatis sangat penting untuk kapal besar seperti VLCC yang memiliki rute panjang dan memerlukan pengoperasian yang efisien serta aman.

#### d) Struktur Penopang dan Fondasi (Support Structure)

Struktur penopang memastikan rotor memiliki penyambungan struktural yang kuat ke dek kapal. Fondasi harus mampu menahan:

1. beban statis rotor,
2. beban dinamis akibat rotasi,
3. beban angin lateral yang signifikan,
4. momen puntir akibat interaksi aerodinamika.

Desain fondasi biasanya melibatkan penegar (*stiffeners*), *support brackets*, serta analisis kekuatan struktural menggunakan metode elemen hingga (FEA). Pada kapal besar seperti VLCC, lokasi pemasangan harus memperhatikan area bebas hambatan (*clearance*), akses perawatan, serta tidak mengganggu jalur muat.

#### 2.4.3 Aplikasi dan Implementasi Sail Rotor di Industri Maritim

Meskipun ditemukan sejak awal abad ke-20 oleh Anton Flettner, pemanfaatan sail rotor baru berkembang pesat kembali dalam dua dekade terakhir seiring meningkatnya perhatian terhadap energi ramah lingkungan. Beberapa contoh implementasi nyata:

1. MV E-Ship 1 (Belanda): menggunakan 4 sail rotor, mampu mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 20%.
2. Maersk Pelican: uji coba sail rotor pada kapal tanker komersial.
3. Scandlines Hybrid Ferries: menggunakan rotor untuk mendukung propulsi lintas Skandinavia.
4. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sail rotor dapat:
  - Mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi CO<sub>2</sub>.
  - Bekerja secara otomatis tanpa mengganggu operasional utama kapal.
  - Mengurangi beban mesin utama, sehingga memperpanjang usia pakainya.

#### 2.5 Gerakan Kapal: Heaving, Pitching, dan Rolling

Gerakan kapal di laut akibat pengaruh gelombang, angin, dan interaksi

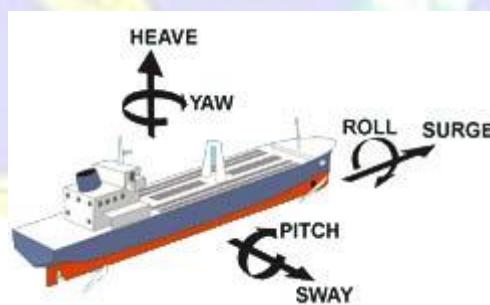
hidrodinamis merupakan fenomena dinamis yang sangat penting dalam kajian seakeeping. Pada lingkungan laut, kapal mengalami enam derajat kebebasan (six degrees of freedom), yaitu surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw. Namun, dalam konteks penelitian ini, fokus analisis dibatasi pada tiga jenis gerakan yang paling berpengaruh terhadap kenyamanan, keselamatan, serta respons hidrodinamika kapal, yaitu heaving, pitching, dan rolling.

Ketiga gerakan ini sangat dipengaruhi oleh bentuk lambung kapal, distribusi massa, kondisi gelombang, serta keberadaan struktur tambahan seperti sail rotor. Pemahaman mendalam mengenai karakteristik gerakan ini menjadi dasar dalam melakukan evaluasi performa seakeeping kapal VLCC dengan variasi penempatan rotor.

Berdasarkan Klasifikasi Sea State (Keadaan Laut) yang Realistis Tinggi gelombang 6 meter termasuk dalam Sea State 6 atau Sea State 7 dalam skala World Meteorological Organization (WMO) atau Douglas Sea Scale.

Sea State 6 ("Very Rough Sea"): Tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) 4-6 meter. Kondisi ini mewakili cuaca buruk (*stormy conditions*) yang masih mungkin dihadapi oleh operasi kapal/platform di laut lepas Asia (mis: Laut China Selatan, Samudra Hindia).

Sea State 7 ("High Sea"):  $H_s$  6-9 meter. Memilih 6 meter berada di batas bawah kondisi ekstrem ini, yang masuk akal untuk analisis kondisi operasional terburuk yang masih relevan (*design extreme condition*).



**Gambar 2.8** Ilustrasi Respon gerak

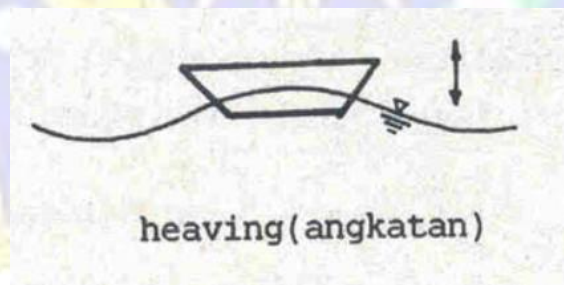
(Sumber: [/indomarine-engineer.blogspot.com](http://indomarine-engineer.blogspot.com))

### 2.5.1 Gerak Heaving

Heaveing adalah gerakan vertikal naik-turun kapal yang terjadi akibat hantaman gelombang laut. Gerakan ini biasanya dimulai saat gelombang mengenai

bagian haluan (depan) kapal, lalu merambat ke bagian tengah 10 hingga buritan (belakang), terutama saat kapal berada pada sudut 0 derajat terhadap arah gelombang. Gerakan heave disebabkan oleh gaya angkat (buoyancy) yang meningkat ketika badan kapal lebih banyak terendam air, serta didukung oleh pengaruh momentum kapal saat bergerak. Gerakan heaving dihasilkan dari keseimbangan tiga komponen utama:

1. Gaya Eksitasi Gelombang (Wave Excitation Force) Gelombang laut menghasilkan gaya vertikal berupa tekanan dinamis pada lambung. Tekanan gelombang pada haluan dan buritan memengaruhi amplitudo heave.
2. Gaya Pemulih Vertikal (Restoring Force) Ketika kapal turun, volume terendam meningkat sehingga gaya apung bertambah. Sebaliknya, ketika kapal naik, gaya apung berkurang. Besarnya gaya pemulih heave tergantung pada:
  - a) luas bidang garis air (*waterplane area*).
  - b) koefisien garis air.
  - c) geometri lambung.
3. Massa Tambahan (*Added Mass*) Pada saat bergerak naik-turun, kapal tidak hanya memindahkan tubuhnya sendiri, tetapi juga menggerakkan air di sekitarnya. Massa air yang ikut bergerak ini menjadi *added mass* yang meningkatkan inersia sistem.



**Gambar 2.9** Sketsa dari Gerak Heaving

(Sumber: shasolo.com)

Persamaan gerak bebas heaving dapat dituliskan sebagai berikut:

$$(m + a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0 \quad (2)$$

Sehingga persamaan gerak karena pengaruh gelombang:

$$(m + a) \ddot{z} + b \dot{z} + cz = F(t) \quad (3)$$

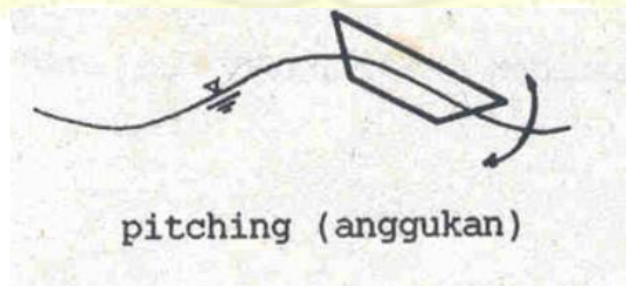
Dimana:

$F(t)$  = gaya yang ditimbulkan karena pengaruh gelombang pada model kapal.

### 2.5.2 Gerakan Pitching

Pitching adalah gerakan rotasi kapal pada sumbu melintang (melengkung ke atas dan ke bawah di bagian haluan dan buritan). Gerakan ini dapat dijelaskan secara teoritis melalui Hukum Euler. Pitch yang berlebihan dapat menimbulkan ketidaknyamanan bagi penumpang maupun awak kapal, seperti rasa mual, pusing, serta munculnya getaran atau guncangan. Oleh karena itu, pengendalian gerakan pitch sangat penting, karena dapat memengaruhi kecepatan, kestabilan, dan keseimbangan kapal. Secara prinsip, ketika terjadi perpindahan posisi pada benda apung, maka stabilitasnya akan terganggu akibat pergeseran dari posisi seimbang awalnya.. Gerakan pitching dipengaruhi oleh:

1. Momen eksitasi gelombang Gelombang memberikan gaya dan momen yang berbeda pada haluan dan buritan, menyebabkan kapal mengalami rotasi.
2. Momen pemulih Ketika kapal berputar, titik apung bergeser relatif terhadap pusat gravitasi sehingga menimbulkan momen yang mengembalikan kapal ke posisi keseimbangan.
3. Added mass moment of inertia Selain tubuh kapal, air di sekitar lambung yang ikut berputar meningkatkan inersia rotasional kapal.



**Gambar 2.10** Sketsa dari Gerak Pitching

(Sumber: shasolo.com)

Adapun persamaan gerak bebas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$(mk^2 + a)\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = 0 \quad (4)$$

Sehingga persamaan gerak karena pengaruh gelombang:

$$(mk^2 + a)\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M(t) \quad (5)$$

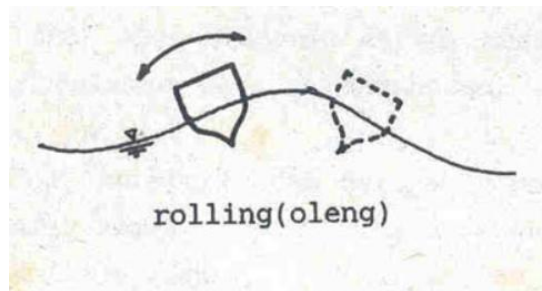
Dimana:

$M(t)$  = Momen gaya yang ditimbulkan karena pengaruh gelombang pada model kapal.

### 2.5.3 Gerakan Rolling

Rolling adalah gerakan kapal ke arah kanan dan kiri (miring ke samping) yang terjadi akibat gelombang datang dari arah samping, atau sudut 90 derajat terhadap kapal. Gerakan ini bisa disebabkan oleh gelombang laut maupun hembusan angin saat kapal berlayar. Roll yang terjadi dengan amplitudo besar dan frekuensi tinggi dapat memengaruhi stabilitas kapal secara signifikan, sehingga berisiko mengganggu keseimbangan bahkan menyebabkan kapal terbalik. Gerakan rolling terbentuk akibat:

1. Gaya eksitasi gelombang samping Gelombang yang datang dari sisi kapal (beam sea) memberikan momen yang memutar kapal ke kanan dan kiri.
2. Momen pemulih (restoring moment) Dipengaruhi oleh:
  - tinggi metasenter (GM),
  - bentuk lambung bagian bawah,
  - distribusi massa kapal.
3. Damping roll yang rendah Rolling memiliki tingkat redaman (*damping*) yang paling kecil dibanding gerakan lainnya. Sumber damping antara lain:
  - viskositas fluida,
  - bilge keel,
  - gelombang radiasi (*radiation damping*).



**Gambar 2.11** Sketsa dari Gerak Rolling  
(Sumber shasolo.com)

#### 2.5.4 Respons Gerakan terhadap Gelombang: Konsep RAO (Response Amplitude Operator)

Analisis numerik respon gerakan kapal menggunakan RAO (Response Amplitude Operator), yang didefinisikan sebagai:

$$RAO(\omega) = \frac{\eta(\omega)}{\zeta(\omega)} \quad (6)$$

Keterangan:

- $\eta(\omega)$  eta (omega)  $\eta(\omega)$  = amplitudo gerakan kapal (heave, pitch, atau roll),
- $\zeta(\omega)$  zeta (omega)  $\zeta(\omega)$  = amplitudo gelombang datang,
- $\omega$  omega = frekuensi gelombang.

Dalam penelitian ini, RAO digunakan untuk membandingkan respons heaving, pitching, dan rolling kapal VLCC pada variasi peletakan sail rotor yang berbeda, sehingga diperoleh variasi peletakan rotor yang paling optimal dari sisi kestabilan.

## 2.6 Simulasi Hidrodinamika Kapal dan Penggunaan Maxsurf Motions

### 2.6.1 Simulasi Numerik dalam Studi Hidrodinamika

Simulasi numerik merupakan pendekatan penting dalam bidang teknik kelautan untuk menganalisis perilaku kapal terhadap gaya eksternal seperti gelombang, arus, dan angin. Dengan menggunakan perangkat lunak berbasis metode numerik, perancang kapal dapat:

1. Memperkirakan respons gerakan kapal (heave, pitch, roll, dll).
2. Menganalisis interaksi lambung kapal dengan gelombang pada berbagai

kondisi laut.

3. Mengoptimalkan desain berdasarkan hasil prediksi hidrodinamis tanpa harus melakukan uji coba fisik penuh.

Pendekatan ini efisien dari segi biaya dan waktu, serta memberikan fleksibilitas tinggi dalam mengevaluasi berbagai skenario desain dan konfigurasi.

### 2.6.2 Perangkat Lunak Maxsurf Motions

Maxsurf Motions merupakan salah satu modul dalam paket perangkat lunak Maxsurf yang dikembangkan oleh Bentley Systems. Aplikasi ini dirancang untuk melakukan simulasi respons gerakan kapal akibat gelombang dengan menggunakan linear potential flow theory.

Fitur utama Maxsurf Motions antara lain:

1. Simulasi respons kapal terhadap gelombang irreguler (*irregular waves*).
2. Perhitungan Response Amplitude Operator (RAO) untuk semua gerakan (heave, pitch, roll, dll).
3. Analisis frekuensi alami kapal serta evaluasi fenomena resonansi.
4. Integrasi dengan Maxsurf Modeler untuk membaca geometri lambung secara langsung.
5. Penyajian hasil dalam bentuk grafik, tabel numerik, dan visualisasi animasi 3D.

### 2.6.3 Penerapan Maxsurf Motions dalam Penelitian Ini

Dalam penelitian ini, Maxsurf Motions digunakan untuk mensimulasikan respons gerakan kapal VLCC terhadap gelombang laut, dengan fokus pada tiga jenis gerakan utama yaitu heaving, pitching, dan rolling. Simulasi dilakukan pada gelombang reguler (*regular waves*) agar hasil antar konfigurasi dapat dibandingkan secara konsisten. Tiga konfigurasi penempatan sail rotor yang diuji meliputi:

1. Dua rotor di tengah kapal (*centerline*).
2. Dua rotor simetris di sisi kiri dan kanan kapal.
3. Dua rotor di sisi kiri kapal (*port side*).

Langkah-langkah simulasi yang dilakukan mencakup:

1. Membuat model lambung kapal VLCC dalam Maxsurf Modeler.

2. Menentukan titik berat dan parameter stabilitas awal kapal.
3. Menambahkan properti tambahan sesuai skenario variasi peletakan rotor (massa, posisi, tinggi).
4. Menjalankan simulasi dalam berbagai frekuensi gelombang.
5. Mengekstraksi serta menganalisis hasil RAO untuk heave, pitch, dan roll.

Dengan pendekatan ini, dapat dipahami bagaimana sekenario variasi peletakan sail rotor memengaruhi kestabilan kapal, sehingga penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam perancangan sistem propulsi tambahan berbasis

