

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Kapal Tradisional di Indonesia

Kapal tradisional Indonesia merupakan manifestasi dari warisan maritim dan kearifan lokal yang berkembang berdasarkan kebutuhan, budaya, dan lingkungan perairan setempat. Jenis-jenis kapal seperti phinisi, lambu, kora-kora, jukung, dan perahu layar telah digunakan selama ratusan tahun sebagai alat transportasi, perikanan, dan perdagangan antar pulau. Studi oleh Ilman et al. (2022) menunjukkan bahwa bentuk lambung kapal tradisional tidak hanya mencerminkan nilai budaya, tetapi juga adaptasi ekologis terhadap karakteristik oseanografi lokal.

#### 2.2. Sea State dan Implikasinya Terhadap Desain Lambung Kapal

##### 2.2.1. Sea State

Tabel 2.1. Pengelompokan Sea State menurut WMO

Sea State	Kondisi Laut	Tinggi Gelombang (m)
0	<i>Calm (glassy)</i>	0
1	<i>Calm (rippled)</i>	0 – 0.10
2	<i>Smooth (wavelets)</i>	0.10 – 0.50
3	<i>Slight</i>	0.50 – 1.25
4	<i>Moderate</i>	1.25 – 2.50
5	<i>Rough</i>	2.50 – 4.00
6 – 9	<i>Very Rough – High</i>	>4.00

*Sea state* merupakan indikator kondisi permukaan laut yang didasarkan pada tinggi gelombang, periode, dan arah gelombang yang terbentuk akibat interaksi angin dan arus laut. Klasifikasi internasional yang digunakan secara luas merujuk pada standar dari *World Meteorological Organization* (WMO), yang mengelompokkan *sea state* ke dalam sembilan kategori, dari Sea State 0 (laut sangat tenang) hingga Sea State 9 (laut sangat ganas), berdasarkan tinggi gelombang signifikan (*significant wave height*) dalam meter (WMO, 2019).

Wilayah perairan Indonesia memiliki karakteristik *sea state* yang sangat bervariasi antar zona waktu dan kawasan geografis. Hal ini disebabkan oleh

perbedaan musim (musim barat dan musim timur), arah angin dominan, dan struktur oseanografi regional.

### **2.2.2. Implikasi terhadap Desain Lambung Kapal Tradisional**

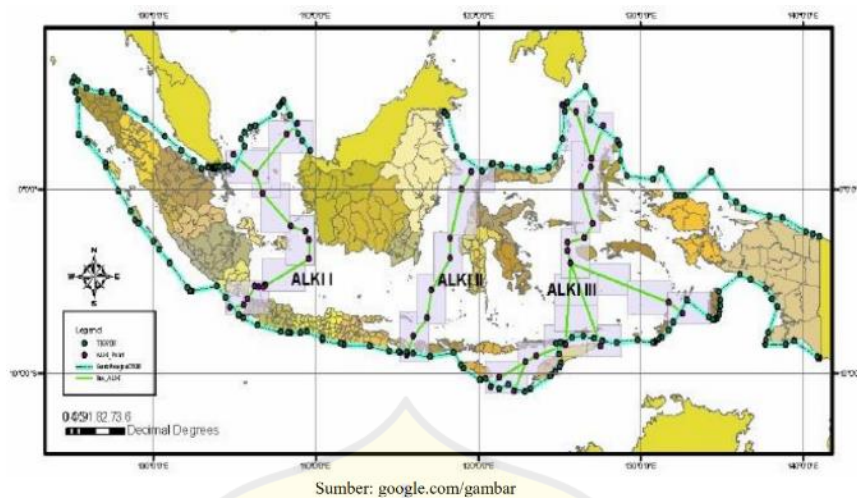
Variasi sea state yang cukup tajam antar wilayah tersebut memberikan tantangan tersendiri dalam perancangan ulang (*re-drawing*) lambung kapal tradisional. Lambung kapal merupakan elemen utama yang memengaruhi kestabilan, daya tahan terhadap gelombang, efisiensi bahan bakar, dan kenyamanan pelayaran. Kapal tradisional umumnya tidak memiliki sistem peredam modern seperti *stabilizer* atau *bilge keel*, sehingga sangat mengandalkan bentuk lambung untuk mengurangi efek olah gerak vertikal (*heave*) dan goyangan lateral (*roll*).

Desain lambung yang tidak sesuai dengan karakteristik gelombang lokal dapat menimbulkan risiko tinggi seperti ketidakstabilan, peningkatan konsumsi bahan bakar, dan penurunan kecepatan jelajah. Oleh karena itu, pemahaman terhadap klasifikasi sea state di setiap zona waktu menjadi landasan penting dalam pendekatan desain kapal tradisional yang aman dan efisien (Utama & Yanuar, 2017).

Penelitian ini menggunakan karakteristik *sea state* per zona sebagai salah satu variabel penting dalam menilai kesesuaian bentuk lambung kapal tradisional terhadap area operasionalnya. Hasil pemodelan dan simulasi hidrodinamis akan membantu dalam menentukan sejauh mana bentuk lambung kapal mampu beradaptasi terhadap kondisi laut setempat dan memberikan rekomendasi desain berbasis data kuantitatif.

### **2.3. Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI)**

ALKI adalah sistem koridor pelayaran nasional yang dibagi menjadi ALKI I, II, dan III, ditetapkan berdasarkan PP No. 37 Tahun 2002. Jalur ini mengatur lalu lintas kapal domestik dan internasional agar lebih tertib dan aman. Menurut Utama & Giri (2019), ALKI menjadi acuan penting dalam pengembangan desain kapal, karena menuntut kapal yang tahan terhadap kondisi laut dan padatnya lalu lintas pelayaran.



Gambar 2.1. Gambar Peta ALKI

Konsep negara kepulauan menurut Indonesia adalah hubungan yang integralistik antara manusia, wilayah yang terdiri dari pulau, perairan serta sumber daya alam yang ada di dalamnya sebagai entitas tunggal (Wisnumurti 2007, 392-393). Hubungan integralistik antara bentuk geografis dalam aspek ekonomi, sosial-budaya dan politik sangat penting dalam negara kepulauan. Konsep kepulauan (*archipelagic*) dalam pasal 46 Konvensi Hukum Laut 1982 diartikan sebagai “... suatu gugusan pulau, termasuk bagian pulau, perairan di antaranya dan lain-lain wujud alamiah yang hubungannya satu sama lain demikian eratny sehingga pulau-pulau, perairan dan wujud alamiah lainnya merupakan satu kesatuan geografis, ekonomi, politik yang hakiki, atau yang secara historis dianggap demikian.” Konsep kepulauan mengandung makna sangat luas dan membuat negara menjadi terintegrasi secara geografis, ekonomi, sosial, politik dan keamanan.

Tujuan diciptakannya alur laut kepulauan di perairan teritorial atau di perairan kepulauan suatu negara ialah untuk menghubungkan antara satu bagian ZEE atau laut bebas ke bagian ZEE atau laut bebas lain. ALKI diundangkan dalam PP No. 37 Tahun 2002 dan diusulkan ke IMO sejak tahun 1998. Bagi Indonesia, penentuan ALKI memberikan konsekuensi pada pengendalian atau pengontrolan untuk keamanan dan keselamatan di ALKI. Pengendalian ALKI diartikan menegakkan kedaulatan Indonesia di

daerah/wilayah perairan nasional, yang digunakan untuk lintas internasional. Pengendalian dan penjagaan yang dimaksud adalah keamanan negara, keselamatan negara dari bahaya ancaman baik yang datang dari dalam maupun dari luar, termasuk pelanggaran hukum.

#### **2.4. Modernisasi dan Nilai Budaya**

Modernisasi kapal tradisional melalui pendekatan re-drawing tidak hanya bertujuan meningkatkan performa teknis, tetapi juga mempertahankan nilai budaya lokal. Menurut Yulianto (2020), bentuk lambung tradisional sering kali mencerminkan kearifan lokal dalam merespons kondisi alam, seperti bentuk lancip untuk menembus ombak atau desain lebar untuk stabilitas di muara sungai.

#### **2.5. Konsep Dasar Hidrodinamika Kapal**

Dalam studi desain dan performa kapal tradisional, pemahaman terhadap prinsip-prinsip dasar hidrodinamika dan stabilitas sangat krusial. Teori-teori berikut menjadi fondasi dalam proses analisis dan pemodelan lambung kapal, khususnya ketika dikaitkan dengan variabel lingkungan seperti *sea state*, pembagian wilayah waktu, dan kondisi geografis perairan Indonesia.

##### **2.5.1. Stabilitas Kapal**

Stabilitas kapal merupakan aspek fundamental dalam desain dan operasi kapal, yang mengacu pada kemampuan kapal untuk kembali ke posisi tegak setelah mengalami gangguan kemiringan akibat gaya eksternal seperti ombak, angin, atau pergeseran muatan di atas kapal. Dalam konteks kapal tradisional Indonesia yang berlayar di perairan kepulauan dengan kondisi oseanografi yang dinamis, pemahaman stabilitas menjadi krusial untuk menjamin keselamatan pelayaran dan efisiensi operasional. Bentuk lambung yang bervariasi pada kapal tradisional secara langsung memengaruhi karakteristik stabilitasnya, yang kemudian berdampak pada efektivitas pelayaran di wilayah tertentu.

## 1. Jenis Stabilitas

Secara umum, stabilitas kapal dibagi menjadi stabilitas statis dan stabilitas dinamis. Stabilitas statis mengacu pada kemampuan kapal untuk menahan atau mengembalikan posisi tegaknya dalam kondisi diam atau saat kemiringan sudut kecil. Sementara itu, stabilitas dinamis adalah ukuran energi yang dibutuhkan untuk mengembalikan kapal dari sudut miring tertentu ke posisi tegak, yang lebih relevan dalam kondisi laut bergelombang dan dinamis. Meskipun fokus utama analisis awal sering pada stabilitas statis, pemahaman tentang kedua jenis stabilitas ini penting untuk menilai performa kapal tradisional secara komprehensif.

### a. Stabilitas Statis

Stabilitas statis kapal ditentukan oleh interaksi dua gaya utama: berat kapal ( $W$ ) yang bekerja ke bawah melalui titik berat ( $G$ ), dan gaya apung ( $B$ ) yang bekerja ke atas melalui titik apung, yaitu titik pusat dari volume air yang dipindahkan oleh lambung kapal. Dalam kondisi stabil, ketika kapal mengalami kemiringan akibat gangguan, titik apung akan bergeser ke sisi yang miring. Pergeseran ini menciptakan momen penegak yang cenderung mengembalikan kapal ke posisi tegak. Lengan momen penegak ini, yang dikenal sebagai lengan penegak (*Righting Arm*,  $GZ$ ), merupakan ukuran penting dari kemampuan kapal untuk mengoreksi kemiringannya. Pada kapal tradisional, distribusi muatan yang seringkali tidak teratur dan perpindahan kru/penumpang dapat secara signifikan memengaruhi posisi  $G$ , sehingga perlu diperhatikan dalam analisis stabilitas.

#### 1) Titik-titik Penting dalam Stabilitas

Dalam analisis stabilitas kapal, beberapa titik acuan menjadi fundamental:

- $G$  (*Center of Gravity*): Titik imajiner di mana total berat kapal terpusat. Posisinya dipengaruhi oleh berat lambung, mesin, perlengkapan, dan muatan.

- *B (Center of Buoyancy)*: Titik pusat volume air yang dipindahkan oleh kapal. Posisinya berubah seiring dengan perubahan bentuk lambung yang terendam saat kapal miring.
- *M (Metacenter)*: Titik perpotongan garis gaya apung saat kapal miring dengan garis vertikal awal dari gaya apung pada kondisi tegak. Posisi metasenter ini sangat bergantung pada bentuk lambung kapal.
- *GM (Metacentric Height)*: Jarak vertikal antara titik berat (*G*) dan metasenter (*M*). Ini adalah parameter utama untuk menilai stabilitas awal (*initial stability*) kapal pada sudut kemiringan kecil. Bentuk lambung kapal tradisional yang cenderung sempit seringkali menghasilkan nilai *GM* yang relatif kecil, menunjukkan respons stabilitas awal yang kurang kaku dibandingkan kapal modern dengan lebar yang lebih besar.

## 2) Persamaan Stabilitas Awal

Penilaian stabilitas awal kapal dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$GM = KM - KG$$

Di mana:

- *KM* : jarak vertikal dari titik dasar (*keel*) ke metasenter. Nilai *KM* ini murni ditentukan oleh geometri lambung kapal.
- *KG* : jarak vertikal dari titik dasar (*keel*) ke titik berat kapal. Nilai *KG* dipengaruhi oleh distribusi berat keseluruhan kapal dan muatan.
- Nilai *GM* yang positif menandakan bahwa kapal memiliki stabilitas awal yang baik dan cenderung kembali ke posisi tegak. Sebaliknya, nilai *GM* yang nol atau negatif menunjukkan kondisi tidak stabil, di mana kapal akan cenderung miring dan bahkan terbalik. Bagi kapal tradisional, pemahaman akan *KM* (dari bentuk lambung) dan estimasi *KG*

yang akurat (mengingat variasi muatan) sangat penting untuk memastikan  $GM$  yang memadai.

### 3) Kurva $GZ$ dan Interpretasinya

Kurva  $GZ$ , yang menggambarkan hubungan antara sudut kemiringan kapal dan lengan penegak ( $GZ$ ), memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai stabilitas kapal pada rentang sudut kemiringan yang luas. Informasi penting yang dapat diperoleh dari kurva  $GZ$  meliputi:

Sudut stabilitas maksimum: Sudut kemiringan di mana lengan penegak ( $GZ$ ) mencapai nilai tertinggi, menunjukkan titik kekuatan pemulih terbesar.

Sudut kehilangan stabilitas (*vanishing stability angle*): Sudut di mana  $GZ$  kembali ke nol, menandakan bahwa kapal tidak lagi memiliki momen pemulih dan akan terus miring atau terbalik.

Sudut *down-flooding*: Sudut kemiringan di mana bukaan yang tidak kedap air (misalnya pintu, jendela, atau bukaan di dek) mulai terendam air dan memungkinkan masuknya air ke dalam kapal, yang dapat menyebabkan kehilangan stabilitas dengan cepat.

Semakin luas area di bawah kurva  $GZ$ , semakin besar energi pemulih (stabilitas dinamis) yang dimiliki kapal, yang berarti kapal lebih mampu menahan gangguan eksternal.  $GZ$  yang tetap positif dalam rentang besar sudut kemiringan menandakan stabilitas yang baik dan kemampuan bertahan yang tinggi dalam kondisi laut yang buruk. Analisis kurva  $GZ$  pada berbagai bentuk lambung kapal tradisional akan menunjukkan seberapa adaptif dan aman lambung tersebut di kondisi gelombang yang berbeda-beda.

### 4) Pengaruh Bentuk Lambung terhadap Stabilitas

Desain lambung kapal memiliki pengaruh langsung dan signifikan terhadap karakteristik stabilitas. Beberapa faktor penting meliputi:

Lebar lambung (*beam*): Umumnya, lebar lambung yang lebih besar akan meningkatkan nilai  $KM$  dan  $GM$ , sehingga meningkatkan stabilitas awal kapal. Kapal tradisional dengan lambung yang lebih ramping atau simetris seringkali memiliki sensitivitas stabilitas awal yang lebih tinggi.

Tinggi lambung (*freeboard*): Jarak vertikal dari garis air ke dek utama. Freeboard yang memadai akan meningkatkan sudut down-flooding dan kemampuan kapal untuk menahan masuknya air, yang krusial untuk keselamatan di laut bergelombang.

Bentuk *midship section*: Penampang melintang lambung di bagian tengah kapal menentukan volume perpindahan air dan respons terhadap gelombang. Bentuk "U" cenderung lebih stabil pada sudut kecil, sementara bentuk "V" mungkin lebih stabil pada sudut besar.

Kapal tradisional Indonesia, dengan ragam bentuk lambungnya seperti yang umumnya ramping di daerah barat dan lebih penuh di daerah timur (yang secara historis disesuaikan dengan kondisi laut lokal), menunjukkan bagaimana bentuk lambung secara inheren memengaruhi stabilitas. Lambung simetris dan sempit yang umum ditemukan pada beberapa jenis kapal tradisional, misalnya, dapat mengurangi stabilitas statis, terutama saat muatan berpindah atau saat ombak besar menghantam lambung, menjadi perhatian dalam penilaian efektivitas pelayaran.

#### b. Stabilitas Dinamis

Berbeda dengan stabilitas statis, stabilitas dinamis adalah ukuran energi yang dibutuhkan untuk mengembalikan kapal dari sudut miring tertentu ke posisi tegak. Secara grafis, hal ini direpresentasikan oleh luas area di bawah kurva  $GZ$ . Dalam pengaruh ombak besar atau saat kapal bergerak cepat, stabilitas dinamis menjadi krusial karena kapal terpapar gaya-gaya transien. Meskipun perhitungan stabilitas dinamis secara rinci mungkin memerlukan simulasi yang lebih kompleks,

konsepnya penting untuk memahami bagaimana kapal tradisional dapat bertahan dalam kondisi laut yang ekstrem, terutama di wilayah Indonesia bagian timur yang dikenal dengan kondisi sea state yang lebih tinggi.

c. Kriteria Stabilitas

Untuk memastikan keselamatan pelayaran, beberapa standar internasional dan nasional telah menetapkan kriteria stabilitas minimum. Standar yang paling umum digunakan adalah *IMO Intact Stability Code (2008 IS Code)*, yang menyebutkan bahwa nilai *GM* awal tidak boleh kurang dari 0,15 meter untuk kapal kecil dan area di bawah kurva *GZ* harus melebihi nilai minimum dalam rentang sudut tertentu. Di Indonesia, Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) juga memiliki pedoman stabilitas yang berlaku untuk kapal niaga. Meskipun untuk kapal tradisional kadang dibutuhkan pendekatan alternatif karena perbedaan bentuk lambung, material, dan metode konstruksi, BKI (2023, Vol. II *Rules for Hull*) tetap menjadi acuan penting. Penerapan kriteria ini pada kapal tradisional akan membantu mengidentifikasi potensi kerentanan dan area untuk peningkatan desain.

### **2.5.2. Hambatan Gerak Kapal (*Ship Resistance*)**

Hambatan gerak kapal adalah total gaya yang melawan pergerakan kapal melalui air. Pemahaman tentang hambatan sangat penting dalam konteks perancangan dan pengoperasian kapal, karena secara langsung memengaruhi efisiensi pelayaran, konsumsi energi, dan performa kapal secara keseluruhan. Hal ini menjadi lebih krusial pada kapal tradisional, yang umumnya memiliki keterbatasan dalam sistem propulsi dan efisiensi bahan bakar. Oleh karena itu, optimalisasi bentuk lambung untuk meminimalkan hambatan merupakan strategi penting guna meningkatkan efektivitas operasional kapal dalam perairan tropis Indonesia yang beragam.

## 1. Komponen Hambatan

Total hambatan kapal (RT) terdiri dari berbagai komponen yang muncul akibat interaksi kapal dengan air dan udara. Komponen-komponen utama ini meliputi:

### a. Hambatan Gesek (*Frictional Resistance*, RF)

Hambatan gesek merupakan gaya yang timbul akibat gesekan antara permukaan basah lambung kapal dengan partikel air yang dilalui. Komponen ini biasanya menjadi penyumbang terbesar dari total hambatan, terutama pada kecepatan rendah hingga sedang.

- Faktor-faktor yang memengaruhi:
- Luas permukaan basah lambung
- Kecepatan kapal
- Bilangan Reynolds (Re)
- Kekasaran permukaan lambung

Khusus pada kapal kayu tradisional, kekasaran ini bisa jauh lebih besar dibanding kapal baja modern karena: permukaan kayu memiliki tekstur alami dan tidak rata; perawatan lambung (termasuk pelapisan *anti-fouling*) umumnya tidak optimal; serta sering terpapar *biofouling* seperti teritip dan lumut. Kondisi ini meningkatkan koefisien hambatan gesek secara signifikan, sehingga kapal tradisional berisiko kehilangan efisiensi. Hambatan gesek biasanya dihitung menggunakan ITTC 1957 *Friction Line*. Guldhammer & Harvald memakai formulasi ITTC-1957 (*International Towing Tank Conference*, Madrid 1957) untuk *Frictional Resistance Coefficient* pada buku *Harvald Resistance and Propulsion of Ships* hal 55:

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}$$

### b. Hambatan Sisa (*Residual Resistance*, $R_R$ )

Hambatan sisa adalah bagian dari hambatan total yang tersisa setelah dikurangi hambatan gesek. Umumnya terdiri dari dua komponen:

c. Hambatan Gelombang (*Wave-Making Resistance,  $R_W$* )

Merupakan energi yang digunakan untuk membentuk gelombang pada permukaan air ketika kapal bergerak, terutama gelombang haluan dan buritan. Besarnya  $R_W$  sangat dipengaruhi oleh: Bilangan Froude ( $F_n$ ) – rasio antara kecepatan kapal dan akar panjang lambung; dan bentuk lambung – bagian haluan dan buritan yang penuh meningkatkan pembentukan gelombang. Hambatan ini sangat relevan pada kapal tradisional dengan bentuk haluan yang cenderung tumpul atau penuh.

d. Hambatan Bentuk (*Form Resistance,  $R_{FORM}$* )

Terjadi karena pemisahan aliran fluida di sekitar lambung yang menghasilkan turbulensi dan pusaran (*vortex*), terutama di buritan kapal. Bentuk buritan yang tidak *streamline* akan meningkatkan hambatan ini.

e. Hambatan Udara (*Air Resistance,  $R_A$* )

Dihasilkan dari gesekan udara terhadap bagian kapal di atas garis air. Hambatan ini bergantung pada luas permukaan proyeksi superstruktur dan kecepatan relatif angin. Meskipun umumnya kecil, pada kapal dengan layar atau bangunan atas besar, komponen ini dapat menjadi signifikan.

f. Hambatan Tambahan (*Appendage Resistance,  $R_{APP}$* )

Berasal dari bagian tambahan kapal seperti kemudi, poros baling-baling, atau *stabilizer*. Kapal tradisional umumnya memiliki struktur bawah air yang sederhana, namun bila terdapat bagian menonjol, hambatan tambahan tetap perlu diperhitungkan.

2. Total Hambatan Kapal

Hambatan total ( $R_t$ ) yang dialami kapal saat bergerak di permukaan air terdiri dari beberapa komponen utama:

- Hambatan gesek ( $R_f$ ): akibat viskositas fluida
- Hambatan gelombang ( $R_w$ ): disebabkan oleh gelombang yang dihasilkan kapal

- Hambatan residu ( $R_r$ ): mencakup hambatan tambahan seperti hambatan akibat pusaran air

Total Hambatan Kapal dapat dirumuskan sebagai :

$$R_R = R_W + R_{FORM}$$

Atau persamaan dasar dari hambatan total:

$$R_t = R_f + R_w + R_r$$

Persamaan ini banyak digunakan dalam pendekatan empiris dan numerik untuk mengevaluasi kebutuhan daya dorong dan konsumsi bahan bakar.

### 3. Pengaruh Bentuk Lambung terhadap Hambatan

Bentuk lambung kapal adalah faktor utama yang menentukan besar kecilnya hambatan total. Optimalisasi geometri lambung sangat penting untuk efisiensi hidrodinamika. Faktor-faktor bentuk utama meliputi:

- Kelangsingan lambung (*slenderness ratio*): Lambung ramping (panjang > lebar) cenderung mengurangi hambatan gelombang pada kecepatan tinggi, tetapi meningkatkan hambatan gesek karena permukaan basah yang lebih luas. Sebaliknya, lambung gemuk meningkatkan hambatan bentuk, namun cenderung stabil dan cocok untuk kecepatan rendah.
- Bentuk haluan dan buritan: Haluan runcing dapat mengurangi hambatan gelombang, sedangkan bentuk tumpul menghasilkan sistem gelombang yang lebih besar. Buritan yang lancip dan halus membantu mengurangi hambatan bentuk akibat pemisahan aliran.
- Koefisien Bentuk Lambung (*Hull Form Coefficients*)
  - Koefisien blok ( $C_b$ ): Menggambarkan kepenuhan volume lambung kapal terhadap bentuk balok imajiner. Kapal dengan  $C_b$  tinggi memiliki lambung penuh dan cocok untuk daya angkut besar, sedangkan  $C_b$  rendah mencerminkan lambung ramping untuk kecepatan tinggi.
  - Koefisien prismatik ( $C_p$ ): Mengindikasikan distribusi volume sepanjang panjang kapal. Nilai  $C_p$  yang mendekati 1 menandakan lambung penuh di sepanjang kapal, menghasilkan hambatan

gelombang lebih tinggi pada kecepatan tertentu karena pembentukan gelombang di haluan dan buritan. Sebaliknya,  $C_p$  rendah menunjukkan distribusi volume yang lebih runcing, yang dapat mengurangi hambatan gelombang, terutama pada kecepatan menengah hingga tinggi.

- Pada kapal tradisional, variasi  $C_b$  dan  $C_p$  mencerminkan adaptasi lokal terhadap fungsi dan kondisi perairan. Misalnya, kapal layar seperti Pinisi memiliki  $C_p$  rendah dan desain ramping untuk efisiensi di laut terbuka, sedangkan kapal pengangkut muatan di sungai cenderung memiliki  $C_p$  dan  $C_b$  tinggi untuk stabilitas dan daya muat maksimum.

### 2.5.3. Koefisien Bentuk Lambung (*Hull Form Coefficients*)

Koefisien bentuk lambung adalah rasio non-dimensi yang digunakan untuk mendeskripsikan geometri dan kelangsingan bentuk lambung kapal secara kuantitatif. Koefisien ini sangat fundamental dalam desain kapal karena secara langsung merefleksikan distribusi volume dan bentuk kapal di bawah garis air, yang pada gilirannya memengaruhi karakteristik hidrodinamis seperti hambatan, stabilitas, dan olah gerak. Bagi studi tentang lambung kapal tradisional, analisis koefisien bentuk ini menjadi kunci untuk memahami adaptasi desain lokal dan pengaruhnya terhadap efektivitas pelayaran di berbagai kondisi perairan Indonesia.

#### 1. Koefisien Blok ( $C_b$ ):

Koefisien blok ( $C_b$ ) adalah rasio antara volume perpindahan air kapal ( $\nabla$ ) dengan volume balok imajiner yang memiliki panjang (LOA atau LBP), lebar ( $B$ ), dan sarat air ( $T$ ) maksimum kapal.

$$C_b = \frac{\nabla}{L \times B \times T}$$

Di mana:

$\nabla$  : Volume perpindahan air (*displacement volume*) kapal.

$L$  : Panjang kapal (umumnya LBP atau LWL).

$B$  : Lebar maksimum kapal.

$T$  : Sarat air kapal.

Nilai  $C_b$  menunjukkan kepenuhan atau kegemukan lambung kapal secara keseluruhan. Kapal dengan  $C_b$  tinggi (mendekati 1) memiliki bentuk yang sangat penuh dan umumnya digunakan untuk kapal kargo berkapasitas besar dengan kecepatan rendah, karena memaksimalkan volume angkut. Sebaliknya, kapal dengan  $C_b$  rendah (lebih ramping) memiliki lambung yang lebih halus dan runcing, cocok untuk mencapai kecepatan tinggi dengan hambatan gelombang yang minimal. Variasi  $C_b$  pada kapal tradisional Indonesia dapat memberikan indikasi awal mengenai fungsi utama kapal (misalnya, pengangkut barang vs. kapal layar) dan adaptasinya terhadap kondisi kecepatan serta perairan lokal.

## 2. Koefisien Midship ( $C_m$ atau $C_x$ )

Koefisien midship (CM atau Cx) adalah rasio antara luas penampang melintang terbesar lambung di bawah garis air ( $A_m$ ) dengan luas persegi panjang yang dibentuk oleh lebar maksimum kapal ( $B$ ) dan sarat air ( $T$ ).

$$C_m = \frac{A_m}{B \times T}$$

Di mana:

$A_m$  : Luas penampang melintang terbesar kapal di bawah garis air.

$B$  : Lebar maksimum kapal.

$T$  : Sarat air kapal.

Nilai  $C_m$  menggambarkan kepenuhan penampang melintang di bagian tengah kapal. Nilai  $C_m$  yang tinggi (mendekati 1) menunjukkan penampang yang penuh, seperti bentuk "U" yang seringkali memberikan volume yang baik dan stabilitas awal yang kaku. Nilai  $C_m$  yang lebih rendah menunjukkan penampang yang lebih runcing, seperti bentuk "V". Pada kapal tradisional, bentuk penampang tengah sangat bervariasi dan merupakan kunci dalam menentukan stabilitas melintang dan bagaimana kapal merespons gelombang samping.

### 3. Koefisien Garis Air ( $C_{wp}$ )

Koefisien garis air ( $C_{wp}$ ) adalah rasio antara luas bidang garis air ( $A_w$ ) dengan luas persegi panjang yang dibentuk oleh panjang garis air ( $L_{WL}$ ) dan lebar maksimum kapal ( $B$ ) pada garis air tersebut.

$$C_{wp} = \frac{A_w}{L_{WL} \times B}$$

Di mana:

$A_w$  : Luas bidang garis air kapal.

$L_{WL}$  : Panjang garis air kapal.

$B$  : Lebar maksimum kapal.

Nilai  $C_{wp}$  menunjukkan kepenuhan bidang garis air. Koefisien ini penting karena luas bidang garis air memengaruhi stabilitas pada sudut kemiringan besar dan respons kapal terhadap gelombang (*seakeeping*), terutama dalam gerakan *heave* dan *pitch*. Lambung kapal tradisional dengan  $C_{wp}$  yang berbeda (misalnya, garis air yang lebih penuh di bagian tengah untuk kapal kargo vs. yang lebih runcing di haluan dan buritan untuk kapal pesiar) akan memiliki karakteristik olah gerak dan stabilitas yang unik.

### 4. Koefisien Prismatik ( $C_p$ )

Koefisien prismatik ( $C_p$ ) adalah rasio antara volume perpindahan air kapal ( $\nabla$ ) dengan volume prisma yang memiliki luas penampang melintang terbesar ( $A_m$ ) dan panjang kapal ( $L$ ).

$$C_p = \frac{\nabla}{A_m \times L} = \frac{C_b}{C_m}$$

Di mana:

$\nabla$  : Volume perpindahan air kapal.

$A_m$  : Luas penampang melintang terbesar kapal.

$L$  : Panjang kapal (umumnya LBP atau LWL).

$C_b$  : Koefisien blok.

$C_m$  : Koefisien *midship*.

Nilai  $C_p$  menggambarkan distribusi volume lambung sepanjang panjang kapal.  $C_p$  yang tinggi (mendekati 1) menunjukkan distribusi volume yang

cenderung seragam atau penuh di sepanjang kapal, mirip dengan prisma, yang seringkali menghasilkan hambatan gelombang lebih tinggi pada kecepatan tertentu karena pembentukan gelombang yang signifikan di haluan dan buritan. Sebaliknya,  $C_p$  rendah menunjukkan distribusi volume yang lebih runcing di ujung-ujungnya (haluan dan buritan), yang dapat mengurangi hambatan gelombang, terutama pada kecepatan menengah hingga tinggi. Analisis  $C_p$  pada kapal tradisional sangat relevan untuk memahami bagaimana pembuat kapal secara intuitif mengoptimalkan bentuk lambung untuk tujuan spesifik (misalnya, kecepatan vs. daya angkut) di lingkungan perairan mereka.

#### 2.5.4. Olah Gerak Kapal (*Seakeeping*)

Olah gerak kapal (*seakeeping*) didefinisikan sebagai kemampuan suatu kapal untuk beroperasi secara aman dan efisien dalam kondisi laut bergelombang. Konsep ini mencakup studi tentang respons dinamis kapal terhadap eksitasi dari gelombang, angin, dan arus laut, serta analisis dampak resultan terhadap keselamatan awak kapal, integritas muatan, dan performa operasional secara keseluruhan. Pemahaman komprehensif mengenai olah gerak menjadi sangat krusial, khususnya bagi kapal tradisional Indonesia yang beroperasi di wilayah perairan Nusantara yang dikenal dinamis, karena secara langsung memengaruhi tingkat kenyamanan selama pelayaran, mitigasi risiko kerusakan muatan, dan kapabilitas kapal dalam mempertahankan arah serta kecepatan jelajah optimalnya.

##### 1. Jenis Gerakan Kapal

Ketika berinteraksi dengan lingkungan laut, kapal mengalami enam derajat kebebasan gerakan (*six degrees of freedom*, 6-DOF) yang dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

##### a. Gerakan Translasi (*Linear Motion*):

- *Heave*: Gerakan vertikal osilasi lambung kapal pada sumbu Z.
- *Sway*: Gerakan horizontal lateral (menyamping) lambung kapal pada sumbu Y.

- *Surge*: Gerakan horizontal longitudinal (maju-mundur) lambung kapal pada sumbu X.
- b. Gerakan Rotasi (*Angular Motion*):
- *Roll*: Gerakan rotasi kapal mengelilingi sumbu longitudinal (X), sering disebut sebagai gerakan oleng ke kiri dan kanan. Gerakan ini merupakan yang paling dominan dan cenderung memberikan dampak terbesar terhadap kenyamanan.
  - *Pitch*: Gerakan rotasi kapal mengelilingi sumbu transversal (Y), yang termanifestasi sebagai gerakan angguk naik-turun pada haluan dan buritan.
  - *Yaw*: Gerakan rotasi kapal mengelilingi sumbu vertikal (Z), yang memengaruhi perubahan arah haluan kapal (gerakan belok horizontal).

Model gerakan ini merupakan dasar fundamental dalam berbagai simulasi numerik dan eksperimen model uji yang bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik olah gerak kapal pada beragam kondisi gelombang.

## 2. Faktor-faktor yang Memengaruhi Olah Gerak

Beberapa parameter desain dan kondisi lingkungan secara signifikan memengaruhi performa olah gerak kapal:

- **Bentuk Lambung**: Geometri lambung, khususnya konfigurasi haluan, buritan, dan penampang melintang, sangat menentukan respons dinamis kapal terhadap gelombang. Lambung yang didesain dengan *flare* (pengembangan ke luar pada bagian haluan) dapat berkontribusi pada reduksi gerakan vertikal (*heave* dan *pitch*), namun pada kondisi tertentu, berpotensi meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian *slamming*.
- **Dimensi Utama Kapal**: Panjang, lebar, dan sarat air kapal secara langsung memengaruhi periode osilasi alami (*natural period*) kapal. Fenomena resonansi dapat terjadi apabila periode alami kapal mendekati periode gelombang yang datang, yang berakibat pada peningkatan amplitudo gerakan kapal secara drastis, berpotensi membahayakan integritas struktural dan stabilitas kapal.

- Distribusi Massa (*Radius of Gyration*): Distribusi massa internal kapal memengaruhi momen inersia dan respons rotasinya. Konsentrasi massa di bagian tengah kapal cenderung mengurangi amplitudo gerakan *roll* dan *pitch*, sedangkan penumpukan massa di ujung-ujung kapal dapat memperparah respons rotasional terhadap eksitasi gelombang.
- Kondisi Lingkungan: Karakteristik gelombang (tinggi dan periode), arah datangnya gelombang relatif terhadap arah gerak kapal (*heading angle*), serta kecepatan angin dan arus laut, secara kolektif akan menentukan magnitudo dan sifat eksitasi gelombang yang diterima oleh kapal.

### 3. Signifikansi Olah Gerak pada Kapal Tradisional

Bagi kapal tradisional di Indonesia, analisis olah gerak memiliki beberapa dimensi signifikansi:

- Keselamatan dan Kenyamanan: Gerakan *roll* dan *pitch* yang berlebihan dapat memicu *motion sickness*, kelelahan pada awak kapal, bahkan cedera. Mengingat kapal tradisional umumnya tidak dilengkapi dengan sistem peredam gerak (*stabilizers*) yang canggih, maka konfigurasi bentuk lambung dan metode distribusi muatan menjadi satu-satunya pengendali utama terhadap respons dinamis kapal.
- Proteksi Muatan: Kapal tradisional seringkali mengangkut berbagai jenis muatan campuran yang tidak selalu dilengkapi dengan sistem pengikat khusus. Gerakan *roll* yang ekstrem berpotensi menyebabkan pergeseran muatan, kerusakan fisik pada komoditas, atau bahkan hilangnya stabilitas kapal secara kritis.
- Efisiensi Operasional: Gerakan *heave* dan *pitch* yang besar dapat memicu beberapa fenomena merugikan, meliputi:
  - *Slamming* (benturan keras antara haluan kapal dengan permukaan air).
  - *Propeller racing* (kondisi di mana baling-baling keluar dari permukaan air).

- Penurunan efisiensi dorong akibat kehilangan kontak baling-baling dengan air. Efek-efek ini secara kolektif akan meningkatkan konsumsi bahan bakar dan mereduksi kecepatan jelajah efektif kapal.
- Adaptasi Desain Lokal: Bentuk lambung kapal tradisional merupakan hasil dari proses evolusi dan adaptasi empiris selama berabad-abad terhadap karakteristik perairan lokal. Sebagai contoh, desain Pinisi dengan haluan yang tinggi dan buritan yang terangkat terbukti efektif dalam menghadapi gelombang besar di laut lepas. Analisis numerik dan empiris modern kini memungkinkan kuantifikasi serta validasi keunggulan hidrodinamis dari desain-desain lokal ini secara ilmiah.

#### 4. Kriteria Olah Gerak (*Seakeeping Criteria*)

Meskipun belum terdapat standar tunggal yang berlaku universal untuk evaluasi olah gerak, beberapa parameter berikut sering digunakan sebagai tolok ukur dalam menilai performa kapal:

- Amplitudo Gerakan: Batas maksimum untuk amplitudo gerakan *roll*, *pitch*, dan *heave* yang masih dianggap memenuhi kriteria keamanan dan kenyamanan operasional.
- Akselerasi: Batas akselerasi linear (vertikal dan lateral) yang dapat ditoleransi oleh kru dan muatan, mempertimbangkan aspek fisiologis dan keamanan.
- Kejadian Ekstrem: Evaluasi frekuensi dan intensitas kejadian *slamming*, *deck wetness* (masuknya air ke dek kapal), dan *propeller racing*.
- Probabilitas Ketidaknyamanan (*Motion Sickness Incidence*, MSI): Parameter ini mengukur tingkat kenyamanan penumpang berdasarkan frekuensi dan amplitudo gerakan yang dialami, sesuai dengan pedoman standar.

#### 2.5.5. *Turning Circle* (Lingkaran Putar)

*Turning circle* atau lingkaran putar adalah representasi jalur yang dilalui oleh pusat gravitasi kapal ketika melakukan belokan penuh dengan sudut

kemudi konstan, dari kondisi awal bergerak lurus. Konsep ini krusial dalam evaluasi manuverabilitas kapal, yang merupakan aspek penting dari keselamatan navigasi, terutama di alur pelayaran yang sempit atau padat, seperti di beberapa selat di perairan Indonesia. Kemampuan kapal untuk berbelok secara efisien dan dalam radius tertentu sangat memengaruhi respons kapal terhadap situasi darurat dan kemampuan navigasi di lingkungan yang kompleks.

#### 1. Parameter Kunci *Turning Circle*

Evaluasi *turning circle* melibatkan beberapa parameter utama yang menggambarkan performa manuver kapal:

- *Tactical Diameter*: Jarak tegak lurus antara garis haluan awal (saat kemudi mulai dibelokkan) dan garis haluan saat kapal telah berputar 180 derajat. Ini menunjukkan seberapa jauh kapal bergeser dari jalur awal saat berbalik arah.
- *Steady Turning Diameter*: Diameter lingkaran stabil yang dicapai kapal setelah mencapai kondisi belok konstan, di mana kecepatan dan sudut *drift* (geseran) kapal relatif stabil. Ini adalah diameter lingkaran terkecil yang dapat dicapai kapal pada sudut kemudi tertentu.
- *Advance*: Jarak yang ditempuh kapal searah dengan arah awal gerak sampai kapal berputar 90 derajat. Ini penting untuk menilai seberapa jauh kapal akan terus maju sebelum berbelok tajam.
- *Transfer*: Jarak tegak lurus dari garis tengah awal kapal sampai kapal berputar 90 derajat. Ini menunjukkan seberapa jauh kapal bergeser lateral dari jalur awal saat berbelok.

#### 2. Faktor-faktor yang Memengaruhi *Turning Circle*

Beberapa faktor signifikan memengaruhi karakteristik *turning circle* kapal:

- *Bentuk Lambung*: Rasio panjang terhadap lebar (L/B) dan bentuk buritan sangat memengaruhi manuverabilitas. Kapal yang lebih pendek dan lebar umumnya memiliki *turning circle* yang lebih kecil (lebih lincah), namun mungkin mengorbankan stabilitas arah.

Lambung yang ramping cenderung membutuhkan radius putar yang lebih besar.

- Ukuran dan Efektivitas Kemudi: Luas permukaan kemudi relatif terhadap luas lambung, serta desain dan posisi kemudi, sangat menentukan gaya putar yang dihasilkan. Kemudi yang lebih besar dan efisien akan menghasilkan radius putar yang lebih kecil.
- Kecepatan Awal Kapal: Pada kecepatan yang lebih tinggi, radius putar cenderung menjadi lebih besar karena momentum inersia kapal yang lebih tinggi.
- Trim Kapal: Kondisi trim (kemiringan memanjang) dapat memengaruhi efektivitas kemudi dan distribusi tekanan air pada lambung, sehingga memengaruhi *turning circle*.

### 3. Relevansi *Turning Circle* pada Kapal Tradisional

Untuk kapal tradisional, karakteristik *turning circle* memiliki relevansi khusus:

- Navigasi di Perairan Sempit: Banyak pelabuhan atau alur pelayaran di Indonesia yang dilalui kapal tradisional memiliki ruang manuver yang terbatas. Kemampuan untuk berbelok dalam radius kecil sangat krusial untuk menghindari kandas atau tabrakan.
- Desain Kemudi Tradisional: Sistem kemudi pada kapal tradisional seringkali berbeda dengan kapal modern (misalnya, kemudi samping, kemudi ganda, atau kemudi yang dioperasikan manual). Analisis *turning circle* dapat membantu mengevaluasi efektivitas desain kemudi tradisional ini.
- Keselamatan: Manuverabilitas yang buruk dapat menjadi faktor risiko dalam kondisi darurat, seperti menghindari rintangan mendadak atau mengoreksi jalur saat badai.
- Perbandingan Desain: Melalui simulasi *turning circle* di *Maxsurf*, berbagai bentuk lambung kapal tradisional dapat dibandingkan untuk menilai mana yang menawarkan manuverabilitas terbaik, yang pada akhirnya berkontribusi pada efektivitas dan keselamatan operasional.

Analisis *turning circle* pada model kapal tradisional menggunakan *Maxsurf* akan memberikan data kuantitatif mengenai kemampuan manuver kapal, yang merupakan aspek fundamental dalam menilai efektivitas pelayaran di lingkungan operasional yang kompleks dan bervariasi di Indonesia.

### **2.5.6. *Deck Wetness (Green Water Loading)* dan Implikasinya Terhadap Desain Lambung**

Dalam pelayaran laut terbuka, kapal sering kali mengalami kondisi cuaca ekstrem seperti badai, gelombang tinggi, dan angin kencang. Salah satu konsekuensi dari kondisi tersebut adalah terjadinya *deck wetness*, yaitu fenomena masuknya air laut secara signifikan ke atas dek kapal. Fenomena ini disebut juga *green water loading*, istilah yang digunakan untuk membedakan semprotan air (*spray*) dari air laut yang benar-benar naik dan menutupi dek (*green water*). Warna kehijauan pada air laut ini menjadi asal penamaannya.

#### 1. Faktor Penyebab Terjadinya *Deck Wetness*

Beberapa kondisi yang menyebabkan terjadinya *green water* antara lain:

- *Freeboard* yang terlalu rendah (jarak vertikal antara permukaan air dan dek).
- Arah gelombang sejajar atau frontal terhadap haluan kapal.
- Kecepatan kapal terlalu tinggi saat menghadapi gelombang.
- Desain lambung yang tidak optimal dalam memotong gelombang.

#### 2. Upaya Mengurangi *Deck Wetness*

Beberapa langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi risiko *deck wetness* adalah:

- Meningkatkan *freeboard* (terutama pada bagian haluan).
- Mengurangi kecepatan kapal dalam kondisi gelombang tinggi.
- Mengubah arah kapal terhadap gelombang (misalnya menghindari *head sea* langsung).
- Mendesain ulang lambung kapal dengan *bow flare* yang lebih besar dan sudut lambung yang lebih adaptif terhadap gelombang.

*Deck wetness* sangat penting untuk diperhatikan dalam desain dan analisis lambung kapal, terutama untuk kapal tradisional yang umumnya memiliki *freeboard* rendah, tidak dilengkapi sistem stabilisator modern, dan sering beroperasi di daerah perairan dengan gelombang tinggi seperti wilayah timur Indonesia (Sea State 4–5). Paparan berulang dari *green water* dapat merusak perlengkapan dek, mereduksi stabilitas kapal, bahkan pada kasus ekstrem dapat memicu *capsizing* (kapal terbalik).

### 2.5.7. *Maxsurf* dan Aplikasinya dalam Desain Kapal

Dalam praktik teknis desain dan analisis hidrodinamika kapal, penggunaan perangkat lunak khusus menjadi sangat esensial. *Maxsurf* adalah salah satu software yang banyak digunakan dalam industri perkapalan, termasuk untuk perancangan dan evaluasi kapal. Perangkat lunak ini menawarkan kapabilitas untuk pemodelan lambung berbasis NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), yang memungkinkan desainer untuk membuat bentuk lambung yang kompleks dan halus dengan presisi tinggi.

Aplikasi *Maxsurf* dalam konteks penelitian ini meliputi:

- Pemodelan Geometri Lambung: *Maxsurf Modeler* digunakan untuk membuat model digital 3D lambung kapal tradisional berdasarkan data dimensi yang ada atau hasil pengukuran. Ini memungkinkan analisis bentuk lambung secara akurat.
- Analisis Hidrostatik dan Stabilitas: *Maxsurf Stability* menyediakan fitur untuk menghitung karakteristik hidrostatik (volume perpindahan, titik apung, pusat gravitasi) dan menganalisis stabilitas kapal (kurva GZ, GM awal, kriteria stabilitas). Ini krusial untuk memastikan kapal aman dalam berbagai kondisi muatan.
- Estimasi Hambatan: *Maxsurf Resistance* memungkinkan perhitungan hambatan total kapal pada berbagai kecepatan menggunakan metode-metode empiris (seperti metode *Holtrop-Mennen*, *Series 60*, dll.) atau numerik (jika terintegrasi dengan modul CFD). Data hambatan ini penting untuk estimasi daya propulsi dan konsumsi bahan bakar.

- Analisis Olah Gerak (*Seakeeping*): *Maxsurf Motions* (atau MOSES jika terintegrasi) dapat digunakan untuk mensimulasikan respons gerakan kapal (*roll, pitch, heave, dll.*) terhadap gelombang pada berbagai *sea state* dan arah datangnya gelombang. Ini membantu mengevaluasi kenyamanan dan keamanan kapal di laut bergelombang.
- Simulasi Manuverabilitas (*Turning Circle*): Meskipun tidak sekompleks simulasi *Maneuvering Modelling Group* (MMG), *Maxsurf* dapat memberikan perkiraan parameter *turning circle* dasar yang membantu menilai kemampuan berbelok kapal.
- Integrasi Desain: *Maxsurf* memungkinkan desainer untuk melakukan iterasi desain dengan cepat dan mengevaluasi dampak perubahan bentuk lambung terhadap performa hidrodinamis.

Penggunaan *Maxsurf* dalam penelitian ini akan memfasilitasi analisis kuantitatif terhadap bentuk lambung kapal tradisional, memberikan data berbasis bukti ilmiah mengenai performa hidrodinamisnya di berbagai kondisi perairan Indonesia. Hal ini diharapkan dapat mendukung upaya modernisasi kapal tradisional tanpa mengesampingkan kearifan lokal dalam desain.