

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tongkang

Tongkang atau *Barge* merupakan jenis kapal tanpa sistem penggerak sendiri dengan karakteristik lambung datar dan mempunyai (*coefisien block*) yang besar. Tongkang digunakan untuk kebutuhan alat angkut muatan curah seperti batubara dan sebagainya (Riyanto et al., 2020). Karakteristik bentuk tersebut menyebabkan Tongkang memiliki stabilitas statis yang baik, namun memiliki stabilitas arah (*directional stability*) cenderung rendah, terutama saat kapal beroperasi di perairan terbuka.



Gambar 2.1 Tongkang
(sumber : [Sinarmas LDA Maritime](#))

Salah satu aspek penting dari karakteristik Tongkang adalah stabilitas statik dan dinamik yang ditentukan oleh geometri lambung dan distribusi massa, yang berpengaruh pada kemampuan kapal dalam mempertahankan arah dan merespons gangguan lingkungan seperti gelombang dan arus. Analisis hidrostatik pada Tongkang menunjukkan bahwa parameter seperti metacentric height (GM), righting arm (GZ), dan range of stability merupakan variabel dasar untuk menjamin kemandirian operasi kapal pada berbagai kondisi muatan (Santoso et al., 2025).

Menurut Molland et al. (2017), kapal dengan bentuk lambung bluff body (benda tumpul) seperti Tongkang memiliki kecenderungan mengalami gangguan gerak lateral dan *Yaw* yang lebih besar akibat pengaruh gelombang dan arus. Hal ini menyebabkan kapal sulit untuk mempertahankan arah gerak lurus, sehingga diperlukan perangkat tambahan untuk meningkatkan stabilitas arah kapal.

2.2 *Skeg* dan Pengaruh Stabilitas Gerak Kapal

2.2.1 Definisi dan Fungsi *Skeg*

Skeg adalah salah satu bentuk modifikasi struktur berbentuk sirip atau lunas yang terletak di bagian bawah lambung kapal, yang terletak di buritan. Fungsi *Skeg* sendiri untuk meningkatkan kestabilan, kontrol arah, serta daya dorong kapal saat *bermanuver* (Prayogo et al., 2025). *Skeg* bekerja dengan memanfaatkan interaksi aliran fluida di sekitar buritan kapal sehingga mampu mengurangi kecenderungan kapal untuk berbelok secara tidak terkendali.

Widodo et al. (2018) menguraikan bahwa tujuan *Barge* menggunakan *Skeg* untuk membuat aliran fluida menjadi lebih halus dengan penambahan *Skeg* pada bagian buritan kapal. Model *Skeg* ini digunakan tidak hanya dalam sebatas bentuk lurus membujur badan kapal konvensional, tetapi juga dalam bentuk variasi *Skeg* yang dibengkokkan untuk mencapai tingkat aliran fluida yang diinginkan.

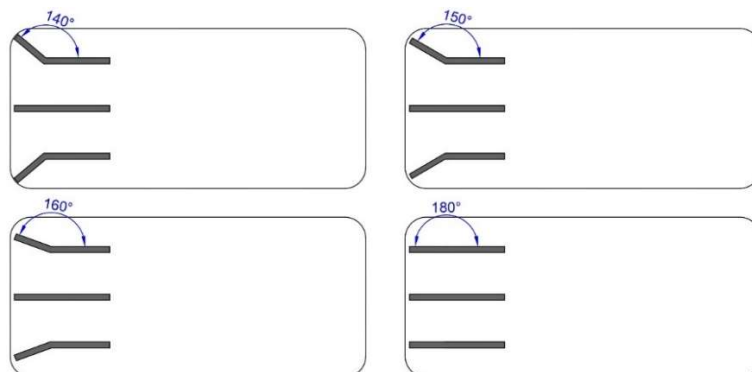


Gambar 2.2 *Skeg* Tongkang
(sumber : Dokumentasi Pribadi)

2.2.2 Pengaruh Sudut *Skeg* terhadap Kestabilan Kapal

Perubahan sudut *Skeg* samping juga berdampak pada distribusi tekanan di sekitar buritan Tongkang. Perubahan sudut *Skeg* menyebabkan terjadinya modifikasi arah aliran, yang memengaruhi percepatan dan perlambatan fluida di sepanjang permukaan *Skeg* dan lambung buritan. Oleh karena itu, variasi sudut *Skeg* samping pada konfigurasi *triple skeg* berpotensi menjadi parameter desain penting dalam mengendalikan karakteristik aliran sekaligus respon hidrodinamika kapal.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pola aliran fluida yang disebabkan oleh perubahan sudut *Skeg*. Dengan pendekatan Studi numerik digunakan untuk memvisualisasikan pola aliran, memetakan distribusi tekanan, serta menghitung gaya-gaya hidrodinamika akibat variasi sudut *Skeg* samping secara detail. Hasil analisis ini diharapkan menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi sudut *Skeg* samping yang optimal untuk meningkatkan performa aliran dan kestabilan kapal.



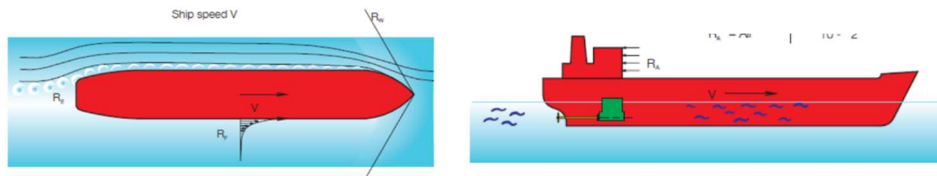
Gambar 2.3 Variasi Sudut *Skeg* 140°, 150°, 160°, dan 180°
(Sumber : Data Pribadi)

2.3 Tahanan Kapal

Tahanan kapal (*ship Resistance*) kapal pada suatu kecepatan adalah gaya fluida yang bekerja pada kapal sedemikian rupa sehingga melawan gerakan kapal tersebut. Tahanan tersebut sama dengan gaya fluida yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal. Tahanan kapal ini adalah sama dengan suatu gaya dan karena dihasilkan oleh air, sehingga biasa juga disebut gaya hidrodinamika (Sijabat et al., 2018). Pada konteks penelitian ini, Tongkang merupakan kapal tanpa penggerak sendiri (*non self propelled Barge*) yang dioperasikan melalui sistem penarikan oleh kapal tunda. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai tahanan kapal menjadi landasan dalam mengevaluasi pengaruh modifikasi *Skeg* terhadap efisiensi operasional sistem tunda secara keseluruhan (Widodo et al., 2018).

Umumnya tahanan kapal terbagi menjadi dua yaitu tahanan yang berada diatas permukaan air dan tahanan yang berada pada bawah permukaan air. Tahanan di atas permukaan air yang mencakup hambatan akibat angin terhadap bangunan atas dan dek. Tahanan di bawah permukaan air yang bekerja pada bagian lambung yang tercelup, meliputi komponen viskos dan gelombang (Rosmani et al., 2023).

Dalam penelitian ini, tahanan total Tongkang mengacu pada pendekatan empiris metode *Holtrop*. Pada metode *Holtrop*, tahanan total Tongkang tidak hanya dipengaruhi oleh tahanan gesek akibat permukaan lambung yang terendam air, tetapi juga oleh tahanan gelombang dan tahanan udara (Register, 2022). Hal ini sesuai dengan karakteristik Tongkang yang umumnya memiliki bentuk lambung relatif kotak, luas bidang melintang besar, serta kecepatan operasi yang rendah hingga sedang. Karena itu, perhitungan tahanan tidak cukup hanya meninjau bagian bawah air, tetapi juga harus memperhitungkan pengaruh angin terhadap bidang Tongkang yang berada di atas garis air.



Gambar 2.4 gambaran umum hambatan yang terjadi pada kapal
(sumber : <https://www.kapaldanlogistik.com/2021/10/hambatan-kapal-dan-perhitungannya>)

2.3.1 Tahanan Total Tongkang

Hambatan total atau total *Resistance* pada kapal adalah kombinasi dari berbagai komponen hambatan yang disebabkan oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi dengan cara yang kompleks (Widianto et al., 2025). Tahanan total Tongkang yang ditarik dihitung dari penjumlahan tahanan gesek, tahanan gelombang, dan tahanan udara. Persamaan dasar tahanan total tongkang dapat dituliskan, sebagai berikut:

$$R_T = R_F + R_W + R_A \dots\dots\dots(1)$$

Di mana:

- R_T = Hambatan Total (kN)
- R_F = *Frictional Resistance* (Hambatan gesek air)
- R_W = *Wave making Resistance* (Hambatan gelombang)
- R_A = *Air Resistance* (Hambatan udara)

Dalam Penelitian ini, nilai tahanan total dari metode *Holtrop* dapat digunakan sebagai pembanding terhadap nilai *Resistance* dari *software Maxsurf* untuk membandingkan dua nilai ini pada hasil analisis *Maxsurf resistance* dengan *software Ansys Aqwa*, sedangkan hasil dari *Maxsurf* menampilkan nilai tahanan dalam kN.

2.3.2 Tahanan Gesek

Tahanan gesek merupakan komponen hambatan yang terjadi akibat gaya gesek antara permukaan lambung kapal dengan air. Tahanan gesek tergantung pada permukaan basah lambung kapal. Untuk kapal yang bergerak lambat seperti tanker, bulker, dan juga tongkang, hambatan gesek sering menjadi pengaruh terbesar (70 – 90%) sedangkan untuk kapal yang melaju cepat, seperti kapal petikemas, hambatan gesek hanya setengah dari hambatan gabungan (Ali et al., 2022). Rumus perhitungan tahanan gesek dari KR Rules dapat dituliskan, sebagai berikut:

$$R_F = 0.000136 \cdot F_1 \cdot A_1 \cdot V^2 \dots\dots\dots(2)$$

Di mana:

- F_1 = Koefisien kondisi permukaan lambung
- A_1 = luas permukaan lambung di bawah garis air / *wetted surface area* (m²)
- V = kecepatan tarik (knots)

2.3.3 Tahanan Gelombang

Hambatan gelombang atau tahanan gesek merupakan salah satu komponen utama dalam perhitungan hambatan. Hambatan gelombang dialami kapal ketika adanya energi yang hilang karena digunakan dalam pembentukan gelombang. Gelombang ini terbentuk akibat interaksi antara lambung kapal yang memindahkan air seiring dengan pergerakan kapal (Rachman et al., 2020). Rumus perhitungan hambatan gelombang dari KR Rules dapat dituliskan, sebagai berikut:

$$R_W = 0,014 \cdot C \cdot F_2 \cdot A_2 V^2 \dots\dots\dots(3)$$

Di mana:

- C = 1.2 (Koefisien kondisi laut)
- F_2 = Koefisien bentuk haluan (bow shape coefficient)
- A_2 = Underwater cross section area (m²)
- V = Kecepatan tarik (knots)

2.3.4 Tahanan Udara

Hambatan udara biasanya mewakili sekitar 2% dari hambatan total, namun dengan peningkatana yang signifikan hingga kira-kira 10% untuk kapal dengan superstruktur besar seperti kapal petikemas yang ditumpuk di geladak (Ali et al., 2022). Rumus perhitungan hambatan udara, sebagai berikut:

$$RA = 0,0000195 \cdot C_w \cdot C_h \cdot A_3 \cdot (V_w + V)^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

Di mana:

C_w = *Shape coefficient* terhadap angin

C_h = *Height coefficient*

A_3 = Area di atas air yang kena angin (m²)

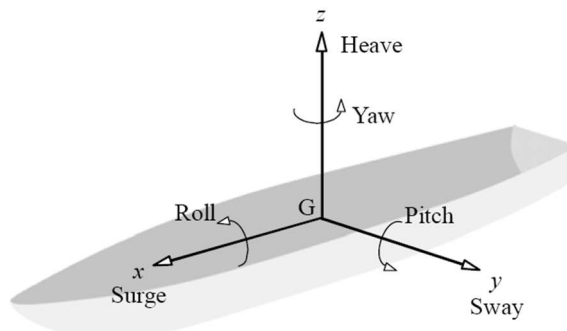
V_w = Kecepatan angin

V = Kecepatan tarik

2.4 Olah Gerak Kapal (*Seakeeping*)

Olah gerak kapal atau *seakeeping* merupakan penguasaan kapal baik dalam keadaan diam atau bergerak untuk mencapai tujuan pelayaran dengan kondisi aman dan efisien dengan menggunakan sarana yang terdapat di kapal seperti mesin, kemudi, dan lain sebagainya (Ricinsi et al., 2020). Secara umum, *seakeeping* menggambarkan kemampuan kapal untuk tetap beroperasi dengan aman dan stabil pada kondisi perairan tertentu. Analisis olah gerak dilakukan untuk mengevaluasi respons dinamis kapal, sehingga dapat diketahui sejauh mana kapal mampu mempertahankan performa operasionalnya saat menerima gaya eksitasi dari gelombang (Pranatal, 2021).

Untuk Tongkang yang ditarik (*towed Barge*), analisis olah gerak menjadi sangat penting karena tidak adanya sistem kontrol aktif seperti rudder yang dapat meredam gerakan kapal. Ada enam macam gerakan kapal di laut (*Degree of Freedom*) yaitu tiga gerakan translasi (*surging, Swaying, heaving*) dan tiga gerakan rotasi (*rolling, pitching, Yawing*) (Nova et al., 2017). Gerakan kapal terjadi karena faktor eksternal, terutama gelombang. Dalam memperoleh perlakuan dari gelombang kapal mengalami dua jenis gerakan atau juga disebut dengan 6 derajat kebebasan yang dapat dilihat dalam gambar dibawah (Romadhoni, 2016), sebagai berikut:



Gambar 2.5 Derajat kebebasan kapal

(Sumber : <https://www.imtra.com/learning-center/fins-vs-gyros-boat-stabilizers>)

1. Gerakan rotasi, gerak ini merupakan gerak putaran meliputi:
 - *Roll*
 - *Pitch*
 - *Yaw*
2. Gerakan translasi, gerak ini merupakan gerak lurus beraturan sesuai dengan sumbu nya meliputi:
 - *Surge*
 - *Sway*
 - *Heave*

2.4.1 Parameter gelombang

Dalam penelitian ini, kondisi perairan yang dianalisis mengacu pada klasifikasi *Sea State Code* yang ditetapkan oleh *World Meteorological Organization* (WMO). Klasifikasi ini digunakan secara luas dalam studi oseanografi dan meteorologi kelautan karena memberikan standar internasional untuk menggambarkan tingkat kekasaran permukaan laut berdasarkan parameter gelombang (Romadhoni, 2016). Peninjauan dilakukan terhadap 1 kondisi laut, dengan merepresentasikan tingkat energi gelombang yang meningkat secara bertahap.

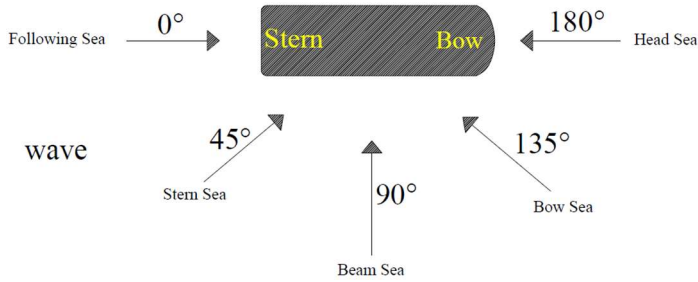
Tabel 2.1 *World Meteorological Organization Sea State Code*
(Sumber : <https://www.researchgate.net/figure/Sea-state-code>)

Sea Code	Wave Height (m)	Wind Speed (knots)	Wave Period (s)	Description of Sea
	Range	Mean		
0	0	0,0	10	Calm (glassy)
1	0,0 – 0,1	0,1	11	Calm (glassy)
2	0,1 – 0,5	0,3	12	Smooth (wavelets)
3	0,5 - 1,25	0,9	13	Slight
4	1,25 - 2,5	1,9	14	Moderate
5	2,5 - 4,0	3,3	5	Rough
6	4,0 - 6,0	5,0	6	Very rough
7	6,0 - 9,0	7,5	7	High
8	9,0 - 14,0	11,5	8	Very high
9	Over 14,0	Over 14,0	9	Phenomenal

Parameter utama yang digunakan dalam penentuan kondisi laut meliputi tinggi signifikan gelombang (1/3 tinggi gelombang tertinggi), periode gelombang dominan, serta kecepatan angin sebagai faktor pembangkit utama gelombang. Ketiga parameter ini saling berkaitan dan menjadi dasar dalam penentuan spektrum gelombang yang digunakan pada analisis selanjutnya (Romadhoni, 2016).

Pemilihan variasi kondisi laut tersebut bertujuan untuk menggambarkan respon sistem kelautan terhadap perubahan tingkat energi gelombang. Dengan pendekatan ini, analisis gelombang yang dilakukan diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perilaku Regular wave pada tingkat sea state, serta relevan untuk diaplikasikan pada perairan kepulauan atau perairan tertutup yang menjadi fokus penelitian.

Sudut datang gelombang (*Wave Heading*), ditunjukkan dalam ilustrasi gambar di bawah ini:



Gambar 2.6 Arah sudut gelombang
(Sumber : Data Pribadi)

Pada penelitian ini, sudut datang gelombang didefinisikan sebagai arah rambat gelombang yang diamati dari berbagai sisi kapal. Sudut masuk gelombang tersebut dikelompokkan menjadi lima arah utama yang mewakili posisi gelombang saat mengenai badan kapal selama beroperasi di laut (Purwoko et al., 2023).

2.5 Response Amplitude Operator (RAO)

RAO adalah rasio amplitudo gerakan kapal baik translasi maupun rotasi terhadap amplitudo gelombang pada frekuensi tertentu. Ini menunjukkan respons gerakan kapal terhadap gelombang reguler. Pada kenyataannya, gelombang di laut adalah gelombang acak sehingga respon kapal terhadap gelombang reguler yang dinyatakan dalam RAO tidak dapat menggambarkan respon kapal pada keadaan sesungguhnya di laut (Yuniati & Firdaus, 2022). *Response Amplitude Operator* (RAO) juga disebut sebagai fungsi transfer, yaitu fungsi respons struktur terhadap beban gelombang yang mengenai struktur lepas pantai pada frekuensi tertentu. RAO disebut sebagai fungsi transfer karena alat ini dapat mentransfer beban luar (gelombang) dalam bentuk respons pada suatu struktur, yaitu amplitudo respons terhadap amplitudo gelombang (Romadhoni, 2016).

RAO secara matematis didefinisikan sebagai perbandingan antara amplitudo respons (ζ_{respon}) dan amplitudo gelombang ($\zeta_{gelombang}$), di mana ζ_{respon} adalah amplitudo output atau respons, sedangkan $\zeta_{gelombang}$ merupakan amplitudo input atau gelombang. Dengan mengetahui nilai RAO, spektrum respons struktur dapat diperkirakan ketika struktur tersebut terpapar gelombang dengan spektrum energi tertentu, asalkan RAO diketahui untuk rentang frekuensi yang sesuai. (Romadhoni et al., 2025). Menurut (Syarifuddin et al., 2020) Respon gerakan RAO terbagi menjadi dua, yaitu:

1. Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi yaitu *surge*, *Sway*, dan *heave*, merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakannya dibanding dengan amplitudo gelombang (dalam satuan panjang). Persamaan (1) digunakan untuk menentukan RAO gerakan translasi.

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} \text{ (m/m)} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

- ζ_{k0} = Amplitudo gerakan kapal
- ζ_0 = Amplitudo gelombang

2. RAO untuk gerakan rotasi yaitu *roll*, *pitch*, dan *Yaw* adalah perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi dengan kemiringan gelombang (hasil kali antara angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden). Persamaan (2) digunakan untuk menentukan RAO gerakan rotasi.

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{k_w \zeta_0} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)\zeta_0} \text{ (rad/rad)} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana:

- ζ_{k0} = Amplitudo rotasi kapal
- ζ_0 = Amplitudo gelombang
- ω = Frekuensi sudut gelombang
- g = Percepatan gravitasi
- k_w = Koefisien terkait dengan gerakan rotasi

2.6 Penelitian Terdahulu

Beberapa peneliti terdahulu telah membahas pengaruh *skeg* terhadap hambatan dan olah gerak kapal, baik pada tongkang maupun kapal tradisional. Wibowo et al. (2025) menganalisis efek variasi sudut side *skeg* pada hambatan dan *seakeeping* tongkang menggunakan simulasi numerik berbasis CFD. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan *skeg* pada buritan kapal secara signifikan mempengaruhi stabilitas dan manuever kapal, walaupun pengaruhnya terhadap hambatan relatif kecil. Penelitian ini menekankan pentingnya konfigurasi sudut side *skeg* terhadap efisiensi penarikan dan kestabilan kapal ketika ditarik atau berlayar di berbagai kondisi gelombang.

Puspita et al. (2023) melakukan penelitian pada kapal ikan tradisional di perairan Puger dengan menambahkan *skeg* pada lambung kapal. Penelitian ini menggunakan model kapal yang dioperasikan nelayan dan dianalisis secara numerik untuk mengevaluasi hambatan dan olah gerak kapal. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan *skeg* mampu meredam gerakan kapal hingga 86-98% dibandingkan kapal tanpa penambahan *skeg*, dan *skeg* juga memberikan pengurangan hambatan. Penelitian ini membuktikan efektivitas *skeg* sebagai komponen tambahan untuk meningkatkan kestabilan dan menurunkan *Resistance* kapal, namun fokusnya terbatas pada kapal ikan tradisional, sehingga belum mencakup kapal tongkang atau variasi sudut *skeg* pada kapal jenis lain.

Prastika et al. (2025) meneliti 12 variasi *skeg* pada tongkang menggunakan simulasi CFD untuk menentukan desain *skeg* yang paling efisien. Analisis dilakukan pada kecepatan rendah dan tinggi, dengan fokus pada gaya hambat dan kecepatan aliran fluida di sekitar lambung. Penelitian menunjukkan bahwa meskipun terdapat variasi sudut dan dimensi *skeg*, perbedaan hasil antara variasi *skeg* relatif kecil, dan variasi optimal cenderung konsisten pada berbagai kondisi operasional. Hal ini menunjukkan bahwa efek penambahan *skeg* lebih dominan dibandingkan perbedaan sudut ukuran minor pada lambung tongkang, sehingga pemilihan sudut side *skeg* harus mempertimbangkan keseimbangan antara penurunan *Resistance* dan peningkatan stabilitas.

Berdasarkan kajian ketiga penelitian di atas, dapat disimpulkan bahwa meskipun *skeg* terbukti efektif dalam menurunkan gerakan lateral dan meningkatkan stabilitas arah, studi yang mengkaji secara spesifik penambahan tiga *skeg* dengan sudut side *skeg* pada tongkang tipe oil *Barge* masih terbatas. Penelitian sebelumnya cenderung memfokuskan pada tongkang umum dan kapal ikan tanpa fokus komparatif antara variasi sudut *skeg*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi research gap tersebut dengan menganalisis efek variasi sudut side *skeg* terhadap hambatan total dan olah gerak tongkang, sehingga dapat diperoleh rekomendasi sudut side *skeg* yang seimbang secara hambatan dan respons olah gerak.