

Analisis Empiris Penurunan Kecepatan Kapal Penyebrangan Akibat Gelombang Laut Menggunakan Integrasi Data AIS dan ERA5 di Indonesia

¹Meriah Kita Deliani,² Suratni Ginting, ³Restu Mujiono,⁴Raplansyah

^{1,3,4} TEKNIKA, ² NAUTIKA, Politeknik Adiguna Maritim Indonesia Medan

Email: meriahkitadeliana@gmail.com

Abstrak. Kapal penyebrangan merupakan elemen penting dalam konektivitas antarpulau di Indonesia, namun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh kondisi oseanografi, khususnya gelombang laut. Penelitian ini menganalisis pengaruh gelombang terhadap kecepatan kapal penyebrangan menggunakan data *Automatic Identification System* (AIS) publik yang terintegrasi dengan data oseanografi pada tiga wilayah perairan Indonesia. Hasil menunjukkan hubungan yang kuat antara peningkatan tinggi gelombang dan penurunan kecepatan kapal, dengan penurunan 8–15% pada kondisi moderat dan lebih dari 25% pada kondisi gelombang kasar, terutama di perairan terbuka dan saat gelombang datang dari depan. Musim barat memberikan dampak penurunan kinerja paling signifikan. Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi data AIS dan oseanografi untuk mendukung keselamatan, efisiensi, dan perencanaan transportasi laut nasional.

Kata Kunci: *Automatic Identification System* (AIS); kapal penyebrangan; gelombang laut; transportasi laut; perairan Indonesia

Abstract. Indonesia's ferry system is vital for inter-island connectivity but is highly affected by complex oceanographic conditions, particularly sea waves. This study examines the impact of wave conditions on ferry vessel speed using publicly available *Automatic Identification System* (AIS) data integrated with oceanographic information from three representative Indonesian waters. The analysis reveals a strong and statistically significant relationship between increasing wave height and vessel speed reduction, with losses of 8–15% under moderate conditions and exceeding 25% during rough seas, especially in open waters and head-sea conditions. Seasonal effects indicate the western monsoon as the period of greatest performance degradation. These findings demonstrate the value of AIS–oceanographic data integration for improving operational efficiency, safety, and maritime transport planning in Indonesia.

Keywords: *Automatic Identification System* (AIS); ferry vessels; vessel speed reduction; sea waves; maritime transportation; Indonesian waters

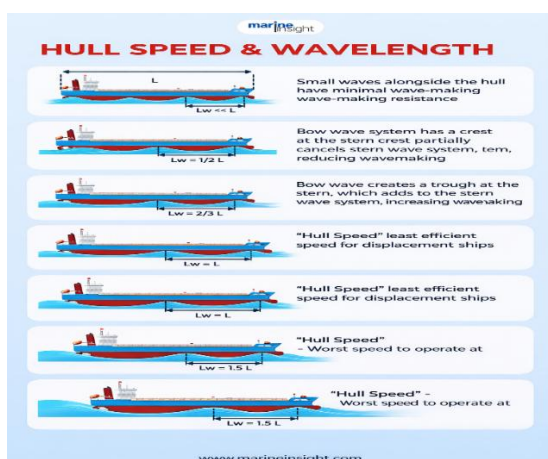
PENDAHULUAN

Indonesia, kepulauan luas yang diakui sebagai negara kepulauan, dibedakan oleh keberadaan luar biasa lebih dari 17.000 pulau yang berbeda, dan kerangka konektivitas antar-regional yang kompleks yang berlaku dalam konteks geografis yang luas ini sangat bergantung pada implementasi transportasi maritim, dengan fokus khusus pada peran penting yang diasumsikan oleh kapal feri. Kapal-kapal feri ini bukan semata-mata sarana transportasi; sebaliknya, mereka memenuhi fungsi penting secara strategis dalam meningkatkan

mobilitas penumpang, memastikan distribusi logistik yang efektif, dan mendorong pembangunan yang adil di berbagai pulau yang membentuk kepulauan ini[1][2].

Namun demikian, penting untuk mengakui bahwa fitur oseanografi yang rumit dan beragam yang melekat di wilayah maritim di sekitar Indonesia — dipengaruhi oleh efek dinamis dari sistem monsun, arus yang melintasi Indonesia, dan variasi musiman dalam fenomena gelombang membuat operasi kapal feri ini sangat rentan terhadap banyak kondisi lingkungan laut yang menantang[3][4].

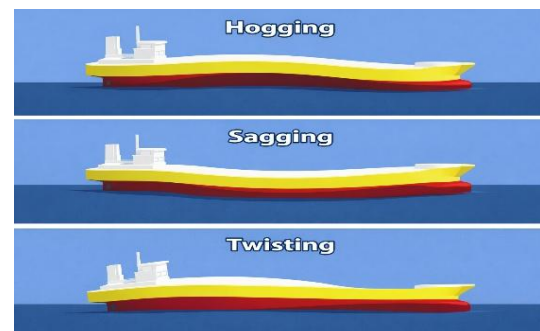
Peta Jaringan Trayek Nusantara yang dipublikasikan pada tahun 2006, "Jaringan Trayek Nusantara" menunjukkan jaringan kapal penumpang yang menghubungkan pulau-pulau di Indonesia ke dalam sistem transportasi laut nasional. Di Indonesia bagian timur, garis merah lebih jarang namun masih penting, dan di bagian barat dan tengah, garis merah menunjukkan banyak trayek pelayaran rutin dan musiman. Peta ini menunjukkan peran strategis transportasi laut sebagai tulang punggung konektivitas, mobilitas penduduk, distribusi logistik, dan pemerataan pembangunan. Ini juga menunjukkan bahwa transportasi laut dapat digunakan sebagai dasar untuk menganalisis perencanaan dan operasional pelayaran nasional[5][6]. Kondisi gelombang maritim mengurangi kecepatan kapal, yang merupakan salah satu dampak paling signifikan. Pengurangan kecepatan ini tidak hanya menyebabkan masalah dengan jadwal dan kualitas layanan yang buruk, tetapi juga meningkatkan pengeluaran bahan bakar, risiko keselamatan, dan kemanjuran operasional secara keseluruhan. Praktiknya, penilaian dampak aksi gelombang pada kecepatan kapal seringkali bersifat kualitatif atau didasarkan pada dokumentasi operasional internal. Akibatnya, ini menghasilkan pemahaman empiris yang kurang komprehensif tentang faktor-faktor yang berpengaruh dalam industri maritim nasional[7][8]. Dengan perkembangan sistem pengenalan otomatis (AIS), ada peluang baru dalam penelitian transportasi laut. Data AIS publik memberikan informasi tentang posisi, kecepatan, waktu, dan karakteristik kapal secara kontinu dan historis; pemanfaatan data ini memungkinkan analisis perilaku pelayaran kapal secara objektif dan berbasis data aktual di lapangan. Misalnya, analisis penurunan kecepatan kapal penyeberangan dapat dilakukan dengan menggabungkan data AIS dan informasi kondisi gelombang[9][10].



Gambar 1. Korelasi antara *Hull Speed & Wavelength*

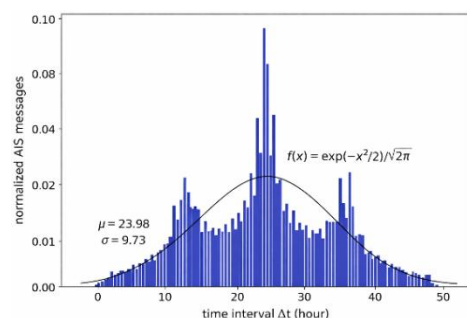
Gambar tersebut menunjukkan bahwa kapal *displacement* meningkatkan kecepatan seiring dengan panjang gelombang air yang dibentuknya. Kapal bergerak dengan cepat karena gelombang yang muncul

masih kecil dan hambatan gelombang rendah. Gelombang haluan dan buritan mulai berinteraksi dengan kecepatan. Interaksi ini masih menguntungkan pada titik tertentu, tetapi dengan kecepatan yang lebih tinggi, hal itu justru meningkatkan hambatan. Ketika panjang gelombang hampir sama dengan panjang kapal (kondisi kecepatan hull), kapal berada di antara puncak gelombang depan dan belakang, menciptakan hambatan yang sangat besar dan mengurangi efisiensi. Penambahan tenaga di atas kecepatan ini hampir tidak menghasilkan peningkatan kecepatan, yang membuat operasi kapal *displacement* tidak efisien dan boros[11][12].



Gambar 3. Tiga Jenis Deformasi (Perubahan Bentuk) Struktur Kapal

Tiga jenis deformasi struktur kapal yang disebabkan oleh gelombang dan pembebanan dapat dilihat pada gambar. Mereka adalah hogging, sagging, dan twisting. Hogging terjadi ketika bagian tengah kapal lebih tinggi daripada haluan dan buritan, sehingga lambung melentur ke atas. Sebaliknya, sagging terjadi ketika bagian tengah kapal turun lebih rendah, sehingga lambung melentur ke bawah. Puntiran pada badan kapal adalah hasil dari gaya yang tidak seimbang di sisi kiri dan kanan. Gambar ini menunjukkan bahwa lambung kapal harus dirancang dengan cara yang dapat menahan gaya lentur dan puntir agar tetap aman dan stabil saat beroperasi di laut[13][14].

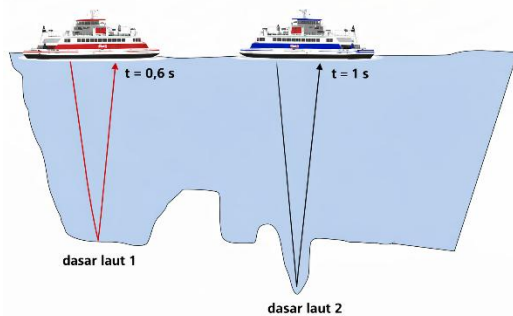


Gambar 4. Histogram Distribusi Selang Waktu (Δt) Pesan AIS

Gambar tersebut menyajikan histogram distribusi selang waktu (Δt) pengiriman pesan AIS yang telah dinormalisasi, dengan sumbu horizontal menunjukkan interval waktu dan sumbu vertikal menunjukkan proporsi frekuensi pesan. Batang-batang biru menunjukkan sebaran data aktual, yang didekati secara teoretis menggunakan kurva distribusi normal (Gaussian)

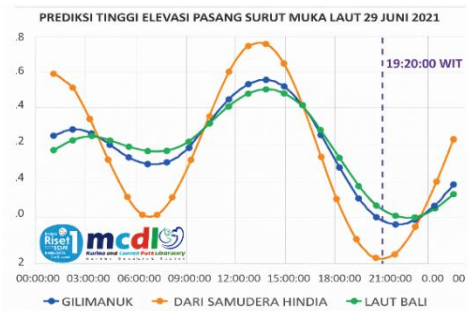
berwarna hitam. Pola distribusi ini memvalidasi konsistensi data AIS yang digunakan, di mana mayoritas data terkumpul pada interval waktu yang rapat sesuai dengan parameter ekstraksi 1 hingga 5 menit yang ditetapkan dalam metode penelitian. Nilai rata-rata (μ), dan simpangan baku (σ) yang dihasilkan menunjukkan bahwa meskipun terdapat puncak-puncak lokal akibat variasi cakupan sinyal, data secara keseluruhan mengikuti pola distribusi yang stabil untuk digunakan dalam pemodelan regresi multivariat [15][16].

Penelitian ini memanfaatkan data AIS publik untuk melakukan pemeriksaan komprehensif terhadap pengaruh dinamika gelombang laut pada kecepatan navigasi kapal penyeberangan di wilayah maritim Indonesia. Analisis difokuskan pada pola kecepatan kapal yang terekam dalam data AIS di bawah pengaruh berbagai variasi kondisi gelombang, guna mengidentifikasi hubungan antara peningkatan tinggi gelombang dengan tingkat pengurangan kecepatan (*speed loss*). [17][18].



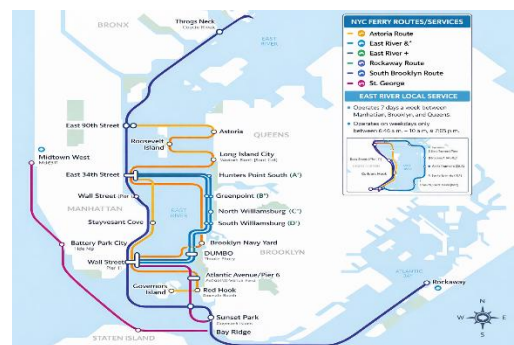
Gambar 5. Peran Batimetri dalam Analisis Karakteristik Lingkungan Maritim

Selain faktor gelombang di permukaan, karakteristik dasar laut atau batimetri dipertimbangkan sebagai parameter lingkungan pendukung yang memengaruhi transformasi gelombang. Prinsip pengukuran kedalaman menggunakan gelombang bunyi (sonar/echo sounder) digambarkan dalam Gambar 5 untuk memberikan gambaran profil kedalaman di zona penelitian. Proses ini bekerja dengan memancarkan gelombang bunyi; pada dasar laut yang dangkal (dasar laut 1), pantulan diterima lebih cepat dengan waktu tempuh $t=0,6$ detik. Sebaliknya, pada area yang lebih dalam (dasar laut 2), waktu tempuh meningkat menjadi $t=1$ detik. Pemahaman mengenai profil kedalaman ini menjadi krusial karena kedalaman laut memengaruhi geometri gelombang melalui fenomena refraksi dan pendangkalan (*shoaling*), yang secara tidak langsung berkontribusi pada besaran hambatan tambahan yang dialami lambung kapal saat melintasi wilayah dengan batimetri yang bervariasi. [19][20].



Gambar 6. Prediksi Tinggi Elevasi Pasang Surut Muka Laut pada Tanggal 29 Juni 2021

Penelitian ini berfokus pada kapal penyeberangan yang beroperasi di wilayah perairan strategis Indonesia dan terekam dalam sistem AIS publik. Subjek utama yang dianalisis adalah lintasan penyeberangan antarpulau dengan intensitas operasional tinggi yang memiliki karakteristik gelombang beragam. Parameter yang dicatat melalui data AIS meliputi posisi geografis, kecepatan pelayaran (*speed over ground*), dan waktu operasional, yang kemudian disinkronkan dengan kondisi gelombang laut pada waktu dan koordinat yang sama [21][22].

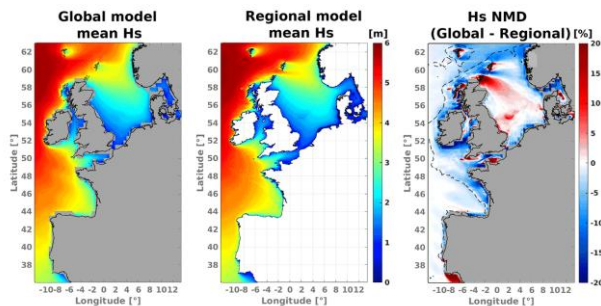


Gambar 7. Model Komparatif Rute Navigasi NYC Ferry

Sebagai kerangka acuan dalam memahami kompleksitas rute transportasi air, Gambar 7 menyajikan skema navigasi rute NYC Ferry di New York City sebagai model perbandingan sistem yang terintegrasi. Ilustrasi tersebut menggambarkan rute-rute yang menghubungkan wilayah pesisir strategis melalui sistem kode warna, yang mencakup layanan di Sungai Timur hingga wilayah selatan Brooklyn. Penggunaan model visual feri perkotaan yang mapan ini berfungsi sebagai repositori untuk memahami keterkaitan layanan feri sebagai alternatif transportasi darat yang efisien.

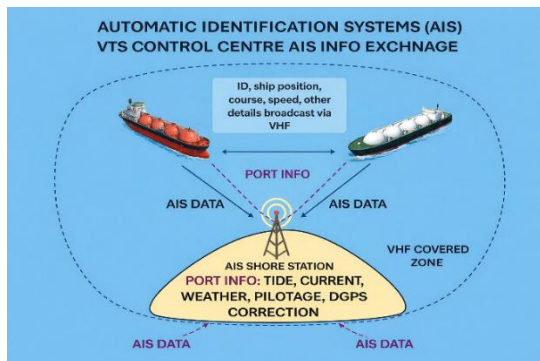
Dalam konteks penelitian ini, prinsip-prinsip navigasi tersebut kemudian diadaptasi untuk menginvestigasi konsekuensi dinamika gelombang terhadap kinerja kapal di perairan Indonesia, dengan menekankan pada prinsip hidrodinamika dan pemodelan komputasi untuk menilai peningkatan resistensi akibat aksi gelombang. Pendekatan ini juga mempertimbangkan data meteorologi laut untuk mengevaluasi potensi keterlambatan atau gangguan operasional pada kegiatan pengiriman nasional.

Kajian keselamatan pelayaran, kepadatan lalu lintas laut, dan analisis rute optimal telah menggunakan data AIS dalam beberapa tahun terakhir. Namun, penelitian yang secara khusus mengaitkan data AIS publik dengan kondisi gelombang untuk menganalisis penurunan kecepatan kapal penyeberangan masih relatif terbatas, terutama dalam konteks perairan Indonesia yang luas dan beragam. Sebagian besar penelitian masih berkonsentrasi pada kapal internasional atau area perairan tertentu di luar wilayah tropis.



Gambar 8. Perbandingan Rata-Rata Tinggi Gelombang Signifikan (H_s) Model Global dan Regional

Keterbaruan (novelty) penelitian ini terletak pada fakta bahwa sumber data utama dari penelitian ini adalah data AIS publik. Dengan menggunakan data ini, kami dapat menganalisis penurunan kecepatan kapal penyeberangan yang disebabkan oleh kondisi gelombang di perairan Indonesia secara empiris dan berbasis data aktual. Studi ini melihat fenomena penurunan kecepatan dari perspektif teoritis dan mengaitkannya dengan lintasan kapal penyeberangan nyata. Penelitian ini juga menemukan cara untuk mengintegrasikan data pelayaran dan parameter oseanografi, yang memberikan gambaran yang lebih realistis tentang kondisi operasional kapal. Hasil penelitian diharapkan dapat berfungsi sebagai referensi ilmiah bagi pengambil kebijakan, operator kapal, dan peneliti lain dalam upaya meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan kecepatan transportasi laut nasional.



Gambar 9. Mekanisme Pertukaran Informasi Sistem AIS melalui Radio VHF

Gambar tersebut menunjukkan bagaimana AIS berkomunikasi dengan kapal, stasiun pantai, dan VTS melalui radio VHF. Kapal dan stasiun darat secara otomatis mengirimkan data navigasi kepada kapal lain dan stasiun darat, dan stasiun pantai mengirimkan kembali informasi pelabuhan yang diperlukan. Dengan komunikasi dua arah secara real-time, sistem ini meningkatkan keselamatan navigasi, kesadaran situasional, dan pengelolaan lalu lintas kapal, khususnya di perairan sibuk dan wilayah pelabuhan. Pendahuluan ini menempatkan penelitian pada konteks empiris yang kuat sekaligus menegaskan relevansi praktis dan kontribusi ilmiahnya untuk pengembangan kajian transportasi laut berbasis data di Indonesia.

Metode Penelitian

Penelitian ini mengeksplorasi penurunan kecepatan kapal penyeberangan yang disebabkan oleh kondisi gelombang di perairan Indonesia. Metode kuantitatif digunakan, termasuk analisis deskriptif dan inferensial. Dengan menggunakan data sekunder dari Sistem Pengenalan Otomatis (AIS) publik dan data oseanografi, desain penelitian bersifat observasional. Studi ini dilakukan di tiga wilayah perairan berbeda di Indonesia yang masing-masing memiliki karakteristik gelombang yang berbeda:

1. Zona 1 (Selat Sunda) terletak pada koordinat 5°50'–6°10' LS dan 105°30'–106°00' BT.
2. Zona 2 (Selat Bali) terletak pada koordinat 8°10'–8°50' LS dan 114°20'–114°50' BT.
3. Zona 3 (Perairan Sumatera Barat) terletak pada koordinat 0°30'–1°30' LS dan 98°00'–99°30' BT. Zona ini memiliki perairan terbuka dengan gelombang tinggi.



Gambar 10. Siklus Dampak Gelombang pada Kecepatan Kapal

Siklus Dampak Gelombang pada Kecepatan Kapal digambarkan dalam lima langkah, seperti yang digambarkan di bawah ini: pertama, data AIS dan oseanografi dikumpulkan untuk melacak kapal dan kondisi laut; kedua, menganalisis data untuk memahami dampak gelombang terhadap kecepatan kapal; ketiga, menemukan pola-pola dampak gelombang terhadap kecepatan kapal; dan keempat, mengevaluasi dampak gelombang terhadap kecepatan kapal dan keselamatan pelayaran. Pengumpulan data baru dilakukan selama siklus ini untuk melacak keberhasilan solusi dan meningkatkan efisiensi dan keselamatan kapal.

Untuk mengidentifikasi variasi musiman gelombang, pengambilan data dilakukan selama dua belas bulan (Januari hingga Desember 2024). Dengan parameter berikut, data AIS dapat diperoleh dari Marine Traffic, Vessel Finder, dan Global Fishing Watch, yang merupakan platform publik:

- Resolusi waktu antara 1 dan 5 menit
- Parameter yang direkam: Identitas Maritime Mobile Service (MMSI), tanggal (UTC), latitude, longitude, Speed Over Ground (SOG), Course Over Ground (COG), arah, jenis kapal, dan dimensi kapal
- Jumlah kapal: Tidak lebih dari 15 kapal penyeberangan per zona yang memenuhi kriteria berikut:
 1. Panjang kapal (LOA): 50–150 meter
 2. GT (Gross Tonnage): 500–5000 GT
 3. Beroperasi reguler pada rute tetap

Data gelombang diperoleh dari:

A. ERA5 Reanalysis Dataset (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts):

1. Significant wave height (H_s)
2. Wave period (T_p)
3. Wave direction (ϑ_w)
4. Resolusi spasial: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$
5. Resolusi temporal: 1 jam

B. Buoy BMKG (validasi):

1. Data in-situ dari stasiun pengamatan gelombang
2. Parameter: H_s , T_p , T_z (zero-crossing period)

Data Tambahan :

- Batimetri dari GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)
- Data angin dari ERA5 (kecepatan dan arah angin)
- Spesifikasi teknis kapal dari database IHS Markit

Akuisisi Data AIS: Dengan menggunakan API penyedia layanan, data AIS dapat dikumpulkan dalam dua langkah:

1. Identifikasi kapal target menggunakan MMSI dan rute operasionalnya;
2. Ekstraksi rangkaian data dengan interval 5 menit
3. Menyimpan data dalam format CSV yang memiliki struktur seperti MMSI, Timestamp, Lat, Lon, SOG, COG, Heading, Status, dan heading.

Tabel 1. Klasifikasi Variabel Utama Penelitian

Kelompok Variabel	Parameter
Operasional Kapal	SOG, COG, Heading

Gelombang	H_s , T_p , Arah Gelombang
Dinamika Kapal	Froude Number
Geometri Kapal	Cb, L/B, Dlr
Output Utama	Speed Loss (%)

Aspek operasional kapal, kondisi gelombang, dinamika, dan geometri kapal adalah variabel utama yang digunakan untuk menganalisis pengaruh kondisi gelombang terhadap penurunan kecepatan kapal. Variabel operasional diperoleh dari data AIS untuk menggambarkan respons kapal saat berlayar, variabel gelombang mewakili kondisi oseanografi yang memengaruhi pergerakan kapal, dan variabel dinamika diwakili oleh angka Froude sebagai indikator karakterisasi kapal. Untuk menghasilkan output utama, metode multivariat digunakan untuk menggabungkan semua variabel tersebut. Output utama adalah persentase penurunan kecepatan kapal, atau penurunan kecepatan, yang menunjukkan kinerja operasional kapal yang dipengaruhi oleh gelombang.

Metode interpolasi spatiotemporal digunakan untuk menyinkronkan data AIS dengan data gelombang: Interpolasi Spasial menggunakan Inverse Distance Weighting (IDW):

$$H_{s(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot H_{s_i}}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

di mana:

- $w_i = \frac{1}{d_i^p}$ (bobot invers jarak)
- d_i = jarak Euclidean dari titik observasi ke grid data gelombang
- p = parameter power (umumnya $p = 2$)
- n = jumlah titik grid terdekat ($n = 4$)

Interpolasi Temporal menggunakan linear interpolation:

$$H_s(t) = H_{s_1} + \frac{(H_{s_2} - H_{s_1})}{(t_2 - t_1)} \cdot (t - t_1)$$

Data AIS difilter menggunakan kriteria berikut:

1. Penghapusan outlier menggunakan Interquartile Range (IQR): Outlier jika: $SOG < Q_1 - 1.5 \text{ IQR}$ atau $SOG > Q_3 + 1.5 \text{ IQR}$
2. Validasi data:
 - SOG lebih dari 0 dan SOG kurang dari 25 knot (batas maksimum kapal penyeberangan)
 - Koordinat berada dalam zona bounding box penelitian
 - Heading dan COG konsisten (deviasi $< 30^\circ$)
3. Data dikeluarkan saat manuver pelabuhan (jarak < 2 nm dari pelabuhan).

Kecepatan dihitung dengan metode Haversine untuk validasi SOG:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$$

$$c = 2 \cdot \arctan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})$$

$$d = R \cdot c$$

$$V_{calc} = \frac{d}{\Delta t}$$

di mana:

- ϕ = latitude (radian)
- λ = longitude (radian)
- R = 6371 km (radius bumi)
- Δt = interval waktu (jam)

Perhitungan Speed Loss :

Speed loss absolut:

$$\Delta V = V_{calm} - V_{wave}$$

Speed loss relatif (persentase):

$$\Delta V_{\%} = \frac{V_{calm} - V_{wave}}{V_{calm}} \times 100\%$$

di mana:

- V_{calm} = kecepatan rata-rata pada kondisi tenang ($H_s < 0.5$ m)
- V_{wave} = kecepatan aktual pada kondisi gelombang tertentu

Kondisi gelombang dikategorikan berdasarkan WMO Sea State Code:

Tabel 2. Klasifikasi Kondisi Laut Berdasarkan Tinggi Gelombang Signifikan (H_s)

Kategori	H_s (meter)	Deskripsi
1	0 - 0.5	Calm to smooth
2	0.5 - 1.25	Slight
3	1.25 - 2.5	Moderate
4	2.5 - 4.0	Rough
5	4.0 - 6.0	Very rough
6	> 6.0	High to very high

Nilai H_s , atau tinggi gelombang signifikan dalam meter, yang menunjukkan rata-rata sepertiga gelombang tertinggi, digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi gelombang laut. Nilai yang lebih rendah menunjukkan

bahwa laut lebih tenang dan aman untuk pelayaran, sedangkan nilai yang lebih tinggi menunjukkan bahwa kondisi laut lebih kasar, bahkan sangat berbah. Untuk keselamatan, peringatan dini, dan perencanaan pelayaran, klasifikasi ini sangat penting.

Model Prediksi *Speed Loss* Untuk memperkirakan penurunan kecepatan kapal (*speed loss*, $\Delta V\%$) akibat pengaruh gelombang, digunakan beberapa model statistik dengan tingkat kompleksitas yang berbeda. Pendekatan ini bertujuan untuk memahami pengaruh tinggi gelombang secara bertahap, baik secara langsung maupun melalui interaksi dengan parameter pelayaran lainnya. **Model regresi linear sederhana** digunakan sebagai langkah awal untuk menggambarkan hubungan dasar antara penurunan kecepatan kapal dan tinggi gelombang signifikan (H_s), yang diasumsikan bersifat linier.

Model regresi polinomial dikembangkan untuk mengakomodasi kemungkinan hubungan nonlinier antara H_s dan penurunan kecepatan kapal, terutama pada kondisi gelombang yang semakin tinggi. Selanjutnya, **model regresi multivariat** diterapkan dengan memasukkan beberapa variabel tambahan, seperti periode puncak gelombang (T_p), sudut datang gelombang relatif terhadap arah kapal, serta bilangan Froude (F_n). Model ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai pengaruh kombinasi kondisi gelombang dan karakteristik hidrodinamika kapal terhadap *speed loss*. Sudut relatif gelombang (θ_{rel}) dihitung berdasarkan selisih antara arah gerak kapal (*Course Over Ground*) dan arah datang gelombang. Sementara itu, bilangan Froude digunakan untuk merepresentasikan kondisi dinamis kapal, yang ditentukan oleh kecepatan kapal, percepatan gravitasi, dan panjang garis air kapal.

Tabel 3. Model Analisis Speed Loss

Model	Tujuan
Regresi Linear	Hubungan Dasar H_s -Speed Loss
Regresi Polinomial	Hubungan Nonlinier
Regresi Multivariat	Kombinasi H_s , T_p , Arah, F_n
Model Kwon (2008)	Added Resistance Empiris
Model Pemandang	Townsin-Kwon, Fmls, Iso 15016

Untuk menyelidiki pengaruh gelombang laut terhadap penurunan kecepatan kapal, penelitian ini menerapkan metodologi pemodelan yang disusun secara hierarkis, mulai dari pendekatan statistik sederhana hingga model empiris berbasis hidrodinamika. Tahapan ini dimulai dengan penggunaan regresi linear sebagai model dasar untuk menguji korelasi langsung antara tinggi gelombang signifikan (H_s) dan penurunan kecepatan kapal. Namun, mengingat adanya keterbatasan model linear dalam menangkap respons non-linear pada kondisi laut kasar sehingga regresi polinomial diterapkan untuk

mengidentifikasi perilaku kapal pada spektrum gelombang yang lebih tinggi.

Guna meningkatkan akurasi prediksi dan menciptakan kondisi simulasi yang lebih realistis, dikembangkan regresi multivariat dengan mengintegrasikan parameter tambahan seperti periode puncak gelombang (T_p), sudut datang gelombang relatif (θ_{rel}), dan bilangan Froude (F_n). Sebagai tahap validasi akhir, hasil statistik dikaitkan dengan mekanisme hidrodinamika menggunakan model empiris Kwon (2008) yang berfokus pada konsep resistensi tambahan (*added resistance*). Model ini, bersama dengan standar ISO 15016, digunakan sebagai pembandingan untuk memastikan konsistensi temuan dengan standar industri maritim global.

Model Empiris berdasarkan *Added Resistance* menggunakan pendekatan Kwon (2008): Dalam model ini, peningkatan hambatan kapal dihitung berdasarkan karakteristik geometrik dan kondisi lingkungan. Rasio hambatan tambahan (R_{AW}) terhadap hambatan kapal pada kondisi laut tenang (R_{calm}) dihitung melalui persamaan berikut:

$$\frac{R_{AW}}{R_{calm}} = a_1 \cdot \left(\frac{H_s}{L_{WL}}\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{L_{WL}}{\lambda}\right)^{a_3}$$

Di mana L_{WL} adalah panjang garis air kapal, dan panjang gelombang (λ) ditentukan oleh percepatan gravitasi (g) serta periode gelombang (T_p):

$$\lambda = \frac{gT_p^2}{2\pi}$$

Persentase penurunan kecepatan ($\Delta V\%$) diestimasi berdasarkan peningkatan total resistensi tersebut menggunakan formula:

$$\Delta V\% = \left(1 - \sqrt[3]{\frac{1}{1 + R_{AW}/R_{calm}}}\right) \times 100\%$$

Pengaruh arah gelombang dianalisis dengan membagi menjadi 5 sektor:

- Head seas: $0^\circ - 30^\circ$ (gelombang datang dari depan)
- Bow quartering: $30^\circ - 60^\circ$
- Beam seas: $60^\circ - 120^\circ$ (gelombang dari samping)
- Stern quartering: $120^\circ - 150^\circ$
- Following seas: $150^\circ - 180^\circ$ (gelombang dari belakang)

Tabel 4. Parameter Penurunan Kecepatan Berdasarkan Sektor Arah Gelombang

SEKTOR ARAH GELOMBANG	RENTANG ARAH ($^\circ$)	PENGARUH (%)
--------------------------	------------------------------	-----------------

Head Seas	$0^\circ - 30^\circ$	30
Bow Quartering	$30^\circ - 60^\circ$	25
Beam Seas	$60^\circ - 120^\circ$	15
Stern Quartering	$120^\circ - 150^\circ$	10
Following Seas	$150^\circ - 180^\circ$	5

Orientasi gelombang relatif terhadap arah gerak kapal memengaruhi penurunan kecepatan secara signifikan. Penurunan kecepatan mencapai titik tertinggi pada kondisi **Head Seas** karena peningkatan hambatan tambahan akibat interaksi langsung lambung kapal dengan puncak gelombang dari arah depan. Sebaliknya, pada kondisi **Following Seas**, kapal mendapatkan dorongan energi dari gelombang yang bergerak searah, sehingga penurunan kecepatan berada pada tingkat paling minimal. Hasilnya menunjukkan bahwa arah datang gelombang adalah komponen penting yang harus dipertimbangkan saat merencanakan rute dan pengoperasian kapal untuk menjaga efisiensi dan keselamatan pelayaran.

Uji Korelasi Pearson:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Uji Signifikansi ($p\text{-value} < 0.05$) Coefficient of Determination (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

Root Mean Square Error (RMSE) untuk evaluasi model:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Mean Absolute Percentage Error (MAPE):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

Pengaruh Karakteristik Geometrik Kapal

Pengaruh karakteristik kapal terhadap perilaku operasionalnya dievaluasi dengan mengelompokkan kapal berdasarkan sejumlah parameter geometrik dan hidrodinamika yang merepresentasikan bentuk lambung serta distribusi berat kapal. Parameter-parameter ini

dipilih karena perannya yang signifikan dalam menentukan interaksi antara kapal dan gelombang.

Parameter pertama adalah **block coefficient (Cb)**, yang digunakan untuk mengukur tingkat kepadatan atau kepenuhan bentuk lambung kapal. Koefisien ini didefinisikan sebagai perbandingan antara volume perpindahan kapal dan hasil kali dimensi utama kapal pada garis air. Nilai Cb yang lebih tinggi menunjukkan bentuk lambung yang lebih penuh, yang umumnya berkaitan dengan peningkatan tahanan gelombang dan respons dinamika kapal yang lebih besar. yang didefinisikan sebagai:

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{WL} \cdot B \cdot T}$$

di mana ∇ merupakan volume perpindahan kapal, L_{WL} adalah panjang garis air, B adalah lebar kapal, dan T adalah sarat kapal. Nilai Cb yang lebih besar menunjukkan bentuk lambung yang lebih penuh, yang umumnya berkorelasi dengan peningkatan tahanan gelombang dan respons gerak kapal.

Selanjutnya, **rasio panjang terhadap lebar (L/B)** digunakan untuk menggambarkan kelangsingan kapal. Rasio ini berpengaruh terhadap karakteristik hidrodinamika dan stabilitas arah kapal. Kapal dengan nilai L/B yang besar cenderung memiliki efisiensi hidrodinamika yang lebih baik, namun dapat menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap gangguan gelombang, terutama dari arah menyamping.

Selain itu, **displacement-length ratio (DLR)** digunakan untuk mengklasifikasikan kapal berdasarkan berat relatifnya terhadap panjang kapal. Parameter ini merefleksikan tingkat pembebanan kapal dan sering dimanfaatkan untuk membedakan antara kapal ringan dan kapal berat. Nilai DLR yang tinggi mengindikasikan kapal dengan massa relatif besar, yang umumnya memiliki respons gerak yang lebih lambat, tetapi berpotensi mengalami peningkatan tahanan tambahan (*added resistance*) pada kondisi gelombang yang lebih berat.

$$DLR = \frac{\Delta}{(0,01 \times L_{WL})^3}$$

di mana Δ adalah *displacement* kapal. Parameter ini mencerminkan beban kapal terhadap ukuran geometrikanya dan sering digunakan untuk membedakan karakteristik kapal ringan dan berat. Nilai DLR yang lebih tinggi menunjukkan kapal dengan massa relatif besar, yang umumnya memiliki respons gerak yang lebih lambat namun mengalami peningkatan *added resistance* pada kondisi gelombang tinggi.

Dengan demikian, pengelompokan kapal berdasarkan parameter Cb, L/B, dan DLR memberikan kerangka analisis yang komprehensif untuk mengevaluasi

pengaruh bentuk dan proporsi kapal terhadap kinerja operasionalnya dalam berbagai kondisi gelombang.

Data dikelompokkan berdasarkan musim:

- Musim Barat (Desember - Februari): Monsun barat laut
- Musim Peralihan 1 (Maret - Mei)
- Musim Timur (Juni - Agustus): Monsun tenggara
- Musim Peralihan 2 (September - November)

Tabel 5. Pengaruh Musim

Musim	Kondisi Gelombang	Speed Loss
Musim Barat	Tinggi	Paling Besar
Peralihan I	Rendah–Sedang	Paling Stabil
Musim Timur	Sedang	Menengah
Peralihan II	Sedang–Tinggi	Meningkat

Tabel pengaruh musim menunjukkan bahwa penurunan kecepatan kapal bervariasi secara musiman seiring perubahan pola monsun di perairan Indonesia. Speed loss terbesar terjadi pada musim barat akibat dominasi gelombang tinggi, sedangkan musim peralihan pertama memberikan kondisi pelayaran paling stabil dengan penurunan kecepatan yang minimal. Pada musim timur, penurunan kecepatan berada pada tingkat menengah, dan kembali meningkat pada musim peralihan kedua seiring memburuknya kondisi gelombang. Temuan ini menegaskan bahwa faktor musiman berperan penting dalam menentukan kinerja operasional kapal penyeberangan.

Analisis varians (ANOVA) digunakan untuk menguji perbedaan signifikan antar musim:

$$F = \frac{MS_{between}}{MS_{within}} = \frac{\sum_j n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2 / (k - 1)}{\sum_j \sum_i (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 / (N - k)}$$

Data dibagi dengan rasio 70:30 untuk training dan testing menggunakan k-fold cross-validation (k=5).

Model divalidasi menggunakan:

- Data AIS dari periode berbeda (Januari 2025)

- Data dari zona perairan tambahan sebagai external validation

Hasil dibandingkan dengan model empiris existing:

- Model Townsin-Kwon
- Model Faltinsen-Minsaas-Liapis-Skjørdal (FMLS)
- Model ISO 15016:2015

Perhitungan Peningkatan Konsumsi Bahan Bakar
Estimasi peningkatan konsumsi menggunakan Admiralty Formula:

$$P = \Delta \cdot V^3 \cdot C$$

Peningkatan konsumsi BBM:

$$\Delta FC = \frac{P_{wave} - P_{calm}}{SFOC} \cdot t_{voyage}$$

di mana:

- P = daya yang dibutuhkan (kW)
- C = konstanta Admiralty
- $SFOC$ = Specific Fuel Oil Consumption (g/kWh)
- t_{voyage} = waktu perjalanan (jam)

Perhitungan Delay Time :

$$t_{delay} = \frac{d}{V_{wave}} - \frac{d}{V_{calm}}$$

di mana d = jarak tempuh perjalanan (nm)

Analisis Biaya Operasional Total tambahan biaya operasional per voyage:

$$\Delta C_{total} = (FC_{added} \times P_{fuel}) + (t_{delay} \times C_{delay})$$

di mana:

- P_{fuel} = harga bahan bakar (USD/ton)
- C_{delay} = biaya keterlambatan per jam (USD/jam)

Visualisasi dilakukan menggunakan:

1. Heat map: Distribusi spasial speed loss

2. Scatter plot: Hubungan H_s vs speed loss dengan trendline
3. Box plot: Distribusi speed loss per kategori gelombang
4. Time series: Variasi temporal kecepatan dan gelombang
5. Polar plot: Pengaruh arah gelombang terhadap speed loss
6. Contour plot: Interaksi H_s dan T_p terhadap speed loss

Analisis data menggunakan:

1. Python 3.9: Pandas, NumPy, SciPy untuk data processing
2. Scikit-learn: Machine learning dan statistical modeling
3. Matplotlib dan Seaborn: Visualisasi data
4. QGIS 3.22: Analisis spasial dan pemetaan
5. MATLAB R2022a: Analisis spektral gelombang
6. R Studio: Analisis statistik lanjutan

Model terbaik dipilih berdasarkan:

1. Akurasi: $R^2 > 0.70$, RMSE minimum, MAPE $< 15\%$
2. Signifikansi: p-value < 0.05 untuk semua koefisien
3. Parsimony: Akaike Information Criterion (AIC) minimum: $AIC = 2k - 2\ln(\hat{L})$
4. Validitas: Residual berdistribusi normal (uji Shapiro-Wilk), tidak ada heteroskedastisitas (uji Breusch-Pagan)

Limitasi Penelitian :

1. Data AIS memiliki temporal gap pada area dengan coverage rendah
2. Akurasi SOG dari AIS bergantung pada kualitas sinyal GPS
3. Data gelombang ERA5 memiliki resolusi terbatas (0.25°)
4. Pengaruh arus laut tidak sepenuhnya terisolasi dari analisis
5. Variabel operasional seperti RPM mesin dan trim kapal tidak tersedia dari AIS publik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa data AIS publik yang digunakan dari Januari hingga Desember 2024 memiliki kepadatan temporal yang tinggi dan representatif untuk menganalisis kinerja kapal penyeberangan di tiga zona perairan Indonesia. Berbeda dengan transmisi data harian, selang waktu pengiriman pesan AIS dalam penelitian ini diekstraksi dengan

resolusi waktu antara 1 hingga 5 menit guna menangkap fluktuasi kecepatan kapal secara dinamis saat berinteraksi dengan gelombang. Proses penyaringan dan validasi tetap menjadi langkah penting untuk mengatasi variasi cakupan stasiun penerima dan gangguan sinyal GPS agar data mencerminkan keadaan operasional laut yang sebenarnya. Analisis data gelombang ERA5 menunjukkan bahwa sebagian besar zona penelitian terpapar gelombang sedang hingga tinggi, khususnya pada musim barat, sementara wilayah seperti Selat Sunda dan Selat Bali memiliki karakteristik interaksi gelombang dan arus yang spesifik.



Gambar 11. Pengaruh Kondisi Gelombang Terhadap Kecepatan Kapal di Indonesia (2024)

Persentase relatif penurunan kecepatan kapal penyeberangan di Indonesia selama tahun 2024 yang dipengaruhi oleh kondisi gelombang dan perubahan musim ditunjukkan pada grafik donut 3D ini. Kondisi gelombang tinggi memberikan kontribusi terbesar terhadap penurunan kecepatan; karena peningkatan resistensi tambahan dan penurunan efisiensi propulsi, mereka menyumbang sekitar setengah dari dampak total. Musim peralihan kedua menyumbang sekitar 20% karena gelombang tidak stabil saat menuju musim barat karena musim monsun barat laut mendominasi, dan musim barat memberikan kontribusi sekitar 30%. Visualisasi ini menunjukkan bahwa oseanografi adalah komponen utama yang memengaruhi kinerja operasional kapal penyeberangan.

Seperti yang ditunjukkan oleh analisis kecepatan kapal yang dilakukan berdasarkan data AIS, terjadi penurunan kecepatan kapal yang konsisten seiring dengan peningkatan tinggi gelombang yang signifikan. Pada kondisi laut tenang, kecepatan kapal relatif stabil dan mendekati kecepatan operasional desain. Namun, pada kondisi gelombang kategori moderat hingga kasar, penurunan kecepatan relatif menjadi lebih nyata, dengan nilai penurunan yang berkisar antara 8 hingga 15% pada gelombang moderat dan dapat melebihi 25% pada gelombang kasar, terutama di perairan terbuka. Prinsip hidrodinamika kapal mengatakan bahwa peningkatan energi gelombang menyebabkan hambatan yang lebih besar dan efisiensi propulsi yang lebih rendah. Ini terjadi terutama ketika kapal mendekati batas kecepatan hull, di mana penggunaan daya mesin tidak lagi berguna untuk meningkatkan kecepatan.

Selain tinggi gelombang, arah datang gelombang juga memengaruhi seberapa besar penurunan kecepatan kapal. Gelombang dari arah depan, karena hambatan gelombang yang lebih tinggi dan resistensi tambahan, memberikan pengaruh paling besar. Gelombang dari arah belakang, di sisi lain, cenderung memberikan pengaruh yang lebih kecil dan, dalam beberapa situasi, memungkinkan kapal untuk mempertahankan kecepatan yang relatif stabil. Hasilnya menunjukkan bahwa orientasi rute terhadap arah gelombang harus dipertimbangkan saat mengatur pelayaran dan penjadwalan kapal penyeberangan.

Model multivariat yang menggabungkan parameter gelombang, arah relatif, dan karakteristik kapal memberikan hasil prediksi yang paling akurat. Ini karena model regresi menunjukkan bahwa hubungan tidak linier antara tinggi gelombang dan penurunan kecepatan kapal, terutama dalam kondisi gelombang tinggi. Selain itu, analisis musiman menunjukkan bahwa musim barat mengalami penurunan kecepatan terbesar, sedangkan musim peralihan pertama memiliki kondisi pelayaran yang paling stabil, karena pengaruh pola monsun di perairan Indonesia.

Secara operasional dan ekonomi, penurunan kecepatan kapal akibat gelombang menyebabkan peningkatan waktu tempuh dan penggunaan bahan bakar, yang pada gilirannya menyebabkan biaya operasional per perjalanan meningkat. Oleh karena itu, pemahaman teknis yang lebih baik tentang data AIS dan oseanografi di peroleh. Ini juga memiliki nilai strategis karena membantu dalam pengambilan keputusan operasional. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa menggunakan data AIS publik dapat memberikan gambaran lengkap tentang bagaimana kondisi gelombang memengaruhi kinerja kapal penyeberangan. Ini juga dapat membantu meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keandalan transportasi laut di Indonesia.

KESIMPULAN

Penelitian ini menemukan bahwa kapal penyeberangan sangat penting untuk konektivitas Indonesia, tetapi arus, monsun, dan musim sangat memengaruhi kinerja kapal. Dengan menggabungkan data AIS publik dengan data gelombang, ada bukti kuat bahwa ada korelasi kuat antara kecepatan dan tinggi gelombang. Pada gelombang moderat, penurunan kecepatan berkisar antara 8 hingga 15%, dan pada gelombang kasar dapat mencapai lebih dari 25%, terutama di perairan terbuka karena mekanisme hidrodinamika pengurangan tekanan dan batas kecepatan hull. Selain tinggi gelombang, arahnya juga berpengaruh; gelombang dari depan memiliki kinerja yang paling buruk dan gelombang dari belakang memiliki kinerja yang lebih baik. Hubungan ini cenderung tidak linier, dan dapat diprediksi dengan menggunakan model multivariat. Peralihan pertama adalah yang paling stabil, sementara musim barat mengalami dampak terbesar. Secara operasional-ekonomi, penurunan kecepatan

meningkatkan konsumsi BBM, waktu tempuh, dan biaya, sehingga studi ini menawarkan kerangka kuantitatif spasial-temporal berbasis AIS-oseanografi untuk membantu perencanaan rute, keselamatan, dan kebijakan transportasi laut yang lebih adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- R. O. S. Gurning *et al.*, “Conceptualizing Floating Logistics Supporting Facility as Innovative and Sustainable Transport in Remote Areas: Case of Small Islands in Indonesia,” *Sustain.*, vol. 14, no. 14, 2022, doi: 10.3390/su14148904.
- L. Xin, S. Hu, F. Wang, W. Xie, D. Hu, and C. Dong, “Using a deep-learning approach to infer and forecast the Indonesian Throughflow transport from sea surface height,” *Front. Mar. Sci.*, vol. 10, no. January, pp. 1–10, 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1079286.
- R. D. Susanto and R. D. Ray, “Seasonal and Interannual Variability of Tidal Mixing Signatures in Indonesian Seas from High-Resolution Sea Surface Temperature,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 8, 2022, doi: 10.3390/rs14081934.
- J. E. Johnson *et al.*, “Climate change implications for the Arafura and Timor Seas region: assessing vulnerability of marine systems to inform management and conservation,” *Clim. Change*, vol. 176, no. 7, pp. 1–26, 2023, doi: 10.1007/s10584-023-03554-9.
- M. Kanrak, Y. Y. Lau, J. Zhou, J. Ge, and S. Traiyarach, “Empirical Analysis of the Cruise Shipping Network in Asia,” *Sustain.*, vol. 15, no. 3, pp. 1–16, 2023, doi: 10.3390/su15032010.
- S. Meng, H. Li, and X. Wu, “International cruise research advances and hotspots: Based on literature big data,” *Front. Mar. Sci.*, vol. 10, no. March, pp. 1–14, 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1135274.
- J. Wang, Q. Ma, S. Yan, and B. Liang, “Modeling Crossing Random Seas by Fully Non-Linear Numerical Simulations,” *Front. Phys.*, vol. 9, no. April, 2021, doi: 10.3389/fphy.2021.593394.
- Y. L. Young, Z. Valles, I. Di Napoli, F. M. Montero, L. F. Minerva, and C. Harwood, “Wave effects on the hydroelastic response of a surface-piercing hydrofoil. Part 1. Fully wetted and ventilated flows,” *J. Fluid Mech.*, vol. 963, pp. 1–51, 2023, doi: 10.1017/jfm.2023.127.
- H. Liu and N. Wakabayashi, “RedNavi: Building a 3D Scene of the Current Sea from AIS Data,” *Sustain.*, vol. 14, no. 19, 2022, doi: 10.3390/su141912572.
- D. Kang, S. H. Kim, D. Shin, J. T. Oh, M. G. Kim, and P. C. Lee, “Hygroscopic Behavior of Polypropylene Nanocomposites Filled with Graphene Functionalized by Alkylated Chains,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 23, pp. 1–10, 2022, doi: 10.3390/nano12234130.
- J. D. Cullen and R. I. Ivanov, “Hamiltonian Description of Internal Ocean Waves With Coriolis Force,” *Commun. Pure Appl. Anal.*, vol. 21, no. 7, pp. 2291–2307, 2022, doi: 10.3934/cpaa.2022029.
- S. Tavakoli, P. Shaghaghi, S. Mancini, F. De Luca, and A. Dashtimanesh, “Wake waves of a planing boat: An experimental model,” *Phys. Fluids*, vol. 34, no. 3, 2022, doi: 10.1063/5.0084074.
- S.-H. L. Kyung-Wan Seo, Young-Cheol Yoon, “LiDAR Point Cloud Data Combined Structural Analysis Based,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 6063, 2023.
- N. Kühl, T. T. Nguyen, M. Palm, D. Jürgens, and T. Rung, “Adjoint node-based shape optimization of free-floating vessels,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 65, no. 9, pp. 1–24, 2022, doi: 10.1007/s00158-022-03338-2.
- S. van Buuren, “Broken Stick Model for Irregular Longitudinal Data,” *J. Stat. Softw.*, vol. 106, no. 7, 2023, doi: 10.18637/jss.v106.i07.
- R. Su, S. Dodge, and K. G. Goulias, *Understanding the impact of temporal scale on human movement analytics*, vol. 24, no. 3. Springer Berlin Heidelberg, 2022. doi: 10.1007/s10109-021-00370-6.
- X. Zhang, H. Sun, and A. Kaneko, “Editorial: Ocean observation based on underwater acoustic technology,” *Front. Mar. Sci.*, vol. 10, no. June, pp. 1–3, 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1212840.
- [T. Song *et al.*, “A review of artificial intelligence in marine science,” *Front. Earth Sci.*, vol. 11, no. February, 2023, doi: 10.3389/feart.2023.1090185.
- [T. C. A. Oliveira, Y. T. Lin, and M. B. Porter, “Underwater Sound Propagation Modeling in a Complex Shallow Water Environment,” *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, no. October, pp. 1–11, 2021, doi: 10.3389/fmars.2021.751327.
- Z. Gong, C. Li, and R. Su, “Fundamental Limits of Doppler Shift-Based, ToA-Based, and TDoA-Based Underwater Localization,” *IEEE/CAA J.*

Autom. Sin., vol. 10, no. 7, pp. 1637–1639, 2023, doi: 10.1109/JAS.2023.123282.

January, pp. 1–8, 2023, doi: 10.3389/fmars.2022.1076775.

S. Nakayama *et al.*, “Comparing spatial patterns of marine vessels between vessel-tracking data and satellite imagery,” *Front. Mar. Sci.*, vol. 9, no.

M. Fromreide and A. Hansen, “Predicting Motion Patterns Using Optimal Paths,” *Front. Phys.*, vol. 9, no. June, pp. 1–8, 2021, doi: 10.3389/fphy.2021.656296.