Integrasi AIS, Expert Judgment, dan MMG untuk Olah Gerak Kapal Tunda-Tongkang Mahakam

Egbert Edward Djajasasana[1], Joe Ronald Kurniawan Bokau*,[2], Barnabas[1], Joe Alend Seniza Bokau[2], Ariq Nur Rafi[1]

[1]Program Studi Nautika, Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
Jalan Tentara Pelajar No. 173, Makassar, 90165, Indonesia
[2]Program Studi Nautika, Politeknik Pelayaran Barombong
Jalan Permandian Alam No. 1, Makassar, 90225, Indonesia

*E-mail: joeronald@poltekpelbarombong.ac.id

Diterima: 13 Januari 2026, direvisi: 27 Maret 2026, disetujui: 6 Mei 2026,
tersedia daring: 26 Juni 2026, diterbitkan: 30 Juni 2026

Abstrak

Penelitian ini menawarkan pendekatan integratif untuk menilai kesulitan olah gerak kapal tunda-tongkang di perairan sungai dengan menggabungkan analisis lintasan AIS, *expert judgment* nahkoda kapal, analisis ruang aman pelayaran, dan simulasi MMG/MANSIM yang selama ini umumnya digunakan secara terpisah. Sungai Mahakam merupakan salah satu koridor pelayaran pedalaman strategis di Kalimantan Timur yang dilalui kapal tunda-tongkang pengangkut komoditas dari wilayah hulu menuju hilir. Keberadaan jembatan pada alur sungai yang sempit menimbulkan tantangan keselamatan navigasi karena kapal tunda-tongkang memiliki kemampuan olah gerak terbatas dan rentan terhadap pengaruh arus lateral. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi tingkat kesulitan olah gerak kapal tunda-tongkang di bawah Jembatan Mahakam berbasis data *Automatic Identification System* (AIS), persepsi nahkoda, ruang aman pelayaran, dan simulasi *Mathematical Modelling Group* (MMG) menggunakan MANSIM. Data AIS dari *Vessel Traffic Service* (VTS) Samarinda mencakup 103 pergerakan kapal tunda-tongkang pada 25 Agustus 2024. Hasil analisis menunjukkan bahwa area di bawah jembatan memiliki ruang aman pelayaran sekitar 81,6 m dari lebar efektif 90 m, arus sekitar pilar sebesar 0,330–0,420 m/s, koreksi haluan berulang hingga enam kali, serta kebutuhan pendekatan lurus sekitar 500 m sebelum dan sesudah jembatan. *Expert judgment* dari tiga nahkoda berpengalaman menunjukkan bahwa arus, keterbatasan ruang, dan kepadatan lalu lintas menjadi faktor utama kesulitan olah gerak. Simulasi MMG/MANSIM memberikan indikasi awal bahwa alur rekomendasi dapat membantu penyelarasan haluan sebelum memasuki zona kritis. Namun, karena simulasi menggunakan model ferry sebagai proksi, hasil simulasi diposisikan sebagai penilaian awal yang bersifat indikatif, bukan prediktif penuh terhadap dinamika kapal tunda-tongkang. Temuan ini menegaskan pentingnya pemanfaatan AIS, panduan alur, penguatan VTS, dan pelatihan olah gerak khusus untuk meningkatkan keselamatan pelayaran di Jembatan Mahakam.

Kata kunci: AIS, jembatan Mahakam, kapal tunda-tongkang, perairan sungai, risiko navigasi, simulasi MMG.

Abstract

Integrative AIS-Based, Expert Judgment, MMG for Tugboat-Barge Maneuvering at Mahakam Bridge, Indonesia: *This study proposes an integrative approach for assessing tugboat-barge maneuvering difficulty in inland waterways by combining AIS trajectory analysis, captain expert judgment, safe navigation width assessment, and MMG/MANSIM simulation, which are often applied separately in previous studies. The Mahakam River is a strategic inland waterway corridor in East Kalimantan, Indonesia, used by tugboats and barges transporting commodities from upstream areas to downstream ports. Bridge structures along this narrow river corridor create navigational safety challenges because tugboat-barge units have limited maneuvering capability and are sensitive to lateral current effects. This study aims to evaluate tugboat-barge maneuvering difficulty under Mahakam Bridge using Automatic Identification System (AIS) data, captain perception, safe navigation width analysis, and Mathematical Modelling Group (MMG) simulation using MANSIM. AIS data obtained from VTS Samarinda recorded 103 tugboat-barge movements on 25 August 2024. The results show that the bridge area provides a safe navigation width of approximately 81.6 m from an effective bridge width of 90 m, current around the bridge piers ranges from 0.330 to 0.420 m/s, AIS trajectories indicate up to six heading corrections, and a straight approach of approximately 500 m before and after the bridge is required to support route alignment. Expert judgment from three experienced captains confirms that current, limited maneuvering space, and traffic density are the main factors affecting maneuvering difficulty. The MMG/MANSIM simulation provides preliminary indication that the recommended route can assist heading alignment before vessels enter the critical zone. However, because the simulation uses a ferry model as a proxy, the simulation output is interpreted as an indicative preliminary assessment rather than a full predictive representation of tugboat-barge hydrodynamics. These findings highlight the importance of AIS-based monitoring, VTS support, dedicated maneuvering training, and route guidance to improve tugboat-barge navigational safety at Mahakam Bridge.*

Keywords**:** *AIS, inland waterway, Mahakam Bridge, MMG simulation, navigational risk, tugboat-barge.*

http://dx.doi.org/10.25104/transla.v28i1.3047
1441-0504/ 2548-4087 ©2026 Badan Kebijakan Transportasi, diterbitkan oleh Sekretariat Badan Kebijakan Transportasi.
Artikel ini *open access* dibawah lisensi CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)
Jurnal Penelitian Transportasi Laut telah terakreditasi Sinta 3.

1. Pendahuluan

Transportasi perairan pedalaman *(inland waterway)* memiliki peran penting dalam mendukung distribusi barang, mobilitas masyarakat, dan konektivitas wilayah di Indonesia. Pada koridor sungai besar, moda ini menjadi bagian strategis dari rantai logistik karena mampu menghubungkan wilayah hulu, kawasan industri, terminal khusus, terminal untuk kepentingan sendiri, dan pelabuhan hilir. Penguatan transportasi perairan pedalaman juga sejalan dengan kebutuhan peningkatan efisiensi logistik dan pengembangan sistem transportasi yang lebih berkelanjutan [1][2]. Namun, peningkatan aktivitas kapal di alur sungai tidak dapat dilepaskan dari tantangan keselamatan, terutama pada segmen yang sempit, berkelok, dangkal, dipengaruhi arus, dan memiliki hambatan tetap seperti jembatan. Pada kondisi tersebut, keselamatan pelayaran tidak hanya ditentukan oleh karakteristik kapal, tetapi juga oleh interaksi antara geometri alur, kondisi hidrodinamik, kepadatan lalu lintas, dan kemampuan olah gerak kapal [3].

Sungai Mahakam merupakan salah satu koridor perairan pedalaman penting di Kalimantan Timur yang dilalui oleh kapal tunda dan tongkang pengangkut komoditas dari wilayah hulu menuju hilir. Dalam perspektif rekayasa lalu lintas maritim, area jembatan di Sungai Mahakam merupakan titik kritis karena terjadi penyempitan ruang navigasi, perubahan pola arus, dan peningkatan kebutuhan pengendalian haluan. Kapal tunda yang menarik tongkang memiliki karakteristik olah gerak yang lebih kompleks dibandingkan kapal tunggal karena rangkaian kapal lebih panjang, respons terhadap kemudi tidak seketika, serta lebih rentan terhadap pengaruh arus lateral. Kondisi ini menyebabkan proses pengolongan di bawah jembatan membutuhkan pengendalian kecepatan, haluan, dan posisi lintasan secara lebih presisi.

Risiko navigasi di area jembatan telah menjadi perhatian penting dalam studi keselamatan pelayaran. Penelitian berbasis *Automatic Identification System* (AIS) menunjukkan bahwa perairan dekat jembatan memiliki karakteristik *ship domain* dan pola risiko yang berbeda dari alur terbuka karena keberadaan pilar, keterbatasan ruang, dan perubahan perilaku kapal saat mendekati struktur tetap [4]. Kajian probabilistik terhadap risiko tumbukan kapal dengan jembatan sungai juga menegaskan bahwa evaluasi keselamatan perlu mempertimbangkan karakteristik lalu lintas kapal, dimensi alur, dan kemungkinan kapal menyimpang dari lintasan aman [5]. Dengan demikian, analisis keselamatan di area jembatan tidak cukup hanya didasarkan pada catatan kecelakaan, tetapi perlu dilengkapi dengan indikator operasional yang dapat menggambarkan perilaku kapal sebelum insiden terjadi.

AIS memberikan peluang penting untuk mengevaluasi perilaku lalu lintas kapal secara aktual. Data AIS menyediakan informasi *spatiotemporal* seperti posisi kapal, waktu, kecepatan, dan *Course Over Ground* (COG) sehingga dapat digunakan untuk menganalisis lintasan, perubahan haluan, pola kecepatan, serta potensi deviasi kapal dari alur aman. Dalam konteks perairan dekat jembatan, data AIS dapat digunakan untuk memahami domain kapal, distribusi risiko, dan karakteristik pergerakan kapal pada area terbatas [4]. Perkembangan studi keselamatan pelayaran juga menunjukkan bahwa sistem peringatan dini di area jembatan dapat diperkuat melalui pendekatan penilaian risiko berbasis perilaku kapal dan lingkungan sekitar jembatan [6]. Selain itu, integrasi AIS dengan sumber data lain semakin banyak digunakan untuk memperkuat penilaian risiko tabrakan di perairan pedalaman [7]. Oleh karena itu, AIS tidak hanya berfungsi sebagai perangkat identifikasi kapal, tetapi juga sebagai sumber data utama dalam rekayasa lalu lintas maritim untuk mendukung identifikasi area kritis dan pengambilan keputusan keselamatan.

Selain data AIS, evaluasi keselamatan di bawah jembatan perlu mempertimbangkan ruang aman pelayaran dan kondisi hidrodinamik setempat. Lebar efektif jembatan, posisi pilar, pola arus, turbulensi, dan bentuk sungai dapat memengaruhi kemampuan kapal dalam mempertahankan lintasan. Di Sungai Mahakam, studi pemodelan lokal menunjukkan bahwa pola arus dan kedalaman di bawah Jembatan Mahakam menjadi aspek penting dalam upaya peningkatan keselamatan pelayaran [8]. Kondisi arus di sekitar pilar dapat menimbulkan *drift lateral*, terutama ketika kapal bergerak pada kecepatan rendah saat mendekati area jembatan. Oleh sebab itu, penilaian tingkat kesulitan olah gerak tidak cukup hanya dilakukan melalui visualisasi lintasan kapal, tetapi perlu dikaitkan dengan batas ruang aman, pengaruh arus sekitar pilar, dan kebutuhan koreksi haluan pada saat kapal melewati zona kritis.

Pendekatan simulasi olah gerak juga diperlukan untuk menilai kelayakan awal rancangan alur pelayaran. Studi mengenai olah gerak kapal di perairan pedalaman menunjukkan bahwa faktor

lingkungan seperti aliran tidak seragam, perairan dangkal, tebing sempit, angin, dan gelombang dapat memengaruhi kemampuan olah gerak kapal [9]. Kajian lain mengenai olah gerak kapal di *inland waterways* juga menekankan bahwa karakteristik alur sempit dan kondisi hidrodinamik perlu diperhitungkan dalam penilaian keselamatan operasi kapal [10]. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah *Mathematical Modelling Group* (MMG) karena model ini mampu merepresentasikan gerak kapal dalam tiga derajat kebebasan, yaitu *surge, sway,* dan *yaw*. MANSIM sebagai perangkat simulasi berbasis MMG telah digunakan untuk mengevaluasi respons olah gerak kapal, termasuk perubahan *heading, yaw rate, drift angle, rudder angle*, dan kecepatan [11]. Dalam konteks Jembatan Mahakam, simulasi olah gerak dapat digunakan sebagai validasi awal terhadap rancangan alur yang disusun berdasarkan data AIS dan kondisi ruang navigasi.

Meskipun studi terdahulu telah membahas risiko tumbukan kapal dengan jembatan, *ship domain* di perairan dekat jembatan, peringatan dini terhadap kapal dan pilar jembatan atau *air draft* kapal terhadap jembatan, serta simulasi olah gerak pada alur terbatas, kajian yang secara spesifik mengintegrasikan data AIS, metrik kesulitan navigasi, ruang aman pelayaran, persepsi nahkoda, kondisi arus, dan simulasi MMG pada kasus kapal tunda-tongkang di sungai Indonesia masih terbatas. Kesenjangan ini penting karena operasi kapal tunda-tongkang di Sungai Mahakam memiliki karakteristik lokal yang berbeda dari pelayaran laut terbuka maupun alur pelabuhan. Kapal harus mempertahankan lintasan dalam ruang yang terbatas, menghadapi arus sekitar pilar, menyesuaikan kecepatan, serta melakukan koreksi haluan berulang sebelum dan sesudah melewati jembatan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menjawab beberapa pertanyaan utama. Pertama, seberapa besar tingkat kesulitan olah gerak kapal tunda-tongkang di bawah Jembatan Mahakam apabila dinilai berdasarkan metrik AIS, khususnya perubahan COG, koreksi haluan berulang, kecepatan, dan deviasi lintasan kapal. Kedua, faktor operasional apa saja yang paling dominan memengaruhi kesulitan olah gerak tersebut berdasarkan *expert judgment* nahkoda berpengalaman. Ketiga, bagaimana keterbatasan ruang aman pelayaran, arus di sekitar pilar, dan karakteristik lintasan kapal berkontribusi terhadap peningkatan risiko navigasi di area bawah jembatan. Keempat, apakah alur pelayaran rekomendasi dengan pendekatan lurus sebelum dan sesudah jembatan memiliki kelayakan awal berdasarkan simulasi MMG/MANSIM. Kelima, implikasi operasional apa yang dapat dirumuskan bagi *Vessel Traffic Service* (VTS), operator kapal, dan otoritas pelayaran dalam meningkatkan keselamatan pengoperasian kapal tunda-tongkang di Jembatan Mahakam.

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat kesulitan olah gerak kapal tunda-tongkang di bawah Jembatan Mahakam melalui pendekatan terintegrasi yang menggabungkan data lalu lintas maritim berbasis AIS, *expert judgment* nahkoda berpengalaman, analisis ruang aman pelayaran, kondisi arus, dan simulasi MMG/MANSIM. Keterpaduan pendekatan

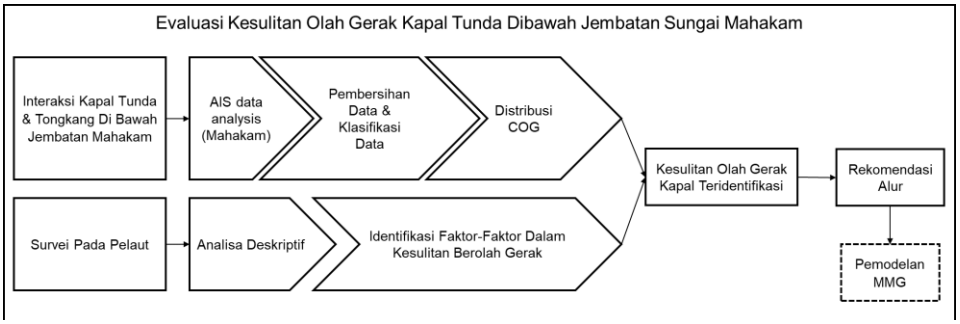


Gambar 1. Sungai Mahakam (Warna Kuning) dengan Panjang Perairan Pedalaman Sungai dari TUKS/TERSUS di Hulu Mencapai 438 km

tersebut digunakan untuk menilai karakteristik pergerakan kapal, batas ruang navigasi, validasi kualitatif dari praktisi, serta kelayakan awal alur rekomendasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi peningkatan pengawasan *Vessel Traffic Service* (VTS), penyusunan panduan alur, pengembangan SOP pengoperasian kapal tunda-tongkang, serta pelatihan olah gerak kapal pada perairan pedalaman. Adapun lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus berbasis rekayasa lalu lintas maritim untuk mengevaluasi tingkat kesulitan olah gerak kapal tunda-tongkang di bawah Jembatan Mahakam, Samarinda. Pendekatan ini mengintegrasikan analisis lintasan *Automatic Identification System* (AIS), informasi geometri jembatan, kondisi arus di sekitar pilar, *qualitative triangulation* melalui *expert judgment* nahkoda berpengalaman, serta simulasi olah gerak menggunakan perangkat lunak MANSIM berbasis *Mathematical Modelling Group* (MMG). Penggunaan AIS didasarkan pada kemampuannya untuk merekam perilaku lalu lintas kapal secara *spatiotemporal* pada perairan dekat jembatan dan alur terbatas [4]. Simulasi MMG atau MANSIM digunakan sebagai penilaian awal terhadap stabilitas lintasan alur rekomendasi, bukan sebagai prediksi penuh dinamika hidrodinamik kapal tunda-tongkang karena model kapal yang tersedia dalam MANSIM masih terbatas [11]. Gambar 2 menunjukkan gambaran metodologi penelitian ini.



Gambar 2. Metodologi Penelitian

2.1. Metode Pengumpulan Data

Data utama penelitian berupa data AIS kapal tunda-tongkang yang melintas di sekitar Jembatan Mahakam pada 25 Agustus 2024. Data diperoleh dari AIS *Receiver* VTS Samarinda pada rentang waktu 06.00–18.00 WITA. Area pengamatan dibatasi pada radius sekitar 2 km dari Jembatan Mahakam untuk menangkap perilaku kapal saat mendekati, melewati, dan meninggalkan area jembatan. Parameter AIS yang digunakan meliputi posisi lintang dan bujur, *timestamp*, COG, dan kecepatan kapal.

Kriteria inklusi data AIS ditetapkan, antara lain kapal teridentifikasi sebagai kapal tunda-tongkang, lintasan kapal melewati area kontrol minimal 10 titik rekaman sebelum dan sesudah jembatan, kecepatan kapal berada pada rentang operasional 0–10 knot, dan data memiliki *timestamp* serta koordinat yang konsisten untuk membentuk lintasan *spatiotemporal*. Dari total 117 rekaman awal yang diperiksa, 103 pergerakan kapal memenuhi kriteria inklusi dan digunakan dalam analisis lebih lanjut. Penetapan kriteria ini bertujuan mengurangi potensi bias akibat data yang tidak lengkap, sinyal AIS yang terputus, atau lintasan yang tidak relevan dengan proses pengolongan di bawah jembatan.

Data pendukung penelitian meliputi informasi geometri jembatan, lebar efektif alur, ruang aman pelayaran, visualisasi kondisi arus di sekitar pilar, serta informasi operasional dari nahkoda. Pertimbangan ruang aman pelayaran mengacu pada prinsip evaluasi keselamatan jembatan dan risiko tumbukan kapal sebagaimana digunakan dalam pedoman desain tumbukan kapal terhadap jembatan [12][13]. *Expert judgment* diperoleh dari tiga nahkoda berpengalaman yang dipilih berdasarkan kriteria, antara lain memiliki pengalaman lebih dari sepuluh tahun di Sungai Mahakam, pernah melintasi jembatan Mahakam minimal lima puluh kali, dan bersedia diwawancarai secara mendalam. Keterlibatan tiga nahkoda tersebut tidak dimaksudkan sebagai survei kuantitatif representatif, melainkan sebagai *qualitative triangulation* untuk memperkuat interpretasi hasil AIS dan konteks operasional lapangan.

2.2. Pengolahan Data

Pengolahan data AIS dilakukan melalui tahapan seleksi, pembersihan, *filtering*, interpolasi, dan visualisasi lintasan. Pertama, data diseleksi berdasarkan area pengamatan, jenis kapal, dan kelengkapan parameter utama. Kedua, data dibersihkan dari duplikasi, titik dengan loncatan posisi lebih dari 500 m dalam interval 1 menit, serta data dengan kecepatan negatif atau COG di luar rentang 0–360°. Ketiga, data disusun secara kronologis berdasarkan *timestamp* untuk membentuk lintasan *spatiotemporal* setiap kapal. Lebar efektif 90 m diperoleh dari ruang pelayaran yang tersedia pada bukaan navigasi utama di bawah jembatan. Ruang aman pelayaran 81,6 m merupakan estimasi operasional setelah mempertimbangkan allowance keselamatan lateral, posisi pilar, dan lintasan aktual AIS pada zona pengamatan. Nilai ini tidak dimaksudkan sebagai nilai desain permanen, tetapi sebagai pendekatan operasional untuk menilai keterbatasan ruang manuver kapal tunda–tongkang di area jembatan.

Untuk mengatasi jeda rekaman AIS, dilakukan interpolasi linier hanya pada celah data kurang dari 30 detik. Titik dengan jeda lebih dari 30 detik tidak diinterpolasi untuk menghindari pembentukan lintasan asumtif yang tidak realistis. Setelah lintasan terbentuk, data AIS dibandingkan dengan garis tengah alur, posisi jembatan, ruang efektif jembatan, dan ruang aman pelayaran. Dalam penelitian ini, lebar efektif jembatan sebesar 90 m menghasilkan ruang aman pelayaran sekitar 81,6 m setelah mempertimbangkan *allowance* keselamatan. Perlu dicatat bahwa perbandingan lebar unit kapal tunda-tongkang 12–15 m dalam penelitian ini digunakan sebagai asumsi operasional awal untuk menafsirkan ruang aman pelayaran, bukan sebagai data dimensi rinci setiap rangkaian kapal yang melintas. Data panjang tali atau *towline* dan variasi konfigurasi *tugboat-barge* belum tersedia dalam dataset AIS sehingga rekomendasi pendekatan lurus 500 m diposisikan sebagai usulan awal berbasis geometri alur, pola lintasan AIS, dan kebutuhan penyelarasan haluan, bukan sebagai nilai final yang diturunkan dari model *towline* secara hidrodinamik. Informasi arus sekitar pilar sebesar 0,330–0,420 m/s digunakan sebagai faktor pendukung untuk menjelaskan kemungkinan *drift lateral* dan kebutuhan koreksi haluan pada area jembatan [8]. Hasil pengolahan data divisualisasikan dalam bentuk peta lintasan, distribusi perubahan haluan, serta rancangan alur rekomendasi.

2.3. Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menilai indikator kesulitan navigasi yang meliputi keterbatasan ruang aman pelayaran, perubahan COG, koreksi haluan berulang, fluktuasi kecepatan, pengaruh arus sekitar pilar, dan kesesuaian lintasan kapal terhadap alur rekomendasi. Perubahan COG digunakan sebagai indikator kebutuhan koreksi arah kapal saat mendekati dan melewati jembatan. Semakin sering koreksi haluan terjadi pada ruang navigasi yang sempit, semakin tinggi indikasi tingkat kesulitan manuver yang dihadapi nahkoda. Pendekatan ini sejalan dengan pemanfaatan AIS untuk memahami perilaku lintasan kapal dan karakteristik risiko pada area terbatas [4][14] .

Hasil analisis AIS kemudian dibandingkan dengan *expert judgment* tiga nahkoda berpengalaman untuk mengonfirmasi faktor-faktor penyulit utama, seperti arus, keterbatasan ruang, kepadatan lalu lintas, dan kebutuhan pengendalian kecepatan. Tahap berikutnya adalah penyusunan alur rekomendasi dengan mempertimbangkan prinsip bahwa rute pelayaran di bawah jembatan sebaiknya dibuat selurus dan sepanjang mungkin untuk mengurangi kebutuhan manuver tajam sebelum memasuki zona kritis [15]. Dalam penelitian ini, rancangan alur direkomendasikan memiliki pendekatan lurus sekitar 500 m sebelum dan 500 m sesudah jembatan agar kapal memiliki ruang yang cukup untuk menyelaraskan haluan dan menstabilkan kecepatan.

Rancangan alur tersebut dievaluasi melalui simulasi MANSIM berbasis MMG. Karena keterbatasan pilihan model kapal dalam perangkat lunak MANSIM, simulasi menggunakan model *ferry single-propeller* atau *single-rudder* sebagai pendekatan awal. Penggunaan model ini merupakan keterbatasan metodologis karena karakteristik hidrodinamik *ferry* berbeda dengan rangkaian kapal tunda-tongkang. Oleh karena itu, hasil simulasi tidak diposisikan sebagai prediksi penuh terhadap olah gerak kapal tunda-tongkang, melainkan sebagai *preliminary assessment* yang bersifat indikatif untuk mengevaluasi stabilitas lintasan, perubahan *heading, yaw rate, drift angle, rudder angle*, dan kecepatan pada alur rekomendasi.

Untuk menguji ketahanan rancangan alur terhadap variasi kondisi operasional, dilakukan analisis sensitivitas sederhana melalui variasi kecepatan awal 3, 4, dan 5 knot serta sudut datang arus 0°, 10°, dan 20°. Variasi ini digunakan untuk melihat rentang respons olah gerak terhadap perubahan kondisi awal, terutama terhadap kestabilan *heading*, perubahan *yaw rate*, dan kecenderungan *drift angle*. Dengan demikian, simulasi tidak hanya digunakan untuk menampilkan lintasan ideal, tetapi juga untuk memberikan indikasi awal mengenai batas operasional alur rekomendasi pada kondisi arus dan kecepatan yang berbeda.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Data AIS dan Area Pengamatan

Data AIS yang dianalisis mencakup 103 pergerakan kapal tunda-tongkang yang melintas di bawah Jembatan Mahakam pada 25 Agustus 2024 karena segmen ini memiliki karakteristik sebagai titik penyempitan alur, dipengaruhi arus di sekitar pilar, serta menuntut pengendalian haluan yang lebih presisi dibandingkan segmen sungai terbuka. Data tersebut diperoleh dari AIS *Receiver* VTS Samarinda dan digunakan untuk merekonstruksi lintasan kapal berdasarkan posisi lintang dan bujur, waktu, COG, dan kecepatan. Hasil rekonstruksi lintasan AIS menunjukkan bahwa kapal tunda-tongkang tidak selalu bergerak sejajar dengan garis tengah alur. Pada beberapa lintasan, kapal melakukan koreksi haluan berulang ketika mendekati, melewati, dan meninggalkan area jembatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa area bawah jembatan merupakan segmen navigasi kritis yang membutuhkan pengambilan keputusan olah gerak secara cepat dan tepat.

Dalam perspektif rekayasa lalu lintas maritim, pola tersebut menunjukkan bahwa tingkat kesulitan tidak hanya ditentukan oleh keberadaan jembatan sebagai struktur tetap, tetapi juga oleh interaksi antara perilaku lintasan kapal, ruang aman pelayaran, arus, dan keterbatasan kemampuan manuver rangkaian kapal tunda-tongkang. Temuan ini sejalan dengan studi AIS pada perairan dekat jembatan yang menunjukkan bahwa data lintasan aktual dapat digunakan untuk memahami karakteristik ship domain dan perilaku kapal pada area terbatas [4][16]. Tabel 1 menyajikan ringkasan metrik utama yang digunakan untuk menilai tingkat kesulitan navigasi di bawah jembatan Mahakam. Metrik ini disusun berdasarkan hasil analisis AIS, informasi geometri jembatan, kondisi arus, persepsi nahkoda, dan hasil simulasi manuver.

Tabel 1. Ringkasan Metrik Kesulitan Navigasi Kapal Tunda-Tongkang di bawah Jembatan Mahakam

No.	Indikator	Hasil Utama	Interpretasi Keselamatan
1.	Jumlah pergerakan AIS	103 pergerakan kapal tunda-tongkang	Menunjukkan intensitas lalu lintas yang perlu dikelola secara hati-hati pada area jembatan
2.	Periode data AIS	25 Agustus 2024	Data digunakan sebagai studi kasus operasional berbasis rekaman VTS Samarinda
3.	Lebar efektif jembatan	90 m	Ruang lateral kapal terbatas saat memasuki area bawah jembatan
4.	Ruang aman pelayaran	81,6 m	Margin kesalahan manuver relatif kecil, terutama bagi rangkaian kapal tunda–tongkang
5.	Arus sekitar pilar	0,330–0,420 m/s	Berpotensi menimbulkan drift lateral dan koreksi haluan tambahan
6.	Koreksi haluan	Hingga 6 perubahan haluan	Mengindikasikan kebutuhan penyesuaian arah berulang saat kapal mendekati dan melewati jembatan
7.	Kecepatan aman menurut nahkoda	3–5 knot	Kecepatan rendah diperlukan untuk menjaga kendali manuver pada ruang sempit
8.	Jalur rekomendasi	500 m lurus sebelum dan sesudah jembatan	Memberikan ruang penyelarasan haluan sebelum kapal memasuki zona kritis

Untuk memperkuat interpretasi kuantitatif terhadap metrik kesulitan navigasi, dilakukan analisis korelasi eksploratif antara kecepatan rata-rata kapal dan koreksi haluan berbasis perubahan COG. Analisis dilakukan terhadap 103 lintasan AIS yang memenuhi kriteria validasi dan pembersihan data. Koreksi haluan dihitung sebagai episode perubahan COG yang menunjukkan penyesuaian arah kapal secara berulang, kemudian dinormalisasi terhadap jarak lintasan dalam satuan nautical mile agar tidak bias terhadap panjang lintasan. Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan negatif yang signifikan antara kecepatan rata-rata kapal dan tingkat koreksi haluan per nautical mile, dengan nilai korelasi *Pearson* sebesar $r = -0{,}558$ dan $p < 0{,}001$. Uji *Spearman* juga menunjukkan arah hubungan yang sama, yaitu $\rho = -0{,}645$ dan $p < 0{,}001$. Temuan ini mengindikasikan bahwa kapal dengan kecepatan lebih rendah

cenderung membutuhkan koreksi haluan lebih sering per satuan jarak saat melewati area pengamatan. Hasil analisis korelasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Korelasi

No.	Variabel yang Diuji	n	Nilai Korelasi	*p-value*	Interpretasi
1.	Kecepatan rata-rata vs jumlah episode koreksi haluan	103	*Pearson r = −0,292*	*0,0028*	Hubungan negatif signifikan
2.	Kecepatan rata-rata vs tingkat koreksi haluan per nautical mile	103	*Pearson r = −0,558*	*<0,001*	Hubungan negatif signifikan dan lebih kuat
3.	Kecepatan rata-rata vs total perubahan COG per nautical mile	103	*Pearson r = −0,333*	*<0,001*	Hubungan negatif signifikan
4.	Kecepatan rata-rata vs tingkat koreksi haluan per nautical mile	103	*Spearman ρ = −0,645*	*<0,001*	Konfirmasi non-parametrik terhadap arah hubungan

Sumber: Hasil Analisis Penulis

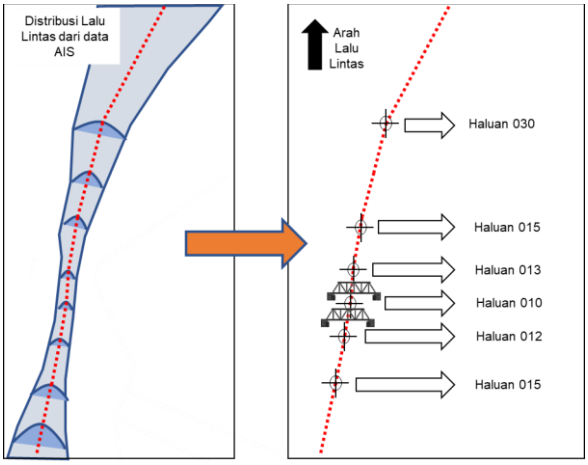
Hubungan tersebut memperkuat interpretasi bahwa kecepatan rendah pada kisaran 3–5 knot memang diperlukan untuk menjaga kendali manuver pada ruang sempit, tetapi pada saat yang sama dapat meningkatkan kerentanan kapal terhadap *drift lateral* akibat arus sekitar pilar. Dengan kata lain, kecepatan rendah tidak selalu berarti beban olah gerak lebih ringan. Pada operasi kapal tunda-tongkang, kecepatan rendah dapat memperbesar kebutuhan koreksi haluan karena respons manuver rangkaian kapal lebih lambat dan lebih mudah dipengaruhi arus lateral. Oleh karena itu, tingkat kesulitan olah gerak di bawah Jembatan Mahakam perlu dipahami sebagai hasil interaksi antara kecepatan rendah, arus lateral, ruang aman terbatas, dan karakteristik olah gerak kapal tunda-tongkang.

Koreksi haluan hingga enam kali tersebut dihitung pada lintasan kapal dalam zona pengamatan sekitar Jembatan Mahakam, yaitu saat kapal mendekati, melewati, dan meninggalkan bukaan jembatan. Koreksi ini tidak ditafsirkan sebagai kesalahan navigasi, melainkan sebagai respons operasional terhadap kombinasi penyelarasan lintasan, arus lateral, keterbatasan ruang aman, dan kebutuhan menjaga posisi kapal terhadap alur rekomendasi. Jumlah koreksi haluan hingga enam kali dalam penelitian ini diperoleh dari perubahan *Course Over Ground* (COG) pada data AIS, bukan dari data *rudder angle* kapal sebenarnya. Koreksi dihitung ketika lintasan AIS menunjukkan perubahan arah berulang yang konsisten pada fase mendekati, melewati, dan meninggalkan bukaan jembatan.

3.2. Metrik Kesulitan Navigasi Kapal Tunda-Tongkang

Hasil analisis menunjukkan bahwa ruang efektif di bawah jembatan sebesar 90 m menyisakan ruang aman pelayaran sekitar 81,6 m setelah memperhitungkan *allowance* keselamatan. Lebar aman pelayaran tersebut perlu ditafsirkan dalam kaitannya dengan standar dan pedoman keselamatan alur pelayaran (PIANC). Mengacu pada prinsip perencanaan alur di perairan terbatas, lebar alur harus mempertimbangkan ukuran kapal, kemampuan manuver, pengaruh arus, serta margin keselamatan lateral. Jika dibandingkan dengan pedoman keselamatan jembatan dan perencanaan ruang pelayaran yang mempertimbangkan dimensi alur, karakteristik lalu lintas, dan kemungkinan penyimpangan lintasan kapal, ruang aman 81,6 m pada Jembatan Mahakam menunjukkan kondisi yang relatif sempit bagi rangkaian kapal tunda-tongkang [5][12][13] . Dengan asumsi lebar unit kapal tunda-tongkang sekitar 12–15 m, ruang aman yang tersedia setara dengan sekitar 5–6 kali lebar kapal. Nilai ini secara geometrik masih dapat dilalui, tetapi tetap memerlukan pengendalian haluan yang presisi karena respons olah gerak rangkaian kapal tunda-tongkang lebih lambat dibandingkan kapal tunggal. Oleh karena itu, ruang 81,6 m tidak dapat ditafsirkan hanya sebagai ruang fisik yang cukup, melainkan sebagai ruang operasional yang tetap membutuhkan pengawasan VTS, pengendalian kecepatan, dan koreksi haluan yang hati-hati.

Indikator lain yang menunjukkan tingkat kesulitan navigasi adalah koreksi haluan berulang. Berdasarkan distribusi perubahan haluan, kapal dapat melakukan hingga enam koreksi arah saat mendekati dan melewati jembatan. Perubahan COG tersebut mengindikasikan bahwa nahkoda harus menyesuaikan arah kapal beberapa kali untuk mempertahankan lintasan aman. Dalam konteks keselamatan navigasi, koreksi haluan berulang pada ruang sempit menunjukkan peningkatan beban olah



Gambar 3. Distribusi Perubahan Haluan saat Kapal Tunda Pengolongan

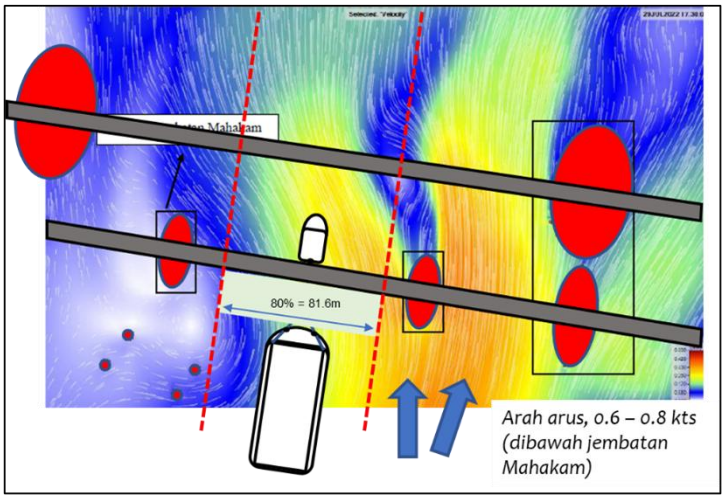
gerak dan kebutuhan kewaspadaan tinggi. Perubahan COG dapat dipahami sebagai indikator operasional yang menggambarkan respons kapal terhadap keterbatasan alur, pengaruh arus, dan kebutuhan menjaga posisi terhadap ruang aman. Pendekatan ini konsisten dengan pemanfaatan data AIS untuk membaca perilaku lintasan dan karakteristik risiko kapal di area terbatas [4][14] . Gambaran hasil analisis COG dari kapal tunda dapat dilihat pada Gambar 3.

Koreksi haluan hingga enam kali yang teramati pada lintasan kapal tidak hanya dapat dikaitkan dengan keberadaan arus, tetapi juga dengan interaksi antara arus lateral, bentuk alur, posisi pilar, dan respons kemudi rangkaian kapal tunda-tongkang yang relatif lambat. Berdasarkan distribusi lintasan AIS, koreksi haluan cenderung meningkat pada segmen sekitar bukaan jembatan, terutama ketika kapal mulai menyelaraskan arah dengan bukaan jembatan dan menyesuaikan posisi terhadap garis tengah alur. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa koreksi haluan berulang perlu dipahami sebagai indikator gabungan dari kompleksitas alur, pengaruh arus, keterbatasan ruang aman, dan tuntutan pengambilan keputusan nahkoda. Temuan ini juga memperkuat hasil analisis korelasi yang menunjukkan bahwa kecepatan rendah berkaitan dengan meningkatnya tingkat koreksi haluan per satuan jarak.

Kondisi hidrodinamik turut memperkuat tingkat kesulitan tersebut. Arus di sekitar pilar berada pada kisaran 0,330–0,420 m/s dan dapat menimbulkan *drift lateral*, terutama ketika kapal memasuki area bawah jembatan dengan kecepatan rendah. *Drift lateral* dapat membuat kapal menyimpang dari alur yang direncanakan sehingga nahkoda perlu melakukan koreksi haluan tambahan. Studi mengenai *bottleneck* navigasi sungai menunjukkan bahwa hambatan fisik, kondisi morfologi, dan keterbatasan alur dapat memengaruhi keselamatan serta kelancaran pelayaran [3]. Selain itu, studi lokal mengenai arus dan kedalaman di bawah Jembatan Mahakam juga menegaskan bahwa kondisi arus merupakan komponen penting dalam peningkatan keselamatan pelayaran di area tersebut [8]. Dengan demikian, temuan pada penelitian ini menunjukkan bahwa kesulitan olah gerak di bawah Jembatan Mahakam tidak hanya disebabkan oleh keterbatasan lebar alur, tetapi juga oleh interaksi antara ruang sempit, arus sekitar pilar, dan respons olah gerak kapal tunda-tongkang.

Penilaian tiga nahkoda berpengalaman memperkuat interpretasi hasil AIS. Para nahkoda menilai bahwa arus sungai, keterbatasan ruang, kepadatan lalu lintas, serta kebutuhan pengendalian kecepatan merupakan faktor penyulit utama dalam proses pengolongan. Kecepatan 3–5 knot dinilai lebih sesuai untuk menjaga kendali manuver saat melewati area jembatan. Temuan ini memperlihatkan bahwa data AIS dan expert judgment saling melengkapi. AIS memberikan bukti lintasan aktual dan perubahan COG, sedangkan penilaian nahkoda memberikan konteks operasional mengenai penyebab koreksi haluan dan

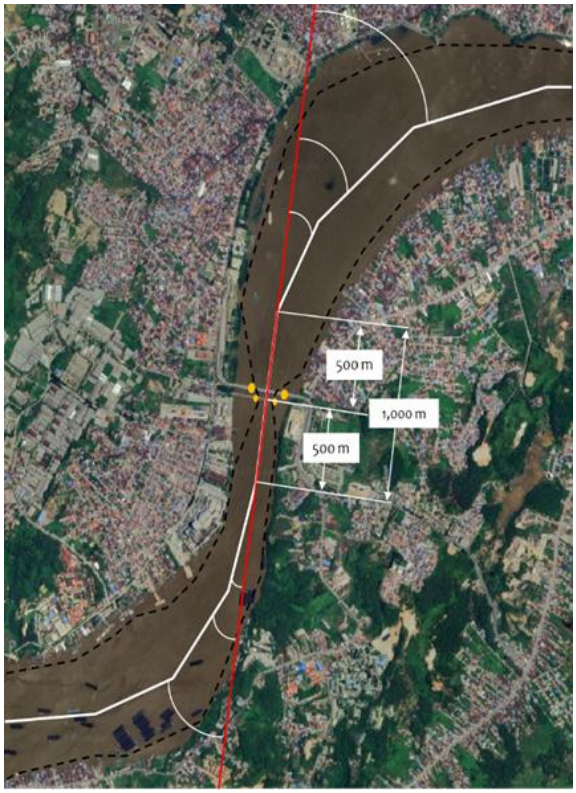
strategi pengendalian kapal di lapangan. Visualisasi dinamika arus Sungai Mahakam dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Visualisasi Dinamika Arus Sungai terhadap Kapal Tunda dan Tongkang.
Sumber: [8]

3.3. Evaluasi Alur Rekomendasi dan Simulasi MMG/MANSIM

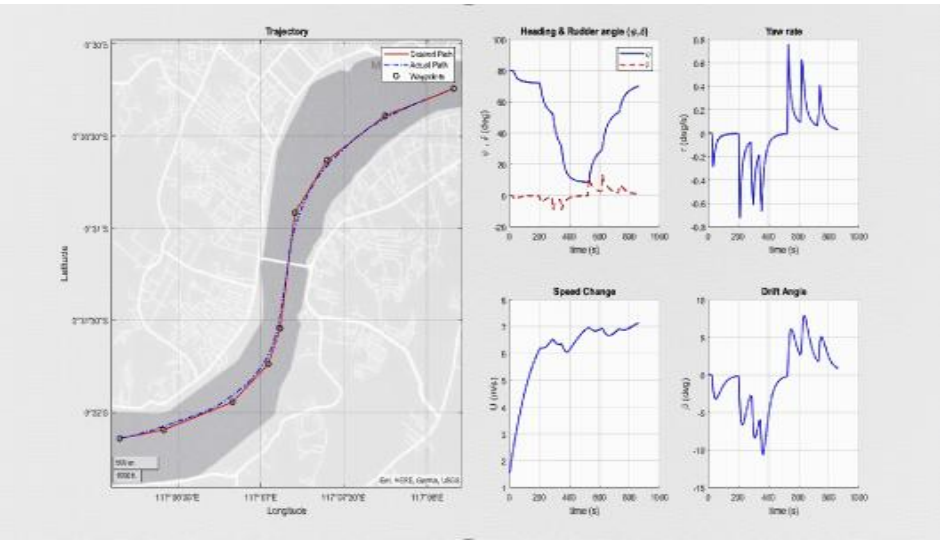
Berdasarkan analisis lintasan AIS, kondisi ruang aman, dan pengaruh arus, penelitian ini merancang alur rekomendasi dengan pendekatan lurus sekitar 500 m sebelum dan 500 m sesudah jembatan. Prinsip ini digunakan untuk memberikan ruang yang cukup bagi kapal dalam menyelaraskan haluan dan menstabilkan kecepatan sebelum memasuki zona kritis. Pendekatan tersebut sejalan dengan rekomendasi bahwa rute pelayaran di bawah jembatan sebaiknya dibuat selurus dan sepanjang mungkin untuk meminimalkan kebutuhan olah gerak yang tajam sebelum kapal melewati struktur jembatan [15]. Gambar 5 merupakan representasi dari rute rekomendasi yang kemudian dianalisis lebih lanjut ke dalam aplikasi MANSIM.



Gambar 5. Rekomendasi Alur Pelayaran Melintasi Jembatan Mahakam

Panjang pendekatan lurus 500 m sebelum dan sesudah jembatan tidak ditetapkan sebagai nilai final hasil optimasi simulasi, melainkan sebagai rekomendasi teknis awal sesuai [15]. Nilai tersebut dirumuskan berdasarkan pertimbangan geometri alur, kebutuhan penyelarasan haluan sebelum memasuki bukaan jembatan, pola lintasan AIS, serta masukan operasional nakhoda. Simulasi MANSIM kemudian digunakan untuk memeriksa respons awal model kapal terhadap rancangan alur tersebut, bukan untuk membuktikan bahwa 500 m merupakan satu-satunya panjang pendekatan yang optimal. Rancangan alur tersebut kemudian diuji menggunakan MANSIM berbasis model MMG 3-DOF (three degree of freedom). Simulasi ini digunakan untuk melihat respons awal model kapal terhadap alur rekomendasi, khususnya melalui parameter heading, rudder angle, yaw rate, speed change, dan drift angle. Hasil visualisasi lintasan dan respons olah gerak ditampilkan pada Gambar 6.

Panjang pendekatan lurus 500 m sebelum dan sesudah jembatan tidak ditetapkan sebagai nilai final hasil optimasi simulasi, melainkan sebagai rekomendasi teknis awal sesuai [15]. Nilai tersebut dirumuskan berdasarkan pertimbangan geometri alur, kebutuhan penyelarasan haluan sebelum memasuki bukaan jembatan, pola lintasan AIS, serta masukan operasional nakhoda. Simulasi MANSIM kemudian digunakan untuk memeriksa respons awal model kapal terhadap rancangan alur tersebut, bukan untuk membuktikan bahwa 500 m merupakan satu-satunya panjang pendekatan yang optimal. Rancangan alur tersebut kemudian diuji menggunakan MANSIM berbasis model MMG 3-DOF *(three degree of freedom)*. Simulasi ini digunakan untuk melihat respons awal model kapal terhadap alur rekomendasi, khususnya melalui parameter *heading, rudder angle, yaw rate, speed change*, dan *drift angle*. Hasil visualisasi lintasan dan respons olah gerak ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Hasil simulasi *software* MANSIM dari Desain Rancangan Alur Pelayaran di bawah Jembatan Mahakam

Simulasi MANSIM menggunakan *input* lintasan alur rekomendasi, kecepatan awal sekitar 1,5 m/s atau 3 knot, waktu simulasi sekitar 900 s, serta model kapal *ferry single-propeller* atau *single-rudder* yang tersedia dalam perangkat lunak. *Input* ini tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan konfigurasi hidrodinamik penuh kapal tunda-tongkang, tetapi digunakan untuk mengevaluasi respons awal lintasan terhadap alur rekomendasi. *Output* simulasi yang dianalisis meliputi jarak lintasan aktual, selisih terhadap lintasan rencana, *heading aktual, rudder angle, yaw rate, speed change, dan drift angle* sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Parameter Kuantitatif Hasil Simulasi MANSIM

No.	Parameter Simulasi	Nilai Hasil Simulasi	Interpretasi
1.	Waktu simulasi	±900 s atau ±15 menit	Model kapal menyelesaikan lintasan simulasi dalam rentang waktu yang sesuai dengan *output* MANSIM
2.	Jarak lintasan aktual	5600,09 m	Menunjukkan jarak tempuh model kapal pada alur simulasi
3.	Jarak lintasan rencana	5674,12 m	Menunjukkan panjang alur rekomendasi yang digunakan sebagai acuan simulasi
4.	Selisih lintasan aktual terhadap rencana	74,02 m atau ±1,31%	Deviasi jarak relatif kecil terhadap total lintasan, sehingga lintasan aktual masih mengikuti alur rencana secara umum
5.	*Heading* aktual	±8° sampai ±80°	Model kapal melakukan perubahan *heading* besar untuk mengikuti bentuk alur sungai yang berbelok
6.	Rentang perubahan *heading*	±72°	Menunjukkan bahwa alur sungai membutuhkan perubahan arah signifikan sebelum dan sesudah area jembatan
7.	*Rudder angle* maksimum	±+14°	Koreksi kemudi positif masih berada pada tingkat moderat
8.	*Rudder angle* minimum	±−10°	Menunjukkan adanya koreksi kemudi berlawanan arah saat kapal menyesuaikan lintasan
9.	*Yaw rate* maksimum	±+0,8°/s	Respons rotasi positif terjadi saat kapal mengikuti perubahan arah alur
10.	*Yaw rate* minimum	±−1,0°/s	Respons rotasi negatif terjadi pada fase koreksi heading sebelum kapal kembali stabil
11.	Kecepatan awal	±1,5 m/s atau ±3,0 knot	Sesuai dengan kecepatan awal rendah pada skenario simulasi
12.	Kecepatan maksimum	±7,3 m/s atau ±14,2 knot	Kecepatan meningkat sepanjang simulasi sehingga perlu ditafsirkan sebagai *output* model, bukan kecepatan operasional aktual yang direkomendasikan
13.	Kecepatan rata-rata berdasarkan jarak/waktu	±6,16 m/s atau ±11,97 knot	Dihitung dari jarak aktual 5600,09 m dan waktu 15,155 menit
14.	*Drift angle* maksimum	±+6,5°	*Drift* positif masih berada dalam rentang moderat
15.	*Drift angle* minimum	±−11°	Terdapat *drift* negatif sesaat yang sedikit melebihi ±10°, menunjukkan adanya fase koreksi lateral yang perlu diperhatikan
16.	Status interpretasi	*Preliminary*/indikatif	Simulasi menggunakan model *ferry single-propeller/single-rudder* sebagai proksi, bukan model hidrodinamik penuh kapal tunda-tongkang

Sumber: *software* MANSIM.

Seluruh interpretasi hasil simulasi dalam penelitian ini didasarkan pada output model MANSIM yang menggunakan ferry single-propeller/single-rudder sebagai proksi. Interpretasi tersebut tidak boleh dibaca sebagai representasi langsung dari karakteristik hidrodinamik kapal tunda–tongkang aktual, melainkan sebagai uji awal terhadap kelayakan geometrik dan kecenderungan respons manuver pada alur rekomendasi.

Berdasarkan hasil simulasi MANSIM, model kapal mampu mengikuti alur rekomendasi dengan selisih jarak sekitar 74,02 m dari total lintasan rencana 5674,12 m, atau sekitar 1,31%. Grafik *heading* dan *rudder angle* menunjukkan bahwa kapal melakukan perubahan haluan yang besar, yaitu dari haluan sekitar 080° hingga sekitar 008°, sebelum kembali menuju haluan 070°. Hal ini menunjukkan bahwa lintasan sungai yang berbelok membutuhkan perubahan arah yang signifikan. Namun, koreksi *rudder angle* masih berada pada kisaran sekitar −10° hingga +14° sehingga tidak menunjukkan kebutuhan koreksi kemudi yang ekstrem dalam skenario dasar. Grafik *yaw rate* menunjukkan respons rotasi kapal berada pada kisaran sekitar −1,0°/s hingga +0,8°/s. Sementara itu, *drift angle* menunjukkan nilai maksimum sekitar +6,5° dan minimum sekitar −11°. Sebagian besar *drift angle* masih berada dalam rentang moderat, tetapi terdapat drift negatif sesaat yang sedikit melebihi ±10° sehingga area tersebut perlu diperhatikan sebagai indikasi potensi koreksi lateral yang lebih tinggi.

Dengan demikian, simulasi memberikan indikasi awal bahwa alur rekomendasi dapat diikuti secara relatif stabil, tetapi tetap membutuhkan pengendalian haluan yang hati-hati, terutama pada segmen perubahan arah dan area dengan potensi *drift lateral*. Perlu dicatat bahwa hasil ini merupakan skenario dasar MANSIM dengan model *ferry single-propeller* atau *single-rudder* sebagai proksi. Oleh karena itu, hasil simulasi tidak dimaksudkan sebagai prediksi penuh terhadap dinamika kapal tunda-tongkang, melainkan sebagai *preliminary assessment* terhadap kelayakan geometrik dan respons manuver awal dari alur rekomendasi.

3.4. Perbandingan dengan Studi Terdahulu

Temuan penelitian ini memperkuat hasil studi terdahulu yang menempatkan area jembatan sebagai zona navigasi berisiko tinggi. Referensi [4] menunjukkan bahwa perairan dekat jembatan memiliki karakteristik yang khas dan dapat dianalisis menggunakan data AIS. Pada penelitian ini, AIS digunakan untuk menunjukkan bahwa kapal tunda-tongkang di Jembatan Mahakam mengalami koreksi haluan

berulang saat melewati ruang navigasi yang terbatas. Dengan demikian, penelitian ini memperluas penggunaan AIS dari sekadar pemetaan lintasan menjadi evaluasi metrik kesulitan navigasi berbasis perilaku lalu lintas aktual.

Penelitian ini juga mendukung kajian [5] yang menekankan pentingnya pendekatan probabilistik dan karakteristik lalu lintas dalam penilaian risiko tumbukan kapal dengan jembatan sungai. Namun, berbeda dari studi yang berfokus pada probabilitas tumbukan atau beban terhadap struktur jembatan, penelitian ini lebih menekankan pada indikator operasional sebelum kecelakaan terjadi, seperti perubahan COG, ruang aman pelayaran, arus sekitar pilar, dan kebutuhan koreksi haluan. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini terletak pada penguatan pendekatan preventif dalam rekayasa lalu lintas maritim, yaitu membaca tanda-tanda kesulitan olah gerak dari data operasional sebelum risiko berkembang menjadi insiden.

Hasil penelitian ini juga memiliki keterkaitan dengan studi peringatan dini terhadap jembatan dan kapal tunda-tongkang yang menekankan perlunya metode penilaian risiko berbasis kondisi aktual kapal dan lingkungan sekitar jembatan [6]. Dalam konteks Jembatan Mahakam, indikator seperti perubahan COG berulang, deviasi lintasan, kecepatan rendah, dan kedekatan kapal terhadap pilar dapat dikembangkan sebagai parameter pengawasan VTS. Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan penilaian risiko tabrakan di perairan pedalaman yang mulai mengintegrasikan AIS dan sumber data lain untuk memperkuat deteksi kondisi berbahaya [7]. Selain itu, model pengambilan keputusan darurat pada kecelakaan di sungai menunjukkan pentingnya dukungan informasi cepat dan terstruktur bagi otoritas ketika menghadapi potensi insiden pelayaran [17].

Dari sisi lokal, penelitian ini melengkapi studi mengenai pola arus dan kedalaman di bawah Jembatan Mahakam [8]. Jika studi tersebut menekankan aspek hidrodinamik dan kondisi fisik perairan, penelitian ini menambahkan perspektif rekayasa lalu lintas maritim melalui analisis lintasan AIS, ruang aman, persepsi nahkoda, dan simulasi olah gerak. Integrasi ini penting karena keselamatan navigasi di area jembatan tidak dapat dijelaskan hanya dari satu aspek. Risiko muncul dari interaksi antara kapal, alur, arus, struktur jembatan, pengambilan keputusan nahkoda, dan pengawasan lalu lintas.

3.5. Implikasi Keselamatan dan Rekomendasi Operasional

Implikasi dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa area di bawah Jembatan Mahakam perlu diperlakukan sebagai zona pengawasan khusus bagi kapal tunda-tongkang. Dari sisi VTS, pengawasan dapat difokuskan pada kapal yang menunjukkan perubahan COG berulang, deviasi lintasan dari alur rekomendasi, kecepatan yang tidak sesuai saat mendekati jembatan, serta kedekatan kapal terhadap pilar. Indikator tersebut dapat digunakan sebagai dasar awal untuk membangun sistem peringatan dini berbasis AIS, terutama pada saat lalu lintas padat, arus kuat, atau visibilitas terbatas. Penguatan sistem peringatan dini di area jembatan dan kapal tunda-tongkang sejalan dengan kebutuhan peningkatan keselamatan pada perairan sungai yang memiliki risiko tumbukan dengan struktur tetap [6][17], serta sejalan dengan pentingnya pemanfaatan VTS dalam mendukung pengawasan lalu lintas kapal di perairan Indonesia [18].

Dalam konteks nasional, kajian kecelakaan kapal di perairan Indonesia menunjukkan bahwa pemetaan karakteristik kecelakaan penting digunakan untuk memahami pola risiko dan mendukung penyusunan strategi keselamatan pelayaran [19]. Upaya peningkatan keselamatan pelayaran juga perlu memperhatikan aspek sumber daya manusia, standar operasi, dan peningkatan kapasitas operator kapal sebagaimana ditekankan dalam kajian keselamatan pelayaran di Indonesia [20]. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar awal bagi penguatan pengawasan VTS, penyusunan SOP pengolongan, dan pelatihan olah gerak kapal tunda-tongkang pada alur sungai yang memiliki jembatan dan arus lateral.

Secara operasional, rekomendasi pendekatan lurus 500 m sebelum dan sesudah jembatan dapat dipertimbangkan sebagai dasar penyusunan peta alur rekomendasi, panduan operasional, dan SOP pengolongan kapal tunda-tongkang. Parameter awal peringatan dini VTS dapat mencakup perubahan COG berulang per satuan jarak, deviasi lintasan terhadap alur rekomendasi, kecepatan kapal yang terlalu rendah atau terlalu tinggi pada zona pendekatan, serta kedekatan kapal terhadap pilar jembatan. Dari sisi kompetensi operator, pelatihan olah gerak berbasis skenario lokal Sungai Mahakam perlu dikembangkan dengan memasukkan skenario arus lateral, pengolongan pada malam hari, visibilitas terbatas, kepadatan

lalu lintas, kondisi tongkang bermuatan, komunikasi dengan VTS, dan pengambilan keputusan pada ruang pelayaran terbatas.

3.6. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menafsirkan hasil. Pertama, data AIS yang digunakan merupakan studi kasus pada satu hari pengamatan, yaitu 25 Agustus 2024. Kondisi tersebut menyebabkan hasil penelitian belum merepresentasikan variasi musiman, variasi pasang surut, perubahan debit sungai, serta dinamika lalu lintas jangka panjang. Oleh karena itu, hasil analisis perlu dipahami sebagai gambaran awal terhadap kondisi operasional pada periode pengamatan tersebut.

Kedua, *expert judgment* hanya melibatkan tiga nahkoda berpengalaman. Jumlah tersebut tidak dimaksudkan untuk menghasilkan generalisasi statistik terhadap seluruh nahkoda kapal tunda-tongkang di Sungai Mahakam, melainkan digunakan sebagai *qualitative triangulation* untuk memperkuat interpretasi hasil AIS dan kondisi operasional lapangan. Penelitian lanjutan perlu melibatkan jumlah responden yang lebih besar, termasuk nahkoda, mualim, operator VTS, dan otoritas pelayaran.

Ketiga, simulasi MMG atau MANSIM menggunakan model *ferry single-propeller* atau *single-rudder* sebagai proksi karena keterbatasan model kapal pada perangkat lunak. Dengan demikian, hasil simulasi tidak merepresentasikan secara penuh dinamika hidrodinamik rangkaian kapal tunda-tongkang, terutama terkait interaksi antara kapal tunda, tongkang, tali atau *towline*, arus lateral, dan respons olah gerak pada beban muatan berbeda. Hasil simulasi dalam penelitian ini diposisikan sebagai *preliminary assessment* yang bersifat indikatif terhadap kelayakan geometrik alur rekomendasi.

Keempat, penelitian ini belum memasukkan variasi kondisi lingkungan secara menyeluruh, seperti musim hujan, musim kemarau, pasang surut, visibilitas rendah, kepadatan lalu lintas pada jam berbeda, serta variasi arah dan kecepatan arus ekstrem. Kondisi tersebut dapat memengaruhi tingkat kesulitan olah gerak kapal tunda-tongkang secara signifikan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan menggunakan periode AIS yang lebih panjang, model hidrodinamika yang lebih rinci, simulasi kapal tunda-tongkang yang lebih spesifik, serta validasi melalui data operasional lapangan yang lebih lengkap seperti tinjauan *ship domain* dengan pilar jembatan sebagai proksi terhadap kapal tunda-tongkang.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa area di bawah Jembatan Mahakam merupakan zona navigasi kritis bagi kapal tunda-tongkang. Tingkat kesulitan olah gerak ditunjukkan oleh ruang aman pelayaran sekitar 81,6 m dari lebar efektif 90 m, arus sekitar pilar sebesar 0,330–0,420 m/s, serta koreksi haluan hingga enam kali pada lintasan kapal. Analisis AIS juga menunjukkan hubungan negatif yang signifikan antara kecepatan rata-rata kapal dan tingkat koreksi haluan per *nautical mile* sehingga kecepatan rendah pada area jembatan perlu dipahami sebagai kondisi yang membutuhkan pengendalian manuver lebih hati-hati, bukan sebagai indikasi beban navigasi yang lebih ringan. *Expert judgment* nahkoda menguatkan bahwa arus, keterbatasan ruang, dan kepadatan lalu lintas merupakan faktor utama yang memengaruhi kesulitan pengolongan kapal tunda-tongkang di Jembatan Mahakam.

Kontribusi orisinal penelitian ini adalah integrasi AIS *trajectory analysis, safe navigation width, expert judgment*, dan MMG atau MANSIM *simulation* secara simultan pada kasus kapal tunda-tongkang di perairan pedalaman Indonesia. Secara ilmiah, penelitian ini memperkaya pendekatan rekayasa lalu lintas maritim dengan menunjukkan bahwa indikator operasional berbasis AIS, seperti perubahan COG, koreksi haluan, deviasi lintasan, dan kecepatan kapal, dapat digunakan sebagai proksi awal untuk menilai tingkat kesulitan olah gerak sebelum kecelakaan terjadi. Pendekatan ini dapat diadopsi pada lokasi jembatan sungai lainnya di Indonesia yang memiliki karakteristik alur sempit, arus lateral, dan lalu lintas kapal tunda-tongkang.

Rekomendasi operasional yang dapat dikembangkan dari penelitian ini meliputi penyusunan peta alur rekomendasi berskala operasional, misalnya 1:10.000 yang menunjukkan jalur pendekatan lurus sekitar 500 m sebelum dan sesudah jembatan; penetapan parameter awal peringatan dini VTS, seperti perubahan COG lebih dari 10° per menit, deviasi lintasan lebih dari 15 m dari alur rekomendasi, dan kecepatan di

luar rentang 3–5 knot pada zona pendekatan; serta pengembangan modul pelatihan olah gerak berbasis skenario lokal Sungai Mahakam. Modul tersebut perlu mencakup skenario arus lateral, *drift angle*, koreksi haluan berulang, visibilitas terbatas, malam hari, kepadatan lalu lintas, dan kondisi tongkang bermuatan agar nahkoda dan awak kapal lebih siap menghadapi operasi pengolongan di ruang pelayaran terbatas serupa, mengingat telah banyak terjadi kecelakaan karena kapal tunda dan tongkang menubruk ponton atau kaki jembatan di wilayah perairan sungai lain.

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa olah gerak kapal tunda-tongkang di bawah Jembatan Mahakam memiliki tingkat kesulitan yang dipengaruhi oleh kombinasi faktor lintasan, perubahan COG, koreksi haluan berulang, kecepatan rendah, deviasi lintasan, keterbatasan ruang aman, serta kondisi arus di sekitar pilar jembatan. Hasil integrasi data AIS, expert judgment, dan simulasi MMG/MANSIM menunjukkan bahwa area sekitar jembatan merupakan ruang navigasi yang membutuhkan perhatian khusus karena kapal tunda-tongkang harus mempertahankan lintasan yang stabil dalam ruang manuver yang terbatas. Temuan ini menegaskan bahwa risiko navigasi di bawah Jembatan Mahakam tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik kapal, tetapi juga oleh kondisi perairan, arus lokal, struktur jembatan, dan kebutuhan koreksi haluan secara berulang.

Sebagai tindak lanjut dari hasil tersebut, otoritas pelayaran dan VTS Samarinda disarankan untuk memperkuat pengawasan lalu lintas kapal tunda-tongkang di sekitar Jembatan Mahakam, terutama terhadap kapal yang menunjukkan perubahan COG berulang, deviasi lintasan, kecepatan yang tidak sesuai saat mendekati jembatan, serta kedekatan kapal terhadap pilar. Rekomendasi alur dengan pendekatan lurus sekitar 500 m sebelum dan sesudah jembatan dapat dipertimbangkan sebagai dasar awal pengaturan alur rekomendasi, panduan operasional, dan penyusunan prosedur pelayaran pada area kritis. Namun demikian, rekomendasi ini tetap memerlukan validasi lebih lanjut melalui data AIS multi-periode, uji operasional bersama VTS, dan masukan dari nahkoda berpengalaman.

Selain itu, VTS dapat mempertimbangkan pengembangan parameter awal peringatan dini berbasis AIS yang masih perlu diuji dan dikalibrasi lebih lanjut. Parameter tersebut dapat mencakup perubahan COG berulang, deviasi lintasan terhadap alur rekomendasi, kecepatan kapal di bawah 3–5 knot pada zona pendekatan, serta kedekatan kapal terhadap pilar jembatan. Sebagai nilai indikatif awal, perubahan COG lebih dari 10° per menit atau deviasi lintasan lebih dari 15 m dapat digunakan sebagai kandidat ambang peringatan, dengan catatan bahwa nilai tersebut harus divalidasi melalui data operasional yang lebih luas dan penilaian ahli.

Penguatan keselamatan navigasi juga perlu didukung melalui peningkatan sarana bantu navigasi, sistem peringatan berbasis AIS, serta pelatihan olah gerak khusus bagi nahkoda kapal tunda-tongkang yang beroperasi di Sungai Mahakam. Pelatihan tersebut sebaiknya berbasis skenario lokal, meliputi pengaruh arus lateral, drift angle, koreksi haluan berulang, visibilitas terbatas, pelayaran malam hari, kepadatan lalu lintas, komunikasi dengan VTS, serta kondisi tongkang bermuatan. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan periode data AIS yang lebih panjang, jumlah expert judgment yang lebih besar, pemodelan hidrodinamika yang lebih rinci, serta model simulasi yang secara khusus merepresentasikan konfigurasi kapal tunda-tongkang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada VTS Samarinda dan para nahkoda yang telah memberikan dukungan data, informasi operasional, dan masukan dalam pelaksanaan penelitian ini.

Deklarasi

Kontribusi Penulis

Seluruh penulis berkontribusi secara setara sebagai kontributor utama dalam artikel ini. Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir artikel.

Pernyatan Pendanaan

Penelitian ini didanai oleh Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Indonesia.

Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang diketahui yang dapat dianggap memengaruhi penelitian yang dilaporkan dalam artikel ini.

Penggunaan Kecerdasan Artifisial atau Teknologi Berbantuan Kecerdasan Artifisial

Dalam proses penyusunan karya ini, penulis tidak menggunakan alat, layanan, atau teknologi berbantuan kecerdasan artifisial. Seluruh isi karya disusun, ditelaah, dan dipertanggungjawabkan sepenuhnya oleh penulis.

Daftar Pustaka

[1] C. P. Camargo-Díaz, E. Paipa-Sanabria, J. A. Zapata-Cortes, A. M. Briceño-Chaves, dan C. F. Serna-Castaño, "Review of Financing Mechanisms to Promote Decarbonization Alternatives in Rail and Inland Waterway Transport," *Sustainability*, vol. 15, no. 2, hlm. 966, Jan 2023, doi: 10.3390/su15020966.

[2] A. A. Tjahjono, "The Cruise/Vessel Characteristics Of Inland Waterways," *IWTJ: International Water Transport Journal,* vol. 2, no. 1, hlm. 10–21, 2020.

[3] M. Schoeneich, M. Habel, D. Szatten, D. Absalon, dan J. Montewka, "An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways," *Water (Basel).*, vol. 15, no. 1, hlm. 141, Des 2022, doi: 10.3390/w15010141.

[4] L. Jinyu, L. Lei, C. Xiumin, H. Wei, L. Xinglong, dan L. Cong, "Automatic identification system data-driven model for analysis of ship domain near bridge-waters," *Journal of Navigation*, vol. 74, no. 6, hlm. 1284–1304, Nov 2021, doi: 10.1017/S0373463321000461.

[5] W. Zhang, S. Liu, W. Luo, L. Wang, B. Geng, dan Z. Zheng, "A New Approach for Probabilistic Risk Assessment of Ship Collision with Riverside Bridges," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, no. 1, Jan 2020, doi: 10.1155/2020/8357494.

[6] C. Fan, X. He, L. Huang, H. Li, dan T. Wen, "Research on Collision Warning Method for Ship-Bridge Based on Safety Potential Field," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 19, hlm. 9089, Okt 2024, doi: 10.3390/app14199089.

[7] H. Ding dan J. Weng, "A robust assessment of inland waterway collision risk based on AIS and visual data fusion," *Ocean Engineering*, vol. 307, hlm. 118242, Sep 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.118242.

[8] N. Kurniadin, R. K. Insanu, F. Fadlin, dan A. A. M. Sutaji, "Studi Pemodelan Pola Arus dan Kedalaman Sungai Mahakam di Bawah Jembatan Mahakam Kembar Sebagai Upaya untuk Meningkatkan Keselamatan Pelayaran," *GEOID*, vol. 19, no. 2, hlm. 224–235, Jun 2024, doi: 10.12962/geoid.v19i2.1257.

[9] C. Wang, M. Diao, S. Tong, L. Jiang, X. Tang, dan P. Jiang, "Numerical simulation study on ship manoeuvrability in mountainous rivers: Comprehensively considering effects of nonuniform flow, shallow water, narrow banks, winds and waves," *Ocean Engineering*, vol. 306, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.118109.

[10] S. Lovato, A. Kirichek, S. L. Toxopeus, J. W. Settels, dan G. H. Keetels, "Validation of the resistance of a plate moving through mud: CFD modelling and towing tank experiments," *Ocean Engineering*, vol. 258, hlm. 111632, Agu 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111632.

[11] O. F. Sukas, O. K. Kinaci, dan S. Bal, "Theoretical background and application of MANSIM for ship maneuvering simulations," *Ocean Engineering*, vol. 192, hlm. 106239, Nov 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106239.

[12] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*. Washington, DC: AASHTO, 2009.

[13] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Seventh Edition. Washington, DC, USA: ASHTO, 2014.

[14] H. Li, H. Jiao, dan Z. Yang, "AIS data-driven ship trajectory prediction modelling and analysis based on machine learning and deep learning methods," *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, vol. 175, hlm. 103152, Jul 2023, doi: 10.1016/j.tre.2023.103152.

[15] Y.-S. Park, Y.-S. Lee, J.-S. Park, I.-S. Cho, dan U. Lee, "A Proposal of Bridge Design Guideline by Analysis of Marine Accident Parameters occurred at Bridges Crossing Navigable Waterways," *Journal of Korean navigation and port research*, vol. 32, no. 10, hlm. 743–750, Des 2008, doi: 10.5394/KINPR.2008.32.10.743.

[16] J. R. Kurniawan Bokau, P. Young-Soo, dan K. Dae-Won, "Implementing Buffer Zones Around Nusa Penida Island in the Lombok Strait to Enhance Maritime Safety & Environmental Protection," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1461, no. 1, hlm. 012046, Mar 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1461/1/012046.

[17] B. Wu, C. Zhao, T. L. Yip, dan D. Jiang, "A novel emergency decision-making model for collision accidents in the Yangtze River," *Ocean Engineering*, vol. 223, hlm. 108622, Mar 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108622.

[18] D. Haryanto, M. Setiyono, dan M. A. Irfandi H, "Effectiveness Of Vessel Traffic Service Utilization By Commercial Vessels In Sorong Port," *Jurnal Teknik Industri: Jurnal Hasil Penelitian dan Karya Ilmiah dalam Bidang Teknik Industri*, vol. 10, no. 2, hlm. 545–551, Jan 2025, doi: 10.24014/jti.v10i2.35682.

[19] S. Hasugian, A. A. I. Sri Wahyuni, M. Rahmawati, dan A. Arleiny, "Pemetaan Karakteristik Kecelakaan Kapal di Perairan Indonesia Berdasarkan Investigasi KNKT," *Warta Penelitian Perhubungan*, vol. 29, no. 2, hlm. 229–240, Jul 2018, doi: 10.25104/warlit.v29i2.521.

[20] J. Malisan dan M. Y. Jinca, "Kajian Strategi Peningkatan Keselamatan Pelayaran Kapal-Kapal Tradisional," *Warta Penelitian Perhubungan*, vol. 24, no. 3, hlm. 218–231, Mei 2019, doi: 10.25104/warlit.v24i3.1008.