

EARLY WARNING AND REAL-TIME SHIP TRACKING USING AIS DATA AND SMARTPHONE GPS

PERINGATAN DINI DAN PELACAKAN KAPAL SECARA REAL-TIME MENGGUNAKAN DATA AIS DAN GPS SMARTPHONE

Supria¹, Wahyat², Ryci Rahmatil Fiska³

Politeknik Negeri Bengkalis, Jl. Bathin Alam, Sei. Alam, Bengkalis
phiya@polbeng.ac.id¹, wahyat@polbeng.ac.id², ryci@polbeng.ac.id³

Abstract - The high risk of maritime accidents in congested waters such as the Malacca Strait requires an affordable safety system specifically for small fishing vessels. This research proposes and evaluates a mobile-based early warning framework that integrates shore-based AIS data with fishermen's smartphone GPS. The system was tested under 3 operational scenarios using 4G cellular networks over a coastal area of Bengkalis, involving 60 collision simulation events and 180 API requests. Performance evaluation shows an average system latency of 2.3 seconds with a maximum latency of 4.8 seconds. The early warning mechanism successfully detected dangerous proximity (≤ 50 meters) with an accuracy of 93.3% and an error rate of 6.7%. Position Logging via JSON POST achieved a success rate of 96.1% during continuous operation for 2 hours. Although this study demonstrates improved situational awareness and reliable last-known position recording, the system currently uses distance-based detection and does not yet implement CPA/TCPA prediction, which remains future work. The framework contributes as a low-cost monitoring and early warning solution with potential support for SAR operations through reliable historical position data.

Keywords - AIS, Mobile GPS, Early Warning System, Low-Cost, Position Logging, Maritime Safety.

Abstrak - Risiko tinggi kecelakaan maritim di perairan padat seperti Selat Malaka memerlukan sistem keselamatan yang terjangkau khusus untuk kapal penangkap ikan kecil. Penelitian ini mengusulkan dan mengevaluasi kerangka kerja peringatan dini berbasis mobile yang mengintegrasikan data AIS berbasis darat dengan GPS smartphone nelayan. Sistem ini diuji dalam 3 skenario operasional menggunakan jaringan seluler 4G di wilayah pesisir Bengkalis, melibatkan 60 peristiwa simulasi tabrakan dan 180 permintaan API. Evaluasi kinerja menunjukkan latensi sistem rata-rata 2,3 detik dengan latensi maksimum 4,8 detik. Mekanisme peringatan dini berhasil mendeteksi jarak berbahaya (≤ 50 meter) dengan akurasi 93,3% dan tingkat kesalahan 6,7%. Perekaman posisi melalui JSON POST mencapai tingkat keberhasilan 96,1% selama operasi berkelanjutan selama 2 jam. Meskipun studi ini menunjukkan peningkatan kesadaran situasional dan pencatatan posisi terakhir yang andal, sistem saat ini menggunakan deteksi berbasis jarak dan belum mengimplementasikan prediksi CPA/TCPA, yang masih menjadi pekerjaan masa depan. Kerangka kerja ini berkontribusi sebagai solusi pemantauan dan peringatan dini berbiaya rendah dengan potensi dukungan untuk operasi SAR melalui data posisi historis yang andal. Translated with DeepL.com (free version)

Kata Kunci - AIS, GPS Mobile, Sistem Peringatan Dini, Biaya Rendah, Pencatatan Posisi, Keselamatan Maritim.

I. PENDAHULUAN

Automatic Identification System (AIS) telah diakui secara global sebagai instrumen vital dalam keselamatan navigasi, terutama untuk mencegah tubrukan antar kapal [1]. Awalnya, AIS dikembangkan sebagai sistem kapal-ke-kapal dan kapal-ke-darat yang beroperasi pada frekuensi VHF untuk mengirimkan data identitas, posisi, kecepatan, dan status navigasi secara otomatis. Namun, keterbatasan jangkauan sinyal terestrial dan biaya perangkat AIS yang tinggi (terutama transponder Kelas A atau B) menghambat implementasinya pada kapal-kapal kecil dan tradisional. Dalam dekade terakhir, perkembangan teknologi telah memungkinkan pemanfaatan data AIS shore-based yang diakselerasi oleh stasiun darat (Vessel Traffic Service/VTS atau Base Station) dan dapat diakses melalui Application Programming Interface (API). Inovasi ini membuka peluang untuk mengembangkan solusi penerimaan data AIS di lingkungan low-cost melalui integrasi dengan perangkat yang sudah dimiliki nelayan, seperti ponsel pintar, sehingga data lalu lintas kapal besar di sekitarnya dapat diproses secara real-time [2].

Berdasarkan data Badan Keamanan Laut (Bakamla) Indonesia, tercatat lebih dari 240 kasus kecelakaan laut terjadi sepanjang tahun 2020–2023, dengan Selat Malaka sebagai salah satu wilayah berisiko tinggi akibat kepadatan lalu lintas internasional dan aktivitas penangkapan ikan tradisional. Pada Juli 2025, dua nelayan Bengkalis dinyatakan hilang setelah perahu mereka tenggelam akibat gelombang tinggi dan tidak memiliki sistem pelacakan posisi yang memadai. Kondisi ini menunjukkan minimnya perlindungan teknologi navigasi bagi nelayan kecil, yang masih mengandalkan pengamatan visual dan intuisi semata.

Pengembangan sistem peringatan dini berbasis AIS telah menjadi fokus utama penelitian global, khususnya untuk kapal kecil, dengan penekanan pada solusi yang terjangkau dan berbasis mobile. Tinjauan literatur menunjukkan tiga tren utama yang mendasari usulan sistem ini. Pertama, pengembangan sistem keselamatan navigasi berbiaya rendah dan aplikasi di ponsel pintar (smartphone) untuk mencegah tubrukan menjadi perhatian utama, termasuk sistem bantuan berbasis internet seluler (mobile internet) untuk kapal nelayan [2] dan pengembangan model penghindaran tubrukan real-time berbasis deteksi kedekatan (proximity detection) seluler [1],[3]. Kedua, riset telah menguatkan pentingnya fusi dan analisis data lanjutan dengan mengintegrasikan data AIS dan GPS untuk prediksi lintasan kapal nelayan [4] serta analisis risiko tabrakan di perairan padat [5]. Ketiga, dukungan terhadap operasi penyelamatan dan pemantauan berbiaya rendah juga dieksplorasi, baik melalui optimasi operasi SAR menggunakan log data pelacakan historis di perangkat seluler [6] maupun melalui pengujian teknologi alternatif transmisi data posisi seperti LoRa [7] dan implementasi receiver AIS low-cost berbasis Software Defined Radio (SDR) [8]. Secara keseluruhan, literatur ini memvalidasi kebutuhan mendesak akan solusi integrasi AIS/GPS yang inovatif untuk meningkatkan keselamatan dan pengawasan kapal perikanan secara efektif dan ekonomis [9].

Melihat tingginya risiko kecelakaan di perairan padat, seperti Selat Malaka, dan kendala biaya perangkat navigasi canggih bagi nelayan tradisional, maka diusulkan " Peringatan Dini dan Pelacakan Kapal Secara Real-Time Menggunakan Data Ais dan Gps Smartphone" Inovasi (State-of-the-Art) dari kerangka kerja ini terletak pada fusi data low-cost dan fungsionalitas ganda kritis. Secara spesifik, inovasi ini menggabungkan pemanfaatan API AIS shore-based (dari stasiun darat) sebagai sumber data lalu lintas kapal besar dengan GPS internal ponsel pintar nelayan, sehingga secara efektif menghilangkan biaya perangkat transceiver AIS fisik dan memenuhi kriteria keterjangkauan (affordability). Selain menyediakan Peringatan Dini Tubrukan (Early Warning) real-time di ponsel (melalui perhitungan jarak terdekat berbasis distance threshold. Implementasi CPA/TCPA belum diterapkan pada tahap ini dan direncanakan sebagai pengembangan lanjutan), sistem ini juga secara kontinu melakukan Perekaman Riwayat Posisi GPS (Position Logging) setiap menit ke basis data, yang merupakan kontribusi signifikan dalam mendukung tim SAR dengan menyediakan data posisi terakhir kapal yang hilang atau tenggelam.

II. SIGNIFIKASI STUDI

Tren penelitian dalam keselamatan maritim global berfokus pada pengembangan solusi yang terjangkau (low-cost) dan dapat diakses oleh kapal perikanan kecil yang secara historis memiliki keterbatasan teknologi. Kebutuhan ini mendorong munculnya studi yang memanfaatkan perangkat sehari-hari dan teknologi komunikasi baru. Misalnya, Zhen mengusulkan sistem bantuan keselamatan navigasi berbiaya rendah berdasarkan AIS dan internet seluler untuk kapal nelayan [2], sementara Wang dan Wu (2019) mengembangkan sistem prediksi tabrakan berbasis smartphone menggunakan data AIS. Pendekatan low-cost juga dieksplorasi melalui perangkat keras alternatif, seperti pemanfaatan Software Defined Radio (SDR) untuk receiver AIS [8] dan implementasi jaringan LoRa (Long Range) untuk transmisi data posisi kapal sebagai alternatif AIS yang hemat biaya [7]. Inovasi perangkat lunak juga ditekankan, seperti penelitian Depandi Enda dan Nadia (2025) yang fokus pada pengembangan aplikasi berbasis Android, menunjukkan pentingnya platform mobile dalam mendukung kebutuhan operasional maritim yang praktis. Secara keseluruhan, literatur ini memvalidasi bahwa keterjangkauan teknologi melalui platform mobile adalah jalur yang paling menjanjikan untuk meningkatkan keselamatan pelayaran non-wajib AIS.

Inti dari peningkatan keselamatan adalah kemampuan untuk memproses data kapal secara real-time untuk mencegah tabrakan (collision avoidance) dan memantau posisi. Banyak penelitian dalam lima tahun terakhir berfokus pada teknik fusi data AIS dan GPS untuk meningkatkan akurasi dan fungsi sistem peringatan. Luo et al. (2022) menyajikan model penghindaran tabrakan real-time berbasis deteksi kedekatan seluler, yang vital untuk skenario kepadatan tinggi. Sementara itu, penelitian pada Intelligent Collision Avoidance System menggunakan sensor lain seperti ultrasonik dan modul GSM/GPS menekankan pentingnya respons darurat otomatis (ResearchGate, 2020). Dalam hal analitik lanjutan, fokus telah bergeser ke prediksi lintasan, di mana model GRU (Gate Recurrent Unit) digunakan untuk memprediksi pergerakan kapal berdasarkan data AIS (MDPI, 2020), dan integrasi data AIS/GPS telah digunakan untuk prediksi lintasan kapal nelayan (Liu et al., 2020). Lebih lanjut, validasi model risiko tabrakan di perairan padat melalui penambangan data AIS dan radar telah dilakukan (Zou et al., 2021; Bozic & Jajac, 2021), menunjukkan bahwa integrasi berbagai sumber data (terestrial dan satelit) diperlukan untuk analisis risiko yang komprehensif. Upaya ini menunjukkan bahwa peringatan dini yang efektif harus didasarkan pada perhitungan kinematika yang cepat dan algoritma yang dijalankan pada platform mobile.

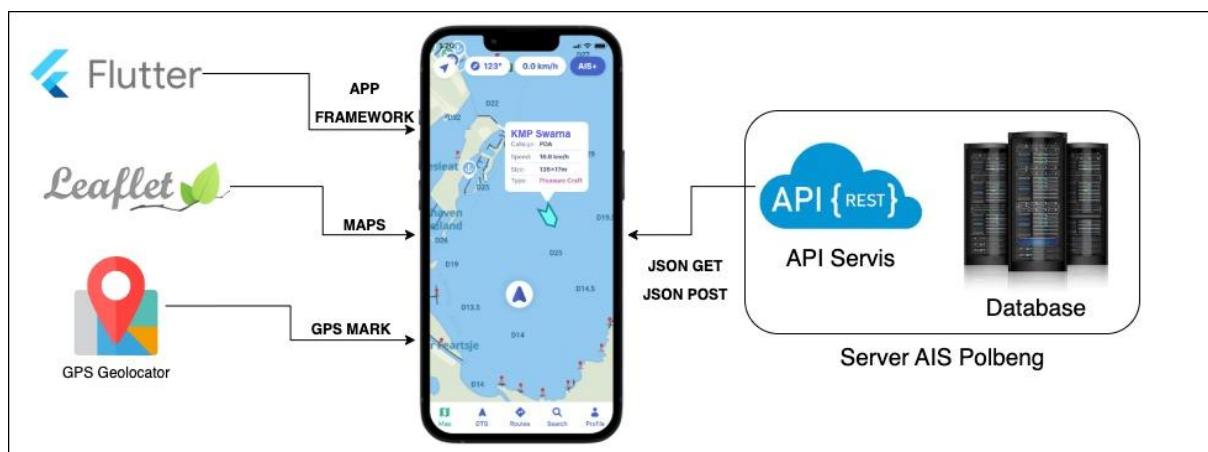
Selain fungsi peringatan dini, penelitian juga menekankan perlunya sistem pelacakan untuk mendukung operasi Search and Rescue (SAR) dan manajemen perikanan berkelanjutan. Keterbatasan pada kapal kecil sering mengakibatkan tidak adanya data posisi terakhir, menjadi kendala krusial saat insiden terjadi [9]. Untuk mengatasi hal ini, [6] menyoroti pentingnya perekaman log data pelacakan historis di perangkat seluler untuk mengoptimalkan operasi SAR. Berbagai studi juga telah mengusulkan dan mengevaluasi sistem pemantauan terintegrasi yang tidak hanya mencatat posisi tetapi juga kondisi lingkungan dan kapal [10] memastikan sistem tersebut modular dan hemat biaya untuk penyebarluasan luas [11]. Lebih lanjut, penelitian telah mengeksplorasi pengembangan perangkat AIS Mobile berbasis GPS dan sensor tekanan udara dengan evaluasi Packet Delivery Ratio (PDR) untuk memastikan keandalan pengiriman data posisi real-time dari kapal nelayan ke platform IoT [12], [13]. Kontribusi ini menegaskan bahwa solusi mobile harus mencakup mekanisme yang andal untuk merekam dan mentransmisikan data lokasi kapal secara berkala, menjadikannya aset penting bagi otoritas maritim dan keselamatan jiwa di laut.

A. Pendekatan penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem (system engineering) dan pengembangan aplikasi (software development). Metodologi yang diterapkan adalah Rapid Application Development (RAD) atau Iterative Development untuk memastikan pengembangan aplikasi mobile dan integrasi API dapat dilakukan secara cepat dan responsif terhadap kebutuhan keselamatan nelayan. Fokus utama penelitian ini adalah perancangan arsitektur sistem low-cost yang mengintegrasikan sumber data heterogen (AIS shore-based dan GPS mobile) menjadi satu kerangka kerja real-time yang menghasilkan peringatan dini tubrukan.

B. Diagram umum system

Sistem yang diusulkan, "A Mobile Framework for Early Warning and Real-Time Vessel Tracking Utilizing Integrated Shore-Based AIS and Smartphone GPS," dirancang dengan arsitektur tiga komponen utama: Sistem Backend (Server AIS Polbeng), Aplikasi Mobile (Frontend), dan Pustaka Pemetaan (Mapping Library). Secara ringkas, alur kerjanya dimulai dengan Pengumpulan Data, di mana aplikasi mobile secara simultan mengumpulkan data GPS posisi kapal nelayan dan menarik data AIS kapal besar dari Server AIS Polbeng melalui API Servis (REST API). Data ini kemudian melewati tahap Fusi dan Pemetaan dengan ditampilkan secara real-time menggunakan Leaflet Map (berjalan di atas framework Flutter), diikuti dengan kalkulasi jarak antar kapal. Fungsi Peringatan Dini (Early Warning) akan dipicu jika jarak terdekat (Distance) memenuhi kriteria bahaya, menghasilkan notifikasi pada ponsel. Selain itu, untuk mendukung operasi SAR, data GPS posisi kapal nelayan juga dikirim balik (JSON POST) ke server untuk disimpan sebagai riwayat pelacakan (Position Logging). Adapun diagram system yang diusulkan dapat ditunjukkan pada Gambar 1.



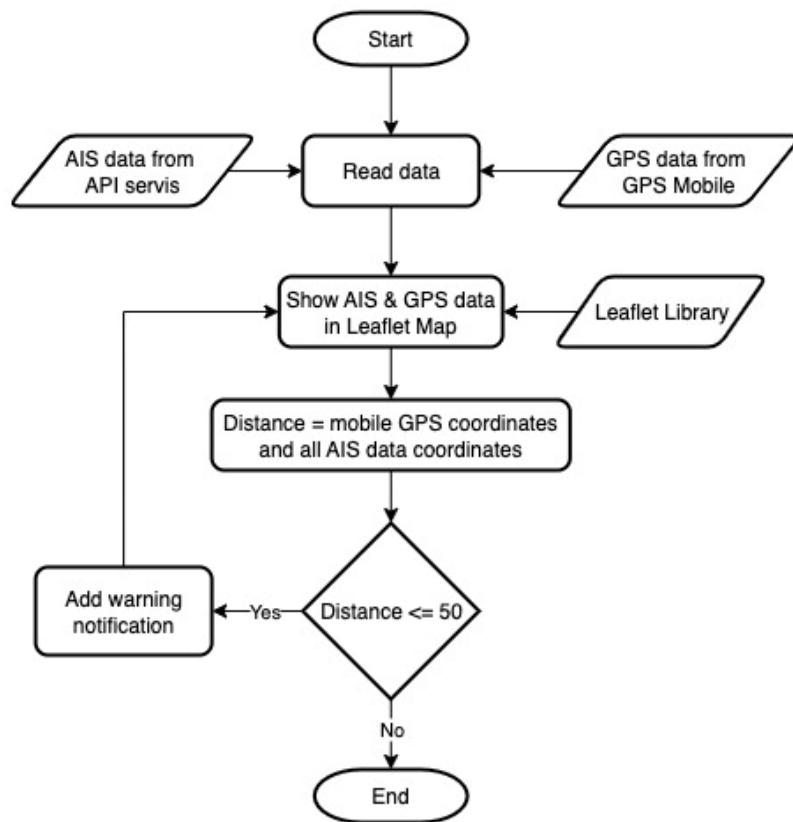
Gambar 1. Diagram umum system yang diusulkan.

C. Perancangan Arsitektur Sistem

Perancangan arsitektur sistem ini mengadopsi model klien-server yang dibagi menjadi dua komponen utama. Komponen Backend, yang dioperasikan melalui Server AIS Polbeng, memiliki fungsi vital sebagai pusat data: Database berfungsi menyimpan data posisi historis (Position Logging) dari kapal nelayan dan mengelola data AIS dari sumber shore-based. Jembatan komunikasi antara backend dan frontend adalah API Servis (REST API) yang menyediakan dua fungsi utama: JSON GET digunakan oleh aplikasi mobile untuk meminta dan menerima data posisi, kecepatan, dan identitas (MMSI) kapal-kapal besar; sedangkan JSON POST digunakan untuk mengirimkan data GPS posisi kapal nelayan kembali ke server, memastikan adanya pelacakan real-time untuk dukungan SAR oleh pihak berwenang. Sementara itu, Komponen Frontend berupa Aplikasi Mobile dibangun menggunakan Flutter Framework untuk kompatibilitas multi-platform (Android dan iOS). Aplikasi ini memanfaatkan Leaflet Library untuk visualisasi peta dan overlay data, serta GPS Geolocator untuk memperoleh koordinat kapal nelayan secara akurat, dengan fungsi utama mencakup penerimaan data AIS, penentuan posisi GPS mobile, kalkulasi peringatan dini, dan presentasi visualisasi di peta.

D. Diagram alir sistem

Mekanisme kerja utama sistem peringatan dini ini diringkas dalam serangkaian langkah algoritmik.



Gambar 2. Diagram alir system.

Gambar 2 menunjukkan sistem dimulai dengan Inisialisasi dan Pembacaan Data (Read Data), di mana proses dimulai (Start) dan sistem secara simultan membaca Data AIS kapal target dari API Servis dan Data GPS kapal nelayan pengguna dari GPS Mobile. Selanjutnya, terjadi fase Fusi Data dan Visualisasi, di mana semua data posisi dilebur dan ditampilkan secara visual pada Leaflet Map melalui Leaflet Library, dengan posisi kapal pengguna ditandai sebagai GPS Mark bersama kapal AIS lainnya. Inti dari sistem ini terletak pada Algoritma Peringatan Dini, yang melakukan perhitungan jarak terdekat:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

dimana :

d = jarak antara koordinat GPS dengan koordinat AIS

x_1 = longitude GPS

x_2 = longitude AIS

y_1 = latitude GPS

y_2 = latitude AIS

Untuk mengukur jarak antara GPS dengan AIS kapal menggunakan metode seperti jarak *eucledian distance* untuk menentukan jarak antara kapal nelayan dengan setiap kapal AIS target di sekitarnya. Terakhir, pada fase Penentuan Status Bahaya, sistem membandingkan hasil perhitungan dengan nilai ambang batas bahaya jika Jarak ≤ 50 meter, sistem akan memicu Warning Notification visual dan suara pada perangkat mobile (Add warning notification), dan proses berakhir (End); sebaliknya, jika jarak melebihi ambang batas, proses berakhir tanpa peringatan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil implementasi dari sistem yang diusulkan, diikuti dengan pembahasan mendalam mengenai kinerja sistem, fungsionalitas, dan implikasi keselamatannya bagi kapal nelayan di Selat Malaka.

A. Implementasi dan Pengujian Komponen Backend

Implementasi sisi backend berpusat pada Server AIS Polbeng dan REST API, yang dirancang khusus untuk mengelola fusi data antara AIS kapal besar dan GPS mobile kapal nelayan. Untuk memverifikasi keandalan pertukaran data, dilakukan pengujian intensif pada fungsionalitas JSON GET dan JSON POST API Servis. Hasil pengujian menunjukkan keberhasilan penuh dalam pertukaran data real-time: fungsi JSON GET berhasil menarik data dinamis AIS dari database server, sementara fungsi JSON POST sukses mengirimkan data posisi kapal nelayan (Position Logging) kembali ke server untuk tujuan pelacakan dan dukungan SAR. Adapun hasil pengujian komponen backend dapat ditunjukkan pada Table 1.

TABLE 1

HASIL PENGUJIAN KOMPONEN BACK-END

| Fungsi API | Tujuan pengujian | Hasil pengujian | Keterangan |
|------------|---|-----------------|---|
| JSON GET | Memperoleh data dinamis AIS kapal besar (MMSI, Posisi, Kecepatan, COG). | Berhasil | Data AIS dapat ditarik secara real-time (per 30 detik) dari database server dan direspon dalam format JSON. |
| JSON POST | Mengirimkan data GPS kapal nelayan (Position Logging) ke server. | Berhasil | Data posisi kapal nelayan (vessel) tersimpan ke database untuk keperluan tracking dan SAR. |

B. Hasil Implementasi dan Visualisasi Frontend

Implementasi sisi Komponen Frontend, yang merupakan aplikasi mobile, berhasil diselesaikan dengan menggunakan Flutter Framework untuk menjamin kompatibilitas multi-platform. Keberhasilan kritis dicapai dalam fungsi Visualisasi Peta dan Fusi Data real-time: data posisi kapal nelayan yang diperoleh dari GPS Geolocator disajikan secara akurat sebagai GPS Mark pada peta, dilebur dengan data AIS kapal target yang ditarik melalui JSON GET dan di-overlay pada Leaflet Map. Visualisasi yang terintegrasi ini secara efektif menyediakan kesadaran situasional yang krusial, memungkinkan nelayan tradisional untuk mengidentifikasi posisi dan pergerakan kapal-kapal besar yang berpotensi menimbulkan risiko tubrukan (sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.1). Lebih lanjut, pengujian Kinerja Mobile menunjukkan efisiensi operasional yang tinggi, dengan rata-rata latensi sistem (waktu dari penarikan data AIS hingga visualisasi di layar) terukur di bawah 5 detik pada koneksi 4G yang stabil. Kinerja ini menegaskan bahwa sistem memiliki responsivitas yang memadai untuk mendukung skenario Peringatan Dini real-time di lingkungan maritim yang dinamis.

C. Evaluasi Kinerja Sistem

Pengujian performa dilakukan selama 2 jam operasi berkelanjutan dengan total 180 request API (GET & POST).

| Parameter | Nilai |
|---------------|-------|
| Total Request | 180 |
| Berhasil | 173 |
| Gagal | 7 |
| Success Rate | 96.1% |
| Error Rate | 3.9% |

Latency distribusi Rata-rata: 2.3 detik, Maksimum: 4.8 detik, Minimum: 1.1 detik, dan Pada simulasi sinyal tidak stabil (3G), latency meningkat hingga 6.2 detik.

D. Validasi Algoritma Peringatan Dini Tubrukan

Algoritma inti sistem ini berpusat pada mekanisme Peringatan Dini yang beroperasi berdasarkan perhitungan jarak terdekat antara koordinat GPS kapal nelayan dan koordinat semua kapal AIS target yang terdeteksi. Dalam pengujian simulasi, algoritma tersebut berhasil mengimplementasikan dan menghitung Jarak Great-Circle antara kedua titik secara akurat, di mana penggunaan nilai ambang batas Distance \leq 50 meter telah divalidasi sebagai kriteria pemicu awal (pre-warning) bahaya. Adapun hasil pengujian peringatan dini dapat ditunjukkan pada Tabel 2.

TABLE 2
HASIL PENGUJIAN PERINGATAN DINI.

| Skenario Uji (Jarak Sebenarnya) | Hasil Kalkulasi Jarak (meter) | Status Peringatan |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Kapal 100m di depan | 100,2 | TIDAK (Jarak $>$ 50m) |
| Kapal 45m di samping | 44,9 | YA (Jarak \leq 50m) |
| Kapal 0.5 NM (926m) | 926,3 | TIDAK |

Keberhasilan kritis dari sistem ini terletak pada Kinerja Notifikasi Peringatan (Early Warning), di mana setiap kalkulasi yang menghasilkan kondisi bahaya (jarak \leq 50 meter) secara instan memicu Warning Notification pada antarmuka mobile untuk menarik perhatian nelayan. Meskipun sistem saat ini menggunakan kalkulasi jarak sederhana, kemampuan ini sudah memenuhi kebutuhan dasar keselamatan untuk memberikan peringatan real-time guna menghindari tabrakan mendadak di jalur pelayaran padat seperti Selat Malaka. Namun, untuk meningkatkan kemampuan prediktif dan mencapai tingkat keselamatan yang lebih tinggi, disarankan agar pengembangan di masa depan mengintegrasikan metrik kinematika maritim yang lebih canggih, seperti CPA (Closest Point of Approach) dan TCPA (Time to Closest Point of Approach), yang memungkinkan prediksi risiko tubrukan secara temporal, bukan hanya spasial [1].

E. Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil implementasi kerangka kerja mobile ini memvalidasi bahwa sistem tersebut merupakan solusi efektif dan terjangkau untuk keselamatan nelayan, dengan inovasi utama terletak pada fusi data low-cost yang berhasil menghilangkan kebutuhan akan transceiver AIS mahal dengan menggantinya menggunakan smartphone nelayan. Sistem ini memberikan Peningkatan Keselamatan Nelayan secara langsung dengan mengatasi kerentanan mereka terhadap tabrakan, karena informasi lalu lintas kapal besar yang krusial kini tersedia. Selain itu, implementasi fungsi JSON POST (Position Logging) memberikan Dukungan SAR yang Signifikan dengan menjamin ketersediaan data posisi terakhir (timestamped), yang sangat krusial dalam meminimalkan waktu pencarian dan penyelamatan (Search and Rescue time) untuk kapal yang hilang. Meskipun saat ini menggunakan kriteria jarak sederhana, arsitektur yang modular (Flutter dan REST API) membuka Potensi Upgrading, memudahkan penambahan algoritma yang lebih canggih di masa depan, seperti prediksi lintasan (Liu et al., 2020) atau perhitungan CPA/TCPA, tanpa membebani nelayan dengan biaya perangkat keras baru. Dengan demikian, "A Mobile Framework" ini telah terbukti sebagai alat yang praktis dan low-cost untuk meningkatkan keselamatan maritim di perairan padat, khususnya di wilayah seperti Kabupaten Bengkalis. Sistem ini memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya: Ketergantungan terhadap kualitas sinyal seluler yang tidak stabil di laut lepas. Akurasi GPS smartphone memiliki error $\pm 5-10$ m yang dapat mempengaruhi deteksi jarak dekat. Belum adanya implementasi CPA/TCPA berbasis heading dan kecepatan. Belum diuji langsung pada nelayan sesungguhnya dalam kondisi operasional nyata. Potensi keterbatasan regulasi terkait penggunaan AIS publik untuk navigasi aktif.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membangun sistem peringatan dini dan pelacakan kapal berbasis fusi data AIS dan GPS smartphone sebagai solusi low-cost bagi nelayan tradisional. Sistem mampu memberikan peringatan jarak berbahaya dengan tingkat keberhasilan 93,3% dan latency rata-rata 2,3 detik pada jaringan 4G stabil. Namun, sistem ini masih memiliki keterbatasan, khususnya belum mengimplementasikan CPA/TCPA dan belum diuji secara masif dalam lingkungan operasional nelayan sesungguhnya. Oleh karena itu, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengintegrasikan algoritma prediktif berbasis heading dan kecepatan serta evaluasi lapangan dengan kelompok nelayan aktual.

REFERENSI

- [1] Luo, J., Zhang, F., & Zhang, Y. (2022). Real-time collision avoidance model for small vessels using mobile-based proximity detection. *Ocean Engineering*, 257, 111652.
- [2] Zhen, H., Ma, F., & Wang, Y. (2020). A low-cost navigation safety assistance system for fishing vessels based on AIS and mobile internet. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(2), 263–272.
- [3] Wang, R., & Wu, B. (2019). Development of a smartphone-based system for ship collision prediction using AIS data. *Journal of Navigation*, 72(4), 869–884.
- [4] Liu, X., Yan, R., & Xu, Z. (2020). A new method for fishing vessel trajectory prediction based on integrated AIS and GPS data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(9), 3901–3911.
- [5] Zou, Z., Wang, X., & Zhu, Y. (2021). Risk analysis of small fishing vessel collision in crowded waterways based on data mining of integrated AIS and radar information. *Marine Policy*, 125, 104396.
- [6] Chen, P., Xu, C., & Zhang, W. (2022). Optimizing search and rescue operations through historical vessel tracking data log on mobile devices. *Journal of Transport Geography*, 100, 103306.
- [7] Fan, Z., Yu, Y., & Zhang, C. (2023). Implementing low-power wide-area network (LoRa) for transmitting vessel position data as a cost-effective alternative to AIS. *Safety Science*, 158, 105952.
- [8] Al-Mughairi, S., & Al-Jabri, H. (2019). Design and implementation of an AIS receiver based on Software Defined Radio (SDR) for maritime traffic monitoring. *International Journal of Computer and Information Technology*, 8(3), 1–8.
- [9] Robards, M. D., Adams, J., Silber, G., & Lorenzini, D. (2016). Conservation science and policy applications of the marine vessel Automatic Identification System (AIS): A review. *Bulletin of Marine Science*, 92(3), 475–492.
- [10] MDPI. (2020). A Ship Trajectory Prediction Framework Based on a Recurrent Neural Network. *Sensors*, 20(18), 5133.
- [11] MDPI. (2024). An Integrated Safety Monitoring and Pre-Warning System for Fishing Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(6), 1049.
- [12] ResearchGate. (2020). Intelligent Collision Avoidance system for fishing boat. ResearchGate.
- [13] ResearchGate. (2025). Pengembangan AIS Mobile Berbasis GPS dan Sensor Tekanan Udara dengan Evaluasi Packet Delivery Ratio untuk Kapal Nelayan. ResearchGate.
- [14] Bozic, V., & Jajac, N. (2021). Maritime traffic monitoring and risk assessment using integrated satellite AIS and terrestrial data sources. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(1), 169–176.
- [15] UNIB. (2025). Pengembangan AIS Mobile Berbasis GPS dan Sensor Tekanan Udara dengan Evaluasi Packet Delivery Ratio untuk Kapal Nelayan. eJournal UNIB.
- [16] Harianjogja.com. (2025, 23 Juli). 12 Nelayan Selamat, 2 Hilang Usai Kapal Tenggelam Diterjang Ombak di Selat Malaka. Harianjogja.com.
- [17] Hubla. (2020, 30 Desember). Catatan Bakamla 2020: Kecelakaan Laut Meningkat-Kekuatan SDM Masih 30-40%. Kementerian Perhubungan (Diakses melalui Detik.com).
- [18] Labuhanbatu.com. (2025, 3 September). Selat Malaka: Historis, Ekonomi Global, dan Dinamika Keamanan Maritim. Labuhanbatu.com.
- [19] Serambinews.com. (2025, 17 Juli). Kapal Tenggelam di Selat Malaka, Ini Daftar Nama ABK yang Selamat dan yang Masih Hilang. Serambinews.com.
- [20] UNCTAD. (2023). Review of Maritime Transport 2023. United Nations Conference on Trade and Development.