

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan luas wilayah perairan mencapai 6,4 juta kilometer persegi, menempatkan sektor maritim sebagai tulang punggung utama konektivitas nasional dan pertumbuhan ekonomi. Posisi strategis ini menjadikan transportasi laut sebagai moda yang paling dominan dalam rantai pasok logistik, memfasilitasi lebih dari 90% volume perdagangan internasional dan domestik. Sejalan dengan visi Poros Maritim Dunia, optimalisasi infrastruktur dan keamanan jalur pelayaran menjadi prioritas strategis pemerintah guna menjamin kelancaran arus barang dan jasa. Dalam ekosistem ini, pelabuhan berfungsi sebagai simpul vital yang menghubungkan aktivitas ekonomi antarwilayah, di mana efisiensi dan keamanan operasionalnya berdampak langsung pada stabilitas ekonomi nasional (Pandjaitan et al., 2025).

Pelabuhan Tanjung Priok, yang berlokasi di Jakarta, memegang peranan sentral sebagai gerbang utama perdagangan internasional sekaligus pelabuhan tersibuk di Indonesia. Berdasarkan data statistik dari PT Pelabuhan Indonesia (Persero), Tanjung Priok menangani lebih dari 50% dari total arus kargo peti kemas nasional. Tingginya volume aktivitas ini tercermin dari ribuan pergerakan kapal yang masuk dan keluar setiap bulannya, menciptakan densitas lalu lintas yang sangat tinggi di alur pelayaran maupun area kolam pelabuhan. Kompleksitas navigasi di area ini tidak hanya disebabkan oleh jumlah kapal, tetapi juga oleh variasi jenis kapal yang beragam, mulai dari kapal kargo raksasa, tanker, hingga kapal penumpang dan nelayan yang berbagi ruang gerak yang sama (Hoerunisa et al., 2023).

Akumulasi densitas lalu lintas yang ekstrem di Tanjung Priok meningkatkan risiko insiden maritim secara signifikan. Risiko keselamatan navigasi seperti potensi tabrakan kapal (*collision*), kandas (*grounding*), hingga situasi *near-miss* menjadi ancaman konstan yang harus dikelola. Selain itu, kemacetan alur pelayaran

sering kali menyebabkan inefisiensi operasional, seperti peningkatan waktu tunggu kapal (*dwelling time*) yang berdampak pada biaya logistik nasional. Insiden maritim di pelabuhan strategis seperti Tanjung Priok tidak hanya merugikan secara materiil, tetapi juga dapat melumpuhkan rantai pasok nasional untuk periode waktu tertentu.

Di luar aspek keselamatan navigasi, tingginya aktivitas di Pelabuhan Tanjung Priok juga membuka celah kerentanan bagi ancaman keamanan maritim. Fenomena pelanggaran hukum di laut, seperti penyelundupan barang ilegal, *illegal anchoring* (berlabuh jangkar tanpa izin di area terlarang atau jalur pipa bawah laut), hingga manipulasi data identitas kapal, menjadi tantangan serius bagi otoritas pelabuhan dan penjaga pantai. Modus operandi pelaku kejahatan maritim semakin canggih, sering kali melibatkan pola pergerakan yang tidak wajar (*anomalous behavior*) atau upaya penipuan identitas (*spoofing*) untuk menghindari deteksi radar dan patroli.

Untuk mendukung pengawasan lalu lintas maritim yang efektif, Organisasi Maritim Internasional (IMO) telah mewajibkan penggunaan *Automatic Identification System* (AIS) pada kapal-kapal dengan tonase kotor tertentu. Perangkat transponder ini secara terus-menerus memancarkan data statis (identitas kapal, dimensi) dan data dinamis (posisi lintang/bujur, kecepatan, haluan) secara *real-time*. Akumulasi data AIS ini menghasilkan *Big Data* spasial-temporal yang sangat berharga untuk memetakan pola pergerakan kapal. Namun, karakteristik data AIS yang memiliki volume sangat besar (*Volume*), kecepatan pembaruan tinggi (*Velocity*), dan variasi tipe data (*Variety*) menghadirkan tantangan teknis tersendiri dalam proses pengolahannya.

Masalah mendasar yang dihadapi oleh otoritas pengawas seperti *Vessel Traffic Services* (VTS) adalah keterbatasan kapasitas kognitif manusia dalam memantau data AIS yang begitu masif secara manual. Operator VTS dihadapkan pada layar pemantauan yang menampilkan ribuan titik data yang bergerak secara simultan dan terus-menerus. Metode pemantauan konvensional ini sangat rentan terhadap faktor kelelahan operator (*human fatigue*) dan penurunan konsentrasi, terutama pada jam kerja yang panjang. Risiko terbesar dari metode manual adalah potensi terlewatnya deteksi terhadap ancaman kritis yang tersembunyi di antara ribuan pergerakan kapal yang normal.

Selain faktor kelelahan, pemantauan manual juga memiliki kelemahan dalam hal objektivitas. Definisi mengenai perilaku "mencurigakan" atau anomali sering kali bersifat subjektif dan bervariasi antar-operator, tergantung pada pengalaman dan intuisi masing-masing. Tidak adanya standar objektif yang konsisten dalam penilaian risiko keamanan menyebabkan inkonsistensi dalam penegakan aturan. Terlebih lagi, pelaku kejahatan maritim sering kali menyamarkan aktivitas mereka dengan pola pergerakan yang halus (misalnya, *loitering* atau bergerak perlahan) yang sulit dibedakan dari aktivitas normal jika hanya diamati secara visual tanpa analisis data yang mendalam.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Ikhsan et al. (2025) telah mencoba mengatasi permasalahan ini melalui analisis densitas kapal menggunakan metode visualisasi manual di Tanjung Priok. Meskipun penelitian tersebut memberikan kontribusi penting dalam pemetaan area padat lalu lintas, pendekatan manual memiliki kelemahan fundamental dalam hal skalabilitas. Metode tersebut tidak dapat diterapkan secara efektif untuk pemantauan *real-time* atau pada skala data yang lebih besar, karena waktu pemrosesan berbanding lurus dengan jumlah data. Hal ini menciptakan kesenjangan penelitian (*research gap*) yang mendesak akan kebutuhan sistem otomatis yang mampu memproses jutaan *record* data AIS dalam waktu singkat dengan tingkat akurasi yang terukur.

Penerapan teknologi *Machine Learning* menawarkan solusi potensial untuk mengotomatisasi proses deteksi anomali tersebut. Namun, tantangan utama dalam domain deteksi anomali maritim adalah ketiadaan label data (*unlabeled data*) atau *ground truth* yang memadai (Wolsing et al., 2022). Anomali maritim merupakan kejadian langka (*rare events*), sehingga sangat sulit untuk mendapatkan dataset historis yang memiliki label "normal" dan "anomali" yang seimbang untuk melatih model *Supervised Learning*. Oleh karena itu, pendekatan *Unsupervised Learning* menjadi pilihan metodologis yang paling relevan dan realistis, di mana model belajar mengenali pola normal dari data mayoritas dan mengidentifikasi data yang menyimpang secara statistik sebagai anomali (Alam et al., 2025).

Meskipun metode *Unsupervised Learning* seperti Isolation Forest dan One-Class SVM efektif dalam mendeteksi anomali tanpa label, tantangan utama yang

sering diabaikan adalah subjektivitas dalam penentuan hyperparameter (seperti nilai contamination atau nu). Banyak penelitian sebelumnya menentukan parameter ini berdasarkan asumsi semata, tanpa pembuktian empiris apakah model tersebut stabil (robust) atau justru sensitif terhadap perubahan kecil. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya berfokus pada akurasi deteksi, tetapi juga mengintegrasikan Analisis Sensitivitas (Sensitivity Analysis) dan Uji Kekokohan (Robustness Check). Pendekatan ini bertujuan untuk membuktikan secara kuantitatif bahwa anomali yang terdeteksi adalah pola perilaku yang persisten dan valid secara statistik, bukan sekadar artefak dari pengaturan parameter tertentu.

Dalam konteks data bervolume besar dan berdimensi tinggi seperti AIS, pemilihan algoritma yang efisien menjadi krusial. Algoritma *Isolation Forest* dikenal memiliki keunggulan komputasi dengan kompleksitas linear $O(n)$, yang sangat cocok untuk menangani *Big Data*. Di sisi lain, algoritma *One-Class Support Vector Machine* (OC-SVM) memiliki kemampuan superior dalam menangkap batas keputusan (*decision boundary*) yang non-linear dan kompleks pada ruang fitur. Menggabungkan kedua algoritma ini dalam sebuah kerangka kerja *Ensemble Learning* diharapkan dapat menutupi kelemahan masing-masing model tunggal dan meningkatkan ketahanan (*robustness*) serta akurasi deteksi anomali dibandingkan metode manual maupun model tunggal.

Berdasarkan urgensi kebutuhan sistem pengawasan yang *scalable*, tantangan teknis dalam pengolahan data AIS tanpa label, dan perlunya validasi objektif terhadap deteksi anomali, penelitian ini mengangkat judul "**Deteksi Anomali Pergerakan Kapal Secara Otomatis Menggunakan Isolation Forest dan SVM Kelas Satu di Pelabuhan Tanjung Priok**". Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan purwarupa sistem cerdas yang mampu membantu otoritas pelabuhan dalam meningkatkan keselamatan navigasi dan keamanan maritim melalui deteksi dini yang cepat, objektif, dan terukur secara statistik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja dan efisiensi komputasi dari sistem deteksi anomali otomatis berbasis *ensemble Isolation Forest* dan *One-Class SVM* dalam memproses dataset AIS berskala besar di Pelabuhan Tanjung Priok jika dibandingkan dengan metode manual *baseline* ?
2. Bagaimana tingkat sensitivitas dan kekokohan (*robustness*) model *Ensemble* (Isolation Forest dan One-Class SVM) terhadap variasi perubahan *hyperparameter*, dan apakah hasil deteksi anomali konsisten saat diuji pada rentang parameter yang berbeda?
3. Fitur-fitur kinematik dan spasial apa saja yang secara statistik terbukti signifikan dalam membedakan perilaku kapal normal dan anomali, guna memastikan bahwa deteksi yang dihasilkan model memiliki dasar yang objektif ?
4. Sejauh mana karakteristik anomali yang dideteksi oleh pendekatan *Machine Learning* (yang berbasis pada pengenalan pola perilaku) berbeda atau melingkupi hasil deteksi dari pendekatan konvensional (yang berbasis pada pelanggaran aturan ambang batas) ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah:

1. Membangun kerangka kerja deteksi anomali menggunakan *ensemble Isolation Forest* dan *One-Class SVM* yang mampu memproses volume data 2,4 kali lebih besar secara efisien (waktu komputasi rendah), sebagai solusi skalabilitas atas keterbatasan metode manual.
2. Mengevaluasi stabilitas kinerja model melalui Analisis Sensitivitas Hyperparameter menggunakan metode *Grid Search* dan mengukur tingkat kekokohan (*robustness*) model menggunakan metrik *Coefficient of Variation* (CV) untuk memastikan validitas hasil deteksi.
3. Mengidentifikasi dan membuktikan signifikansi statistik (*statistical significance*) dari 46 fitur rekayasa menggunakan uji *Mann-Whitney U*, untuk menjamin bahwa model memisahkan data anomali berdasarkan perbedaan perilaku yang nyata, bukan sekadar *noise* statistik.

4. Mengungkap perbedaan fundamental karakteristik anomali yang ditangkap oleh algoritma *unsupervised learning* dibandingkan dengan inspeksi manual, guna memberikan rekomendasi strategi pengawasan hibrida yang optimal bagi otoritas pelabuhan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis:
 - a. Memberikan kontribusi pada literatur Informatika Kelautan (*Maritime Informatics*) dengan menawarkan kerangka kerja deteksi anomali otomatis yang teruji pada dataset tanpa label (*unlabeled data*). Penelitian ini mendemonstrasikan bagaimana pendekatan *Ensemble Isolation Forest* dan *One-Class SVM* dapat diterapkan secara efektif untuk mengatasi ketiadaan data *ground truth* yang sering menjadi hambatan dalam riset keamanan maritim.
 - b. Memberikan kerangka kerja (*framework*) validasi baru untuk penelitian deteksi anomali maritim berbasis *unsupervised learning*, di mana keandalan model diukur tidak hanya dari hasil akhir, tetapi juga dari ketahanannya terhadap variabilitas parameter (*parameter robustness*).
 - c. Menyediakan pendekatan evaluatif yang terstruktur untuk memvalidasi model *unsupervised*. Penggunaan uji signifikansi statistik (*Mann-Whitney U Test*) dan analisis ukuran efek (*Effect Size*) yang diterapkan dalam penelitian ini dapat dijadikan acuan metodologis bagi penelitian selanjutnya untuk membuktikan validitas deteksi anomali secara objektif ketika metrik akurasi standar (seperti *Confusion Matrix*) tidak tersedia.
 - d. Memperkaya pemahaman teoretis mengenai perbedaan fundamental antara deteksi berbasis pola (*pattern-based*) yang dilakukan oleh *Machine Learning* dengan deteksi berbasis aturan (*rule-based*). Hasil penelitian ini memberikan bukti empiris bahwa algoritma

cerdas lebih unggul dalam menangkap variabilitas perilaku dan anomali kinematik yang kompleks dibandingkan pelanggaran ambang batas statis.

2. Manfaat Praktis:

- a. Memberikan solusi teknologi yang *scalable* bagi operator *Vessel Traffic Services* (VTS) dan otoritas pelabuhan (Syahbandar) untuk memantau ribuan pergerakan kapal secara simultan. Sistem ini mampu memangkas waktu analisis data bervolume besar secara signifikan (dari hitungan jam/hari menjadi menit), sehingga memungkinkan pengawasan yang mendekati *real-time*.
- b. Menyediakan sistem penilaian risiko (*anomaly scoring*) yang konsisten dan objektif, yang dapat mengurangi ketergantungan pada penilaian subjektif operator manusia yang rentan terhadap faktor kelelahan (*fatigue*). Hal ini membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih terukur terkait prioritas pemeriksaan kapal.
- c. Hasil penelitian ini dapat menjadi modul dasar (*backend engine*) bagi pengembangan sistem peringatan dini keamanan maritim nasional, yang mampu mendeteksi potensi ancaman seperti penyelundupan atau aktivitas ilegal lainnya melalui analisis pola pergerakan yang mencurigakan.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian terarah dan sesuai dengan tujuan, batasan masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Fokus analisis dilakukan pada data pergerakan kapal di wilayah perairan Pelabuhan Tanjung Priok, Jakarta, yang merupakan pelabuhan dengan densitas lalu lintas tertinggi di Indonesia.
2. Data yang digunakan adalah data sekunder *Automatic Identification System* (AIS) tertanggal 1 April 2021 . Dataset ini terdiri dari 105.813 *records* data

dari 671 kapal unik, yang mencakup informasi statis (MMSI, tipe kapal) dan dinamis (koordinat, kecepatan, haluan).

3. Pengujian sensitivitas model dibatasi pada parameter kunci, yaitu *Contamination* (0.01 – 0.10) untuk Isolation Forest, serta kombinasi *Nu* (0.01 – 0.10) dan *Gamma* untuk One-Class SVM. Evaluasi stabilitas dilakukan menggunakan pendekatan *Grid Search* dengan metrik validasi statistik (Uji Mann-Whitney U) dan *Coefficient of Variation* (CV).
4. Algoritma yang digunakan dibatasi pada pendekatan *Unsupervised Learning*, yaitu *Isolation Forest* dan *One-Class Support Vector Machine* (OC-SVM), serta strategi *Ensemble* untuk menggabungkan skor keduanya. Penelitian ini tidak menggunakan metode *Supervised Learning* dikarenakan ketiadaan label anomali yang lengkap dan terverifikasi.
5. Fitur yang digunakan dalam pemodelan terbatas pada 46 fitur hasil rekayasa (*feature engineering*) yang dikelompokkan ke dalam enam kategori: Temporal, Kinematik, *Course* (Haluan), Trajektori, Spasial, dan Kontekstual. Fitur eksternal seperti cuaca, arus laut, atau data kargo tidak dilibatkan dalam penelitian ini.
6. Mengingat tidak adanya data *ground truth* (label benar/salah) untuk seluruh populasi data, evaluasi kinerja tidak menggunakan metrik klasifikasi standar seperti Akurasi, Presisi, atau *Recall*. Validasi model difokuskan pada uji beda statistik (*Mann-Whitney U Test*) untuk membuktikan signifikansi fitur, analisis distribusi skor, serta studi kasus kualitatif terhadap anomali yang terdeteksi.