

Pengembangan Model Deteksi Ancaman Maritim Berbasis AI: Kerangka Keamanan Prediktif untuk Penangkapan Ikan Ilegal dan Pembajakan di Laut Natuna

Triyani* A. Adang Supriyadi, Bayu Asih yulianto, Lukman Yudho, Panji Suwarno

Fakultas Keamanan Nasional, Unhan RI, Jakarta, Indonesia

*Email: triyani.acc@gmail.com, aadangsupriyadi@gmail.com, b.asyou@gmail.com,
lukman.prakoso@idu.ac.id, triyani.acc01@gmail.com

Abstrak:

Laut Natuna Utara yang berada dalam Zona Ekonomi Eksklusif Indonesia semakin rentan terhadap berbagai ancaman maritim seperti penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU fishing), pembajakan, serta pelanggaran wilayah oleh kapal asing, terutama dalam konteks meningkatnya ketegangan geopolitik di kawasan Laut Cina Selatan. Sistem pengawasan laut konvensional terbukti tidak memadai dalam memberikan peringatan dini atau pencegahan proaktif karena keterbatasan jangkauan dan sifatnya yang reaktif. Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi pemanfaatan kecerdasan buatan (artificial intelligence/AI) dalam memperkuat sistem keamanan maritim Indonesia melalui model deteksi prediktif. Berdasarkan kajian literatur yang berkembang mengenai penerapan AI dalam pemantauan laut dan manajemen risiko maritim, penelitian ini menelaah bagaimana teknik machine learning telah merevolusi operasi kelautan di negara-negara maju melalui navigasi berbasis data dan pengawasan cerdas. Metode: Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan studi kasus di wilayah Natuna, dan didasarkan pada studi literatur serta data sekunder seperti rekaman Automatic Identification System (AIS), citra satelit, dan laporan insiden maritim dari sumber terbuka. Hasil: Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi algoritma seperti Random Forest, Long Short-Term Memory (LSTM), dan Convolutional Neural Networks (CNN) dapat membentuk model deteksi hybrid yang mampu mengenali perilaku kapal mencurigakan, memprediksi zona risiko, serta memberikan peringatan dini terhadap aktivitas IUU fishing. Studi ini juga menyoroti pentingnya integrasi data AIS, citra satelit, dan sensor laut untuk meningkatkan kesadaran spasial dan presisi respons. Kesimpulan: keamanan maritim berbasis AI memberikan peluang strategis bagi Indonesia untuk beralih dari sistem pertahanan yang reaktif menuju pendekatan yang prediktif dan antisipatif. Kebaruan/Keaslian artikel ini : Kebaruan dalam studi ini terletak pada integrasi konsep predictive security dan preventive defense dalam perancangan model AI yang spesifik untuk wilayah rawan seperti Laut Natuna Utara—pendekatan yang belum pernah dioperasikan secara nyata dalam konteks keamanan maritim Indonesia.

Kata Kunci: kecerdasan buatan (artificial intelligence), keamanan maritim, IUU fishing, Laut Natuna Utara, deteksi prediktif

Abstract:

The North Natuna Sea, which is located in Indonesia's Exclusive Economic Zone, is increasingly vulnerable to various maritime threats such as illegal, unreported, and unregulated (IUU fishing), piracy, and territorial violations by foreign vessels, especially in the context of increasing geopolitical tensions in the South China Sea region. Conventional marine surveillance systems have proven inadequate in providing early warning or proactive prevention due to their limited range and reactive nature. This study aims to explore the potential use of artificial intelligence (AI) in strengthening Indonesia's maritime security system through predictive detection models. Based on a review of the growing literature on the application of AI in ocean monitoring and maritime risk management, this study examines how machine learning techniques have revolutionized marine operations in developed countries through data-driven navigation and intelligent surveillance. Methods: This study used a descriptive qualitative approach with case studies in the Natuna region, and was based on literature studies as well as secondary data such as Automatic Identification System (AIS) recordings, satellite imagery, and open-source maritime incident reports. Results: The results of the analysis show that a

combination of algorithms such as Random Forest, Long Short-Term Memory (LSTM), and Convolutional Neural Networks (CNN) can form a hybrid detection model that is able to recognize suspicious vessel behavior, predict risk zones, and provide early warning of IUU fishing activities. The study also highlights the importance of integrating AIS data, satellite imagery, and marine sensors to improve spatial awareness and response precision. Conclusion: AI-based maritime security provides a strategic opportunity for Indonesia to move from a reactive defense system to a predictive and anticipatory approach. Novelty of this article: The novelty in this study lies in the integration of the concepts of predictive security and preventive defense in the design of AI models that are specific to vulnerable areas such as the North Natuna Sea—an approach that has never been operationalized in real terms in the context of Indonesia's maritime security.

Keywords: artificial intelligence, maritime security, IUU fishing, North Natuna Sea, predictive detection

Corresponding: Nama author

E-mail: Email author



PENDAHULUAN

Laut Natuna Utara, bagian dari Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) Indonesia yang berbatasan langsung dengan Laut Cina Selatan, menjadi salah satu kawasan strategis sekaligus rawan dalam konteks keamanan maritim nasional. Wilayah ini tidak hanya menyimpan potensi ekonomi kelautan yang besar melalui sektor perikanan, migas, dan pelayaran internasional, tetapi juga merupakan arena kontestasi kekuatan geopolitik yang melibatkan aktor-aktor besar seperti Tiongkok, Amerika Serikat, dan negara-negara ASEAN. Dalam konteks ini, eskalasi penangkapan ikan dan pembajakan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU) di Laut Natuna Utara adalah masalah beragam dengan implikasi signifikan bagi keamanan regional, stabilitas ekonomi, dan kelestarian lingkungan. Penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU) menimbulkan implikasi parah bagi perikanan tuna Indonesia, menyebabkan menipisnya stok tuna, mengancam perekonomian negara karena tuna menyumbang 2,65% terhadap PDB dan menyumbang sekitar 16% dari produksi tuna global (Khan et al., 2024).

Aktivitas IUU fishing di Laut Natuna Utara tidak hanya berdampak pada kerugian ekonomi akibat eksploitasi sumber daya laut yang dilakukan secara ilegal, tetapi juga merupakan manifestasi dari pelanggaran batas yurisdiksi suatu negara yang berimplikasi pada isu kedaulatan negara. Menurut Chapsos & Hamilton (2019), penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU) di Indonesia melibatkan kapal asing yang secara sistematis mencuri ikan di Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE), sering didukung jaringan logistik yang kuat. Operasi ini dapat diperumit lebih lanjut dengan keterlibatan elemen paramiliter dari negara asal kapal, yang menunjukkan dimensi kejahatan terorganisir transnasional. Situasi ini memperburuk tantangan yang Indonesia dalam mengelola perikanan dan mengatasi implikasi yang lebih luas dari penangkapan ikan IUU terhadap keamanan dan keberlanjutan. Pembajakan di wilayah maritim sering melibatkan taktik canggih, termasuk menyamarkan kapal bajak laut sebagai kapal penangkap ikan, yang mempersulit identifikasi awal oleh pasukan keamanan. Taktik ini sangat menantang karena memungkinkan bajak laut berbaur dengan lalu lintas maritim yang sah, sehingga sulit bagi pihak berwenang untuk membedakan antara kegiatan

penangkapan ikan asli dan potensi ancaman. Bajak laut juga sering menggunakan kapal nelayan sebagai penutup untuk mendekati kapal target tanpa menimbulkan kecurigaan. Taktik ini efektif karena penggunaan kapal nelayan umum di banyak wilayah maritim mempersulit pasukan keamanan untuk mengidentifikasi potensi ancaman tanpa intelijen khusus atau sistem deteksi canggih (Phayal et al., 2024).

Ketegangan geopolitik di kawasan Laut Cina Selatan turut memperparah ancaman di Laut Natuna Utara. Klaim sepihak Tiongkok melalui konsep "nine-dash line" yang menyorok ke wilayah ZEE Indonesia telah menimbulkan berbagai insiden diplomatik dan operasional di lapangan (McLaughlin, 2022). Ketika kapal pengawas perikanan dan penjaga pantai Tiongkok memasuki wilayah yang secara hukum internasional berada dalam yurisdiksi Indonesia, muncul benturan kepentingan antara prinsip hukum laut dengan realitas kekuasaan di laut (power projection). Meskipun Indonesia secara tegas tidak mengakui klaim tersebut, dan tetap berpegang pada United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) 1982, keterbatasan pengawasan dan penegakan hukum membuat posisi Indonesia rentan terhadap pelanggaran berulang. Hal ini menciptakan kondisi dilematis, di mana ketegasan diplomatik belum sepenuhnya didukung oleh kesiapsiagaan teknologi dan operasional di lapangan.

Di tengah konteks ancaman yang kian kompleks dan dinamis ini, sistem pemantauan maritim konvensional yang digunakan oleh Indonesia menunjukkan berbagai kelemahan mendasar. Sistem radar pesisir, pengamatan visual, patroli rutin, dan pelaporan manual dari kapal nelayan atau aparat di lapangan sering kali tidak mampu memberikan peringatan dini secara akurat dan berkelanjutan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Denamiel et al., 2021), metode-metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan dalam kemampuannya untuk menangkap ketidakpastian. Terbatasnya jangkauan radar serta keterbatasan kapal patroli dan personel di lautan luas menyebabkan banyak potensi ancaman tidak terdeteksi hingga terlambat. Dalam beberapa kasus, informasi mengenai pelanggaran baru diketahui setelah kejadian berlangsung atau setelah dampak ekonomi dan politiknya muncul secara signifikan. Menurut (Şengül et al., 2023) deteksi ancaman yang terlambat secara signifikan membahayakan keselamatan dan keamanan maritim, terutama di daerah laut kritis di mana tanggapan tepat waktu sangat penting.

Di sinilah teknologi kecerdasan buatan (AI) menawarkan peluang strategis untuk memperkuat sistem keamanan maritim Indonesia. AI memungkinkan pengolahan data dalam jumlah besar dari berbagai sumber—seperti data Automatic Identification System (AIS), citra satelit, sensor laut, rekaman radar, dan laporan intelijen—dalam waktu nyata (real-time) untuk mendeteksi pola-pola yang mencurigakan atau anomali dalam pergerakan kapal (Venskus et al., 2019). Melalui pendekatan machine learning dan predictive analytics, sistem kecerdasan buatan (AI) dapat menganalisis data historis dari berbagai insiden ilegal, unreported, and unregulated (IUU) fishing maupun pembajakan, untuk mengidentifikasi pola dan indikator awal yang konsisten muncul sebelum kejadian berlangsung. Menurut temuan Welch et al. (2022), algoritma AI yang dilatih dengan data spasial-temporal dari rekaman pergerakan kapal, cuaca laut, serta insiden masa lalu dapat mengenali anomali perilaku kapal—misalnya, perubahan mendadak dalam kecepatan, arah, atau pola pelayaran yang tidak lazim—sebagai indikator potensi ancaman. Kemampuan ini memungkinkan sistem untuk menghasilkan early

warning atau peringatan dini secara otomatis kepada pihak berwenang sebelum ancaman aktual terjadi. Berbeda dari sistem konvensional yang bersifat reaktif dan baru merespons setelah pelanggaran terjadi, pendekatan berbasis AI bersifat proaktif dan antisipatif. AI tidak hanya membantu mendeteksi keberadaan kapal ilegal, tetapi juga memprediksi kapan dan di mana potensi pelanggaran dapat muncul, sehingga aparat dapat menyusun strategi penempatan patroli dan penindakan secara lebih efisien. Dengan demikian, teknologi ini membuka peluang baru bagi sistem keamanan laut Indonesia untuk bertransformasi dari sekadar pengawasan ke arah pencegahan yang berbasis data.

Di Laut Natuna Utara, penerapan kecerdasan buatan (AI) memiliki potensi besar untuk menutup celah dalam sistem pengawasan maritim konvensional yang selama ini terbatas oleh jangkauan radar, jumlah armada patroli, dan kecepatan respons. AI dapat secara otomatis mendeteksi pola pergerakan kapal yang mencurigakan, seperti berhenti tiba-tiba di tengah laut, menghindari jalur pelayaran umum, atau mematikan sistem Automatic Identification System (AIS). Pola-pola ini sering menjadi indikator awal aktivitas ilegal, seperti pencurian ikan atau pembajakan. Dengan kemampuan pemrosesan data real-time, AI mampu memberikan sinyal peringatan dini kepada aparat keamanan laut untuk segera melakukan verifikasi dan respons taktis. Lebih jauh, AI juga dapat mengintegrasikan data lingkungan seperti cuaca, arus laut, musim migrasi ikan, dan aktivitas ekonomi setempat, guna memperkuat presisi prediksi. Dengan cara ini, strategi pengamanan laut menjadi lebih proaktif, berbasis data, dan mampu merespons ancaman sebelum terjadi eskalasi.

Lebih dari sekadar deteksi anomali, kecerdasan buatan (AI) juga memungkinkan visualisasi dan pelacakan banyak kapal secara simultan di wilayah laut yang sangat luas—kemampuan yang sulit dicapai dengan pendekatan manual, terutama mengingat keterbatasan personel dan infrastruktur pengawasan maritim Indonesia. Menurut penelitian Liu et al. (2024), model deteksi berbasis AI mampu menangani interaksi spasial dan temporal antar kapal secara dinamis, sehingga menghasilkan prediksi yang lebih akurat dan andal. Model ini tidak hanya membaca posisi, tetapi juga menganalisis kecepatan, arah, dan pola historis pergerakan kapal untuk mengidentifikasi potensi ancaman. Hal ini sangat penting dalam konteks Laut Natuna Utara yang memiliki lalu lintas kapal padat dan rawan pelanggaran batas wilayah. Dengan kemampuan pelacakan canggih ini, pengambil keputusan di sektor maritim dapat bertindak lebih cepat dan tepat, sehingga meningkatkan keselamatan laut, efektivitas patroli, dan efisiensi alokasi sumber daya keamanan.

Penting untuk dicatat bahwa pendekatan berbasis AI yang dibahas tidak untuk menggantikan sistem pertahanan militer sebagai strategi yang ofensif. Esai ini secara eksplisit tidak membahas penggunaan senjata, kekuatan tempur, atau operasi militer. Sebaliknya, fokus utama adalah pada deteksi dan pencegahan dini sebagai bagian dari strategi preventive defense. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pertahanan non-konfrontatif yang menekankan pada kesiapsiagaan teknologi, penegakan hukum berbasis bukti, serta penguatan legitimasi hukum internasional. Dengan demikian, penggunaan AI dilihat sebagai alat bantu pengambil keputusan yang mendukung institusi maritim seperti Bakamla, TNI AL, Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP), serta Badan Informasi Geospasial (BIG) dalam menjalankan mandatnya secara lebih efektif.

Studi pemanfaatan AI menjadi semakin relevan di tengah tren global menuju smart maritime security, di mana negara-negara maju mulai mengembangkan sistem pemantauan berbasis AI untuk mendeteksi aktivitas ilegal di perairan mereka. Tren global menuju keamanan maritim cerdas tersebut ditandai dengan integrasi teknologi canggih dan strategi inovatif untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan dalam operasi maritim. Tren ini didorong oleh kebutuhan untuk mengatasi tantangan kompleks seperti ancaman dunia maya, pembajakan, dan bahaya lingkungan, sementara juga memanfaatkan peluang untuk pertumbuhan ekonomi dan peningkatan tata kelola (Oruc et al., 2024). Indonesia, dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia dan posisi strategis di jalur pelayaran global, perlu beradaptasi dan mengambil pelajaran dari pendekatan-pendekatan ini.

Dengan memperhatikan fakta bahwa Laut Natuna Utara adalah titik kritis dalam menjaga kedaulatan dan integritas wilayah maritim Indonesia, serta mempertimbangkan berbagai keterbatasan pengawasan konvensional, maka pengembangan model AI untuk sistem deteksi ancaman menjadi sebuah keharusan strategis. Model tersebut tidak hanya akan memperkuat postur keamanan nasional, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap diplomasi maritim Indonesia yang berbasis pada data, transparansi, dan tata kelola laut yang modern. Selain itu, model ini dapat berfungsi sebagai prototipe untuk diterapkan di wilayah perairan Indonesia lainnya yang menghadapi tantangan serupa, seperti Selat Malaka, Laut Arafura, dan perairan Papua.

Singkatnya, latar belakang dari studi ini berpijak pada kebutuhan mendesak untuk mereformasi pendekatan keamanan maritim Indonesia melalui pemanfaatan teknologi canggih berbasis kecerdasan buatan. AI tidak hanya menawarkan kemampuan untuk menganalisis, memprediksi, dan memvisualisasikan ancaman di laut, tetapi juga berperan sebagai instrumen strategis untuk mencegah konflik, memperkuat kontrol wilayah, dan melindungi sumber daya laut nasional. Melalui studi kasus Laut Natuna Utara, esai ini bertujuan membahas deteksi ancaman berbasis AI yang aplikatif, adaptif, dan relevan dengan konteks keamanan maritim Indonesia kontemporer.

METODE PENELITIAN

Metode dalam studi ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan strategi studi kasus pada wilayah Laut Natuna Utara. Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, telaah dokumen kebijakan keamanan maritim Indonesia, serta analisis data sekunder dari sumber-sumber terbuka seperti Automatic Identification System (AIS), citra satelit Synthetic Aperture Radar (SAR) dan optikal, serta laporan lembaga maritim nasional dan internasional. Data-data ini digunakan untuk menggambarkan karakteristik ancaman maritim di wilayah studi, menjelaskan keterbatasan sistem pengawasan konvensional yang ada, serta mengkaji potensi pemanfaatan teknologi AI sebagai solusi dalam sistem deteksi dini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evolusi dan Sub-set Artificial Intelligence

Artificial Intelligence (AI) merupakan salah satu pencapaian teknologi paling signifikan dalam revolusi digital abad ke-21, dan kini telah memasuki fase implementatif dalam berbagai sektor strategis, termasuk industri dan ilmu kelautan. Pada awal pengembangannya,

AI dirancang untuk meniru proses pengambilan keputusan manusia dengan mengolah data dalam jumlah besar melalui sistem komputasi cerdas. Namun, seiring kemajuan dalam kekuatan pemrosesan, algoritma, dan ketersediaan data real-time, AI telah berevolusi jauh melampaui tujuan awalnya. Saat ini, AI memiliki kapabilitas untuk melakukan fungsi-fungsi kompleks secara otonom, termasuk pengenalan objek, klasifikasi spasial-temporal, serta prediksi berbasis pola historis dan kondisi lingkungan terkini.

Dalam konteks industri maritim, transformasi operasional berbasis AI telah menciptakan paradigma baru. AI secara bertahap mengubah proses operasional tradisional industri maritim, bergerak dari sistem tradisional yang mengandalkan intuisi menjadi sistem yang mengoptimalkan penggunaan data (Munim et al., 2020). Salah satu terobosan paling menonjol adalah pengembangan kapal otonom, yaitu sistem transportasi laut yang mampu berlayar dan mengambil keputusan navigasi tanpa intervensi manusia secara langsung (Francis & Traykovski, 2021). Sistem ini menggunakan AI untuk mengoptimalkan rute pelayaran, menghindari tabrakan, serta menyesuaikan operasi berdasarkan kondisi laut yang dinamis (He et al., 2019). AI juga menjadi komponen penting dalam sistem navigasi berbasis data (*data-driven navigation*), yang menggantikan intuisi subjektif kapten kapal dengan model prediktif yang didukung sensor, radar, dan data historis. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi bahan bakar dan keselamatan pelayaran, tetapi juga mengurangi risiko kesalahan manusia (*human error*) dalam operasi kapal (Zhi et al., 2021).

Kecerdasan buatan (AI) memainkan peran penting dalam transportasi maritim dengan meningkatkan keselamatan dan manajemen risiko ((Simion et al., 2024). Aplikasi utama AI dalam transportasi maritim meliputi analisis risiko, manajemen sumber daya kru, penanganan material berbahaya, pemeliharaan prediktif, dan sistem navigasi (Durlík et al., 2024a). Sistem AI dapat mengidentifikasi potensi bahaya, memberikan dukungan keputusan real-time, memantau bahan berbahaya, memprediksi kegagalan peralatan, dan mengoptimalkan rute pengiriman.

AI dalam industri maritim meningkatkan keberlanjutan dengan mengoptimalkan penggunaan bahan bakar, meningkatkan efisiensi operasional, dan mengurangi emisi (Durlík et al., 2024b). Aplikasi utama termasuk pengoptimalan bahan bakar, pemeliharaan prediktif, perencanaan rute, dan manajemen energi cerdas. Implementasi yang berhasil, seperti yang dilakukan oleh Maersk Line dan Pelabuhan Rotterdam, menunjukkan kemajuan signifikan dalam efisiensi bahan bakar dan pemantauan lingkungan.

Selain sektor industri, integrasi AI juga merevolusi ilmu kelautan dengan mempercepat pemrosesan data laut dalam skala besar seperti yang dijelaskan dalam penelitian Malde et al., (2020). Dalam era digital saat ini, para ilmuwan kelautan dihadapkan pada limpahan data dari berbagai platform—mulai dari sensor bawah laut, drone laut, kapal penelitian, hingga citra satelit. Namun, keterbatasan dalam kapasitas analisis manual menciptakan apa yang disebut sebagai *data bottleneck*, yakni kesenjangan antara volume data yang tersedia dan kemampuan untuk menafsirkannya secara efisien. Di sinilah AI berperan sebagai solusi kunci. Dengan menggunakan algoritma *machine learning* dan *deep learning*, AI dapat mengotomatisasi proses identifikasi pola, klasifikasi data biologis, dan prediksi tren ekosistem, sehingga meningkatkan kecepatan dan akurasi penelitian kelautan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Feng (2020), berkaitan dengan bagaimana AI merevolusi ilmu kelautan, teknologi AI digunakan untuk mengoptimalkan sistem pemrosesan informasi bahasa kapal. Optimailisasini melibatkan pemrosesan data real-time, yang sangat penting untuk pergerakan dan manajemen lalu lintas kapal laut. AI memungkinkan kueri, pengambilan, dan waktu respons yang lebih cepat dibandingkan dengan sistem tradisional, membuat operasi maritim lebih efisien. Disamping itu, AI membantu dalam mengelola

berbagai jenis database bahasa di kapal, termasuk database statis, dinamis, dan historis. Manajemen data yang komprehensif ini mendukung integrasi dan pertukaran informasi antara sistem informasi bahasa yang berbeda, memfasilitasi komunikasi yang lebih baik dan pengambilan keputusan di kapal.

Platform informasi bahasa kapal berbasis AI mendukung kerja kolaboratif di antara berbagai aplikasi. Integrasi ini memungkinkan pertukaran data yang mulus, yang penting untuk navigasi yang efektif dan keselamatan operasional. Dengan demikian, AI mengubah ilmu kelautan dengan mengoptimalkan sistem pemrosesan informasi, meningkatkan manajemen data serta mendukung kerja kolaboratif. Kemajuan ini berkontribusi pada operasi maritim yang lebih aman dan lebih efisien, menunjukkan peran penting AI di bidang ini. Dalam implementasinya di sektor maritim, AI memiliki tiga cabang utama yang paling banyak digunakan, yakni Machine Learning (ML), Deep Learning (DL), dan Bayesian Networks (BN), masing-masing dengan keunggulan dan fungsi yang berbeda.

Machine Learning (ML) merupakan metode pembelajaran berbasis data yang mampu mengenali pola dan membuat prediksi tanpa pemrograman eksplisit. ML telah digunakan secara luas dalam penelitian kelautan untuk memodelkan habitat laut, memprediksi suhu permukaan laut, hingga mengidentifikasi spesies ikan berdasarkan data video dan akustik. Beyan dan Browman (2020) menekankan bahwa ML mengurangi ketergantungan pada analisis manual, yang memakan waktu dan sumber daya manusia, dengan menawarkan model adaptif yang dapat memperbaharui prediksinya secara otomatis seiring masuknya data baru. Di sektor industri, ML juga diterapkan dalam sistem pemantauan aktivitas kapal dan peringatan dini untuk mendeteksi perilaku mencurigakan di laut.

Deep Learning (DL), sebagai cabang dari ML, menggunakan jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Networks/ANNs) untuk memproses data secara mendalam melalui banyak lapisan nonlinier. Teknologi ini sangat unggul dalam pengolahan data kompleks seperti gambar, video, dan sinyal akustik. Pedro et al. (2020) menunjukkan bagaimana Convolutional Neural Networks (CNNs) dapat digunakan untuk mendeteksi aktivitas penangkapan ikan secara otomatis melalui analisis visual dari rekaman video di atas kapal. CNN mampu mengenali tindakan mencurigakan seperti transshipment ilegal atau penggunaan alat tangkap yang dilarang, sekaligus memberikan verifikasi visual terhadap data posisi kapal dari sistem VMS (Vessel Monitoring System). Kombinasi antara visual recognition dan data pergerakan kapal ini memperkuat validitas dan efektivitas pemantauan aktivitas perikanan secara real-time.

Bayesian Networks (BN), berbeda dari ML dan DL yang lebih deterministik, menggunakan pendekatan probabilistik untuk memodelkan ketidakpastian dan kompleksitas dalam sistem maritim. BN dapat digunakan untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara berbagai faktor yang berkontribusi terhadap aktivitas penangkapan ikan ilegal. Elizabeth et al. (2020) menguraikan bagaimana BN dapat menggabungkan variabel seperti kapasitas manajemen perikanan, produktivitas spesies ikan, efektivitas penegakan hukum, dan dinamika pasar dalam satu kerangka prediktif. Pendekatan ini sangat berguna dalam konteks keterbatasan data, di mana BN dapat mengandalkan pengetahuan ahli untuk mengisi kekosongan informasi, memberikan gambaran komprehensif terhadap risiko dan titik-titik rawan dalam sistem perikanan.

Ketiga cabang AI tersebut bekerja secara sinergis dalam membentuk ekosistem pengawasan maritim yang cerdas dan adaptif. ML menyediakan kemampuan klasifikasi dan prediksi dasar; DL memperkuat validasi visual dan pemrosesan data kompleks; sementara BN memberikan pemahaman probabilistik yang membantu dalam pengambilan keputusan strategis. Dalam konteks Indonesia, terutama di wilayah rawan seperti Laut Natuna Utara, kombinasi ketiganya dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi kapal yang berperilaku anomali,

memverifikasi aktivitas penangkapan secara visual, dan memodelkan risiko berdasarkan variabel lingkungan dan sosial-ekonomi.

Dengan demikian, perkembangan dan aplikasi AI dalam sektor maritim bukan sekadar inovasi teknologi, melainkan representasi dari pergeseran paradigma dalam pengelolaan sumber daya laut dan pengamanan wilayah perairan. AI membuka jalan bagi sistem maritim yang tidak hanya responsif, tetapi juga prediktif dan berbasis bukti, yang pada akhirnya memperkuat kedaulatan, keberlanjutan, dan efisiensi dalam pengelolaan laut Indonesia.

Konsep Predictive Security dan Preventive Defense

Dalam lingkungan strategis yang semakin kompleks dan tidak menentu, paradigma keamanan maritim tradisional yang mengandalkan respons reaktif terhadap insiden dianggap tidak lagi memadai. Ancaman modern seperti penangkapan ikan ilegal (IUU fishing), pembajakan, dan pelanggaran wilayah maritim kini bersifat non-konvensional, tersembunyi, dan dinamis. Dalam konteks ini, pendekatan berbasis predictive security dan preventive defense menjadi sangat relevan, karena tidak hanya berfokus pada penindakan pasca-kejadian, tetapi juga pada upaya pencegahan melalui pemanfaatan teknologi dan data untuk memprediksi potensi ancaman secara lebih awal dan akurat.

Konsep predictive security merupakan perkembangan mutakhir dari doktrin keamanan yang sebelumnya lebih berfokus pada deterrence atau pencegahan melalui ancaman penggunaan kekuatan. Jika deterrence bertumpu pada kemampuan ofensif dan postur militer sebagai alat penekan psikologis bagi lawan, maka predictive security menekankan pada pengumpulan, analisis, dan pemodelan data untuk mengidentifikasi potensi ancaman sebelum berkembang menjadi aksi nyata (Aradau & Blanke, 2017). Dengan demikian, prediksi bukan sekadar aktivitas intelijen, melainkan menjadi komponen utama dari strategi pertahanan itu sendiri.

Dalam teori keamanan modern, dikenal prinsip anticipatory intelligence, yakni kemampuan suatu sistem keamanan untuk tidak hanya mengamati dan merekam, tetapi juga memahami dinamika potensi ancaman dan bertindak sebelum terjadi kerugian strategis. Menurut Paes & de Oliveira (2023), pendekatan proaktif ini meningkatkan kesadaran situasional, memungkinkan intervensi tepat waktu dalam kasus-kasus potensi insiden maritim seperti pembajakan atau penyelundupan. Prinsip ini menjadi dasar dari banyak transformasi pertahanan kontemporer, khususnya dalam konteks keamanan laut yang kompleks dan multilateral. Antisipasi tidak hanya bersifat taktis, tetapi juga strategis dan diplomatis: dengan mengetahui potensi pelanggaran wilayah atau pergerakan kapal ilegal, negara dapat menyusun strategi respons berbasis data dan menghindari eskalasi yang tidak perlu.

Salah satu pilar utama dari pendekatan keamanan prediktif adalah pembangunan sistem early warning atau peringatan dini. Menurut (Afra et al., 2020), sistem peringatan dini adalah aspek fundamental dari keamanan prediktif, karena sistem peringatan dini ini memanfaatkan teknologi dan analisis data untuk mengidentifikasi dan mengurangi potensi ancaman secara proaktif. Dalam konteks maritim, sistem ini mengacu pada arsitektur teknologi yang mampu mengidentifikasi aktivitas kapal mencurigakan secara real-time dengan menggabungkan berbagai sumber data dan memprosesnya secara otomatis. Sistem ini bukan hanya alat monitoring, tetapi sebuah intelligent surveillance framework yang memungkinkan negara merespons secara lebih cepat dan terarah. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Li et al., 2024), sistem ini memfasilitasi penilaian dan penanggulangan serangan potensial dengan menggunakan radar gesit frekuensi untuk mengidentifikasi kapal bajak laut. Ini menggunakan penginderaan terkompresi untuk mengatasi tantangan komputasi dan merekonstruksi pengamatan radar, menghasilkan algoritma deteksi target yang memberikan informasi tepat

tentang ancaman terdekat. Model ini menunjukkan kinerja peringatan yang unggul, mencapai akurasi rata-rata 0,964, presisi 0,966, dan daya ingat 0,955.

Arsitektur umum dari sistem peringatan dini maritim berbasis AI terdiri atas tiga komponen utama: sensor dan data acquisition, data fusion dan pemrosesan AI, serta visualisasi dan peringatan operasional. Pada tahap pertama, data dikumpulkan dari berbagai sumber: AIS, VMS (Vessel Monitoring System), citra satelit radar (SAR), drone laut, sonar, serta laporan patroli. VMS adalah komponen penting dari operasi maritim modern. VMS mampu meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan perlindungan lingkungan melalui teknologi pelacakan dan pemantauan canggih (Xavier et al., 2021). VMS juga mampu menyediakan data real-time tentang lokasi kapal, yang penting untuk memastikan kepatuhan terhadap peraturan dan meningkatkan keselamatan maritim (Qiming et al., 2023). Tahap kedua adalah inti dari sistem ini, yaitu pemrosesan data menggunakan algoritma machine learning dan deep learning untuk mengenali pola, mendeteksi anomali, dan membuat prediksi berdasarkan rekam jejak historis dan kondisi aktual. Tahap terakhir adalah konversi hasil prediksi menjadi visualisasi di dashboard operasional dan penyampaian alert kepada aparat keamanan laut.

Sistem peringatan dini tidak hanya menjadi alat pengawasan, tetapi juga instrumen pembuatan kebijakan. Ketika AI menunjukkan bahwa sebuah wilayah laut tertentu memiliki lonjakan aktivitas kapal asing yang tidak biasa, maka instansi terkait seperti Bakamla atau TNI AL dapat mengarahkan patroli ke wilayah tersebut lebih awal, mencegah pelanggaran sebelum terjadi. Ini menciptakan sinergi antara teknologi dan pengambilan keputusan berbasis risiko (risk-based patrol allocation), yang jauh lebih efisien dibanding pendekatan patroli acak atau rutin yang bersifat statis.

Salah satu perubahan mendasar dalam paradigma keamanan maritim adalah pergeseran dari responsive enforcement ke preventive defense. Sistem lama mengandalkan pelaporan setelah kejadian, disusul dengan penindakan atau investigasi. Meskipun masih diperlukan, pendekatan ini seringkali terlambat dan berisiko menimbulkan eskalasi konflik. Preventive defense justru berfokus pada pemahaman dini terhadap potensi ancaman, penempatan sumber daya secara strategis, dan pencegahan sebelum terjadi insiden.

Dalam perbandingan antara kedua pendekatan tersebut, sistem prediktif jelas memiliki beberapa keunggulan. Pertama, ia lebih efisien dari segi penggunaan anggaran dan tenaga operasional karena sumber daya dialokasikan berdasarkan potensi risiko. Kedua, ia mengurangi kerugian ekonomi dan reputasi negara akibat pelanggaran yang berhasil dicegah. Ketiga, ia meningkatkan legitimasi negara dalam pengelolaan wilayah maritim karena berbasis pada sistem yang transparan dan data-driven.

Namun, perlu ditegaskan bahwa AI dan sistem prediktif bukanlah senjata dalam arti militer, melainkan alat bantu strategis. Dalam konteks keamanan maritim Indonesia yang bersifat sipil dan berorientasi pada tata kelola laut berkelanjutan, penting untuk mencegah militerisasi teknologi AI. Pendekatan preventif ini harus tetap berada dalam koridor penegakan hukum berbasis sipil (law enforcement), bukan transformasi ke arah sistem pengawasan represif atau ofensif. Oleh karena itu, AI harus diposisikan sebagai decision-support tool, bukan sebagai entitas otonom yang menggantikan peran manusia dalam pengambilan keputusan.

Dalam konteks Indonesia, transformasi menuju pendekatan prediktif tidak hanya relevan, tetapi mendesak. Laut Natuna Utara adalah wilayah rawan yang sangat memerlukan sistem deteksi dini yang efektif, bukan hanya untuk menghadapi kapal asing, tetapi juga untuk mencegah eksploitasi berlebihan terhadap sumber daya laut. Dengan mengadopsi pendekatan ini, Indonesia tidak hanya memperkuat postur keamanannya, tetapi juga menunjukkan komitmen terhadap tata kelola laut berbasis teknologi dan data, sejalan dengan prinsip Indonesia sebagai negara kepulauan yang berdaulat, berdaya, dan berwawasan maritim.

Sumber Data dan Integrasi Sistem Desain Model AI untuk Deteksi Ancaman Maritim

Penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam sistem deteksi ancaman maritim sangat bergantung pada kualitas dan kuantitas data yang tersedia. Model AI yang efektif dan akurat tidak dapat bekerja secara optimal tanpa fondasi data yang solid, kaya konteks, dan terintegrasi dari berbagai sumber. Dalam konteks keamanan maritim, khususnya untuk mendeteksi aktivitas penangkapan ikan ilegal (IUU fishing) dan pembajakan di wilayah Laut Natuna Utara, dua sumber utama data yang menjadi tulang punggung sistem adalah Automatic Identification System (AIS) dan citra satelit, yang dapat diperkuat oleh sensor laut tambahan.

AIS merupakan sistem pelacakan otomatis berbasis radio VHF yang dikembangkan untuk meningkatkan keselamatan pelayaran dengan memungkinkan kapal bertukar informasi secara otomatis mengenai identitas, posisi, kecepatan, arah, dan status navigasi (Wright et al., 2019). Sistem ini mewajibkan semua kapal penumpang internasional dan kapal kargo dengan bobot di atas 300 GT untuk mengaktifkan transponder AIS mereka (Tu et al., 2018). Persyaratan ini meningkatkan keselamatan maritim dengan memungkinkan pertukaran elektronik data navigasi, yang mencakup informasi penting seperti lokasi kapal, kecepatan, dan jalur. Data AIS sangat penting dalam membentuk situational awareness di lautan dan merupakan komponen utama dari sistem pemantauan pergerakan kapal global.

Dari perspektif AI, data AIS memiliki sejumlah karakteristik yang sangat mendukung pengembangan model pembelajaran mesin (machine learning). Karakteristik ini termasuk sejumlah besar data yang dihasilkan dari kegiatan maritim, dimensi temporal dan spasial data, dan kemampuan untuk menangkap berbagai peristiwa maritim (Li et al., 2024). Selanjutnya, informasi spasial dan temporal dalam AIS dapat digunakan untuk membangun dataset besar yang menggambarkan perilaku normal dan tidak normal kapal. Dengan demikian, model dapat dilatih untuk mengenali pola pergerakan kapal yang lazim di wilayah tertentu dan mengidentifikasi penyimpangan yang mencurigakan.

Misalnya, dalam konteks IUU fishing, model AI dapat mendeteksi perilaku seperti (Zhang et al., 2020, (do Nascimento et al., 2024):

- Kapal yang sering mematikan AIS di lokasi strategis (indikasi penyembunyian aktivitas ilegal).
- Pola lintasan melingkar dalam durasi lama yang sering kali menandakan penangkapan ikan.
- Kapal bergerak sangat lambat dalam jarak pendek di zona ZEE yang dilarang.
- Kapal yang melakukan “rendezvous” dengan kapal lain di tengah laut, yang berpotensi menandakan aktivitas transshipment ilegal.

Selain itu, data AIS historis dapat digunakan untuk membangun baseline dari pergerakan kapal legal dan membandingkannya dengan aktivitas aktual guna mendeteksi anomali. Sebagai contoh, jika sebuah kapal terdaftar sebagai kapal tanker tetapi menunjukkan pola lintasan yang lebih mirip dengan kapal penangkap ikan, maka sistem dapat memberikan sinyal peringatan dini kepada aparat.

Namun demikian, data AIS juga memiliki sejumlah kelemahan. Salah satunya adalah AIS spoofing, yaitu manipulasi sinyal atau identitas kapal untuk mengelabui sistem pengawasan. Dalam kasus lain, beberapa kapal secara sengaja mematikan transponder AIS mereka untuk menghindari deteksi. Di sinilah AI berperan penting: dengan mengombinasikan AIS dengan data lain seperti citra satelit dan sensor laut, sistem dapat mengisi celah informasi dan tetap memberikan gambaran menyeluruh mengenai aktivitas maritim.

Sumber data kedua yang sangat penting dalam membangun model AI maritim adalah citra satelit. Teknologi satelit menawarkan kemampuan pengamatan cakupan luas dan non-intrusif, menjadikannya ideal untuk memantau wilayah maritim terbuka seperti Laut Natuna Utara. Dalam konteks ini, dua jenis utama citra satelit yang digunakan adalah Synthetic Aperture Radar (SAR) dan optical imagery.

SAR merupakan teknologi radar aktif yang dapat menghasilkan citra permukaan laut baik siang maupun malam dan dalam segala kondisi cuaca. Ini menjadi keunggulan utama dibanding citra optik yang sangat tergantung pada kondisi langit cerah. SAR sangat efektif dalam mendeteksi objek logam seperti kapal di permukaan laut (Cao et al., 2024). Teknologi ini juga memungkinkan pengukuran kecepatan, arah, dan ukuran kapal, serta dapat digunakan untuk mengidentifikasi aktivitas mencurigakan seperti:

- Kapal tanpa sinyal AIS yang muncul di citra SAR.
- Kelompok kapal yang berdekatan di lokasi yang tidak biasa.
- Kapal yang berada terlalu dekat dengan batas ZEE.

Di sisi lain, citra optik—yang menyerupai gambar visual biasa—memiliki keunggulan dalam hal resolusi spasial dan kemampuan klasifikasi visual. Citra ini dapat digunakan untuk mengenali jenis kapal berdasarkan bentuk dan warna, mengamati aktivitas penangkapan ikan, serta memverifikasi data AIS secara visual. Meskipun terbatas oleh faktor cuaca dan pencahayaan, citra optik tetap berguna untuk validasi informasi dan pembuatan peta historis aktivitas maritim.

Model AI berbasis computer vision, seperti Convolutional Neural Networks (CNN), dapat dilatih untuk mengklasifikasikan kapal, mengenali jenis alat tangkap, atau mengidentifikasi tanda visual dari kegiatan ilegal. Dalam praktiknya, kombinasi antara citra SAR dan optik memberikan kerangka kerja yang kuat untuk pengawasan visual.

Selain citra satelit, sensor laut seperti sonar, akustik bawah air, dan sensor suhu permukaan laut juga dapat digunakan sebagai pelengkap. Sensor ini biasanya terpasang di kapal patroli, drone laut (unmanned surface vehicles), atau pelampung (buoys) (Soldi et al., 2021). Data dari sensor laut dapat digunakan untuk:

- Mengonfirmasi kehadiran kapal yang tidak terlihat oleh radar atau citra satelit.
- Mendeteksi suara mesin kapal atau aktivitas penangkapan di bawah permukaan.
- Memantau kondisi lingkungan seperti suhu, arus, dan kedalaman laut yang relevan untuk prediksi migrasi ikan.

Integrasi semua sumber data ini—AIS, satelit, dan sensor laut—merupakan kunci dari sistem deteksi berbasis AI yang andal. Untuk itu, diperlukan kerangka data fusion yang mampu menyatukan data dalam berbagai format, resolusi, dan waktu ke dalam satu platform terpadu. Dengan menggunakan teknik pemrosesan paralel, AI dapat menilai kesesuaian antara data AIS dan citra satelit untuk memverifikasi lokasi kapal secara real-time. Apabila ditemukan kapal di citra satelit namun tidak memiliki sinyal AIS, sistem akan menandainya sebagai objek “non-cooperative” dan memicu peringatan dini.

Desain model AI untuk deteksi ancaman maritim tidak dapat dilepaskan dari fondasi data yang kuat. Sumber data utama seperti AIS, citra satelit SAR dan optik, serta sensor laut memberikan gambaran yang berbeda namun saling melengkapi terhadap aktivitas kapal di laut. Melalui proses integrasi data yang cermat dan pemrosesan cerdas berbasis AI, sistem dapat mendeteksi pola mencurigakan, mengisi celah informasi, dan memberikan sinyal peringatan dini sebelum terjadi pelanggaran hukum maritim. Dalam konteks Laut Natuna Utara—wilayah rawan dan strategis—desain seperti ini bukan hanya relevan, melainkan esensial untuk memperkuat kedaulatan, efisiensi pengawasan, dan pengambilan keputusan berbasis risiko.

Pemilihan Pendekatan Pembelajaran Mesin Dalam Konteks IUU Fishing di Natuna

Dalam konteks kecerdasan buatan (AI) untuk deteksi ancaman maritim, khususnya dalam upaya mengidentifikasi aktivitas ilegal, unreported, and unregulated (IUU) fishing di wilayah strategis seperti Laut Natuna Utara, pemilihan pendekatan pembelajaran mesin sangat menentukan kualitas dan efektivitas sistem deteksi. Dua pendekatan utama dalam domain ini adalah supervised learning (pembelajaran terawasi) dan unsupervised learning (pembelajaran tidak terawasi). Masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan, tergantung pada jenis data yang tersedia, kompleksitas pola pelanggaran, serta tujuan sistem dalam mendukung pengambilan keputusan taktis maupun strategis. Dalam konteks Natuna, di mana data pelayaran dan aktivitas perikanan kerap tidak lengkap atau disembunyikan, kombinasi kedua pendekatan ini menjadi sangat relevan.

Supervised learning digunakan ketika tersedia dataset historis yang memiliki label jelas, seperti aktivitas kapal legal vs ilegal, atau insiden pelanggaran yang sudah dikonfirmasi (Watson et al., 2023). Dalam kasus IUU fishing, data ini dapat mencakup informasi tentang kapal-kapal yang pernah tertangkap melakukan penangkapan ikan tanpa izin, pola pergerakan kapal dalam zona ekonomi eksklusif (ZEE) Indonesia, serta waktu dan kecepatan pelayaran yang mencurigakan. Algoritma seperti Random Forest, Support Vector Machine (SVM), dan Long Short-Term Memory (LSTM) dapat dilatih untuk mengenali pola perilaku kapal yang cenderung terlibat dalam praktik IUU. Dengan demikian, sistem berbasis supervised learning mampu memberikan skor risiko atau peringatan dini terhadap kapal yang saat ini beroperasi di perairan Natuna dengan pola yang menyerupai insiden pelanggaran sebelumnya (Watson et al., 2023).

Kekuatan utama dari pendekatan ini terletak pada kemampuannya menghasilkan prediksi akurat, terutama jika data historis cukup lengkap dan representatif (Watson et al., 2023). Dalam konteks Natuna yang menjadi titik pertemuan aktivitas nelayan lokal dan kapal asing, AI dapat digunakan untuk memantau rute kapal asing yang memasuki ZEE tanpa izin dan segera mengklasifikasikannya sebagai ancaman potensial. Namun, pendekatan ini sangat tergantung pada kualitas data pelatihan; apabila data label minim atau tidak diperbarui, efektivitas sistem akan menurun drastis.

Sebaliknya, unsupervised learning bekerja tanpa memerlukan label eksplisit dalam dataset dan berguna dalam mendeteksi pola-pola baru atau pelanggaran tersembunyi (Zoppi et al., 2020). Di Natuna, banyak aktivitas IUU fishing yang tidak tercatat secara resmi atau dilakukan oleh kapal yang mematikan transponder AIS mereka. Dalam situasi seperti ini, algoritma seperti K-Means Clustering atau teknik anomaly detection dapat mengidentifikasi perilaku kapal yang menyimpang dari norma perilaku pelayaran yang lazim (Anneken et al., 2018). Misalnya, kapal yang beroperasi dalam waktu malam secara berulang di zona larangan, atau yang memutar rute secara tidak wajar, dapat ditandai sebagai anomali meski tidak ada data pelanggaran sebelumnya.

Keunggulan dari unsupervised learning sangat krusial di wilayah yang memiliki dinamika ancaman tinggi seperti Natuna, di mana pelaku IUU fishing terus beradaptasi dengan strategi baru. Pendekatan ini membantu mendeteksi zero-day threats—aktivitas yang belum pernah muncul sebelumnya dan belum terekam dalam data label (Anneken et al., 2018). Namun, interpretasi output dari model ini sering kali memerlukan analisis tambahan oleh operator manusia atau sistem pendukung lainnya karena tidak semua anomali merupakan pelanggaran (Anneken et al., 2018).

Dalam praktiknya, sistem deteksi ancaman maritim modern yang digunakan untuk mengamankan wilayah seperti Laut Natuna umumnya mengadopsi pendekatan kombinasi, yaitu semi-supervised learning. Data yang diklasifikasikan melalui clustering digunakan untuk

membentuk label semu (pseudo-labeling), yang kemudian dilatih ulang dengan metode supervised. Strategi ini memungkinkan sistem mendeteksi ancaman meskipun data berlabel sangat terbatas, sebagaimana kondisi realitas di perbatasan maritim Indonesia yang kompleks dan tidak selalu terdokumentasi dengan baik (Le et al., 2021).

Dengan mengintegrasikan kedua pendekatan ini, sistem AI untuk deteksi IUU fishing di Natuna menjadi lebih adaptif dan mampu beroperasi di bawah kondisi ketidakpastian data. Keunggulan ini menjadi modal penting dalam menciptakan sistem keamanan prediktif maritim yang andal. Di tengah intensitas aktivitas nelayan asing yang melanggar batas ZEE, kemampuan AI untuk menyaring sinyal-sinyal risiko dari ratusan kapal setiap harinya menjadi kunci untuk memperkuat pengawasan dan mempercepat respons patroli TNI AL, Bakamla, dan KKP. Oleh karena itu, pemilihan pendekatan pembelajaran mesin yang sesuai dan evaluasi berkelanjutan atas performa model sangat vital untuk memastikan bahwa sistem AI yang digunakan benar-benar mendukung kedaulatan dan keamanan laut Indonesia secara efektif.

Algoritma Pembelajaran Mesin Dalam Konteks IUU Fishing di Natuna

Dalam pengembangan sistem kecerdasan buatan (AI) untuk deteksi ancaman maritim—khususnya aktivitas ilegal, unreported, and unregulated (IUU) fishing di Laut Natuna Utara—pemilihan algoritma pembelajaran mesin menjadi faktor krusial dalam menentukan akurasi, kecepatan respons, serta kemampuan prediktif sistem. Tiga algoritma yang banyak digunakan dalam domain ini adalah Random Forest, Long Short-Term Memory (LSTM), dan Convolutional Neural Networks (CNN). Ketiganya memiliki karakteristik teknis yang berbeda, namun dapat saling melengkapi dalam membangun sistem deteksi yang komprehensif untuk memantau dan mengantisipasi aktivitas kapal-kapal ilegal yang beroperasi di wilayah perbatasan Indonesia.

Random Forest merupakan algoritma berbasis ensemble decision trees yang unggul dalam klasifikasi data tabular seperti Automatic Identification System (AIS) (Ren et al., 2023). Dalam konteks Natuna, Random Forest dapat digunakan untuk memproses parameter-parameter seperti kecepatan, arah, waktu pelayaran, serta ID kapal. Melalui pelatihan pada dataset yang mencakup perilaku kapal-kapal yang pernah melakukan pelanggaran ZEE Indonesia, algoritma ini dapat mengenali pola mencurigakan, seperti kapal asing yang berulang kali memasuki zona penangkapan tanpa izin. Keunggulannya juga mencakup interpretabilitas fitur—sehingga sistem dapat menjelaskan indikator risiko utama, seperti perubahan arah mendadak atau aktivitas malam hari yang tidak biasa, yang lazim ditemukan pada praktik IUU fishing (Ren et al., 2023).

Long Short-Term Memory (LSTM), sebagai jenis Recurrent Neural Network (RNN), memiliki kekuatan dalam memahami data deret waktu. LSTM sangat cocok untuk menganalisis temporal behavior kapal—yaitu ritme dan pola pergerakan dari waktu ke waktu (Levine et al., 2024). Dalam kasus IUU fishing di Natuna, LSTM dapat mengidentifikasi penyimpangan dalam pola pelayaran yang seharusnya—misalnya, kapal yang tiba-tiba berhenti di lokasi rawan pada jam-jam tertentu, atau berpindah rute secara acak namun berulang. Kemampuan LSTM untuk mengingat urutan aktivitas membantu sistem memprediksi potensi lokasi pelanggaran berikutnya, mendukung penempatan patroli yang lebih efisien.

Convolutional Neural Networks (CNN) awalnya populer dalam pengolahan citra, kini banyak digunakan dalam pemantauan maritim berbasis remote sensing (Guo & Ren, 2023). Di wilayah Natuna, banyak kapal “gelap” yang sengaja mematikan transponder AIS untuk menghindari deteksi. Dengan menggunakan citra satelit Synthetic Aperture Radar (SAR) dan optikal, CNN dapat memproses informasi spasial seperti bayangan kapal, jejak pergerakan di permukaan laut, dan korelasi terhadap wilayah terlarang. CNN dapat mendeteksi keberadaan

kapal ilegal secara visual bahkan tanpa sinyal digital, menjadikannya sangat efektif dalam menjawab tantangan IUU fishing yang tersembunyi (Guo & Ren, 2023).

Ketiga algoritma ini sering dikombinasikan dalam skema pipeline hybrid, membentuk sistem deteksi berlapis (Guo & Ren, 2023). Sebagai contoh, data pergerakan kapal di Laut Natuna dapat terlebih dahulu dianalisis dengan Random Forest untuk penyaringan awal berdasarkan fitur-fitur numerik. Selanjutnya, data temporal yang menunjukkan pola pelayaran diproses menggunakan LSTM guna mendeteksi anomali berbasis waktu. Secara paralel, wilayah perairan dengan intensitas pelanggaran tinggi dipantau menggunakan citra satelit yang dianalisis dengan CNN untuk mendeteksi kapal tanpa AIS. Hasil dari ketiga model ini dapat digabungkan dalam mekanisme ensemble voting untuk memberikan skor risiko yang lebih andal, yang menjadi dasar bagi tindakan operasional oleh Bakamla, TNI AL, atau KKP.

Keberhasilan implementasi sistem ini sangat bergantung pada kualitas data pelatihan, termasuk label historis pelanggaran IUU fishing di Natuna, serta kemampuan preprocessing untuk menyaring noise dan mengatasi data imbalance. Pengaturan parameter model (hyperparameter tuning) dan evaluasi berkala juga penting agar sistem tetap adaptif terhadap perubahan taktik pelaku IUU fishing, yang semakin kompleks dan terorganisasi. Lebih lanjut, integrasi hasil prediksi dengan sistem operasi laut dan kebijakan penegakan hukum—misalnya, perintah patroli otomatis berbasis skor risiko atau pembentukan zona waspada—akan memastikan bahwa AI tidak hanya bekerja sebagai alat teknis, tetapi menjadi instrumen strategis dalam menjaga kedaulatan laut Indonesia.

KESIMPULAN

Laut Natuna Utara merupakan wilayah strategis yang secara geografis berada di dalam Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) Indonesia, namun secara geopolitik berada dalam cakupan klaim sepihak "nine-dash line" Republik Rakyat Tiongkok. Kawasan ini mengalami eskalasi ancaman keamanan maritim, terutama dalam bentuk ilegal, unreported, and unregulated (IUU) fishing, serta pembajakan dan pelanggaran batas yurisdiksi oleh kapal asing. Situasi ini tidak hanya mengancam kelestarian sumber daya laut, tetapi juga menyentuh isu sensitif kedaulatan, hukum internasional, dan stabilitas regional. Dalam konteks inilah, reformasi pendekatan keamanan maritim menjadi sangat penting, khususnya melalui pemanfaatan teknologi kecerdasan buatan (AI) sebagai instrumen prediksi dan pencegahan dini.

Teknologi kecerdasan buatan hadir sebagai solusi strategis untuk mentransformasi sistem keamanan maritim dari pendekatan reaktif menjadi pendekatan proaktif dan prediktif. AI mampu memproses data dalam jumlah besar secara real-time, dari berbagai sumber seperti AIS (Automatic Identification System), citra satelit (SAR dan optikal), sensor laut, rekaman radar, hingga laporan intelijen. Dengan pendekatan machine learning, AI dapat mengenali pola-pola anomali dalam pergerakan kapal, seperti berhenti mendadak di zona rawan, perubahan arah tidak wajar, atau hilangnya sinyal AIS. Pendekatan ini memungkinkan pembentukan sistem peringatan dini yang tidak hanya mendeteksi keberadaan kapal mencurigakan, tetapi juga memprediksi potensi lokasi dan waktu terjadinya pelanggaran.

Tiga algoritma AI yang menjadi tulang punggung sistem ini adalah Random Forest, Long Short-Term Memory (LSTM), dan Convolutional Neural Networks (CNN). Random Forest digunakan untuk mengolah data tabular dari AIS, dan efektif dalam klasifikasi awal berdasarkan parameter seperti kecepatan, arah, dan waktu pelayaran. LSTM digunakan untuk mengenali pola waktu (temporal patterns), mendeteksi perilaku kapal yang menyimpang dari rutinitas lazim. Sementara itu, CNN berperan dalam analisis visual berbasis citra satelit untuk mendeteksi keberadaan kapal yang mematikan transponder atau berada di lokasi-lokasi rawan IUU fishing. Ketiga algoritma ini jika dikombinasikan dalam pipeline hybrid dapat

menghasilkan skor risiko terhadap kapal-kapal tertentu yang dapat dijadikan dasar alokasi patroli atau intervensi lapangan oleh aparat keamanan laut.

Studi ini juga menyoroti pentingnya integrasi berbagai sumber data dan sistem pendukung untuk membangun kerangka kerja deteksi ancaman yang adaptif. Data AIS memberikan dimensi spasial dan temporal pergerakan kapal, namun memiliki kelemahan seperti kemungkinan spoofing atau pemadaman sinyal. Citra satelit SAR dapat mengisi celah ini karena mampu mendeteksi objek logam seperti kapal dalam segala kondisi cuaca dan waktu, bahkan saat AIS dimatikan. Sementara itu, data dari sensor laut seperti sonar dan akustik dapat memberikan informasi tambahan yang krusial di bawah permukaan laut. Proses data fusion antar sumber ini sangat penting untuk menciptakan representasi yang utuh dan akurat terhadap situasi di lapangan.

Konsep predictive security dan preventive defense menjadi paradigma baru yang ditawarkan dalam studi ini. Berbeda dari pendekatan deterrence militeristik yang mengandalkan kehadiran kekuatan bersenjata untuk mengintimidasi pelaku, pendekatan ini menitikberatkan pada pengumpulan, analisis, dan interpretasi data untuk mencegah pelanggaran sejak dini. Model keamanan seperti ini juga lebih kompatibel dengan pendekatan penegakan hukum berbasis sipil yang dianut oleh institusi seperti Bakamla, KKP, dan TNI AL dalam konteks non-konflik. Selain itu, AI dapat digunakan sebagai decision-support tool bagi pengambil kebijakan dalam menentukan strategi patroli berbasis risiko, memprioritaskan zona rawan, dan mengoptimalkan sumber daya terbatas.

DAFTAR PUSTAKA

- Anneken, M., Joussetme, A.-L., Robert, S., & Beyerer, J. (2018). Synthetic Trajectory Extraction for Maritime Anomaly Detection. *International Conference on Computational Science*. <https://doi.org/10.1109/CSCI46756.2018.00204>
- Aradau, C., & Blanke, T. (2017). Politics of prediction: Security and the time/space of governmentality in the age of big data. *European Journal of Social Theory*, 20(3), 373–391. <https://doi.org/10.1177/1368431016667623>
- Cao, S., Zhao, C., Jian, D., & Fu, X. (2024). Ship Detection in Synthetic Aperture Radar Images under Complex Geographical Environments, Based on Deep Learning and Morphological Networks. *Sensors*, 24(13), 4290. <https://doi.org/10.3390/s24134290>
- Chapsos, I., & Hamilton, S. (2019). Illegal fishing and fisheries crime as a transnational organized crime in Indonesia. *Trends in Organized Crime*, 22(3), 255–273. <https://doi.org/10.1007/S12117-018-9329-8>
- Denamiel, C., Huan, X., & Vilibić, I. (2021). Conceptual design of extreme sea-level early warning systems based on uncertainty quantification and engineering optimization methods. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2021.650279>
- do Nascimento, V. D., Alves, T. A. O., de Farias, C. M., & Dutra, D. L. C. (2024). A Hybrid Framework for Maritime Surveillance: Detecting Illegal Activities through Vessel Behaviors and Expert Rules Fusion. *Sensors*, 24(17), 5623. <https://doi.org/10.3390/s24175623>
- Guo, H., & Ren, L. (2023). A Marine Small-Targets Classification Algorithm Based on Improved Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*, 15(11), 2917. <https://doi.org/10.3390/rs15112917>
- Khan, A. M. A., Jiang, M., Yang, X., Apriliani, I. M., Purba, N. P., Wiryawan, B., Taurusman, A. A., & Pasaribu, B. (2024). Illegal fishing threatens the sustainability of future tuna

- commodities in Indonesia. *Marine Policy*, 159, 105936. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105936>
- Le, D. C., Zincir-Heywood, N., & Heywood, M. I. (2021). Training regime influences to semi-supervised learning for insider threat detection. *IEEE Symposium on Security and Privacy*, 13–18. <https://doi.org/10.1109/SPW53761.2021.00010>
- Levine, M. D., Edwards, S. J., Howard, D., Weems, K. M., Sapsis, T. P., & Pipiras, V. (2024). Multi-fidelity data-adaptive autonomous seakeeping. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116322>
- Li, X., Wang, W., Gu, H., & Jin, K. (2024). Exploring an early warning system for maritime security risks: An approach based on compressed sensing. *Expert Systems With Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123670>
- Li, Z., Liu, T., Peng, X., Ren, J., & Liang, S. (2024). An AIS-based deep learning model for multi-task in the marine industry. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116694>
- Liu, R. W., Zheng, W., & Liang, M. (2024). Spatio-temporal multi-graph transformer network for joint prediction of multiple vessel trajectories. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107625>
- Malde, K., Handegard, N. O., Eikvil, L., & Salberg, A.-B. (2020). Machine intelligence and the data-driven future of marine science. *Ices Journal of Marine Science*, 77(4), 1274–1285. <https://doi.org/10.1093/ICESJMS/FSZ057>
- McLaughlin, R. L. (2022). The Law of the Sea and PRC Gray-Zone Operations in the South China Sea. *American Journal of International Law*, 116(4), 821–835. <https://doi.org/10.1017/ajil.2022.49>
- Munim, Ziaul Haque; Mariia Dushenko, Veronica Jaramillo Jimenez, Mohammad Hassan Shakil & Marius Imset. (2020). Big Data And Artificial Intelligence In The Maritime Industry: A Bibliometric Review And Future Research Directions, *Maritime Policy & Management*, 47:5, 577-597, <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1788731>
- Oruc, A. Y., Chowdhury, N., & Gkioulos, V. (2024). A modular cyber security training programme for the maritime domain. *International Journal of Information Security*, 1–36. <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00799-4>
- Paes, A., & de Oliveira, D. (2023). AIS-based maritime anomaly traffic detection: A review. *Expert Systems with Applications*, 231, 120561. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120561>
- Phayal, A., Gold, A., Maharani, C., Prins, B., & Riyadi, S. (2024). The complementary relationship between illegal fishing and maritime piracy: A case study of the Gulf of Guinea. *Marine Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106209>
- Ren, Y., Zhu, X., Bai, K., & Zhang, R. (2023). A New Random Forest Ensemble of Intuitionistic Fuzzy Decision Trees. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31, 1729–1741. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2022.3215725>
- Ryan, B. J. (2019). The disciplined sea: a history of maritime security and zonation. *International Affairs*, 95(5), 1055–1073. <https://doi.org/10.1093/IA/IIZ098>

- Şengül, B., Yılmaz, F., & Uğurlu, Ö. (2023). Safety–Security Analysis of Maritime Surveillance Systems in Critical Marine Areas. *Sustainability*, 15(23), 16381. <https://doi.org/10.3390/su152316381>
- Soldi, G., Gaglione, D., Forti, N., Di Simone, A., Daffina, F. C., Bottini, G., Quattrociochi, D., Millefiori, L. M., Braca, P., Carniel, S., Willett, P., Iodice, A., Riccio, D., & Farina, A. (2021). Space-Based Global Maritime Surveillance. Part I: Satellite Technologies. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36(9), 8–28. <https://doi.org/10.1109/MAES.2021.3070862>
- Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., & Huang, G.-B. (2018). Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(5), 1559–1582. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2724551>
- Venskus, J., Treigys, P., Bernatavičienė, J., Tamulevičius, G., & Medvedev, V. (2019). Real-Time Maritime Traffic Anomaly Detection Based on Sensors and History Data Embedding. *Sensors*, 19(17), 3782. <https://doi.org/10.3390/S19173782>
- Watson, J. T., Ames, R., Holycross, B. M., Suter, J., Somers, K., Kohler, C., & Corrigan, B. (2023). Fishery catch records support machine learning-based prediction of illegal fishing off US West Coast. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.16215>
- Welch, H., Clavelle, T., White, T. D., Cimino, M. A., Van Osdel, J., Hochberg, T., Kroodsmas, D., & Hazen, E. L. (2022). Hot spots of unseen fishing vessels. *Science Advances*, 8(44). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq2109>
- Wright, D., Janzen, C., Bochenek, R., Austin, J., & Page, E. C. (2019). Marine Observing Applications Using AIS: Automatic Identification System. *Frontiers in Marine Science*, 6, 537. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2019.00537>
- Zhang, T., Zhao, S., Cheng, B., & Chen, J. (2020). Detection of AIS Closing Behavior and MMSI Spoofing Behavior of Ships Based on Spatiotemporal Data. *Remote Sensing*, 12(4), 702. <https://doi.org/10.3390/RS12040702>
- Zoppi, T., Ceccarelli, A., & Bondavalli, A. (2020). Into the Unknown: Unsupervised Machine Learning Algorithms for Anomaly-Based Intrusion Detection. *Dependable Systems and Networks*, 81. <https://doi.org/10.1109/DSN-S50200.2020.00044>
- Afra, S., Alhajj, R., & Alhajj, R. (2020). Early warning system: from face recognition by surveillance cameras to social media analysis to detecting suspicious people. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*, 540, 123151. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2019.123151>
- Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., & Tuński, T. (2024a). Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app14188420>
- Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Krzemińska, A., & Kostecki, T. (2024b). Harnessing AI for Sustainable Shipping and Green Ports: Challenges and Opportunities. *Applied Sciences*, 14(14), 5994. <https://doi.org/10.3390/app14145994>
- Feng, M. (2020). Optimization of Ship Language Information Processing Systems Based on Artificial Intelligence Technology. *Journal of Coastal Research*, 110, 179–182. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI110-043.1>

- Francis, H., & Traykovski, P. (2021). Development of a Highly Portable Unmanned Surface Vehicle for Surf Zone Bathymetric Surveying. *Journal of Coastal Research*, 37(5), 933–945. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00143.1>
- He, Huang., Kaiyue, Qiu., Myeong-Hun, Jeong., Seung-Bae, Jeon., Woo, Pyeong, Lee. (2019). Detecting Anomalous Vessel Dynamics with Functional Data Analysis. *Journal Of Coastal Research*, 12 <https://doi.org/10.2112/si91-082.1>
- Simion, D., Postolache, F., Fleacă, B., & Fleacă, E. (2024). AI-Driven Predictive Maintenance in Modern Maritime Transport—Enhancing Operational Efficiency and Reliability. *Applied Sciences*, 14(20), 9439. <https://doi.org/10.3390/app14209439>
- Qiming, Zhang., Yang, Liu., Chenguang, Guo., Shibo, Yin., Lin, Ma. (2023). Marine Radar Monitoring Iot System and Case Study of Target Detection Based On PPI Images. *Expert Systems*, <https://doi.org/10.1111/exsy.13333>
- Xavier, F; Martinez, De, Oses., Àfrica, Uyà, Juncadella. (2021). Global Maritime Surveillance and Oceanic Vessel Traffic Services: Towards The E-Navigation. *WMU Journal*
- Zhi, Yung, Tay., Januwar, Hadi., Favian, Chow., De, Jin, Loh., Dimitrios, Konovessis. (2021). Big Data Analytics and Machine Learning of Harbour Craft Vessels To Achieve Fuel Efficiency: A Review. *Journal Of Marine Science and Engineering*, 9(12):1351-. <https://doi.org/10.3390/JMSE9121351>