

Implementasi Teknologi Modern dalam Strategi Keamanan Laut untuk Mencegah Pencurian Sumber Daya Laut di Wilayah Perairan Indonesia

Yussie Novitasari¹, Bambang Irwanto², Lukman Yudho Prakoso³

^{1,2,3} Universitas Pertahanan Republik Indonesia

E-mail: yussie.novitasari@kn.idu.ac.id¹, bambang.irwanto@idu.ac.id², lukman.prakoso@idu.ac.id³

Article History:

Received: 24 Oktober 2025

Revised: 29 November 2025

Accepted: 09 Desember 2025

Keywords: Keamanan laut, IUU Fishing, teknologi maritim, satelit, drone, sensor bawah laut, PSMA.

Abstract: Penelitian ini membahas implementasi teknologi modern dalam strategi keamanan laut Indonesia untuk mencegah pencurian sumber daya laut, khususnya praktik Illegal, Unreported, and Unregulated Fishing (IUU Fishing). Aktivitas ini telah menimbulkan kerugian ekonomi, ekologis, dan sosial yang signifikan, serta mengancam kedaulatan maritim nasional. Penelitian ini menyoroti urgensi penerapan teknologi berbasis kecerdasan buatan, sistem pemantauan satelit, Automatic Identification System (AIS), drone pengintai, dan sensor bawah laut sebagai instrumen strategis dalam pengawasan maritim. Dengan pendekatan deskriptif-kualitatif, penelitian ini menganalisis efektivitas serta tantangan penerapan teknologi modern dalam konteks sistem keamanan laut Indonesia, termasuk dalam kerangka Port State Measures Agreement (PSMA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi teknologi modern secara signifikan meningkatkan kemampuan deteksi dan pencegahan aktivitas ilegal di laut, namun masih dihadapkan pada kendala teknis, regulatif, dan sumber daya manusia. Diperlukan sinergi lintas sektor, penguatan kapasitas teknologi nasional, serta harmonisasi regulasi maritim agar implementasi teknologi dapat berfungsi optimal dalam mendukung keamanan laut dan ketahanan maritim Indonesia.

PENDAHULUAN

Pencurian sumber daya laut, yang juga dikenal sebagai penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU fishing), merupakan salah satu ancaman terbesar bagi upaya konservasi laut dan pengelolaan perikanan berkelanjutan. Aktivitas ini melibatkan praktik penangkapan ikan yang melanggar hukum nasional dan internasional, serta mengakibatkan dampak signifikan terhadap lingkungan, ekonomi, dan masyarakat sosial. Fenomena ini tidak hanya berdampak pada degradasi ekosistem laut tetapi juga memperburuk kondisi sosial-ekonomi komunitas pesisir yang bergantung pada sumber daya laut. Pada tahun 2015, kerugian ekonomi yang diakibatkan oleh IUU fishing di Indonesia mencapai sekitar \$6,8 miliar, dan antara tahun

2013 hingga 2018, total kerugian diperkirakan mencapai \$201 miliar (Malik, 2022).

Selain aspek ekonomi, dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh praktik IUU Fishing juga sangat signifikan. Aktivitas penangkapan ikan yang tidak diatur telah menyebabkan kerusakan ekosistem laut, termasuk terumbu karang yang menjadi tempat hidup berbagai spesies ikan. Diperkirakan sekitar 65% terumbu karang di perairan Indonesia berada dalam kondisi terancam akibat praktik IUU fishing. Penurunan stok ikan juga menjadi salah satu dampak yang mempengaruhi ekosistem dan kesejahteraan masyarakat pesisir yang bergantung pada sumber daya laut (Kasim & Widagdo, 2019).

Pemerintah dalam upayanya memerangi IUU Fishing, pada tahun 2014, pernah menangkap sebanyak 930 kapal ilegal, sementara pada tahun 2019 jumlah ini menurun drastis menjadi 38 kapal. Namun, angka tersebut kembali naik menjadi 167 kapal pada tahun 2021, yang secara tidak langsung menandakan bahwa meskipun ada penurunan yang signifikan, tantangan dalam mengatasi IUU fishing belum sepenuhnya terselesaikan.

Lebih lanjut, IUU Fishing menimbulkan kerusakan besar terhadap habitat laut, penurunan biomassa ikan, serta peningkatan tangkapan sampingan yang tidak diinginkan, yang pada akhirnya merusak keseimbangan ekosistem laut. Dampaknya tidak hanya terbatas pada ekosistem, tetapi juga memiliki implikasi serius terhadap kesejahteraan ekonomi masyarakat lokal yang bergantung pada perikanan (Seminar et al., 2023). Penurunan hasil tangkapan akibat persaingan dengan nelayan ilegal menimbulkan tekanan ekonomi yang memicu keterlibatan dalam kejahatan maritim lainnya, seperti pembajakan. Phayal et al. (2024) menemukan bahwa IUU fishing berkaitan dengan meningkatnya kejahatan maritim karena nelayan yang kehilangan mata pencaharian beralih ke aktivitas kriminal.

Salah satu bentuk penangkapan ikan ilegal yang umum terjadi di Indonesia adalah perikanan tanpa lisensi. Kegiatan ini dilakukan tanpa izin resmi dari otoritas terkait, sehingga merusak tata kelola perikanan yang sah. Kurangnya pengawasan yang efektif dan minimnya mekanisme penegakan hukum memperburuk situasi ini. Studi menunjukkan bahwa lemahnya sistem pemantauan di Indonesia membuat pelaku penangkapan ikan tanpa lisensi dapat beroperasi dengan bebas di perairan yang luas (Vallejos et al., 2024).

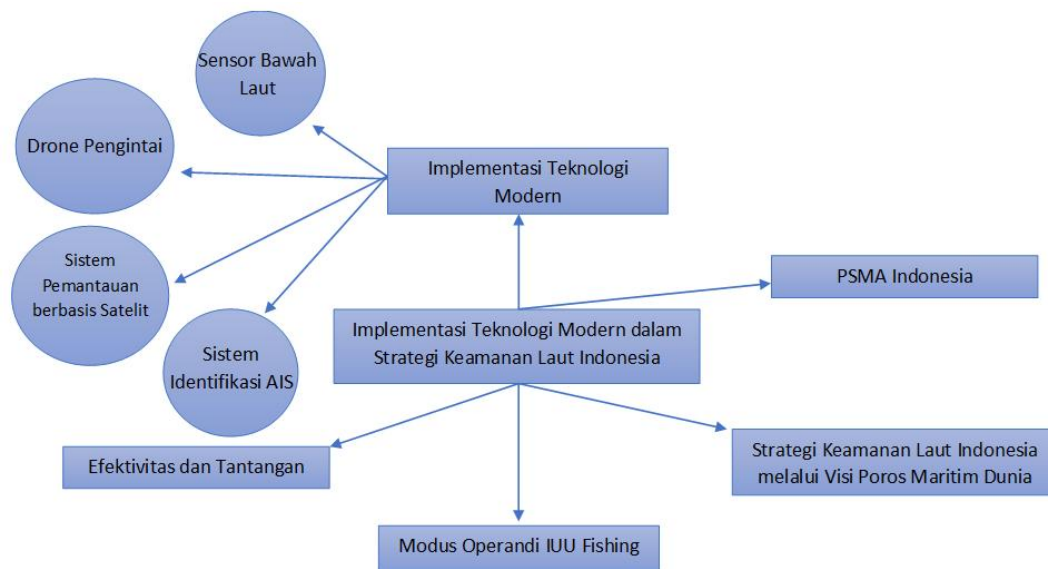
Lebih lanjut, penegakan peraturan terhadap penangkapan IUU Fishing sering kali menghadapi berbagai tantangan, mulai dari kompleksitas yurisdiksi, keterbatasan sumber daya, hingga kondisi lingkungan maritim yang sulit. Garcia (2024) juga menyoroti bahwa pengamat perikanan yang bertugas di laut sering kali menghadapi risiko yang tinggi akibat lemahnya sistem pemantauan, kontrol, dan pengawasan (Libecap, 2024). Oleh karena itu, perlu adanya perbaikan dalam kerangka kerja yang mengatur aktivitas perikanan, termasuk implementasi teknologi modern dalam strategi keamanan laut di Indonesia dalam meningkatkan pengawasan, transparansi, dan akuntabilitas dalam pengelolaan sumber daya laut, yang pada gilirannya mendukung keberlanjutan ekosistem laut dan ketahanan ekonomi sektor perikanan nasional.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan deskriptif untuk menganalisis penerapan teknologi modern dalam strategi keamanan laut Indonesia, khususnya dalam pencegahan pencurian sumber daya laut atau *Illegal, Unreported, and Unregulated Fishing* (IUU Fishing). Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan pemahaman yang mendalam terhadap fenomena sosial, kebijakan, dan dinamika implementasi teknologi yang kompleks di sektor maritim. Data dikumpulkan melalui studi pustaka (*library research*) dengan menelaah berbagai sumber akademik seperti jurnal internasional bereputasi, laporan lembaga

pemerintah, serta dokumen kebijakan maritim dari Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP), TNI AL, dan Bakamla yang relevan dengan tema penelitian.

Analisis data dilakukan dengan menggunakan analisis tematik (*thematic analysis*), yaitu mengidentifikasi dan mengelompokkan tema-tema utama yang berkaitan dengan penerapan teknologi seperti sistem pemantauan satelit, drone pengintai, sensor bawah laut, dan *Automatic Identification System* (AIS) dalam mendukung strategi keamanan laut. Validitas data dijaga melalui triangulasi sumber dengan membandingkan berbagai referensi ilmiah dan kebijakan resmi. Hasil analisis diinterpretasikan secara kontekstual dengan mempertimbangkan aspek geografis, teknologis, dan regulatif Indonesia sebagai negara maritim.



Gambar 1. Brainstorming

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Modus operandi IUU fishing

Praktik penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (*Illegal, Unreported, and Unregulated Fishing* atau IUU Fishing) semakin marak dan terus mengalami evolusi dalam modus operandinya. Nelayan ilegal menggunakan berbagai metode untuk melakukan IUU Fishing di Indonesia. Berbagai modus operandi terkait praktik IUU fishing telah diidentifikasi dan diilustrasikan dalam Gambar 2.

1	Pemalsuan dokumen kapal
2	Penandaan ganda dan pendaftaran ganda
3	Memancing tanpa izin
4	Modifikasi kapal secara ilegal
5	Menggunakan kapten dan pelaut asing
6	Penonaktifan pemancar kapal
7	Pengangkutan ilegal di kapal
8	Pemalsuan buku catatan
9	Tidak adanya sertifikat Kesehatan and deklarasi ekspor
10	Pelanggaran daerah penangkapan ikan
11	Menggunakan alat tangkap ikan yang dilarang
12	Pendaratan hasil tangkapan secara ilegal

Gambar 2. Modus Operandi IUU Fishing

Sumber: (Kasim & Widagdo, 2019).

Gambar 2 menunjukkan berbagai modus operandi IUU fishing, termasuk pemalsuan dokumen, penandaan ganda, penangkapan tanpa izin, modifikasi kapal ilegal, penggunaan pelaut asing, penonaktifan pemancar, *transshipment* ilegal, hingga pelanggaran wilayah dan penggunaan alat tangkap terlarang. Praktik ini menghindari pengawasan otoritas dan merugikan ekonomi serta ekosistem laut, secara tidak langsung menunjukkan peningkatan kecanggihan pelaku.

Lebih lanjut, Nelayan ilegal tidak hanya berasal dari kapal asing, tetapi juga kapal-kapal berbendera Indonesia yang beroperasi di perairan nasional. Modus operandi yang sering digunakan adalah menangkap ikan di perairan Indonesia, lalu memindahkan hasil tangkapan tersebut ke kapal asing di laut lepas, menghindari pengawasan dari aparat. Ini menunjukkan bahwa pelaku IUU Fishing telah mengadopsi strategi-strategi canggih untuk mengecoh otoritas.

Selain itu, para pelaku juga memanfaatkan kapal-kapal berbendera Indonesia (*reflagging*) yang dibeli melalui lelang bertahun-tahun sebelumnya, dengan tujuan menyamarkan aktivitas ilegal mereka (Park et al., 2023). Penggunaan kapal Indonesia ini mempersulit aparat penegak hukum dalam mengidentifikasi dan menindak kapal-kapal yang terlibat dalam IUU Fishing, karena kapal tersebut tampak sah secara administratif. Praktik ini menambah kompleksitas dalam upaya pemberantasan penangkapan ikan ilegal di perairan nasional.

Terdapat juga kasus yang lebih rumit, di mana awak kapal (ABK) yang tampak memiliki identitas Indonesia, seperti KTP Batam, ternyata merupakan warga negara asing. Ini menambah tantangan dalam proses identifikasi dan penegakan hukum terhadap pelaku IUU Fishing. Selain itu, ratusan kapal asing telah diberi label "*made in Indonesia*" untuk menghindari deteksi dan meningkatkan kesulitan dalam pelacakan asal kapal dan ikan yang ditangkap secara ilegal (Kasim & Widagdo, 2019).

Adapun kapal-kapal dari negara tetangga seperti Thailand, Vietnam, Filipina, dan Malaysia sering kali terlibat dalam kegiatan penangkapan ikan secara ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak

diatur (Illegal, Unreported, and Unregulated Fishing/IUU). Aktivitas ini terjadi terutama di wilayah perairan teritorial Indonesia yang kaya akan sumber daya perikanan, yang dipicu oleh letak geografis strategis serta keanekaragaman hayati laut yang sangat melimpah (Massie et al., 2024). Kegiatan tersebut tidak hanya merugikan ekonomi nasional melalui eksploitasi sumber daya, tetapi juga menantang upaya penegakan hukum dan kedaulatan wilayah laut Indonesia.

Salah satu kawasan yang sangat rentan terhadap intrusi kapal asing adalah perairan Natuna dan Sulawesi Utara. Kedua wilayah ini, yang berada dekat dengan perairan internasional, sering menjadi target kegiatan penangkapan ikan IUU karena kekayaan sumber daya alam lautnya yang melimpah (Robin et al., 2023). Kerentanan geografis ini memberikan tantangan tambahan bagi pemerintah Indonesia dalam menjaga kedaulatan perairan dan menegakkan hukum maritim.

B. Strategi Keamanan Laut Indonesia melalui Visi Poros Maritim Dunia

Visi *Poros Maritim Global* (*Global Maritime Fulcrum*/GMF) yang diusung oleh pemerintahan Joko Widodo (Jokowi) pada periode pertama pemerintahannya menjadi salah satu agenda utama yang menekankan pentingnya sektor maritim bagi pembangunan nasional. GMF tidak hanya mengedepankan aspek ekonomi, tetapi juga berfokus pada dimensi politik, dengan tujuan utama menjadikan Indonesia sebagai kekuatan maritim yang disegani di kawasan dan global. Pembangunan maritim ini diarahkan untuk memperkuat konektivitas dan infrastruktur maritim serta memastikan kedaulatan dan keamanan maritim Indonesia, terutama di wilayah perbatasan dan jalur strategis. Implementasi visi ini sangat bergantung pada kondisi keamanan dan stabilitas di kawasan, khususnya di ASEAN (Anwar, 2020). Stabilitas regional akan menjadi landasan bagi keberhasilan pencapaian visi GMF, yang tidak hanya berimplikasi bagi Indonesia tetapi juga bagi dinamika geopolitik di Asia Tenggara.

Visi GMF pertama kali diperkenalkan oleh Jokowi pada pidato kemenangannya tahun 2014, dengan tujuan menjadikan Indonesia sebagai pusat peradaban politik maritim di masa depan. Pada tingkat nasional, visi ini berakar pada kampanye Jokowi-Jusuf Kalla yang dikenal dengan "Nawacita" (sembilan agenda prioritas) yang menekankan pentingnya memperkuat identitas Indonesia sebagai negara maritim. Salah satu poin kunci dari Nawacita adalah perlunya menjaga kepentingan dan keamanan maritim Indonesia, khususnya dalam hal kedaulatan, keamanan perbatasan, serta pengelolaan sumber daya alam maritim yang berkelanjutan (Khanisa & Farhana, 2018). Ini menunjukkan adanya komitmen pemerintah untuk kembali menempatkan laut sebagai pusat dari kebijakan nasional, setelah sebelumnya dianggap kurang menjadi perhatian.

Selain itu, visi GMF juga mengandung pilar-pilar penting yang diperkenalkan Jokowi pada berbagai forum internasional, termasuk pada KTT Asia Timur ke-9 di Nay Pyi Taw. Pilar-pilar tersebut meliputi: pengembangan budaya maritim, pengelolaan sumber daya maritim, pembangunan infrastruktur dan konektivitas maritim, diplomasi maritim, dan pertahanan maritim. Pilar-pilar ini menunjukkan bahwa visi GMF bukan hanya upaya untuk memajukan perekonomian berbasis laut, tetapi juga untuk memperkuat posisi Indonesia dalam diplomasi internasional dan pertahanan wilayah.

Sebagai bagian dari implementasi visi GMF, pemerintah Indonesia telah menetapkan sejumlah kebijakan dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2015–2019, yang menyoroti pentingnya pembangunan sektor kemaritiman sebagai salah satu prioritas nasional. Dokumen ini menegaskan bahwa keamanan laut merupakan elemen kunci dalam memperkuat identitas Indonesia sebagai negara maritim (Khanisa & Farhana, 2018). Dalam hal ini, strategi keamanan laut tidak hanya mencakup aspek militer, tetapi juga melibatkan pendekatan diplomasi maritim untuk mengatasi tantangan keamanan non-tradisional seperti

perompakan, perdagangan manusia, dan penangkapan ikan ilegal.

Selain itu, strategi keamanan maritim Indonesia melalui visi GMF juga didukung oleh dokumen strategis lain seperti Rangkuman Inisiatif Strategis Optimalisasi Pemanfaatan Potensi Kelautan dan Buku Putih Diplomasi Maritim. Kedua dokumen ini memberikan panduan untuk optimalisasi pemanfaatan potensi kelautan sekaligus mengidentifikasi tantangan yang perlu dihadapi. Beberapa rekomendasi kunci yang dihasilkan mencakup pengembangan teknologi maritim, peningkatan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan laut, serta penguatan kapasitas kelembagaan untuk memastikan terlaksananya visi GMF secara berkelanjutan.

C. Implementasi Teknologi Modern

a) Sistem Pemantauan berbasis Satelit

Sistem pemantauan berbasis satelit menjadi salah satu pilar penting dalam peningkatan keamanan maritim Indonesia, khususnya dalam menghadapi ancaman pencurian sumber daya laut dan aktivitas ilegal di wilayah perairan yang luas. Teknologi ini memungkinkan pemantauan secara *real-time* dengan memanfaatkan citra satelit beresolusi tinggi yang mampu mendeteksi pergerakan kapal secara akurat di seluruh perairan Indonesia. Keunggulan utama teknologi ini adalah kemampuannya mencakup area yang luas, hingga 5,8 juta km² wilayah laut, dalam waktu yang relatif singkat, menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan metode pengawasan tradisional yang memerlukan patroli fisik secara langsung di laut.

Dalam operasionalnya, sistem ini menggunakan berbagai jenis satelit, termasuk satelit optik dan radar, yang dilengkapi dengan resolusi spasial hingga sub-meter. Citra yang dihasilkan dari satelit-satelit ini kemudian diproses menggunakan algoritma canggih seperti *Convolutional Neural Networks* (CNN) untuk mengidentifikasi dan melacak pergerakan kapal. Algoritma seperti HO-SipNet bahkan mampu mencapai akurasi deteksi hingga 95% dalam pemantauan kapal secara real-time, memberikan kontribusi yang signifikan dalam mendeteksi aktivitas ilegal seperti pencurian ikan, penyelundupan, dan aktivitas lain yang merugikan ekonomi serta stabilitas keamanan nasional (Ieracitano et al., 2024).

Sistem pemantauan ini juga dapat diintegrasikan dengan teknologi pendukung seperti Sistem Identifikasi Otomatis (*Automatic Identification System/AIS*) untuk memverifikasi identitas kapal dan mendeteksi anomali dalam pola pergerakan kapal-kapal yang mencurigakan. Integrasi ini memungkinkan otoritas kelautan untuk melakukan respons cepat terhadap ancaman potensial di perairan Indonesia. Selain itu, penggunaan radar gesit frekuensi dan teknologi penginderaan terkompresi juga membantu dalam sistem peringatan dini yang dapat menilai risiko keamanan maritim dan mencegah aktivitas seperti pembajakan dan penangkapan ikan ilegal secara lebih efektif (Li et al., 2024).

Namun, meskipun sistem ini menawarkan berbagai manfaat, tantangan teknis seperti deteksi target kecil di lingkungan laut yang kompleks dan pemantauan pada malam hari masih menjadi hambatan yang perlu diatasi. Algoritma CSDP-YOLO telah menunjukkan keberhasilan dalam mendeteksi kapal-kapal kecil dengan meningkatkan ekstraksi fitur, sedangkan model Glimmer YOLO meningkatkan kinerja deteksi dalam kondisi cahaya rendah, mencapai akurasi presisi rata-rata hingga 96,7% (Fan et al., 2024; Song et al., 2023). Ini menunjukkan bahwa meski teknologi telah berkembang, masih ada ruang untuk inovasi lebih lanjut agar sistem ini dapat bekerja secara optimal di semua kondisi.

Terlepas dari kemajuan teknologi, penggunaan data satelit dalam konteks hukum juga masih menghadapi tantangan. Penggunaan data ini sebagai bukti dalam proses hukum terkait pelanggaran maritim, seperti pencemaran laut, sering kali terbatas. Oleh karena itu, diperlukan

kebijakan yang lebih mendukung untuk memastikan integrasi data satelit dalam sistem peradilan lingkungan dapat diakui secara legal (Zhang et al., 2024). Kesimpulannya, sistem pemantauan berbasis satelit memberikan solusi yang efektif untuk meningkatkan keamanan maritim, tetapi tantangan teknis dan hukum perlu terus diatasi agar implementasinya dapat berlangsung lebih optimal dalam konteks pengawasan maritim di Indonesia.

b) Drone Pengintai

Penggunaan drone pengintai atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dalam pengawasan maritim juga menjadi salah satu solusi dalam memperkuat keamanan laut Indonesia. Keunggulan teknologi drone terletak pada mobilitas tinggi, jangkauan luas, serta kemampuan pengumpulan data yang andal, terutama di wilayah perbatasan dan Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) yang seringkali menjadi sasaran aktivitas *Illegal, Unreported, and Unregulated* (IUU) Fishing. Dengan menggunakan kamera resolusi tinggi dan sensor canggih, drone pengintai mampu mendeteksi serta memantau pergerakan kapal mencurigakan bahkan dalam kondisi cuaca yang kurang mendukung (Gilani et al., 2024). Penggunaan drone dalam konteks ini menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode patroli tradisional menggunakan kapal atau pesawat berawak.

Salah satu keunggulan signifikan dari teknologi drone pengintai adalah biaya operasional yang rendah dan kemampuan untuk terbang secara kontinu tanpa memerlukan banyak intervensi manusia. Hal ini memberikan nilai tambah dalam efisiensi pengawasan wilayah laut yang luas seperti Indonesia. Selain itu, integrasi drone dengan sistem pemantauan berbasis satelit dan sensor bawah laut memperluas cakupan pengawasan, memungkinkan identifikasi dini terhadap ancaman keamanan maritim (Chen et al., 2024). Kemampuan drone untuk terbang pada ketinggian rendah juga memberikan kualitas data visual yang lebih detail, yang penting dalam proses klasifikasi kapal dan identifikasi aktivitas ilegal di perairan (Otero et al., 2024).

Namun, penerapan drone pengintai di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait aspek regulasi dan hukum.¹ Masalah regulasi di perairan internasional, serta pengaturan ruang udara, memerlukan kajian yang lebih mendalam untuk memastikan bahwa penggunaan drone sejalan dengan ketentuan internasional (Topak, 2023). Selain itu, infrastruktur pendukung, seperti stasiun kontrol darat yang dapat mengelola drone secara efektif, dan sistem komunikasi yang handal untuk pengiriman data real-time, menjadi prasyarat penting bagi keberhasilan operasional drone pengintai di lapangan. Peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan teknis dan operasional juga diperlukan guna memastikan drone dapat dioperasikan secara optimal.

Integrasi teknologi drone pengintai dengan sistem intelijen maritim yang lebih luas juga menjadi strategi yang penting dalam upaya pencegahan pencurian sumber daya laut. Analisis big data yang dikombinasikan dengan kecerdasan buatan (AI) dapat memfasilitasi identifikasi pola-pola aktivitas ilegal serta memprediksi area rawan. Dengan demikian, sistem pengawasan dapat mengalokasikan sumber daya secara lebih efektif dan meningkatkan respons terhadap ancaman maritim. Lebih jauh lagi, informasi real-time yang dihasilkan oleh drone mempercepat proses pengambilan keputusan serta meningkatkan koordinasi antar lembaga dalam menangani isu keamanan laut secara holistik (Ghazo & Hayajneh, 2023).

Kesimpulannya, drone pengintai berperan penting dalam transformasi sistem pengawasan maritim Indonesia. Penggunaan drone tidak hanya meningkatkan efektivitas pengawasan, tetapi

¹ Penggunaan drone di Indonesia diatur oleh Kementerian Perhubungan melalui Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 47 Tahun 2016. Regulasi ini mencakup berbagai aspek seperti ketinggian maksimum penerbangan, jarak aman dari bandara, dan area terlarang untuk penerbangan drone.

juga berfungsi sebagai katalis dalam memperkuat manajemen keamanan maritim yang lebih adaptif terhadap dinamika ancaman kontemporer. Tantangan yang ada, terutama dalam hal regulasi, infrastruktur, dan sumber daya manusia, harus diatasi melalui pendekatan integratif yang melibatkan kolaborasi lintas sektor dan inovasi teknologi yang berkelanjutan.

c) Sensor Bawah Laut

Penggunaan sensor bawah laut sebagai bagian dari strategi keamanan laut modern memberikan kontribusi signifikan terhadap upaya pencegahan pencurian sumber daya laut di wilayah perairan Indonesia. Sensor ini memanfaatkan berbagai teknologi canggih seperti sonar, LiDAR, dan pencitraan hiperspektral untuk memantau aktivitas bawah laut dan mendeteksi potensi ancaman secara real-time. Teknologi sensor bawah laut memungkinkan pemantauan yang efektif, tidak hanya untuk mendeteksi ancaman terhadap keamanan, tetapi juga untuk menjaga keanekaragaman hayati dan kelestarian lingkungan laut. Sensor bawah laut juga menawarkan solusi teknologi canggih yang memungkinkan pemantauan berkelanjutan terhadap aktivitas bawah laut secara lebih efektif dan efisien dibandingkan metode konvensional, seperti patroli fisik di laut atau udara.

Dalam konteks pemantauan sumber daya laut, sensor bawah laut dapat mengumpulkan data rinci tentang kondisi laut, termasuk suhu, salinitas, dan kualitas air, yang sangat penting untuk memantau perubahan lingkungan laut dan memahami dinamika ekosistem (Liu et al., 2023). Selain itu, teknologi seperti pencitraan hiperspektral memungkinkan klasifikasi jenis mineral dan pengamatan spesies laut secara lebih akurat. Hal ini sangat relevan dalam menjaga ekosistem laut yang rentan terhadap eksploitasi berlebihan dan kegiatan ilegal.

Lebih lanjut, teknologi ini juga memiliki manfaat dalam aspek navigasi dan keselamatan maritim. Sistem fusi sonar dan optik-sonar memberikan citra yang jelas tentang lingkungan bawah laut, sehingga membantu kapal-kapal menghindari rintangan dan memastikan jalur yang aman (Kim et al., 2022). Selain itu, dengan kemampuan mendeteksi perubahan suhu secara detail, sensor bawah laut dapat digunakan untuk memetakan kondisi lingkungan secara lebih akurat, yang sangat berguna dalam perencanaan misi maritim serta operasi keamanan laut (Zhang et al., 2023). Pemetaan topografi dasar laut dengan menggunakan teknologi seperti LiDAR dan pencitraan hiperspektral juga memungkinkan identifikasi objek di dasar laut, seperti endapan mineral dan kehidupan laut, yang dapat mendukung kegiatan ekonomi dan keamanan nasional (Maccarone et al., 2023).

Salah satu aplikasi terpenting dari teknologi sensor bawah laut adalah dalam mendeteksi aktivitas ilegal, seperti pencurian ikan dan sumber daya laut lainnya. Teknologi ini memungkinkan pemantauan populasi dan pergerakan ikan, serta analisis data menggunakan kecerdasan buatan (AI) dan teknik pembelajaran mesin, untuk mengidentifikasi pola-pola kegiatan ilegal (Chang et al., 2022).

Adapun kemajuan teknologi ini mencakup beberapa inovasi utama, salah satunya adalah pengembangan sensor bertenaga sendiri. Berkat *nanogenerator triboelektrik* (TENG), sensor-sensor ini dapat menghasilkan listrik dari energi mekanik arus laut, memungkinkan pengoperasian jangka panjang tanpa memerlukan sumber daya eksternal, yang sangat ideal untuk wilayah terpencil dan minim infrastruktur (Pan et al., 2024; Zou et al., 2024). Selain itu, integrasi sensor dengan kabel bawah laut seperti kabel SMART memungkinkan pemantauan berbagai parameter laut, termasuk suhu, tekanan, dan aktivitas seismik, memperluas cakupan deteksi sumber daya laut dalam skala besar (Howe, 2023). Komunikasi serat optik di lingkungan bawah laut juga memfasilitasi transfer data dan pemantauan lingkungan dengan lebih baik, mendukung *Internet of Underwater Things* (IoUT) dan aplikasi sensor lainnya (Guo et al., 2023).

Sensor bawah laut dapat diintegrasikan dengan kendaraan bawah laut tak berawak (*Unmanned Underwater Vehicle/UUV*), yang mencakup kendaraan yang dioperasikan dari jarak jauh (*Remotely Operated Vehicles/ROV*) dan kendaraan bawah laut otonom (*Autonomous Underwater Vehicle/AUV*). Kendaraan ini sangat penting untuk inspeksi dan pemantauan infrastruktur bawah laut yang kritis (CUI), dan dapat dilengkapi dengan sensor canggih untuk meningkatkan keamanan maritim (In This Issue, 2024). Selain itu, jaringan sensor akustik bawah air (UASN) menawarkan solusi untuk komunikasi dan pemantauan yang aman dengan algoritma canggih, yang memungkinkan transmisi data yang terjaga keamanannya di lingkungan laut yang sulit (Kaveripakam & Chinthajjala, 2023). Penggunaan fotodetektor fotoelektrokimia, berbasis kawat nano Cu@GaN, juga menawarkan efisiensi tinggi dalam komunikasi optik bawah laut tanpa memerlukan peralatan kedap air yang kompleks, sehingga meningkatkan efisiensi pemantauan (Chen et al., 2023).

Meskipun demikian, implementasi sensor bawah laut dihadapkan pada beberapa tantangan. Salah satunya yakni kualitas dan keandalan data. Faktor lingkungan laut yang ekstrem, keterbatasan daya, dan kendala komunikasi mampu mempengaruhi kinerja sensor. Oleh karena itu, pengembangan sistem pengujian otomatis dan diagnostik mandiri menjadi penting guna menjaga kualitas dan akurasi data dalam pengoperasian jangka panjang (Skålvik et al., 2023). Selain itu, efisiensi energi dan keamanan komunikasi juga menjadi perhatian utama. Pemanfaatan komputasi yang aman dan penghapusan gangguan kooperatif dapat mengoptimalkan penggunaan energi perangkat IoT laut serta meningkatkan keamanan transmisi data di lingkungan bawah laut (Li et al., 2023).

Lebih lanjut, dalam konteks pencegahan pencurian sumber daya laut, sensor bawah laut dapat mendeteksi aktivitas penangkapan ikan ilegal dan destruktif, seperti pengeboman ikan atau penggunaan pukot harimau. Dengan kemampuan mengidentifikasi pola suara mesin kapal dan alat tangkap, sensor dapat membedakan aktivitas perikanan legal dan ilegal. Selain itu, data yang dikumpulkan dapat digunakan untuk memverifikasi klaim kapal mengenai lokasi dan jenis aktivitas mereka, sehingga meningkatkan akuntabilitas dalam industri perikanan.

Secara keseluruhan, teknologi sensor bawah laut menawarkan solusi signifikan bagi Indonesia untuk mengatasi tantangan keamanan maritimnya. Namun, keberhasilan implementasi bergantung pada kesiapan infrastruktur teknologi, dukungan kebijakan yang memadai, penguatan kapasitas sumber daya manusia, serta kolaborasi internasional dalam mengelola keamanan maritim di tingkat regional.

d) Sistem Identifikasi AIS

Penggunaan AIS dalam pengawasan maritim memungkinkan pemantauan aktivitas kapal yang lebih akurat dan komprehensif. Data yang dihasilkan oleh sistem AIS memberikan informasi penting yang dapat digunakan untuk memantau kepatuhan kapal terhadap regulasi maritim, khususnya terkait dengan aktivitas penangkapan ikan. Menurut Wan et al. (2024), data AIS dapat mengungkap perilaku kapal yang mencurigakan, seperti perubahan rute yang tiba-tiba atau aktivitas yang tidak sesuai dengan jalur yang diizinkan. Hal ini sangat penting dalam mengidentifikasi dan mencegah tindakan pencurian sumber daya laut, termasuk penangkapan ikan secara ilegal dan tidak dilaporkan (Rodríguez et al., 2024). AIS bekerja dengan mentransmisikan informasi tentang posisi, kecepatan, dan arah kapal melalui gelombang radio VHF. Data ini dikumpulkan oleh stasiun pantai atau satelit yang memungkinkan otoritas maritim untuk memantau aktivitas kapal secara terus-menerus.

Adapun di wilayah dengan topografi pantai yang kompleks, seperti di sepanjang pantai Indonesia, teknologi AIS juga membantu mengatasi area dengan sinyal lemah, sehingga

meningkatkan akurasi dalam pelacakan kapal dan memberikan perlindungan tambahan terhadap kecelakaan laut maupun aktivitas ilegal (Jung et al., 2024).

Selain fungsinya sebagai sistem pelacakan, AIS dapat ditingkatkan melalui integrasi dengan teknologi kecerdasan buatan (AI). Integrasi ini memungkinkan analisis yang lebih dalam terhadap data kapal, memprediksi ancaman, serta meningkatkan manajemen sumber daya laut. Gesami dan Nunoo (2024) menekankan bahwa penggunaan AI bersama dengan data AIS membantu meningkatkan ketepatan dalam mendeteksi ancaman terhadap ekosistem laut, termasuk yang disebabkan oleh aktivitas manusia dan perubahan iklim. Lebih lanjut, AI juga memungkinkan prediksi anomali yang lebih cepat dan akurat, memfasilitasi otoritas maritim dalam mengambil tindakan pencegahan dini terhadap potensi pencurian atau kerusakan ekosistem laut (Li et al., 2024). Pemrosesan Big Data dari AIS menggunakan algoritma AI juga berperan penting dalam pengambilan keputusan terkait manajemen keamanan laut.

Namun, meski teknologi AIS memiliki banyak manfaat, ada sejumlah tantangan yang harus diatasi. Salah satu ancaman signifikan adalah risiko manipulasi atau penonaktifan AIS oleh kapal-kapal yang terlibat dalam kegiatan ilegal, sehingga menyulitkan otoritas untuk melacak pergerakan mereka. Selain itu, risiko keamanan siber juga menjadi perhatian dalam penerapan AIS. Sebagai sistem berbasis data, AIS rentan terhadap serangan siber yang dapat mengakibatkan gangguan serius terhadap integritas data dan operasi maritim. Menurut Soner et al. (2024), ancaman seperti manipulasi data AIS dapat memberikan informasi yang salah, yang dapat mengganggu upaya pengawasan dan pencegahan pencurian sumber daya laut. Oleh karena itu, langkah-langkah keamanan siber yang ketat perlu diimplementasikan untuk melindungi sistem AIS dari akses yang tidak sah. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah pengembangan sistem deteksi intrusi yang adaptif, seperti *Adaptive Intrusion Detection and Prevention Systems* (AIDPS), yang dapat meningkatkan keamanan jaringan bawah air dan menjaga agar data AIS tetap andal serta aman (Das et al., 2024).

Untuk memastikan efektivitas sistem AIS dalam strategi keamanan laut Indonesia, diperlukan kerangka regulasi yang kuat dan koordinasi antar lembaga terkait. Kementerian Kelautan dan Perikanan, TNI Angkatan Laut (TNI AL), dan Badan Keamanan Laut (Bakamla) perlu bekerja sama untuk memastikan penegakan hukum yang ketat atas penggunaan AIS di perairan nasional. Selain itu, kerja sama internasional juga penting mengingat sifat lintas batas dari ancaman keamanan maritim.

C. Efektivitas dan Tantangan

Implementasi teknologi modern dalam mencegah pencurian sumber daya laut di Indonesia memiliki potensi yang signifikan, namun dihadapkan pada berbagai tantangan. Salah satu teknologi yang digunakan untuk memantau aktivitas laut, seperti *Automatic Identification System* (AIS) dan radar, terbukti efektif dalam mendeteksi kapal yang terlibat dalam kegiatan ilegal. Namun, kondisi cuaca buruk dan interferensi sinyal dapat mempengaruhi akurasi teknologi ini, mengurangi efektivitas pemantauan (Rasimin et al., 2024). Selain itu, tidak semua kapal mematuhi regulasi, terutama kapal-kapal kecil yang beroperasi secara ilegal. Penegakan hukum yang efektif memerlukan koordinasi antar lembaga dan sumber daya yang memadai untuk menjangkau wilayah perairan yang luas dan sulit diakses (Jompa et al., 2023).

Salah satu tantangan terbesar adalah kebutuhan akan investasi besar dalam infrastruktur dan pelatihan personel. Negara berkembang seperti Indonesia sering kali menghadapi kesulitan dalam menyediakan sumber daya yang diperlukan untuk mengoperasikan teknologi canggih, terutama di wilayah yang terpencil (Rasimin et al., 2024). Di samping itu, kurangnya literasi digital dan

keterampilan teknis di antara pemangku kepentingan, termasuk nelayan dan petugas, dapat menghambat adopsi teknologi secara efektif. Faktor ini diperparah dengan minimnya pelatihan yang tersedia, menyebabkan kesenjangan dalam penguasaan teknologi.

Selain hambatan teknis dan infrastruktur, ada pula masalah regulasi dan tata kelola yang mempengaruhi efektivitas implementasi teknologi modern. Pemindahan otoritas pengelolaan kawasan lindung laut di Indonesia sering kali terganggu oleh keterbatasan dana dan kapasitas personel, yang menghambat perlindungan sumber daya laut secara optimal (Jompa et al., 2023). Koordinasi yang terbatas antara organisasi pengelolaan perikanan regional (RFMO) dan kurangnya integrasi sistem pemantauan kapal (VMS) juga menjadi kendala utama dalam mengatasi penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU) (Fujii et al., 2023).

Dari sisi keamanan data, ada risiko bahwa informasi yang dikumpulkan dari teknologi pemantauan dapat disalahgunakan oleh pihak yang tidak bertanggung jawab. Untuk itu, diperlukan mekanisme keamanan yang kuat guna melindungi data sensitif yang berpotensi membahayakan kedaulatan negara jika jatuh ke tangan yang salah. Di tingkat internasional, kerangka hukum seperti Konvensi Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Hukum Laut (UNCLOS) membantu memfasilitasi kolaborasi antarnegara dalam pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan dan pengambilan keputusan berbasis bukti (Khaskheli et al., 2023). Walaupun demikian, tantangan-tantangan ini bukan tanpa solusi. Upaya multi-segi yang melibatkan peningkatan literasi digital, kerjasama antar lembaga, serta penerapan kerangka peraturan yang kuat dapat membantu mengatasi hambatan tersebut.

D. *Port State Measures Agreement (PSMA) Indonesia dalam mendukung Implementasi Teknologi Modern*

Indonesia telah mengambil langkah-langkah progresif dengan meratifikasi PSMA dan menetapkan beberapa pelabuhan utama sebagai titik masuk kapal yang terdaftar di bawah perjanjian ini. Empat pelabuhan yang ditunjuk, termasuk pelabuhan umum dan pelabuhan penangkapan ikan, memerlukan penerapan standar layanan berbasis teknologi yang lebih konsisten. Teknologi seperti sistem manajemen pelabuhan berbasis digital dan alat deteksi canggih dapat membantu dalam memperkuat inspeksi kapal dan memvalidasi dokumentasi kapal penangkap ikan. Namun, perbedaan dalam pengelolaan pelabuhan umum dan pelabuhan nelayan masih menjadi kendala utama dalam penerapan PSMA di Indonesia. Kementerian Perhubungan yang bertanggung jawab atas pelabuhan umum beroperasi di bawah MoU Tokyo, sementara Kementerian Kelautan dan Perikanan mengikuti pedoman PSMA di pelabuhan nelayan, sehingga menciptakan ketidaksejajaran regulasi yang berpotensi melemahkan efektivitas penegakan hukum (Solihin et al., 2024).

Salah satu faktor kunci keberhasilan implementasi PSMA adalah kemampuan sumber daya manusia di lapangan. Indonesia menghadapi tantangan dalam hal pelatihan dan ketersediaan petugas yang kompeten untuk melakukan inspeksi pelabuhan secara efisien. Penerapan teknologi modern dalam pelatihan, seperti simulasi virtual untuk pelatihan inspeksi kapal, dapat membantu meningkatkan kompetensi personel. Meskipun beberapa elemen dari PSMA telah dimasukkan ke dalam peraturan nasional, kapasitas sumber daya manusia yang terbatas tetap menjadi tantangan kritis yang memerlukan solusi segera (Solihin et al., 2022).

PSMA terkait hal ini, mengharuskan pengawasan ketat terhadap armada kapal yang masuk ke pelabuhan untuk mencegah penyelundupan ikan hasil tangkapan ilegal ke pasar global. Namun, pengawasan armada domestik dan asing sering terkendala oleh jumlah kapal yang sangat banyak serta terbatasnya infrastruktur teknologi di pelabuhan. Penggunaan analisis data berbasis risiko

dapat meningkatkan efisiensi inspeksi, di mana kapal yang terindikasi berisiko tinggi dapat diprioritaskan untuk pemeriksaan. Selain itu, penggunaan teknologi seperti AIS dan radar pemantauan jarak jauh juga dapat memperkuat pengawasan kapal yang beroperasi di wilayah perairan Indonesia (Adiputra et al., 2024).

Selain itu, teknologi modern memiliki peran penting dalam memperkuat strategi keamanan laut Indonesia di bawah PSMA. Teknologi pengawasan berbasis satelit dan penggunaan drone untuk patroli laut dapat membantu dalam mendeteksi aktivitas IUU Fishing di zona ekonomi eksklusif (ZEE) Indonesia. Selain itu, pengembangan sistem pelaporan otomatis untuk kapal asing yang masuk ke pelabuhan dapat mempercepat proses inspeksi dan verifikasi dokumen. Kerja sama regional juga diperlukan untuk memperkuat keamanan maritim, terutama melalui sharing data antara negara-negara anggota ASEAN dalam rangka mengawasi kapal yang terlibat dalam penangkapan ikan ilegal (Elizabeth, 2023).

Meskipun Indonesia telah menunjukkan komitmen yang kuat dalam mengimplementasikan PSMA, masih ada tantangan signifikan yang harus diatasi. Kendala dalam harmonisasi kerangka hukum, keterbatasan kapasitas sumber daya manusia, serta kurangnya integrasi teknologi modern menjadi hambatan utama dalam penegakan langkah-langkah negara pelabuhan. Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan peningkatan pengembangan kapasitas, baik melalui pelatihan sumber daya manusia maupun implementasi teknologi canggih di pelabuhan. Kolaborasi regional juga sangat penting untuk menangani masalah IUU Fishing secara menyeluruh. Pengalaman negara-negara lain dalam implementasi PSMA, seperti di kawasan Karibia, menunjukkan bahwa kerangka hukum yang kuat dan pengembangan teknologi adalah kunci sukses dalam menerapkan perjanjian ini (Bethel et al., 2021; Onoora, 2018).

KESIMPULAN

Implementasi teknologi modern dalam strategi keamanan laut Indonesia merupakan langkah penting untuk memerangi pencurian sumber daya laut, khususnya praktik penangkapan ikan ilegal, tidak dilaporkan, dan tidak diatur (IUU fishing). Pencurian sumber daya laut ini telah menjadi salah satu tantangan terbesar bagi upaya konservasi dan pengelolaan perikanan berkelanjutan di Indonesia. Dampak dari IUU fishing tidak hanya menyebabkan kerugian ekonomi, dengan estimasi kerugian mencapai \$6,8 miliar pada tahun 2015, tetapi juga merusak ekosistem laut yang penting bagi kehidupan masyarakat pesisir. Kerusakan ini berdampak langsung pada kesejahteraan sosial ekonomi, karena masyarakat lokal yang bergantung pada perikanan menghadapi penurunan hasil tangkapan akibat kompetisi dengan nelayan -nelayan ilegal.

Salah satu pendekatan yang diusulkan untuk mengatasi tantangan ini adalah dengan menerapkan sistem pemantauan berbasis satelit. Teknologi ini memungkinkan pengawasan yang lebih luas dan efisien terhadap perairan Indonesia, mencapai area hingga 5,8 juta km². Dengan menggunakan citra satelit beresolusi tinggi dan algoritma canggih, pemantauan aktivitas kapal dapat dilakukan secara real-time. Meskipun sistem ini menawarkan banyak manfaat, tantangan seperti deteksi target kecil dalam kondisi lingkungan laut yang kompleks dan penggunaan data satelit dalam konteks hukum harus diatasi. Kebijakan yang mendukung integrasi data satelit dalam sistem peradilan lingkungan sangat penting untuk memastikan bahwa data ini dapat digunakan sebagai bukti dalam proses hukum terkait pelanggaran maritim.

Selain pemantauan berbasis satelit, penggunaan drone pengintai (UAV) juga menjadi solusi yang menjanjikan. Drone menawarkan mobilitas tinggi dan kemampuan pengumpulan data yang andal, serta dapat beroperasi dalam berbagai kondisi cuaca. Dengan biaya operasional yang

lebih rendah dan kemampuan terbang yang kontinu, drone memungkinkan pengawasan lebih efektif di wilayah perbatasan dan Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) Indonesia. Meski terdapat tantangan teknis dan hukum, teknologi ini berpotensi besar mengatasi isu pencurian sumber daya laut. Integrasi drone dengan sistem pemantauan lainnya, seperti satelit dan sensor bawah laut, mampu meningkatkan identifikasi dini terhadap ancaman dan mempercepat respons terhadap aktivitas ilegal. Namun, penerapan drone juga menghadapi tantangan dalam regulasi dan infrastruktur yang nantinya perlu diatasi untuk memastikan keberhasilan operasionalnya.

Penggunaan sensor bawah laut sebagai bagian dari strategi keamanan laut modern menawarkan solusi canggih untuk mendeteksi potensi ancaman di bawah permukaan laut. Sensor ini dapat mengumpulkan data rinci mengenai kondisi laut guna menjaga keanekaragaman hayati dan kelestarian lingkungan laut. Dengan memanfaatkan teknologi seperti sonar dan pencitraan hiperspektral, sensor bawah laut lebih efektif dalam pemantauan dibandingkan dengan metode konvensional. Pemantauan berkelanjutan terhadap aktivitas bawah laut ini tidak hanya akan membantu dalam deteksi ancaman, tetapi juga dalam pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan. Pendekatan ini menekankan pentingnya inovasi dalam pengawasan maritim.

Secara keseluruhan, penerapan teknologi modern, seperti sistem pemantauan berbasis satelit, drone pengintai, dan sensor bawah laut, merupakan langkah strategis dalam meningkatkan keamanan laut Indonesia. Upaya ini tidak hanya mengatasi pencurian sumber daya laut, tetapi juga mendukung keberlanjutan ekosistem laut dan kesejahteraan masyarakat pesisir. Meskipun tantangan teknis dan regulasi tetap ada, pendekatan yang inovatif dan kolaboratif diperlukan untuk menciptakan sistem pengawasan maritim yang efektif dan berkelanjutan. Melalui pemanfaatan teknologi dan peningkatan kapasitas sumber daya manusia, Indonesia dapat memperkuat posisinya dalam mengelola sumber daya laut dan menghadapi tantangan kejahatan maritim di masa depan.

DAFTAR REFERENSI

- Adiputra, I. K. H. P., Wijayanto, D., Mahendra, P. G. P. S., & Firmansyah, D. (2024). ANALISIS INSPEKSI PORT STATE CONTROL INDONESIA BERDASARKAN TOKYO MOU. *JPB : Jurnal Patria Bahari*, 3(2), 8-15. <https://doi.org/10.54017/jpb.v3i2.104>
- Akhmad, Solihin., Darmawan, Darmawan., M., Fedi, A., Sondita., Ari, Purbayanto. (2024). Developing Standards for PSMA 2009 Implementing Port and Its Implementation in Indonesia. *Indonesian Journal of International Law*, <https://doi.org/10.17304/ijil.vol21.3.3>
- Alaa, T., Al, Ghazo., Mohammad, Radi, Hayajneh. (2023). Advanced IoT-AI Security System with Drone Surveillance: Campus Smart Security Prototype. *International journal on engineering applications*, <https://doi.org/10.15866/irea.v11i5.24007>
- Anup, Phayal., Aaron, Gold., Curie, Maharani., Brandon, Prins., Sayed, Riyadi. (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>
- Astrid, Marie, Skålvik., Camilla, Saetre., K.-E., Froysoa., Ranveig, Nygaard, Bjørk., Anders, Tengberg. (2023). Challenges, limitations, and measurement strategies to ensure data quality in deep-sea sensors. *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1152236>
- Aurora, Maccarone., Kristofer, Drummond., Aongus, McCarthy., Ulrich, Steinlehner., Julián, Andrés, Tachella., Diego, Aguirre, Garcia., Robert, A., Lamb., Robert, Henderson., Stephen, McLaughlin., Yoann, Altmann., Gerald, S., Buller. (2023). Submerged single-photon LiDAR imaging sensor used for real-time 3D scene reconstruction in scattering

- underwater environments. *Optics Express*, <https://doi.org/10.1364/oe.487129>
- Bohan, Liu., Shaojie, Men., Zhongjun, Ding., Dewei, Li., Zhigang, Zhao., Jiahao, He., Haochen, Ju., Mengling, Shen., Qiuyuan, Yu., Zhaojun, Liu. (2023). Underwater Hyperspectral Imaging System with Liquid Lenses. *Remote sensing*, <https://doi.org/10.3390/rs15030544>
- Bong-Kyu, Jung., Cheor-Hong, Park., Won-Sam, Choi., Dong-Hyun, Kim. (2024). Analysis of Radio-Shaded Areas in the Geoje Island Sea Based on the Automatic Identification System (AIS). *Remote sensing*, <https://doi.org/10.3390/rs16142624>
- Brigid, K., Gesami., Jacob, Nunoo. (2024). Artificial intelligence in marine ecosystem management: addressing climate threats to Kenya's blue economy. *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1404104>
- C., Seminara., M., L., Barbosa-Filho., Rachel, Ann, Hauser-Davis., Gabriel, Barros, Gonçalves, Souza., Marcela, Alvarenga., Christiana, Cabicieri, Profice., Salvatore, Siciliano. (2023). Artisanal fisher knowledge on the impacts of destructive and illegal practices on the Southern Coast of Bahia, Brazil. *Marine Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105862>
- Chin-Chun, Chang., Naomi, A., Ubina., Shyi-Chyi, Cheng., Hsun-Yu, Lan., Kuan, Chu, Chen., Chin-Chao, Huang. (2022). A Two-Mode Underwater Smart Sensor Object for Precision Aquaculture Based on AIoT Technology. *Sensors*, <https://doi.org/10.3390/s22197603>
- Chloe, Stanford-Clark., Eléonore, Loiseau., Arnaud, Helias. (2024). Fisheries Impact Pathway: Making Global and Regionalised Impacts on Marine Ecosystem Quality Accessible in Life Cycle Impact Assessment. *Sustainability*, <https://doi.org/10.3390/su16093870>
- Cosimo, Ieracitano., Nadia, Mammone., Fanny, Spagnolo., Fabio, Frustaci., Stefania, Perri., Pasquale, Corsonello., Francesco, Carlo, Morabito. (2024). An explainable embedded neural system for on-board ship detection from optical satellite imagery. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108517>
- Dewi, Fortuna, Anwar. (2020). Indonesia and the ASEAN outlook on the Indo-Pacific. *International Affairs*, <https://doi.org/10.1093/IA/IIZ223>
- Eleanor, L., Garcia. (2024). Fisheries observers: An overlooked vulnerability for crime and corruption within the global fishing industry. *Marine Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106029>
- Elizabeth R Selig, Colette C C Wabnitz, Shinnosuke Nakayama, et al., (2023) Actions at port are essential for ending illegal, unreported and unregulated fishing. *ESS Open Archive*, <https://doi.org/10.22541/essoar.168332205.56821298/v1>
- Farhana, F., & Khanisa (2022). *ASEAN Maritime Security: The Global Maritime Fulcrum in the Indo-Pacific* (Maufur, Trans.). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-2362-3>
- Gary, D., Libecap. (2024). Advancing ocean ecosystem conservation via property rights, rather than marine protected areas (MPAs). *Maritime studies*, <https://doi.org/10.1007/s40152-024-00358-0>
- Guo, Y., Marin, J. M., Ashry, I., Trichili, A., Havlik, M. N., Ng, T. K., Duarte, C. M., & Ooi, B. S. (2023). Submarine optical fiber communication provides an unrealized deep-sea observation network. *Scientific Reports*, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42748-0>
- Han, Chen., Zefeng, Lin., Yan, Tang., Shini, Yang., Jingtian, Zhao., Qicheng, Zhou., Guozhen, Liu., Yang, Zhao., Feiya, Xu., Shengli, Huang., Xiaohong, Chen., Shuping, Li., Duanjun, Cai., Junyong, Kang. (2023). High-Responsivity Natural-Electrolyte Undersea

- Photoelectrochemical Photodetector with Self-Powered Cu@GaN Nanowires Network. *Advanced Functional Materials*, <https://doi.org/10.1002/adfm.202302872>
- Hong, Gi, Kim., Jungmin, Seo., Soonhag, Kim. (2022). Underwater Optical-Sonar Image Fusion Systems. *Sensors*, <https://doi.org/10.3390/s22218445>
- Howe, B. (2023). SMART submarine cable technology can facilitate acoustics on the global scale. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(4_supplement), A176–A176. <https://doi.org/10.1121/10.0023181>
- Huanfa, Chen., Xiaowei, Gao., Huanhuan, Li., Zaili, Yang. (2024). A framework for the optimal deployment of police drones based on street-level crime risk. *Applied Geography*, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103178>
- Iwao, Fujii., Yumi, Okochi., H., Kawamura., Mitsutaku, Makino. (2023). Potential cooperation of RFMOs for the integrity of MCS: Lessons from the three RFMOs in the Asia-Pacific. *Marine Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105748>
- Jaeyoon, Park., Jennifer, Van, Osdel., Joanna, Turner., Courtney, M, Farthing., Nathan, A., Miller., Hannah, L., Linder., Guillermo, Ortuño, Crespo., Gabrielle, Carmine., David, Kroodsma. (2023). Tracking elusive and shifting identities of the global fishing fleet. *Science Advances*, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abp8200>
- Jamaluddin, Jompa., Amanda, Pricella, Putri., Abigail, Moore., Hartati, Tamti., Siti, Haerani. (2023). The transference of marine protected area management authority in Indonesia: Problems encountered, consequences and ways to move forward. *Marine Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105756>
- Jorge, Rodríguez., Xabier, Irigoien., Carlos, Marmolejo, Duarte., Víctor, M., Eguíluz. (2024). Identification of suspicious behavior through anomalies in the tracking data of fishing vessels. *EPJ Data Science*, <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-024-00459-0>
- Kasim, N., & Widagdo, A. (2019). Combating illegal, unreported, unregulated (IUU) fishing in Indonesia. *AACL Bioflux*, 12(6).
- Li, M., Qian, L. P., Dong, X., Lin, B., Wu, Y., & Yang, X. (2023). Secure Computation Offloading for Marine IoT: An Energy-Efficient Design via Cooperative Jamming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(5). <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3231295>
- Lijun, Wan., Tianfei, Cheng., Wei, Fan., Yongchuang, Shi., Heng, Zhang., Shengmao, Zhang., Li-bin, Yu., Yang, Dai., Shenglong, Yang. (2024). Spatial information extraction of fishing grounds for light purse seine vessels in the Northwest Pacific Ocean based on AIS data. *Heliyon*, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28953>
- Lonna, Bethel., Henning, Jessen., Johan, Hollander. (2021). Implementing the Port State Measures Agreement to combat illegal, unreported and unregulated fishing in the Caribbean. *Marine Policy*, <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2021.104643>
- Malik, A. (2022, November 16). *IUU Fishing as an Evolving Threat to Southeast Asia's Maritime Security* | *Asia Maritime Transparency Initiative*. Asia Maritime Transparency Initiative. Retrieved October 7, 2024, from <https://amti.csis.org/iuu-fishing-as-an-evolving-threat-to-southeast-asias-maritime-security/>
- Massie, C. D., Turangan, D. D., & Sheriman, I. (2024). The Quandary of Resolving Illegal, Unreported, and Unregulated (IUU) Fishing Cases: Navigating the Crossroads of Judicial Processes and Maritime Diplomacy. *Pakistan Journal of Criminology*, 16(3), 1143–1154. <https://doi.org/10.62271/pjc.16.3.1143.1154>
- Max, Zhang., Jiaqi, Zhang., Bojun, Yang. (2024). The evidentiary challenges of using satellite technologies to enforce ship-source marine pollution standards on the high seas. *Heliyon*,

- <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25141>
- Muhammad, Bilawal, Khaskheli., Shumin, Wang., Xin, Zhang., Imran, Haider, Shamsi., Chenghuan, Shen., Sanober, Rasheed., Zakir, Ibrahim., Dost, Muhammad, Baloch. (2023). Technology advancement and international law in marine policy, challenges, solutions and future prospective. *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1258924>
- O., Soner., Gizem, Kayisoglu., Pelin, Bolat., Kimberly, Tam. (2024). Risk sensitivity analysis of AIS cyber security through maritime cyber regulatory frameworks. *Applied Ocean Research*, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103855>
- Onoora, P. (2018). Addressing the legislative gaps in the implementation of port state measures: Southeast Asian perspective. *Fish for the People*, 16(1), 5-20. <http://hdl.handle.net/20.500.12066/1356>
- Otero, P., Velasco, E., & Valeiras, J. (2024). Surveillance of coastal biodiversity through social network monitoring. *Ecological Informatics*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102515>
- Özgün, E., Topak. (2023). Drones: Robot eyes on racialized migrant bodies. *International Migration*, <https://doi.org/10.1111/imig.13183>
- Rasimin., Andi, Bahtiar, Semma., Zakiyuddin., Muhammad, Irfan, Helmy. (2024). Multi-dimensional challenges in the Indonesian social science information technology-based learning: A systematic literature review. *Heliyon*, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28706>
- Sathish, Kaveripakam., Ravi, Chinthaginjala. (2023). Optimal path selection and secured data transmission in underwater acoustic sensor networks: LSTM-based energy prediction. *PLOS ONE*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289306>
- Sidhant, Das., Aryan, Mohammadi, Pasikhani., Prosanta, Gope., John, A., Clark., Chintan, Patel., Biplab, Sikdar. (2024). AIDPS: Adaptive Intrusion Detection and Prevention System for Underwater Acoustic Sensor Networks. *IEEE ACM Transactions on Networking*, <https://doi.org/10.1109/tnet.2023.3313156>
- Syeda, Mahnoor, Gilani., Adeel, Anjum., Abid, Khan., Madiha, H., Syed., Syed, Atif, Moqurrab., Gautam, Srivastava. (2024). A robust Internet of Drones security surveillance communication network based on IOTA. *Internet of things*, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101066>
- Tomás, Vallejos., Laura, Nahuelhual., Stefan, Gelcich., Rodrigo, Oyanedel. (2024). Situational crime analysis of poaching within Territorial Use Rights Fisheries (TURFs). *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1419800>
- Wensheng, Song., Dongmei, Yan., Jun, Yan., Changmiao, Hu., Wanrong, Wu., Xiaowei, Wang. (2023). Ship detection and identification in SDGSAT-1 glimmer images based on the glimmer YOLO model. *International Journal of Digital Earth*, <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2277796>
- Xinran, Li., Wei, Wang., Hao, Gu., Kun, Jin. (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>
- Xiyu, Fan., Zhuhua, Hu., Yaochi, Zhao., Junfei, Chen., Wei, Tang., Zhen, Huang. (2024). A Small Ship Object Detection Method for Satellite Remote Sensing Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, <https://doi.org/10.1109/jstars.2024.3419786>

-
- Yong, Jiu, Zou., Minzheng, Sun., Shuang, Li., Xinyu, Zhang., Liang, Feng., Yu, Wang., Taili, Du., Yulong, Ji., Peiting, Sun., Minyi, Xu. (2024). Advances in Self-powered Triboelectric Sensor toward Marine IoT. *Nano Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109316>
- Yuan, Pan., Zhuhan, Dai., Haoxiang, Ma., Jinrong, Zheng., Jing, Leng., Chao, Xie., Yapeng, Yuan., Wayne, Yang., Yaxiaer, Yalikun., Xuemei, Song., Chang, Bao, Han., Chenjing, Shang., Yang, Yang. (2024). Self-powered and speed-adjustable sensor for abyssal ocean current measurements based on triboelectric nanogenerators. *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50581-w>
- Yucheng, Zhang., Dekai, Ye., Mengxue, Li., Xi, Zhang., Chong-an, Di., Chao, Wang. (2023). Solid state ionics enabled ultra-sensitive detection of thermal trace with 0.001K resolution in deep sea. *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35682-8>
- Zechen, Li., Tong, Liu., Xing, Peng., Jinxin, Ren., Shan, Liang. (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>
- Zhijuan, Su., Gang, Wan., Wenhua, Zhang., Ningbo, Guo., Yitian, Wu., Jia, Liu., Dianwei, Cong., Yutong, Jia., Zhanji, Wei. (2024). An Integrated Detection and Multi-Object Tracking Pipeline for Satellite Video Analysis of Maritime and Aerial Objects. *Remote sensing*, <https://doi.org/10.3390/rs16040724>