

Peran Sistem Informasi Geografis Dalam Penguatan Maritime Domain Awareness: Systematic Literature Review Berbasis PRISMA 2020

Tedi Septiadi^{1*}, Muhammad Ali², Lukman Yudho Prakoso³, Nefra Firdaus⁴, Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶

^{1,2,3,4,5,6}Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Indonesia

tedi.septiadi@km.idu.ac.id¹, kasalmuhammadali@gmail.com², lukman.prakoso@idu.ac.id³,
nefra.firdaus@idu.ac.id⁴, harri.dolli@idu.ac.id⁵, yuniar@idu.ac.id⁶

*Corresponding Author

Article Info

Article history:

Received : 13 Juli, 2026

Revised : 13 Juli, 2026

Accepted : 14 Juli, 2026

Kata Kunci:

Automatic Identification System;
Keamanan Maritim;
Maritime Domain Awareness;
Sistem Informasi Geografis;
Systematic Literature Review.

Abstrak

Keamanan maritim kontemporer menuntut pengawasan berbasis integrasi teknologi geospasial dan kecerdasan buatan untuk menghadapi ancaman non-tradisional. Sistem Informasi Geografis (GIS) kini bertransformasi dari alat pemetaan statis menjadi platform analitis cerdas yang berkonvergensi dengan penginderaan jauh, Automatic Identification System (AIS), *big data*, *cloud computing*, dan *digital twin* guna mendukung *Maritime Domain Awareness* (MDA). Bagi Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, integrasi teknologi ini mendesak mengingat luasnya perairan dan kompleksitas ancaman seperti penangkapan ikan ilegal dan penyelundupan, sementara literatur yang ada masih mengkaji tiap domain teknologi secara terpisah tanpa sintesis lintas-tema yang komprehensif. Penelitian ini bertujuan memetakan dan mensintesis literatur mengenai peran GIS, remote sensing, AIS, kecerdasan buatan, *big data*, *cloud GIS*, dan *digital twin* dalam penguatan MDA, serta merumuskan arah penelitian masa depan yang relevan bagi konteks Indonesia. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) mengacu pada PRISMA 2020 melalui empat tahap *Identification*, *Screening*, *Eligibility*, dan *Included Studies* dengan pencarian pada *Scopus*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, dan MDPI. Sebanyak 19 artikel memenuhi kriteria inklusi dan disintesis ke dalam sepuluh tema: GIS, *remote sensing*, AIS, kecerdasan buatan, *big data*, *cloud GIS*, MDA, *digital twin*, keamanan siber, dan arah penelitian masa depan. Hasil sintesis menunjukkan bahwa literatur pada level komponen teknis khususnya deteksi kapal berbasis *deep learning* dan deteksi anomali AIS telah mencapai kematangan metodologis tinggi, namun masih terdapat kesenjangan pada integrasi sistemik lintas-domain serta minimnya validasi kontekstual di kawasan maritim Asia Tenggara. Penelitian ini menyimpulkan bahwa perkembangan literatur menunjukkan pola konvergensi teknologi yang semakin erat, di mana GIS telah bertransformasi menjadi platform integrasi cerdas yang menyatukan data dari citra satelit, UAV, AIS, dan sensor bawah laut melalui lapisan analitik berbasis kecerdasan buatan, sebagaimana tercermin dalam kerangka MDA.

PENDAHULUAN

Wilayah maritim di era kontemporer telah bertransformasi menjadi ruang strategis yang kompleks, tidak hanya sebagai jalur pelayaran dan sumber daya ekonomi, tetapi juga sebagai arena ancaman non-tradisional yang bersifat lintas batas dan multidimensi. Perkembangan teknologi geospasial, khususnya Sistem Informasi Geografis (*Geographic Information System/GIS*), telah mengalami pergeseran paradigma yang signifikan dari sekadar alat pemetaan statis menjadi infrastruktur analitis yang mampu mengintegrasikan data spasial dalam skala masif dan kompleksitas tinggi. Breunig et al. (2020) menegaskan bahwa manajemen data geospasial kontemporer menghadapi tantangan besar dalam hal interoperabilitas, skalabilitas, dan integrasi lintas platform, sebuah kondisi yang mendorong lahirnya generasi baru GIS yang lebih adaptif. Perkembangan ini semakin dipertajam oleh gagasan Li dan Ning (2023) mengenai "Autonomous GIS", yaitu sistem informasi geografis generasi berikutnya yang digerakkan oleh kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dan mampu melakukan penalaran spasial secara otonom, tanpa intervensi manusia yang intensif dalam setiap tahap analisis. Transformasi semacam ini menandakan bahwa GIS tidak lagi berdiri sendiri sebagai disiplin teknis, melainkan telah berkonvergensi dengan kecerdasan buatan, *big data*, *cloud computing*, dan *Internet of Things (IoT)* untuk membentuk ekosistem teknologi geospasial yang terintegrasi (Yang et al., 2017).

Konvergensi teknologi tersebut memiliki relevansi yang sangat besar dalam konteks keamanan maritim global. Domain maritim, yang mencakup lebih dari dua pertiga permukaan bumi, merupakan ruang yang secara inheren sulit diawasi secara konvensional. Kehadiran teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*), baik berbasis satelit maupun *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, telah memperluas kapasitas negara dan lembaga maritim dalam melakukan pemantauan wilayah laut secara sistematis (Emilien et al., 2021; Quamar et al., 2023). Di sisi lain, sistem *Automatic Identification System (AIS)* telah menjadi tulang punggung pengawasan lalu lintas kapal secara *real-time*, meskipun keterbatasannya dalam mendeteksi kapal yang sengaja mematikan transpondernya (*dark vessel*) mendorong pengembangan metode deteksi anomali berbasis pembelajaran mesin (Nguyen et al., 2019; Yang, Liu, et al., 2024). Kombinasi antara data optik, radar *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, dan AIS kemudian melahirkan pendekatan fusi data multimodal yang semakin presisi dalam merekonstruksi lalu lintas maritim (Guo et al., 2023). Perkembangan ini secara kolektif membentuk fondasi bagi apa yang dalam literatur keamanan maritim disebut sebagai *Maritime Domain Awareness (MDA)*, yaitu kapasitas komprehensif untuk memahami segala sesuatu yang berkaitan dengan domain maritim yang dapat berdampak pada keamanan, ekonomi, atau lingkungan.

Pada tataran nasional, Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia menghadapi tantangan keamanan maritim non-tradisional yang sangat kompleks, mencakup penangkapan ikan ilegal (*illegal, unreported, and unregulated fishing/IUU fishing*), penyelundupan, serta lemahnya pengawasan pada zona-zona perairan yang luas dan tersebar. Studi Kurekin et al. (2019) mengenai pemantauan operasional aktivitas penangkapan ikan ilegal di Ghana melalui kombinasi data observasi bumi satelit dan AIS memberikan preseden metodologis yang relevan, meskipun konteks geografisnya berbeda dari perairan Indonesia. Karakteristik geografis Indonesia yang terdiri atas ribuan pulau dan garis pantai yang sangat panjang menjadikan pendekatan pengawasan konvensional tidak lagi memadai, sehingga kebutuhan terhadap sistem pengawasan berbasis integrasi GIS, penginderaan jauh, AIS, dan kecerdasan buatan menjadi semakin mendesak. Tantangan ini diperparah oleh keterbatasan kapasitas kelembagaan dalam mengelola volume data maritim yang terus meningkat, sebuah persoalan yang secara

langsung berkaitan dengan isu big data maritim sebagaimana diuraikan oleh Jahanbakht et al. (2020) dalam kajian mereka mengenai *Internet of Underwater Things*.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk memahami secara komprehensif bagaimana berbagai cabang teknologi geospasial dan kecerdasan buatan tersebut yang selama ini dikaji secara terpisah dalam literatur ilmiah dapat disintesis menjadi satu kerangka pemahaman yang koheren guna mendukung penguatan *Maritime Domain Awareness*. Sebagian besar literatur yang tersedia cenderung membahas satu domain teknologi secara terisolasi, misalnya kajian yang berfokus pada deteksi kapal berbasis citra SAR menggunakan arsitektur deep learning tertentu (Jiang et al., 2021; Wei et al., 2020; Xu et al., 2022; Zhang, Zhang, Shi, & Wei, 2019; Zhang, Zhang, & Ke, 2021; Zhang, Wu, Xu, Wang, & Sun, 2019), tanpa menghubungkannya secara eksplisit dengan kerangka besar keamanan maritim atau dengan perkembangan paralel pada domain big data, cloud GIS, digital twin (Rathore et al., 2021), maupun keamanan siber pada sistem transportasi maritim cerdas (Kumar et al., 2023). Fragmentasi kajian semacam ini menciptakan celah penelitian (*research gap*) yang signifikan, yakni minimnya sintesis literatur lintas-tema yang mampu memetakan keterkaitan antarteknologi tersebut secara sistematis, sekaligus kelangkaan kajian yang secara eksplisit mengaitkan perkembangan teknologi tersebut dengan konteks negara kepulauan seperti Indonesia.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada upaya menyusun sintesis literatur sistematis yang mengintegrasikan sepuluh tema teknologi mulai dari perkembangan GIS, remote sensing, AIS, kecerdasan buatan, *big data*, *cloud GIS*, *Maritime Domain Awareness*, digital twin, keamanan siber, hingga arah penelitian masa depan ke dalam satu kerangka analitis yang koheren dan berorientasi pada konteks aplikatif keamanan maritim. Pendekatan ini berbeda dari kajian-kajian sebelumnya yang cenderung bersifat tinjauan tunggal-domain, karena penelitian ini secara eksplisit berupaya membangun jembatan konseptual antarteknologi sekaligus merefleksikan relevansinya terhadap tantangan keamanan maritim Indonesia. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: pertama, mengidentifikasi dan memetakan perkembangan literatur mengenai integrasi GIS, *remote sensing*, AIS, kecerdasan buatan, *big data*, *cloud GIS*, dan *digital twin* dalam mendukung *Maritime Domain Awareness*; kedua, melakukan sintesis kritis terhadap persamaan, perbedaan, kelebihan, dan kekurangan pendekatan-pendekatan yang telah dikembangkan dalam literatur tersebut; dan ketiga, merumuskan arah penelitian masa depan yang relevan bagi penguatan keamanan maritim, khususnya dalam konteks Indonesia sebagai negara kepulauan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* 2020 (PRISMA 2020) sebagaimana dirumuskan oleh Page et al. (2021). Pedoman PRISMA 2020 dipilih karena menawarkan kerangka pelaporan yang transparan, terstruktur, dan dapat direplikasi, sehingga memungkinkan proses identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan penetapan studi yang disertakan dilakukan secara sistematis dan minim bias subjektif. Pendekatan SLR dianggap paling sesuai untuk tujuan penelitian ini karena sifatnya yang mampu mensintesis temuan dari berbagai domain teknologi GIS, remote sensing, AIS, kecerdasan buatan, big data, cloud GIS, dan digital twin yang selama ini berkembang secara terpisah dalam literatur ilmiah, menjadi satu kerangka pemahaman yang koheren mengenai penguatan *Maritime Domain Awareness*.

Strategi pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada basis data ilmiah bereputasi yang mengindeks jurnal-jurnal berkualitas tinggi di bidang geospasial,

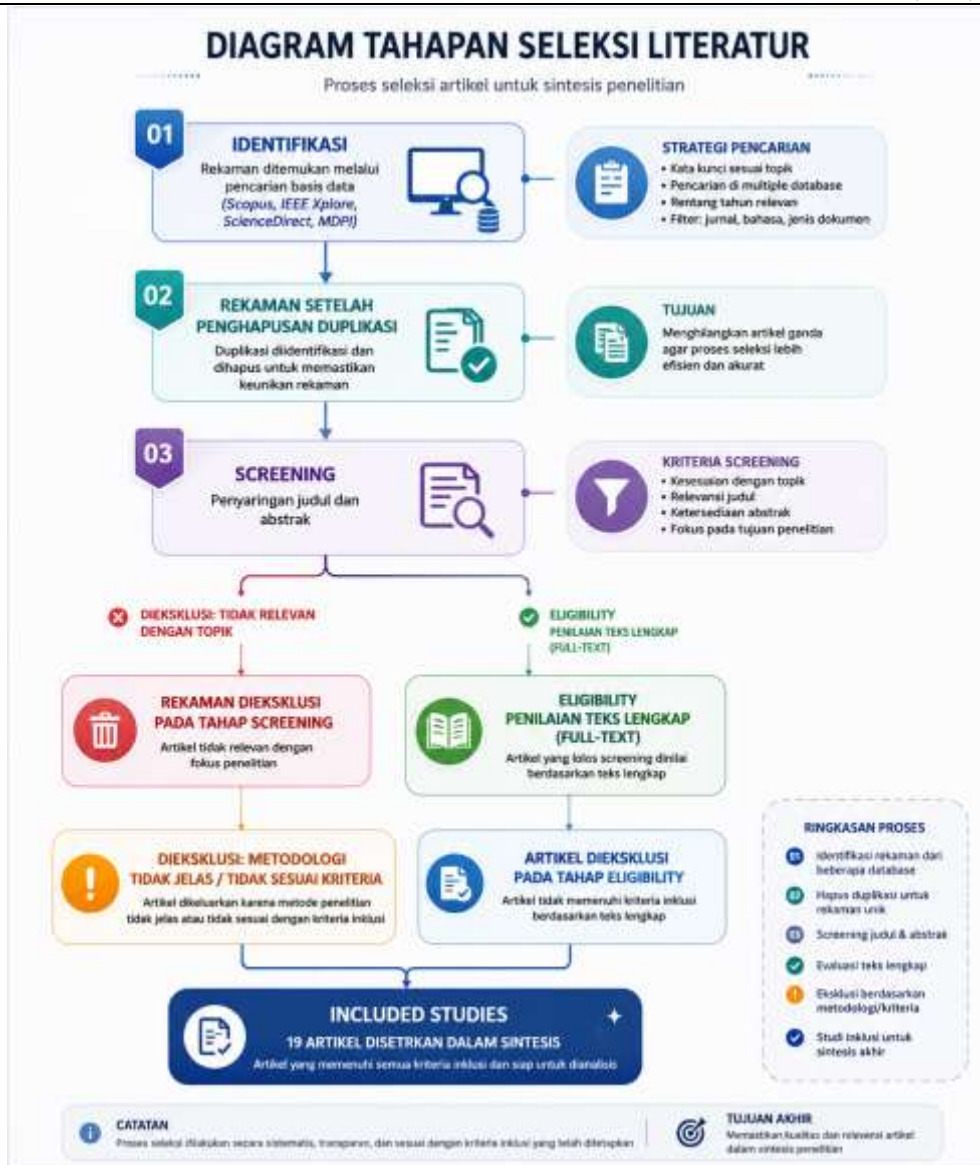
kecerdasan buatan, dan teknik kelautan, yaitu *Scopus*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, dan MDPI (*Multidisciplinary Digital Publishing Institute*). Pemilihan keempat basis data tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa mayoritas literatur mengenai integrasi GIS, remote sensing, dan kecerdasan buatan untuk aplikasi maritim dipublikasikan pada jurnal-jurnal yang terindeks di dalamnya, sebagaimana tercermin dari sumber-sumber yang menjadi rujukan utama penelitian ini, antara lain *International Journal of Geographical Information Science*, *Remote Sensing*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *IEEE Access*, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *Science of Remote Sensing*, dan *Transportation Research Part E*.

Artikel yang disertakan dalam penelitian ini harus memenuhi kriteria berikut: (1) merupakan artikel jurnal ilmiah yang telah melalui proses *peer-review* dan diterbitkan pada rentang tahun 2017–2024; (2) membahas secara substantif setidaknya satu dari sepuluh tema teknologi yang menjadi fokus penelitian, yaitu GIS, *remote sensing*, AIS, kecerdasan buatan, *big data*, *cloud GIS*, *Maritime Domain Awareness*, *digital twin*, keamanan siber maritim, atau arah penelitian masa depan pada domain tersebut; (3) ditulis dalam bahasa Inggris; dan (4) menyediakan metodologi dan temuan yang dapat diekstraksi secara jelas untuk keperluan sintesis tematik.

Sebaliknya, artikel dieksklusi apabila memenuhi salah satu kondisi berikut: (1) berupa prosiding konferensi tanpa proses *peer-review* yang setara jurnal, editorial, opini, atau abstrak tanpa teks lengkap; (2) tidak memiliki keterkaitan langsung dengan domain maritim atau aplikasi geospasial; (3) merupakan duplikasi dari studi yang telah tercakup pada basis data lain; atau (4) tidak dapat diakses teks lengkapnya (*full text*) pada saat proses pengumpulan data dilakukan.

Proses seleksi artikel dilakukan mengikuti empat tahapan PRISMA 2020, yaitu Identification, Screening, Eligibility, dan Included Studies. Pada tahap Identification, dilakukan pencarian awal pada keempat basis data menggunakan kombinasi kata kunci sebagaimana dijelaskan sebelumnya, yang menghasilkan sejumlah rekaman (*records*) awal. Rekaman yang teridentifikasi kemudian melalui proses penghapusan duplikasi (*deduplication*) sebelum memasuki tahap berikutnya. Pada tahap *Screening*, judul dan abstrak dari setiap rekaman disaring secara manual untuk menilai relevansinya terhadap topik penelitian, dengan mengeliminasi artikel yang secara jelas tidak relevan berdasarkan kriteria eksklusi. Tahap *Eligibility* melibatkan penilaian teks lengkap (*full-text assessment*) terhadap artikel yang lolos tahap penyaringan, guna memastikan kesesuaiannya dengan kriteria inklusi secara menyeluruh, termasuk kejelasan metodologi dan relevansi temuan terhadap tema penelitian. Artikel yang lolos seluruh tahapan tersebut kemudian ditetapkan sebagai Included Studies, yang dalam penelitian ini berjumlah 19 artikel sebagaimana tercantum pada daftar pustaka.

Untuk memberikan gambaran visual mengenai keseluruhan alur seleksi tersebut, disajikan diagram PRISMA pada Gambar 1 berikut. Diagram ini menggambarkan secara ringkas jumlah rekaman pada setiap tahapan seleksi beserta alasan eksklusi pada tiap tahap, sehingga proses seleksi literatur dapat ditelusuri secara transparan.



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA 2020
(Sumber: diolah oleh penulis, 2026)

Sebagaimana tergambar pada diagram tersebut, proses seleksi bersifat progresif dan selektif, di mana jumlah rekaman semakin menyusut pada setiap tahapan seiring dengan diterapkannya kriteria inklusi dan eksklusi secara konsisten. Pola penyusutan semacam ini merupakan karakteristik umum dari SLR berbasis PRISMA, yang menekankan pentingnya ketelitian metodologis dalam menyaring literatur agar sintesis akhir hanya didasarkan pada studi-studi yang benar-benar relevan dan berkualitas.

Penilaian kualitas terhadap 19 artikel yang disertakan dilakukan dengan mempertimbangkan tiga aspek utama, yaitu kejelasan rumusan masalah dan tujuan penelitian, ketepatan metodologi yang digunakan (baik pendekatan kuantitatif berbasis deep learning, survei literatur, maupun studi kasus empiris), serta relevansi dan kontribusi temuan terhadap domain GIS dan keamanan maritim. Seluruh artikel yang disertakan dalam penelitian ini merupakan publikasi pada jurnal bereputasi dengan proses peer-review yang ketat, sehingga secara umum memenuhi standar kualitas metodologis yang memadai untuk disintesis.

Sintesis data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan thematic synthesis, yaitu proses pengelompokan temuan dari 19 artikel yang disertakan ke dalam sepuluh tema

besar yang saling berkaitan: perkembangan GIS, *remote sensing*, AIS, kecerdasan buatan, *big data*, *cloud GIS*, *Maritime Domain Awareness*, *digital twin*, keamanan siber, dan arah penelitian masa depan. Pendekatan ini dipilih alih-alih meta-analisis kuantitatif karena heterogenitas metodologis yang tinggi di antara studi-studi yang disertakan, mulai dari studi konseptual, tinjauan literatur, hingga pengembangan model deep learning dengan metrik evaluasi yang berbeda-beda, sehingga agregasi statistik tidak dapat dilakukan secara valid. Sebagai gantinya, sintesis tematik memungkinkan identifikasi pola, persamaan, perbedaan, serta kesenjangan antarstudi secara naratif dan kritis, yang kemudian diintegrasikan untuk membentuk pemahaman komprehensif mengenai kontribusi kolektif literatur terhadap penguatan *Maritime Domain Awareness*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Literatur mengenai perkembangan GIS yang disertakan dalam sintesis ini menunjukkan pergeseran orientasi yang jelas, dari GIS sebagai infrastruktur manajemen data spasial menuju GIS sebagai sistem analitis yang cerdas dan otonom. Breunig et al. (2020) memotret kondisi riset manajemen data geospasial secara luas dan mengidentifikasi bahwa tantangan utama yang dihadapi bukan lagi sekadar ketersediaan data, melainkan interoperabilitas antarplatform, skalabilitas penyimpanan, serta efisiensi pemrosesan data dalam volume besar. Temuan ini sejalan dengan arah perkembangan yang diuraikan oleh Li dan Ning (2023), yang mengajukan konsep "*Autonomous GIS*" sebagai generasi berikutnya dari sistem informasi geografis sebuah sistem yang tidak hanya menyimpan dan menampilkan data spasial, tetapi mampu melakukan penalaran spasial, pengambilan keputusan, dan bahkan interaksi bahasa alami dengan penggunaannya melalui integrasi model bahasa besar (*large language models*) ke dalam arsitektur GIS.

Jika kedua studi tersebut dibandingkan, tampak adanya kesinambungan logis: Breunig et al. (2020) mengidentifikasi persoalan struktural pada level infrastruktur data, sementara Li dan Ning (2023) menawarkan arah solusi pada level kecerdasan sistem. Persamaan mendasar keduanya terletak pada keyakinan bahwa GIS konvensional yang bersifat statis dan sangat bergantung pada operator manusia untuk setiap tahap analisis tidak lagi memadai untuk menjawab kompleksitas data spasial kontemporer. Namun demikian, terdapat perbedaan penekanan yang signifikan. Breunig et al. (2020) lebih berorientasi pada aspek teknis-infrastruktural seperti format data, standar interoperabilitas, dan arsitektur basis data, sedangkan Li dan Ning (2023) berorientasi pada aspek kognitif-fungsional, yakni bagaimana GIS dapat "berpikir" dan bertindak secara mandiri. Kelebihan pendekatan Breunig et al. (2020) terletak pada cakupannya yang komprehensif terhadap seluruh ekosistem manajemen data geospasial, namun kelemahannya adalah minimnya elaborasi mengenai bagaimana kecerdasan buatan dapat diintegrasikan secara konkret ke dalam infrastruktur tersebut. Sebaliknya, gagasan *Autonomous GIS* dari Li dan Ning (2023) menawarkan visi yang lebih futuristik dan inspiratif, tetapi masih bersifat konseptual dan belum sepenuhnya diuji pada skala implementasi yang luas, khususnya pada *domain* aplikasi spesifik seperti keamanan maritim.

Sintesis dari kedua studi ini menunjukkan bahwa perkembangan GIS kontemporer bergerak pada dua sumbu yang saling melengkapi yaitu penguatan infrastruktur data di satu sisi, dan penguatan kapasitas analitis-kognitif di sisi lain. Bagi konteks Indonesia sebagai negara kepulauan dengan volume data spasial maritim yang terus bertambah mulai dari data batimetri, citra satelit, hingga data lalu lintas kapal kombinasi kedua orientasi tersebut menjadi sangat relevan. Tantangan interoperabilitas data sebagaimana diidentifikasi Breunig et al. (2020) sangat mungkin dijumpai dalam konteks Indonesia,

mengingat data maritim seringkali tersebar di berbagai kementerian dan lembaga dengan format serta standar yang tidak seragam, sementara visi *Autonomous GIS* dari Li dan Ning (2023) membuka peluang bagi pengembangan sistem pengawasan maritim yang lebih adaptif terhadap dinamika ancaman non-tradisional yang terus berubah.

Untuk memperjelas perbandingan pendekatan GIS yang berkembang dalam literatur, berikut disajikan tabel yang memetakan orientasi, kelebihan, dan keterbatasan masing-masing pendekatan. Tabel ini bertujuan memberikan gambaran ringkas mengenai posisi setiap pendekatan dalam spektrum perkembangan GIS, sebelum dikaitkan lebih lanjut dengan tema-tema berikutnya seperti *remote sensing* dan kecerdasan buatan.

Tabel 1. Perbandingan Pendekatan GIS dalam Literatur

Aspek	Breunig et al. (2020) Geospatial Data Management	Li & Ning (2023) Autonomous GIS
Orientasi utama	Infrastruktur & manajemen data	Kecerdasan & otonomi sistem
Fokus persoalan	Interoperabilitas, skalabilitas	Penalaran spasial otonom
Kelebihan	Cakupan komprehensif ekosistem data	Visi progresif, integrasi AI/LLM
Keterbatasan	Minim elaborasi integrasi AI konkret	Masih konseptual, belum teruji luas
Relevansi bagi Indonesia	Integrasi data lintas-lembaga	Sistem pengawasan adaptif

(Sumber: diolah penulis, (2026))

Sebagaimana terlihat pada Tabel 1, kedua pendekatan tersebut sesungguhnya tidak bersifat kontradiktif, melainkan komplementer dalam membentuk arah perkembangan GIS masa depan. Pendekatan yang berorientasi infrastruktur menjadi prasyarat teknis bagi terwujudnya GIS otonom, sementara visi otonomi memberikan arah tujuan bagi pengembangan infrastruktur tersebut. Implikasinya, pengembangan sistem GIS untuk keamanan maritim Indonesia idealnya tidak hanya berfokus pada penguatan basis data spasial semata, tetapi juga perlu mempertimbangkan kapasitas analitis cerdas yang mampu beradaptasi terhadap pola ancaman yang terus berkembang.

Remote sensing merupakan salah satu tema dengan representasi literatur yang cukup kaya dalam sintesis ini, mencakup studi Emilien et al. (2021), Quamar et al. (2023), Yang, Yu, et al. (2022), dan Janga et al. (2023). Emilien et al. (2021) mengkaji sinergi antara UAV dan citra satelit untuk aplikasi penginderaan jauh optik, dan menyimpulkan bahwa kedua platform tersebut memiliki karakteristik yang saling melengkapi: satelit unggul dalam cakupan area yang luas namun terbatas dalam resolusi temporal dan spasial pada area spesifik, sementara UAV menawarkan resolusi tinggi dan fleksibilitas waktu pengambilan data, tetapi terbatas dalam cakupan area akibat keterbatasan daya jelajah. Temuan ini diperkuat oleh Quamar et al. (2023), yang secara lebih spesifik meninjau perkembangan teknologi *drone* yang terintegrasi dengan GIS, menegaskan bahwa integrasi tersebut telah memperluas aplikasi GIS ke berbagai sektor, termasuk pemantauan lingkungan dan infrastruktur yang sebelumnya sulit dijangkau oleh metode penginderaan jauh konvensional.

Sementara itu, Yang, Yu, et al. (2022) memberikan kontribusi yang berbeda sifatnya, yaitu analisis bibliometrik terhadap tren riset aplikasi UAV dalam pemantauan laut. Melalui visualisasi pengetahuan (*knowledge visualization*), studi ini memetakan bagaimana riset UAV untuk pemantauan laut telah berkembang pesat dalam dekade terakhir, dengan fokus yang semakin bergeser dari sekadar akuisisi citra menuju integrasi dengan analitik data lanjutan. Di sisi lain, Janga et al. (2023) mengambil perspektif yang lebih luas dengan meninjau aplikasi AI praktis untuk *remote sensing* pada ilmu kebumihutan secara umum, menegaskan bahwa integrasi kecerdasan buatan khususnya *deep learning* telah menjadi elemen tak terpisahkan dari pemrosesan data penginderaan jauh

kontemporer, mencakup klasifikasi tutupan lahan, deteksi perubahan, hingga estimasi parameter lingkungan.

Apabila keempat studi tersebut dibandingkan, tampak adanya persamaan mendasar dalam hal pengakuan terhadap keterbatasan platform penginderaan jauh tunggal dan kebutuhan akan pendekatan multi-platform yang terintegrasi. Namun demikian, terdapat perbedaan signifikan dalam hal metodologi kajian Emilien et al. (2021) dan Quamar et al. (2023) lebih bersifat tinjauan literatur deskriptif-naratif yang berfokus pada karakteristik teknis platform, sedangkan Yang, Yu, et al. (2022) menggunakan pendekatan bibliometrik kuantitatif yang memungkinkan identifikasi tren riset secara lebih objektif dan terukur. Janga et al. (2023) menempati posisi yang berbeda lagi, karena kajiannya tidak spesifik pada domain maritim, melainkan pada ilmu kebumihajaran secara umum, sehingga kontribusinya terhadap sintesis ini lebih bersifat kontekstual yaitu menegaskan bahwa tren integrasi AI dalam remote sensing merupakan fenomena lintas-domain yang juga berlaku pada aplikasi maritim.

Kelebihan kolektif dari keempat studi ini adalah kekayaan perspektif yang mereka tawarkan, mulai dari karakteristik teknis platform hingga tren riset secara makro. Akan tetapi, kekurangan yang cukup menonjol adalah minimnya kajian yang secara eksplisit menghubungkan penginderaan jauh dengan konteks keamanan maritim non-tradisional, seperti pengawasan aktivitas ilegal di laut. Sebagian besar studi lebih berorientasi pada aplikasi lingkungan dan pemantauan sumber daya secara umum, sehingga penerapannya pada konteks keamanan memerlukan adaptasi lebih lanjut. Dalam konteks Indonesia, sintesis ini mengindikasikan bahwa strategi pemantauan maritim yang optimal semestinya mengombinasikan citra satelit untuk cakupan wilayah perairan yang luas dengan UAV untuk verifikasi area-area rawan secara lebih detail, sebuah pendekatan yang sangat relevan mengingat luasnya zona ekonomi eksklusif Indonesia yang tidak mungkin diawasi secara efektif hanya dengan satu jenis platform penginderaan jauh. Untuk merangkum karakteristik teknologi remote sensing yang dibahas dalam literatur, tabel berikut menyajikan perbandingan platform, keunggulan, dan keterbatasannya. Tabel ini disusun guna memudahkan pemahaman mengenai kapan dan bagaimana masing-masing platform paling optimal digunakan dalam konteks pemantauan maritim.

Tabel 2. Teknologi Remote Sensing untuk Pemantauan Maritim

Platform/Fokus	Studi Rujukan	Keunggulan	Keterbatasan
Citra satelit	Emilien et al. (2021)	Cakupan area luas	Resolusi temporal terbatas
UAV	Emilien et al. (2021); Quamar et al. (2023)	Resolusi tinggi, fleksibel	Cakupan area terbatas
Integrasi UAV-GIS	Quamar et al. (2023)	Perluasan aplikasi multisektor	Kompleksitas integrasi sistem
Analisis tren riset UAV kelautan	Yang, Yu, et al. (2022)	Pemetaan arah riset objektif	Tidak menghasilkan teknologi baru
AI untuk remote sensing	Janga et al. (2023)	Otomatisasi pemrosesan citra	Kajian tidak spesifik maritim

(Sumber: diolah penulis, 2026)

Data pada Tabel 2 menegaskan bahwa tidak terdapat satu platform *remote sensing* tunggal yang secara sempurna memenuhi seluruh kebutuhan pemantauan maritim. Setiap platform memiliki keunggulan komparatif pada kondisi tertentu, sehingga pendekatan yang paling rasional adalah integrasi *multi-platform* yang disesuaikan dengan karakteristik area dan kebutuhan operasional. Temuan ini menjadi dasar penting bagi pembahasan mengenai AIS, yang pada dasarnya merupakan sumber data pelengkap bagi keterbatasan *remote sensing* dalam mendeteksi kapal yang tidak teridentifikasi secara *visual*.

Automatic Identification System (AIS) merupakan salah satu tema dengan kedalaman kajian yang cukup signifikan dalam sintesis literatur ini, direpresentasikan oleh Nguyen et al. (2019), Guo et al. (2023), Yang, Liu, et al. (2024), dan secara tidak langsung oleh Kurekin et al. (2019). Nguyen et al. (2019) mengembangkan *GeoTrackNet*, sebuah pendekatan deteksi anomali maritim yang memanfaatkan representasi probabilistik berbasis *neural network* terhadap data trayektori AIS, dikombinasikan dengan metode *deteksi a contrario* untuk mengidentifikasi pola pergerakan kapal yang menyimpang dari kebiasaan normal. Pendekatan ini merepresentasikan pergeseran signifikan dari metode deteksi anomali berbasis aturan (*rule-based*) menuju pendekatan berbasis pembelajaran statistik yang mampu menangkap pola kompleks dalam data trayektori dalam skala besar.

Studi yang relevan dan saling melengkapi datang dari Guo et al. (2023), yang mengembangkan pendekatan *asynchronous trajectory matching* untuk fusi data maritim multimodal dalam konteks pengawasan lalu lintas kapal di perairan pedalaman (*inland waterways*). Perbedaan mendasar antara kedua studi ini terletak pada fokus permasalahannya Nguyen et al. (2019) berfokus pada deteksi anomali dari data AIS tunggal, sedangkan Guo et al. (2023) berfokus pada penggabungan data AIS dengan sumber data lain untuk meningkatkan akurasi rekonstruksi lalu lintas maritim, khususnya pada kondisi di mana data AIS tidak sinkron secara temporal antarkapal. Kombinasi kedua pendekatan ini menunjukkan bahwa tantangan utama dalam pemanfaatan data AIS bukan hanya soal mendeteksi anomali dari data yang ada, tetapi juga soal bagaimana mengatasi keterbatasan intrinsik data AIS itu sendiri, seperti data yang hilang, tidak sinkron, atau sengaja dimatikan oleh operator kapal.

Yang, Liu, et al. (2024) memberikan kontribusi yang bersifat lebih komprehensif dan integratif, yaitu tinjauan menyeluruh mengenai pemanfaatan *machine learning* untuk riset maritim berbasis data AIS. Studi ini memetakan berbagai aplikasi pembelajaran mesin pada data AIS, mulai dari prediksi trayektori, deteksi anomali, klasifikasi jenis kapal, hingga estimasi risiko tabrakan, sehingga memberikan gambaran holistik mengenai betapa luasnya potensi pemanfaatan data AIS ketika dikombinasikan dengan teknik kecerdasan buatan. Jika dibandingkan dengan kedua studi sebelumnya yang bersifat pengembangan model spesifik, kontribusi Yang, Liu, et al. (2024) lebih bersifat sintesis payung yang menempatkan *GeoTrackNet* (Nguyen et al., 2019) dan pendekatan fusi data (Guo et al., 2023) sebagai bagian dari lanskap riset AIS-machine learning yang jauh lebih luas. Sementara itu, studi Kurekin et al. (2019) mengenai pemantauan operasional aktivitas penangkapan ikan ilegal di Ghana memberikan perspektif aplikatif yang sangat relevan, karena secara eksplisit mengombinasikan data AIS dengan citra satelit *observasi* bumi untuk mengidentifikasi kapal-kapal yang mematikan transpondernya guna menghindari deteksi sebuah praktik umum dalam aktivitas *IUU fishing*. Studi ini menjembatani tema AIS dengan tema *remote sensing* yang telah dibahas sebelumnya, sekaligus menunjukkan bahwa keterbatasan AIS dalam mendeteksi "kapal gelap" (*dark vessel*) hanya dapat diatasi secara efektif melalui kombinasi dengan sumber data independen seperti citra satelit radar.

Secara kolektif, keempat studi tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai AIS telah berkembang dari fokus teknis deteksi anomali tunggal menuju pendekatan yang semakin terintegrasi dan aplikatif. Kelebihan yang menonjol dari korpus literatur ini adalah kekayaan metodologis, mulai dari pendekatan probabilistik, fusi data multimodal, hingga tinjauan komprehensif berbasis machine learning. Namun demikian, kelemahan yang patut dicatat adalah bahwa mayoritas studi kecuali Kurekin et al. (2019) dikembangkan dan diuji pada konteks geografis di luar Asia Tenggara, sehingga karakteristik unik lalu lintas maritim di perairan Indonesia, seperti kepadatan kapal

nelayan tradisional berskala kecil yang seringkali tidak dilengkapi transponder AIS sama sekali, belum banyak menjadi fokus kajian. Kondisi ini menjadi celah penting yang perlu diperhatikan dalam pengembangan sistem MDA berbasis AIS di Indonesia, karena efektivitas deteksi anomali dan fusi data akan sangat bergantung pada karakteristik lalu lintas maritim lokal yang berbeda signifikan dari perairan Eropa atau Tiongkok yang menjadi lokasi pengujian mayoritas studi tersebut.

Efektivitas pemanfaatan AIS untuk keamanan maritim sangat bergantung pada sejauh mana data tersebut dikombinasikan dengan sumber data dan metode analitik lain. AIS sebagai sumber data tunggal memiliki keterbatasan mendasar, khususnya terkait kerentanannya terhadap manipulasi atau penonaktifan oleh pihak yang tidak ingin terdeteksi, sehingga sintesis dari keempat studi ini mengarah pada satu kesimpulan penting: penguatan *Maritime Domain Awareness* memerlukan pendekatan multi-sumber data yang menggabungkan AIS, remote sensing, dan kecerdasan buatan secara terintegrasi.

Kecerdasan buatan merupakan tema dengan representasi literatur paling padat dalam sintesis ini, mencakup enam studi yang secara spesifik berfokus pada pengembangan arsitektur *deep learning* untuk deteksi kapal berbasis citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR), yaitu Jiang et al. (2021), Wei et al. (2020), Xu et al. (2022), Zhang, Zhang, Shi, dan Wei (2019), Zhang, Zhang, dan Ke (2021), serta Zhang, Wu, Xu, Wang, dan Sun (2019), yang kemudian dilengkapi oleh gagasan konseptual Li dan Ning (2023) mengenai Autonomous GIS. Kepadatan literatur pada subdomain deteksi kapal SAR ini mencerminkan bahwa citra SAR yang memiliki keunggulan mampu beroperasi pada kondisi cuaca buruk dan malam hari, berbeda dengan citra optik telah menjadi sumber data primadona dalam riset deteksi kapal berbasis kecerdasan buatan.

Zhang, Wu, Xu, Wang, dan Sun (2019) mengembangkan pendekatan berbasis *Region-based Convolutional Neural Network* (R-CNN) untuk deteksi kapal dari citra penginderaan jauh beresolusi tinggi, yang pada masanya merepresentasikan penerapan awal arsitektur *deep learning* two-stage detector pada domain ini. Perkembangan selanjutnya ditunjukkan oleh Zhang, Zhang, Shi, dan Wei (2019), yang mengajukan arsitektur *depthwise separable convolutional neural network* guna mempercepat proses deteksi kapal pada citra SAR berkecepatan tinggi, dengan penekanan pada efisiensi komputasi tanpa mengorbankan akurasi secara signifikan. Perbedaan mendasar antara kedua studi ini terletak pada orientasi optimasinya R-CNN pada studi pertama lebih mengutamakan akurasi deteksi melalui mekanisme region proposal yang komprehensif, sementara *depthwise separable convolution* pada studi kedua mengutamakan efisiensi komputasi dan kecepatan inferensi, sebuah *trade-off* klasik dalam pengembangan model *deep learning* untuk aplikasi *real-time*.

Perkembangan berikutnya semakin menegaskan tren menuju model yang ringan dan efisien, sebagaimana ditunjukkan oleh Jiang et al. (2021) dengan algoritma deteksi kapal ringan berbasis YOLO-v4 untuk citra SAR tiga kanal RGB, serta Xu et al. (2022) dengan Lite-YOLOv5 yang secara eksplisit dirancang untuk deteksi kapal on-board pada citra Sentinel-1 berskala besar. Kedua studi ini memiliki kesamaan mendasar dalam hal penggunaan keluarga arsitektur YOLO (*You Only Look Once*) sebagai basis pengembangan, yang dikenal unggul dalam kecepatan deteksi *single-stage* dibandingkan pendekatan *two-stage* seperti R-CNN. Namun, terdapat perbedaan penting dalam konteks aplikasi: Jiang et al. (2021) lebih menekankan pada modifikasi arsitektur untuk menangani karakteristik citra tiga kanal, sedangkan Xu et al. (2022) secara spesifik mengoptimalkan model agar dapat dijalankan langsung pada perangkat *on-board* satelit,

sebuah pertimbangan praktis yang sangat relevan mengingat keterbatasan daya komputasi dan *bandwidth* komunikasi pada platform satelit.

Sementara itu, Wei et al. (2020) memberikan kontribusi yang berbeda sifatnya, yaitu penyediaan dataset HRSID (*High-Resolution SAR Images Dataset*) yang dirancang khusus untuk mendukung tugas deteksi dan segmentasi instance kapal. Kontribusi ini bersifat fundamental karena menyediakan basis data standar yang memungkinkan berbagai studi termasuk studi-studi lain dalam sintesis ini untuk melakukan *benchmarking* model secara konsisten dan dapat dibandingkan. Adapun Zhang, Zhang, dan Ke (2021) mengajukan *Quad Feature Pyramid Network (Quad-FPN)*, sebuah arsitektur yang dirancang untuk menangani tantangan deteksi kapal multi-skala pada citra SAR, di mana ukuran kapal yang bervariasi secara signifikan dari kapal nelayan kecil hingga kapal kargo besar seringkali menjadi sumber kesalahan deteksi pada arsitektur konvensional.

Apabila keenam studi tersebut disintesis secara kolektif, tampak sebuah pola perkembangan yang jelas dalam riset deteksi kapal berbasis AI: pergeseran dari akurasi menuju efisiensi, dari model generik menuju model yang dioptimalkan untuk kondisi operasional spesifik (seperti pemrosesan *on-board*), dan dari fokus tunggal pada arsitektur model menuju perhatian yang lebih besar terhadap ketersediaan dataset standar. Kelebihan kolektif dari korpus literatur ini adalah kematangan metodologisnya yang tinggi, dengan berbagai arsitektur yang telah diuji dan dibandingkan secara ekstensif pada dataset *benchmark* seperti HRSID maupun citra Sentinel-1. Akan tetapi, kekurangan yang cukup mencolok adalah bahwa sebagian besar studi berfokus pada optimasi teknis model tanpa banyak mengaitkan temuan tersebut dengan kerangka aplikasi keamanan maritim yang lebih luas, seperti bagaimana hasil deteksi kapal tersebut diintegrasikan ke dalam sistem pengambilan keputusan operasional bagi otoritas maritim. Di sinilah relevansi gagasan *Autonomous GIS* dari Li dan Ning (2023) menjadi penting, karena menawarkan kerangka konseptual mengenai bagaimana output deteksi berbasis AI seperti yang dihasilkan oleh keenam model tersebut dapat diintegrasikan ke dalam sistem GIS yang lebih besar dan mampu melakukan penalaran spasial secara otonom, bukan sekadar menghasilkan bounding box deteksi kapal yang berdiri sendiri.

Dalam konteks Indonesia, sintesis ini memiliki implikasi praktis yang signifikan. Karakteristik perairan Indonesia yang seringkali diselimuti awan tebal terutama pada musim penghujan menjadikan citra SAR sebagai sumber data yang jauh lebih andal dibandingkan citra optik untuk pemantauan berkelanjutan. Namun demikian, model-model deteksi kapal yang dikembangkan dalam studi-studi tersebut umumnya dilatih dan diuji pada dataset dari perairan Tiongkok atau kawasan lain yang karakteristik lalu lintas kapalnya berbeda signifikan dari perairan Indonesia, khususnya dalam hal dominasi kapal nelayan tradisional berukuran kecil yang secara *visual* maupun radar memiliki tanda tangan (*signature*) yang berbeda dari kapal kargo atau tanker berukuran besar yang menjadi fokus mayoritas dataset benchmark yang ada.

Big data dalam sintesis ini direpresentasikan oleh dua studi utama, yaitu Yang et al. (2017) yang membahas big data dan cloud computing secara luas dalam konteks geospasial, serta Jahanbakht et al. (2020) yang secara lebih spesifik mengkaji big data pada domain Internet of Underwater Things (IoUT). Yang et al. (2017) mengajukan argumen bahwa konvergensi antara *big data* dan *cloud computing* membuka peluang inovasi yang signifikan bagi ilmu geospasial, namun secara bersamaan juga menghadirkan tantangan baru terkait keamanan data, privasi, serta kebutuhan akan arsitektur komputasi terdistribusi yang mampu menangani volume, kecepatan, dan

variasi data spasial dalam skala masif karakteristik yang lazim dikenal sebagai "3V" dalam *literatur big data*.

Sementara itu, Jahanbakht et al. (2020) memberikan perspektif yang jauh lebih spesifik dan aplikatif pada domain kelautan, dengan mengkaji secara komprehensif tantangan analitik big data dalam ekosistem *Internet of Underwater Things* sebuah jaringan sensor bawah laut yang menghasilkan volume data lingkungan kelautan dalam skala besar dan berkelanjutan. Studi ini mengidentifikasi bahwa tantangan big data pada konteks bawah laut memiliki karakteristik unik dibandingkan big data pada domain daratan, terutama terkait keterbatasan bandwidth komunikasi bawah laut, konsumsi energi sensor, dan kompleksitas propagasi sinyal akustik yang digunakan sebagai media transmisi data pada lingkungan bawah laut.

Perbandingan antara kedua studi ini menunjukkan adanya hubungan yang bersifat umum-khusus: Yang et al. (2017) memberikan kerangka konseptual besar mengenai big data geospasial secara umum, sementara Jahanbakht et al. (2020) menerapkan dan memperdalam kerangka tersebut pada konteks spesifik lingkungan bawah laut yang memiliki tantangan teknis tersendiri. Persamaan mendasar keduanya terletak pada pengakuan bahwa volume data yang terus meningkat memerlukan infrastruktur komputasi yang lebih canggih daripada sistem basis data konvensional, serta bahwa nilai *big data* hanya dapat direalisasikan apabila diimbangi dengan kapasitas analitik yang memadai. Namun demikian, terdapat perbedaan signifikan dalam hal cakupan kajian: Yang et al. (2017) mencakup spektrum aplikasi geospasial yang luas, sedangkan Jahanbakht et al. (2020) fokus secara mendalam pada satu domain aplikasi yang sangat spesifik, sehingga memberikan kedalaman analisis teknis yang lebih tinggi namun dengan cakupan generalisasi yang lebih sempit.

Kelebihan dari kedua studi ini secara kolektif adalah kemampuannya menjembatani perspektif makro dan mikro mengenai big data maritim, memberikan pemahaman yang komprehensif mulai dari tantangan konseptual hingga persoalan teknis operasional. Akan tetapi, kekurangan yang dapat diidentifikasi adalah minimnya pembahasan eksplisit mengenai bagaimana big data maritim tersebut baik dari sensor bawah laut maupun dari sumber permukaan seperti AIS dan citra satelit sebagaimana dibahas pada tema-tema sebelumnya dapat diintegrasikan ke dalam satu platform analitik terpadu. Kedua studi cenderung membahas big data secara terisolasi dari domain AIS dan *remote sensing*, padahal secara praktis ketiga sumber data tersebut idealnya dikelola dalam satu ekosistem big data yang sama untuk mendukung Maritime Domain Awareness secara menyeluruh.

Relevansi tema ini bagi konteks Indonesia sangat signifikan mengingat kompleksitas dan volume data maritim yang harus dikelola oleh berbagai instansi, mulai dari data AIS, citra satelit, data batimetri, hingga data lingkungan dari sensor oseanografi. Tantangan yang diidentifikasi oleh Jahanbakht et al. (2020) mengenai keterbatasan infrastruktur komunikasi bawah laut juga sangat relevan bagi Indonesia, mengingat potensi pengembangan jaringan sensor bawah laut untuk pemantauan lingkungan dan keamanan maritim di perairan Indonesia masih menghadapi kendala infrastruktur yang signifikan, termasuk keterbatasan konektivitas di wilayah-wilayah perairan terpencil.

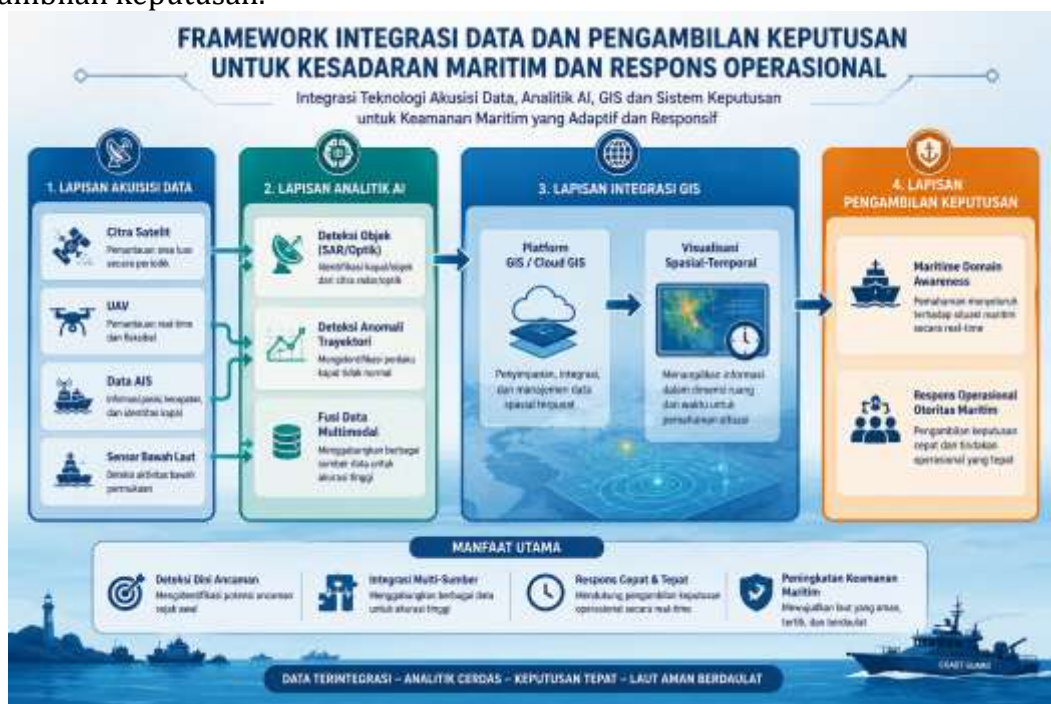
Berbeda dari pembahasan sebelumnya yang masing-masing berfokus pada satu klaster teknologi tertentu, *Maritime Domain Awareness* (MDA) berfungsi sebagai kerangka integratif yang menyatukan kontribusi GIS, remote sensing, AIS, dan kecerdasan buatan. Tidak terdapat studi tunggal dalam korpus literatur ini yang secara eksplisit menggunakan istilah "*Maritime Domain Awareness*" sebagai fokus utamanya, namun konsep ini secara implisit menjadi benang merah yang menghubungkan berbagai

kontribusi teknis yang telah diuraikan sebelumnya. Kurekin et al. (2019), misalnya, secara operasional mendemonstrasikan bagaimana MDA dibangun melalui integrasi citra satelit dan data AIS untuk memantau aktivitas *illegal fishing*, sementara Yang, Liu, et al. (2024) memetakan bagaimana *machine learning* berbasis data AIS berkontribusi terhadap pemahaman situasional maritim secara lebih luas.

Jika seluruh temuan disintesiskan melalui lensa MDA, tampak sebuah pola arsitektur yang koheren GIS berfungsi sebagai platform integrasi dan visualisasi data spasial; remote sensing dan AIS berfungsi sebagai sumber data primer mengenai kondisi dan aktivitas di *domain maritim*; sedangkan kecerdasan buatan berfungsi sebagai lapisan analitik yang mengubah data mentah tersebut menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti (*actionable intelligence*). Guo et al. (2023) dan Nguyen et al. (2019) secara khusus menunjukkan bagaimana data AIS yang telah diproses melalui algoritma deteksi anomali dan fusi trajektori dapat menghasilkan pemahaman situasional yang jauh lebih akurat dibandingkan pemantauan manual konvensional, sebuah karakteristik inti dari MDA yang efektif.

Namun demikian, sintesis kritis terhadap literatur ini juga mengungkap kesenjangan penting: sebagian besar studi yang telah dibahas cenderung berfokus pada optimasi teknis komponen individual baik itu akurasi model deteksi kapal, efisiensi algoritma anomali AIS, maupun skalabilitas infrastruktur data tanpa banyak membahas bagaimana komponen-komponen tersebut diintegrasikan ke dalam satu sistem pengambilan keputusan yang koheren bagi otoritas maritim. Dengan kata lain, literatur yang ada kaya akan kontribusi pada level subsistem, tetapi relatif miskin pada level integrasi sistem secara menyeluruh.

Untuk memvisualisasikan bagaimana berbagai komponen teknologi yang telah dibahas dapat disusun ke dalam satu kerangka MDA yang koheren, berikut disajikan diagram konseptual framework GIS untuk keamanan maritim. Diagram ini disusun berdasarkan hasil sintesis penulis terhadap pola integrasi yang teridentifikasi di seluruh literatur yang dikaji, dan bertujuan menggambarkan alur data dari akuisisi hingga pengambilan keputusan.



Gambar 2. Framework GIS untuk Maritime Security
(Sumber: diolah oleh penulis dan dilustrasikan AI, 2026)

Diagram tersebut menggambarkan bahwa *Maritime Domain Awareness* bukanlah produk dari satu teknologi tunggal, melainkan hasil akhir dari rangkaian proses yang melibatkan empat lapisan berbeda akuisisi, analitik, integrasi, dan pengambilan keputusan yang masing-masing telah dibahas secara mendalam pada tema-tema sebelumnya namun jarang disintesis secara eksplisit dalam satu kerangka utuh oleh literatur yang ada. Implikasinya bagi konteks Indonesia adalah bahwa pengembangan sistem MDA yang efektif tidak dapat hanya mengandalkan penguatan pada satu lapisan saja, misalnya hanya berinvestasi pada teknologi deteksi kapal berbasis AI tanpa memperkuat lapisan integrasi data dan pengambilan keputusan operasional, karena efektivitas MDA sesungguhnya ditentukan oleh kelancaran alur informasi di antara keempat lapisan tersebut secara keseluruhan.

Digital twin dalam sintesis ini direpresentasikan oleh studi Rathore et al. (2021), yang melakukan tinjauan literatur sistematis mengenai peran kecerdasan buatan, machine learning, dan big data dalam pengembangan *digital twin*. Studi ini mendefinisikan digital twin sebagai representasi digital dinamis dari suatu entitas fisik yang diperbarui secara berkelanjutan melalui aliran data real-time, sehingga memungkinkan simulasi, prediksi, dan optimasi terhadap sistem fisik yang direpresentasikannya. Rathore et al. (2021) mengidentifikasi bahwa AI dan machine learning berperan krusial dalam digital twin, khususnya untuk mengolah data sensor dalam volume besar menjadi model prediktif yang dapat digunakan untuk mengantisipasi kondisi atau kegagalan sistem sebelum benar-benar terjadi.

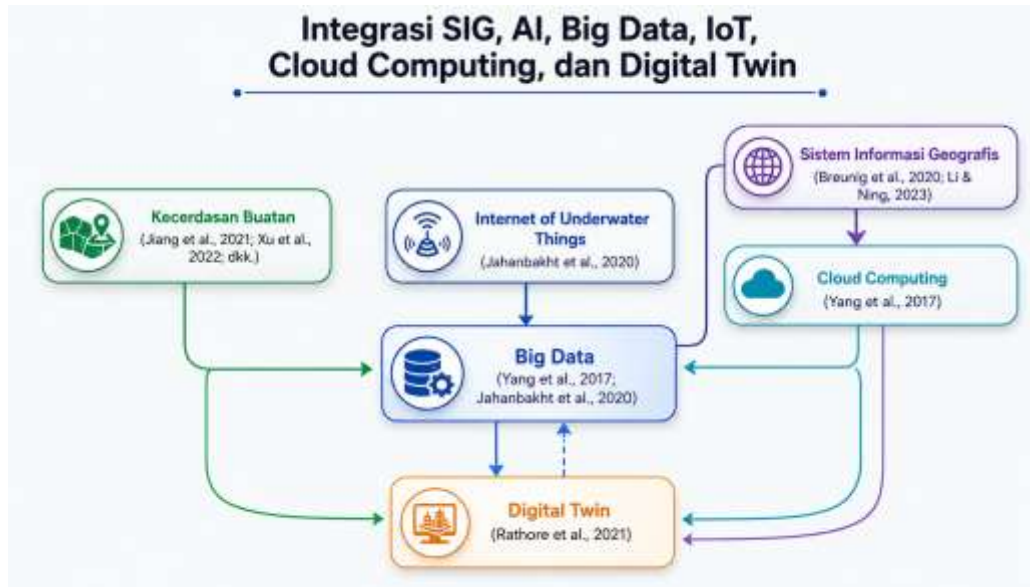
Apabila dikaitkan dengan tema-tema sebelumnya, *digital twin* pada dasarnya merepresentasikan level integrasi teknologi yang lebih tinggi dibandingkan MDA konvensional. Jika MDA berfokus pada pemahaman situasional terhadap kondisi aktual domain maritim, digital twin melangkah lebih jauh dengan menciptakan replika virtual yang memungkinkan simulasi skenario hipotetis, seperti prediksi pola pergerakan kapal pada kondisi cuaca tertentu atau simulasi dampak dari kebijakan pengawasan yang berbeda, sebelum diterapkan pada kondisi nyata. Rathore et al. (2021) secara eksplisit mengidentifikasi bahwa tantangan utama pengembangan *digital twin* bukan hanya pada aspek teknis pemodelan, tetapi juga pada aspek integrasi data lintas sistem, sebuah tantangan yang konsisten dengan persoalan interoperabilitas yang telah diidentifikasi Breunig et al. (2020)

Kelebihan konsep digital twin sebagaimana diuraikan Rathore et al. (2021) adalah potensinya yang besar untuk mendukung pengambilan keputusan prediktif, bukan sekadar reaktif, dalam konteks pengelolaan sistem maritim yang kompleks. Namun demikian, kekurangan yang perlu dicermati adalah bahwa kajian tersebut bersifat umum dan lintas-sektor, tanpa secara spesifik membahas tantangan unik penerapan *digital twin* pada domain keamanan maritim, seperti bagaimana merepresentasikan secara *virtual* pola lalu lintas kapal di perairan yang luas dan dinamis, atau bagaimana mengintegrasikan data dari berbagai sumber yang telah dibahas pada tema-tema sebelumnya remote sensing, AIS, dan *big data* kelautan ke dalam satu model *digital twin* yang koheren untuk domain maritim.

Relevansi digital twin bagi konteks Indonesia terletak pada potensinya untuk mendukung perencanaan dan simulasi kebijakan keamanan maritim, misalnya dalam mensimulasikan efektivitas penempatan aset pengawasan pada berbagai skenario ancaman sebelum benar-benar dialokasikan secara fisik, sehingga dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya yang terbatas. Namun demikian, penerapan digital twin pada skala nasional memerlukan prasyarat infrastruktur data yang matang, sehingga penerapan konsep ini di Indonesia kemungkinan besar masih memerlukan tahapan

pengembangan bertahap yang dimulai dari penguatan infrastruktur data dasar terlebih dahulu.

Untuk menggambarkan bagaimana digital twin dapat memposisikan diri sebagai lapisan integratif tertinggi yang menyatukan seluruh teknologi yang telah dibahas GIS, AI, *big data*, IoT, dan cloud computing berikut disajikan diagram konseptual integrasi teknologi. Diagram ini bertujuan menunjukkan bagaimana kelima domain teknologi tersebut saling berkelindan dalam membentuk ekosistem *digital twin* maritim yang komprehensif.



Gambar 3. Integrasi SIG, AI, Big Data, IoT, *Cloud Computing*, dan *Digital Twin*
(Sumber: diolah oleh penulis dan diilustrasikan oleh AI, 2026)

Diagram tersebut menunjukkan bahwa *digital twin* sesungguhnya berfungsi sebagai titik konvergensi akhir dari seluruh teknologi yang telah dibahas sepanjang sintesis ini, di mana IoT dan cloud computing menyediakan infrastruktur akuisisi dan komputasi, big data menyediakan kapasitas pengelolaan volume data, AI menyediakan kapasitas analitik dan prediktif, sedangkan GIS menyediakan kerangka representasi spasial. Konvergensi kelima domain ini pada gilirannya membentuk digital twin sebagai representasi virtual yang komprehensif terhadap domain maritim. Pola konvergensi ini menegaskan kembali bahwa penguatan MDA dan digital twin maritim memerlukan investasi yang seimbang pada seluruh lapisan teknologi, bukan hanya pada satu domain tertentu.

Sintesis menyeluruh terhadap tema sebelumnya mengungkap beberapa celah penelitian (*research gap*) yang konsisten muncul di berbagai domain teknologi yang dikaji. Pertama, sebagaimana telah diidentifikasi terdapat kesenjangan yang berulang mengenai interoperabilitas dan integrasi data lintas system mulai dari persoalan interoperabilitas geospasial (Breunig et al., 2020), tantangan *integrasi big data* multisumber (Yang et al., 2017; Jahanbakht et al., 2020), hingga tantangan integrasi data lintas sistem pada digital twin (Rathore et al., 2021). Kedua, mayoritas model deteksi dan analisis berbasis AI dikembangkan dan diuji pada konteks geografis di luar Asia Tenggara, sehingga validitas dan generalisasinya terhadap karakteristik lalu lintas maritim Indonesia yang didominasi kapal nelayan tradisional berskala kecil masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Ketiga, terdapat kesenjangan signifikan antara kekayaan literatur pada level subsistem teknis dengan kelangkaan kajian pada level integrasi sistem secara menyeluruh dan keamanan siber sistem terintegrasi tersebut.

Celah penelitian yang teridentifikasi tidak berdiri secara acak pada masing-masing tema, melainkan membentuk pola yang konsisten, yaitu kesenjangan antara kematangan

riset pada level teknis-komponen dengan keterbatasan riset pada level integrasi sistemik dan kontekstualisasi geografis-sosial tertentu, khususnya bagi negara kepulauan seperti Indonesia. Pola ini mengindikasikan bahwa arah penelitian masa depan yang paling produktif bukanlah sekadar pengembangan lebih lanjut terhadap masing-masing komponen teknis secara terisah, melainkan penelitian yang secara eksplisit berfokus pada integrasi lintas-domain dan validasi kontekstual pada wilayah geografis yang selama ini kurang terwakili dalam literatur.

Berdasarkan sintesis tersebut, dapat dirumuskan beberapa arah penelitian masa depan yang relevan. Pertama, penelitian mengenai pengembangan model deteksi dan analisis berbasis AI yang secara spesifik dilatih dan divalidasi pada data maritim Asia Tenggara, termasuk karakteristik unik kapal nelayan tradisional Indonesia. Kedua, penelitian mengenai arsitektur integrasi data yang menyatukan AIS, remote sensing, dan big data sensor bawah laut ke dalam satu platform MDA yang koheren, sebagaimana diisyaratkan namun belum sepenuhnya dijawab oleh literatur yang dikaji. Ketiga, penelitian mengenai penerapan digital twin pada domain keamanan maritim secara spesifik, melampaui aplikasi digital twin generik yang telah dibahas Rathore et al. (2021). Keempat, penelitian mengenai kerangka keamanan siber yang secara khusus dirancang untuk ekosistem MDA yang semakin terhubung dan terotomatisasi, memperluas kontribusi awal Kumar et al. (2023) ke konteks yang lebih luas.

Sebagai penutup bagian sintesis tematik, berikut disajikan model konseptual sistem pendukung keputusan yang mengintegrasikan seluruh temuan dari tema yang telah dibahas, sebagai gambaran ringkas mengenai bagaimana arsitektur ideal MDA berbasis GIS, AI, dan *big data* dapat disusun untuk mendukung pengambilan keputusan operasional keamanan maritim.



Gambar 4. Model Konseptual Sistem Pendukung Keputusan Keamanan Maritim
(Sumber: Diolah oleh penulis dan diilustrasikan oleh AI, 2026)

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan memetakan, mensintesis, dan mengkritisi literatur mengenai integrasi Sistem Informasi Geografis, penginderaan jauh, AIS, kecerdasan buatan, *big data*, *cloud GIS*, dan *digital twin* dalam mendukung penguatan *Maritime Domain Awareness* (MDA), dengan pendekatan *Systematic Literature Review* berbasis PRISMA 2020. Berdasarkan sintesis terhadap 19 artikel yang disertakan, disimpulkan bahwa perkembangan literatur pada domain ini menunjukkan pola konvergensi teknologi yang semakin erat, di mana GIS telah bertransformasi dari alat pemetaan statis menjadi platform integrasi cerdas yang menyatukan data dari citra satelit, UAV, AIS, dan sensor bawah laut melalui lapisan analitik AI. Meskipun literatur pada level komponen teknis, khususnya deteksi kapal berbasis *deep learning* dan deteksi anomali AIS, telah mencapai kematangan metodologis yang tinggi, kesenjangan yang konsisten ditemukan pada level integrasi sistemik lintas-domain serta minimnya validasi kontekstual pada wilayah geografis dengan karakteristik maritim seperti Indonesia.

Implikasi teoritis penelitian ini terletak pada kontribusinya dalam membangun kerangka sintesis lintas-tema yang menghubungkan sepuluh domain teknologi yang selama ini cenderung dikaji secara terpisah, sehingga memperkaya pemahaman konseptual bahwa MDA sesungguhnya merupakan hasil konvergensi multi-lapisan dari akuisisi, analitik, integrasi, hingga pengambilan keputusan. Kerangka konseptual ini menawarkan lensa analitis baru bagi penelitian selanjutnya untuk memposisikan kontribusi teknisnya dalam konteks sistem MDA yang lebih luas. Adapun implikasi praktisnya, penelitian ini menegaskan bahwa penguatan MDA nasional Indonesia memerlukan investasi yang seimbang pada seluruh lapisan teknologi, bukan hanya pada akuisisi data atau model deteksi AI semata, tetapi juga pada infrastruktur integrasi data dan platform *cloud GIS* yang memadai.

Kontribusi teoritis spesifik dari penelitian ini adalah tersusunnya peta research gap yang sistematis, yang mengidentifikasi bahwa kesenjangan literatur tidak bersifat acak melainkan membentuk pola berulang berupa disparitas antara kematangan riset teknis-komponen dengan keterbatasan riset integrasi sistemik dan validasi kontekstual geografis. Sementara itu, kontribusi praktisnya berupa model konseptual sistem pendukung keputusan keamanan maritim yang dapat menjadi rujukan awal bagi perumusan arsitektur MDA nasional Indonesia, meskipun implementasi konkret dari model tersebut masih memerlukan penelitian teknis lanjutan pada masing-masing komponennya.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diakui, yaitu ketergantungan penuh pada 19 studi yang disertakan tanpa pengujian empiris langsung pada konteks Indonesia, distribusi literatur yang tidak merata antartema dengan konsentrasi tinggi pada deteksi kapal berbasis SAR namun representasi tipis pada digital twin dan keamanan siber, serta potensi terlewatnya studi relevan di luar basis data Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan MDPI. Berdasarkan hal tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi empiris model-model deteksi AI pada data maritim Indonesia, mengembangkan arsitektur big data multisumber yang dirancang khusus untuk konteks kelembagaan nasional, memperluas kajian digital twin dan keamanan siber di domain maritim, serta memutakhirkan sintesis secara berkala mengingat pesatnya perkembangan teknologi. Dengan demikian, sintesis ini diharapkan menjadi fondasi konseptual yang bermanfaat, baik bagi pengembangan riset akademik lanjutan maupun bagi perumusan kebijakan penguatan *Maritime Domain Awareness* di Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia.

DAFTAR PUSTAKA

- Breunig, M., Bradley, P., Jahn, M., Kuper, P., Mazroob, N., Rösch, N., Al-Doori, M., Stefanakis, E., & Jadidi, M. (2020). Geospatial Data Management Research: Progress and Future Directions. **ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 9*, 95. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020095>
- Emilien, A.-V., Thomas, C., & Thomas, H. (2021). UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. **Science of Remote Sensing**. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100019>
- Guo, Y., Liu, R. W., Qu, J., Lu, Y., Zhu, F., & Lv, Y. (2023). Asynchronous Trajectory Matching-Based Multimodal Maritime Data Fusion for Vessel Traffic Surveillance in Inland Waterways. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24*, 12779-12792. <https://doi.org/10.1109/tits.2023.3285415>
- Jahanbakht, M., Xiang, W., Hanzo, L., & Azghadi, M. R. (2020). Internet of Underwater Things and Big Marine Data Analytics—A Comprehensive Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23*, 904-956. <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3053118>
- Janga, B., Asamani, G., Sun, Z., & Cristea, N. (2023). A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences. **Remote. Sens.*, 15*, 4112. <https://doi.org/10.3390/rs15164112>
- Jiang, J., Fu, X., Qin, R., Wang, X., & Z. (2021). High-Speed Lightweight Ship Detection Algorithm Based on YOLO-V4 for Three-Channels RGB SAR Image. **Remote. Sens.*, 13*, 1909. <https://doi.org/10.3390/rs13101909>
- Kumar, P., Gupta, G. P., Tripathi, R., Garg, S., & Hassan, M. M. (2023). DLTIF: Deep Learning-Driven Cyber Threat Intelligence Modeling and Identification Framework in IoT-Enabled Maritime Transportation Systems. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24*, 2472-2481. <https://doi.org/10.1109/tits.2021.3122368>
- Kurekin, A., Loveday, B., Clements, D. O., Quartly, G., Miller, P. I., Wiafe, G., & Agyekum, K. (2019). Operational Monitoring of Illegal Fishing in Ghana through Exploitation of Satellite Earth Observation and AIS Data. **Remote. Sens.*, 11*, 293. <https://doi.org/10.3390/rs11030293>
- Li, Z., & Ning, H. (2023). Autonomous GIS: the next-generation AI-powered GIS. **International Journal of Digital Earth*, 16*, 4668 - 4686. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2278895>
- Nguyen, D., Vadaine, R., Hajduch, G., Garelo, R., & Fablet, R. (2019). GeoTrackNet—A Maritime Anomaly Detector Using Probabilistic Neural Network Representation of AIS Tracks and A Contrario Detection. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23*, 5655-5667. <https://doi.org/10.1109/tits.2021.3055614>
- Quamar, M. I., Al-Ramadan, B., Khan, K. A., Shafiullah, M., & El-Ferik, S. (2023). Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology - A Review. **Remote. Sens.*, 15*, 5039. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>
- Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E., & Bakiras, S. (2021). The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities. **IEEE Access*, 9*, 32030-32052. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3060863>

- Wei, S., Zeng, X., Qu, Q., Wang, M., Su, H., & Shi, J. (2020). HRSID: A High-Resolution SAR Images Dataset for Ship Detection and Instance Segmentation. *IEEE Access, 8*, 120234-120254. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3005861>
- Xu, X., Zhang, X., & Zhang, T. (2022). Lite-YOLOv5: A Lightweight Deep Learning Detector for On-Board Ship Detection in Large-Scene Sentinel-1 SAR Images. *Remote. Sens., 14*, 1018. <https://doi.org/10.3390/rs14041018>
- Yang, Y., Liu, Y., Li, G., Zhang, Z., & Liu, Y. (2024). Harnessing the power of Machine learning for AIS Data-Driven maritime Research: A comprehensive review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103426>
- Yang, C., Huang, Q., Li, Z., Liu, K., & Hu, F. (2017). Big Data and cloud computing: innovation opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth, 10*, 13 - 53. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1239771>
- Yang, Z., Yu, X., Dedman, S., Rosso, M., Zhu, J., Yang, J., Xia, Y., Tian, Y., Zhang, G., & Wang, J. (2022). UAV remote sensing applications in marine monitoring: Knowledge visualization and review.. *The Science of the total environment*, 155939 . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155939>
- Zhang, T., Zhang, X., Shi, J., & Wei, S. (2019). Depthwise Separable Convolution Neural Network for High-Speed SAR Ship Detection. *Remote. Sens., 11*, 2483. <https://doi.org/10.3390/rs11212483>
- Zhang, T., Zhang, X., & Ke, X. (2021). Quad-FPN: A Novel Quad Feature Pyramid Network for SAR Ship Detection. *Remote. Sens., 13*, 2771. <https://doi.org/10.3390/rs13142771>
- Zhang, S., Wu, R., Xu, K., Wang, J., & Sun, W. (2019). R-CNN-Based Ship Detection from High Resolution Remote Sensing Imagery. *Remote. Sens., 11*, 631. <https://doi.org/10.3390/rs11060631>