

Analisis Peran Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai Decision Support System (DSS) dalam Mendukung Keamanan Maritim Nasional Indonesia

Adela Apriuli Maharani¹, Muhammad Risahdi², Ceppi Hilmansyah³, Nefra Firdaus⁴,
Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶, Lukman Yudho Prakoso⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Indonesia

adela.maharani@km.idu.ac.id¹, muhammad.rishadi@idu.ac.id², ceppi.hilmansyah@idu.ac.id³,
nefra.firdaus@idu.ac.id⁴, harri.dolli@idu.ac.id⁵, yuniar@idu.ac.id⁶, lukman.prakoso@idu.ac.id⁷

*Corresponding Author

Article Info

Article history:

Received : 13 Juli, 2026

Revised : 14 Juli, 2026

Accepted : 14 Juli, 2026

Kata Kunci:

Autonomous GIS;
Decision Support System;
Keamanan Maritim;
Maritime Domain Awareness;
Sistem Informasi Geografis.

Abstrak

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia menghadapi tantangan besar dalam mengawasi wilayah lautnya yang luas, di tengah ancaman multidimensi berupa *illegal fishing*, *smuggling*, *human trafficking*, *piracy*, dan *marine pollution*. Kesadaran situasional yang komprehensif terhadap domain maritim, yang dikenal sebagai *Maritime Domain Awareness* (MDA), menjadi prasyarat penting bagi otoritas maritim untuk merespons ancaman tersebut secara proaktif. Penelitian ini bertujuan menganalisis peran Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai *Decision Support System* (DSS) dalam mendukung keamanan maritim nasional Indonesia. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif melalui studi literatur, analisis isi, sintesis, dan analisis komparatif terhadap literatur ilmiah internasional yang membahas perkembangan SIG, teknologi sensor maritim, dan sistem pendukung keputusan berbasis kecerdasan buatan. Hasil kajian menunjukkan bahwa SIG telah bertransformasi dari alat visualisasi pasif menuju Autonomous GIS yang mampu melakukan penalaran spasial secara mandiri, sebagaimana tercermin pada perkembangan GeoGPT dan GIS *Copilot*. Integrasi data multisumber seperti AIS, radar, citra satelit, UAV, dan *Marine IoT* dengan melalui mekanisme verifikasi silang terbukti menjadi kunci efektivitas deteksi *dark vessel*, prediksi perilaku kapal mencurigakan, dan pemantauan pencemaran laut. Kajian ini juga merumuskan *roadmap* pengembangan SIG nasional yang menekankan pentingnya interoperabilitas data antarlembaga (Bakamla, TNI AL, BIG, BRIN, dan lainnya) sebagai fondasi sebelum adopsi teknologi otonom yang lebih kompleks. Penelitian ini berkontribusi pada pemetaan konseptual keterkaitan SIG-DSS-MDA yang masih terbatas dalam literatur nasional, sekaligus menawarkan arah kebijakan bagi penguatan keamanan maritim Indonesia berbasis teknologi geospasial.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai yang membentang sepanjang lebih dari 99.000 kilometer, menempatkan wilayah laut sebagai ruang hidup yang secara geografis jauh lebih dominan

dibandingkan wilayah daratan. Kondisi geografis semacam ini menghadirkan tantangan struktural dalam pengawasan, pengendalian, dan penegakan kedaulatan di wilayah yurisdiksi maritim nasional, mengingat luasnya area yang harus dipantau tidak sebanding dengan kapasitas sumber daya pengawasan konvensional. Karakteristik kepulauan yang tersebar juga menciptakan celah-celah geografis yang rentan dimanfaatkan oleh aktor non-negara maupun individu untuk melakukan aktivitas ilegal lintas batas. Kompleksitas ini semakin meningkat ketika mempertimbangkan posisi strategis Indonesia sebagai penghubung antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik, yang menjadikan perairan nasional sebagai jalur pelayaran internasional dengan intensitas lalu lintas kapal yang tinggi. Situasi geografis dan geostrategis tersebut menuntut adanya sistem pengawasan yang mampu bekerja secara luas, cepat, dan berkelanjutan tanpa bergantung sepenuhnya pada kehadiran fisik aparat di lapangan. Oleh karena itu, kebutuhan terhadap teknologi pendukung pengawasan berbasis data spasial menjadi semakin mendesak seiring dengan meningkatnya kompleksitas ancaman di wilayah laut Indonesia.

Ancaman terhadap keamanan maritim Indonesia bersifat multidimensi dan terus berkembang seiring waktu, mencakup aktivitas penangkapan ikan ilegal (*illegal fishing*), penyelundupan barang dan manusia (*smuggling dan human trafficking*), pembajakan (*piracy*), serta pencemaran lingkungan laut (*marine pollution*). Aktivitas-aktivitas tersebut umumnya melibatkan pola pergerakan kapal yang menyimpang dari jalur normal, manipulasi sinyal identifikasi otomatis, atau bahkan menonaktifkan transponder untuk menghindari deteksi, sebuah fenomena yang dikenal sebagai *dark vessel activity* (Han et al., 2021). Data *Automatic Identification System* (AIS) yang seharusnya menjadi sumber informasi utama pergerakan kapal juga memiliki keterbatasan signifikan, termasuk potensi manipulasi data, kekosongan sinyal, dan inkonsistensi pelaporan yang dapat menyulitkan proses deteksi dini terhadap aktivitas mencurigakan (Emmens et al., 2021). Kompleksitas pola perilaku kapal ini menuntut kemampuan analitik yang mampu mengidentifikasi anomali secara sistematis, bukan sekadar visualisasi posisi kapal secara statis. Tanpa kemampuan analitik semacam ini, otoritas maritim akan kesulitan membedakan antara aktivitas pelayaran normal dan aktivitas yang berpotensi melanggar hukum di tengah volume data yang sangat besar. Kondisi ini menegaskan bahwa keamanan maritim nasional tidak lagi dapat mengandalkan pendekatan pengawasan konvensional, melainkan memerlukan dukungan sistem informasi yang mampu mengolah data secara cerdas dan kontekstual.

Konsep *Maritime Domain Awareness* (MDA) hadir sebagai kerangka kerja yang mengintegrasikan berbagai sumber informasi untuk membangun pemahaman situasional yang komprehensif terhadap seluruh aktivitas di wilayah maritim. MDA tidak hanya berfokus pada deteksi keberadaan kapal, tetapi juga pada pemahaman terhadap pola perilaku, identifikasi anomali, dan prediksi potensi ancaman berdasarkan data historis dan real-time (Thombre et al., 2020). Penelitian mengenai sensor dan kecerdasan buatan untuk kesadaran situasional pada kapal otonom menunjukkan bahwa efektivitas MDA sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam mengintegrasikan berbagai modalitas sensor secara simultan (Thombre et al., 2020). Kajian bibliometrik terhadap sistem pendukung keputusan berbasis kapal (*shipboard decision support systems*) juga mengonfirmasi bahwa perkembangan riset di bidang ini terus meningkat, khususnya dalam konteks pencegahan kecelakaan dan pengambilan keputusan operasional yang lebih akurat (Gil et al., 2020). Pemahaman situasional yang menyeluruh terhadap domain maritim menjadi prasyarat mutlak bagi otoritas untuk dapat merespons ancaman secara proaktif, bukan reaktif. Dengan demikian, MDA berfungsi sebagai jembatan konseptual

yang menghubungkan ketersediaan data mentah dengan kebutuhan pengambilan keputusan strategis di tingkat operasional maupun kebijakan.

Perkembangan Sistem Informasi Geografis (SIG) turut mengalami transformasi signifikan, dari sistem yang semula bersifat statis dan bergantung pada operator manusia menuju sistem yang semakin otonom dan berbasis kecerdasan buatan. Konsep Autonomous GIS yang diperkenalkan oleh (Li & Ning, 2023) menandai pergeseran paradigma penting, di mana SIG tidak lagi sekadar menjadi alat visualisasi dan analisis pasif, melainkan agen cerdas yang mampu melakukan pengambilan keputusan spasial secara mandiri. Pengembangan lebih lanjut berupa kerangka kerja agen GIS otonom untuk pengambilan data geospasial memperkuat arah perkembangan ini, dengan menekankan kemampuan sistem dalam mengambil, memproses, dan menginterpretasikan data spasial tanpa intervensi manusia yang intensif (Ning et al., 2024). Selain itu, kemunculan asisten berbasis kecerdasan buatan seperti GeoGPT yang dirancang untuk memahami dan memproses tugas-tugas geospasial (Zhang et al., 2024), serta GIS *Copilot* yang berfungsi sebagai agen otonom untuk analisis spasial (Akinboyewa et al., 2024), menunjukkan bahwa integrasi antara SIG dan kecerdasan buatan generatif bukan lagi sekadar wacana teoretis, melainkan telah memasuki tahap implementasi praktis. Perkembangan ini membuka peluang besar bagi penerapan SIG dalam konteks keamanan maritim, di mana volume dan kompleksitas data yang harus diproses jauh melampaui kapasitas analisis manual. Namun demikian, tingkat kepercayaan pengguna terhadap sistem berbasis kecerdasan buatan tersebut sangat dipengaruhi oleh keahlian domain penggunaannya, sebagaimana ditunjukkan dalam kajian tentang peran keahlian domain dalam mempercayai dan mengikuti rekomendasi sistem pendukung keputusan yang dapat dijelaskan (*explainable AI*) (Bayer et al., 2021). Aspek kepercayaan dan transparansi ini menjadi pertimbangan krusial ketika SIG diarahkan untuk berfungsi sebagai basis pengambilan keputusan dalam konteks keamanan yang berisiko tinggi.

Sejalan dengan perkembangan SIG, *Decision Support System* (DSS) juga mengalami evolusi yang signifikan seiring integrasi kecerdasan buatan ke dalam arsitekturnya. Kajian mengenai DSS berbasis AI menekankan pentingnya keseimbangan antara akurasi, transparansi, dan kepercayaan pengguna di berbagai sektor, termasuk sektor yang berkaitan dengan keselamatan dan keamanan (Kovari, 2024). Keseimbangan ini menjadi tantangan tersendiri ketika DSS diterapkan pada domain maritim, karena keputusan yang dihasilkan dapat berdampak langsung terhadap keselamatan navigasi, penegakan hukum, dan bahkan keselamatan jiwa manusia. Tinjauan sistematis terhadap literatur AI praktis untuk ilmu kebumihantropika juga menunjukkan tren peningkatan penggunaan kecerdasan buatan dalam pengolahan data penginderaan jauh untuk mendukung berbagai keputusan berbasis lokasi (Janga et al., 2023). Konvergensi antara SIG, DSS, dan kecerdasan buatan ini pada dasarnya membentuk suatu ekosistem teknologi yang saling melengkapi, di mana SIG menyediakan kerangka spasial, DSS menyediakan logika pengambilan keputusan, dan kecerdasan buatan menyediakan kapasitas pemrosesan data berskala besar secara adaptif. Ekosistem inilah yang berpotensi menjadi fondasi teknologi bagi sistem pengawasan maritim generasi baru di Indonesia.

Urgensi integrasi teknologi geospasial dalam konteks keamanan maritim semakin nyata ketika mempertimbangkan ketersediaan berbagai sumber data yang dapat dimanfaatkan, mulai dari data AIS, citra satelit, radar, hingga data yang dihasilkan oleh wahana udara tanpa awak (UAV). Penelitian mengenai akurasi pengukuran real-time kinematics pada UAV menunjukkan bahwa teknologi ini telah mencapai tingkat presisi yang memadai untuk keperluan pemetaan dan pengawasan wilayah pesisir (Ekaso et al., 2020). Demikian pula, tinjauan komprehensif mengenai teknologi drone yang terintegrasi

dengan SIG menegaskan bahwa kombinasi kedua teknologi tersebut mampu memperluas cakupan pengawasan pada area yang sulit dijangkau oleh metode konvensional (Quamar et al., 2023). Ketersediaan data dari sumber-sumber yang beragam ini sesungguhnya menjadi modal besar bagi Indonesia, namun modal tersebut hanya akan bermanfaat apabila terdapat kerangka integrasi yang mampu menyatukan data-data heterogen tersebut ke dalam satu sistem analisis yang koheren. Tanpa kerangka integrasi semacam ini, data yang melimpah justru berpotensi menjadi beban administratif ketimbang aset strategis bagi pengambilan keputusan.

Meskipun literatur internasional telah banyak membahas perkembangan Autonomous GIS, DSS berbasis AI, dan berbagai teknologi sensor untuk pengawasan maritim secara terpisah, kajian yang secara eksplisit mensintesis ketiga domain tersebut dalam konteks kelembagaan dan kebijakan keamanan maritim Indonesia masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian yang tersedia cenderung membahas aspek teknis dari masing-masing teknologi secara terisolasi, seperti performa algoritma deteksi kapal (Patel et al., 2022) atau efektivitas clustering data AIS (Han et al., 2021), tanpa mengaitkannya secara eksplisit dengan kerangka kelembagaan pengambilan keputusan di tingkat nasional. Kesenjangan ini menjadi signifikan mengingat efektivitas suatu sistem teknologi pada akhirnya sangat bergantung pada bagaimana sistem tersebut diintegrasikan ke dalam struktur kelembagaan yang menaunginya. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan menawarkan kebaruan berupa sintesis kritis atas literatur global mengenai SIG, Autonomous GIS, dan DSS, yang kemudian dikontekstualisasikan secara spesifik terhadap kebutuhan dan tantangan keamanan maritim nasional Indonesia. Pendekatan sintesis lintas domain ini diharapkan mampu memberikan kontribusi konseptual yang belum banyak dieksplorasi dalam literatur nasional.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran Sistem Informasi Geografis sebagai *Decision Support System* dalam mendukung keamanan maritim nasional Indonesia melalui kajian literatur yang mendalam dan sistematis. Secara lebih spesifik, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perkembangan teknologi SIG menuju sistem yang otonom dan berbasis kecerdasan buatan, menganalisis pola integrasi data spasial dan nonspasial dalam mendukung *Maritime Domain Awareness*, serta merumuskan rekomendasi pengembangan SIG nasional yang relevan dengan konteks kelembagaan Indonesia. Melalui tujuan-tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baik secara akademik, dalam bentuk pemetaan konseptual keterkaitan SIG-DSS-MDA, maupun secara praktis, dalam bentuk masukan bagi pengembangan kebijakan dan infrastruktur geospasial pertahanan maritim nasional.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan tujuan untuk mengeksplorasi, memahami, dan menyintesis peran Sistem Informasi Geografis sebagai *Decision Support System* dalam konteks keamanan maritim secara mendalam. Pendekatan kualitatif deskriptif dipilih karena fenomena yang dikaji, yaitu integrasi teknologi geospasial ke dalam sistem pengambilan keputusan maritim, bersifat kompleks, multidimensi, dan sangat bergantung pada konteks kelembagaan yang sulit direduksi menjadi variabel-variabel terukur secara numerik. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menangkap nuansa perkembangan teknologi, keterkaitan konseptual antarliteratur, serta implikasi kebijakan yang tidak selalu dapat ditangkap melalui pengujian statistik. Selain itu, mengingat objek kajian penelitian ini adalah perkembangan teknologi mutakhir seperti Autonomous GIS dan DSS berbasis kecerdasan buatan yang

relatif baru, ketersediaan data kuantitatif skala besar mengenai penerapannya di Indonesia masih sangat terbatas, sehingga pendekatan berbasis sintesis literatur menjadi lebih relevan dan dapat dipertanggungjawabkan secara metodologis.

Jenis penelitian yang digunakan adalah studi literatur (*literature review*) yang bersifat naratif-kritis, di mana peneliti tidak sekadar merangkum temuan dari berbagai sumber, melainkan melakukan pembacaan kritis, perbandingan, dan sintesis terhadap berbagai perspektif yang muncul dalam literatur untuk membangun argumentasi baru mengenai keterkaitan SIG, DSS, dan keamanan maritim. Studi literatur dipilih karena mampu mengakomodasi kebutuhan penelitian ini untuk memetakan perkembangan konseptual suatu bidang ilmu secara komprehensif, sekaligus mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang belum banyak dibahas oleh peneliti sebelumnya. Pendekatan ini juga sejalan dengan karakteristik topik penelitian yang bersifat lintas disiplin, mencakup ilmu geoinformatika, kecerdasan buatan, keamanan maritim, dan kebijakan publik, sehingga memerlukan kemampuan sintesis lintas domain yang hanya dapat dicapai melalui kajian literatur yang mendalam dan sistematis.

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui penelusuran sistematis pada basis data ilmiah bereputasi internasional, yaitu *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *IEEE Xplore*, *Taylor & Francis Online*, *MDPI*, dan *Springer*, yang dipilih karena keempatnya mengindeks jurnal-jurnal dengan proses peer review yang ketat pada bidang geoinformatika, penginderaan jauh, kecerdasan buatan, dan studi kemaritiman. Pemilihan basis data tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa mayoritas literatur mutakhir mengenai *Autonomous GIS*, *Decision Support System* berbasis AI, serta teknologi sensor maritim seperti AIS, radar, dan citra satelit dipublikasikan pada jurnal-jurnal yang terindeks pada platform-platform tersebut, sebagaimana tercermin dari sumber-sumber yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain *International Journal of Digital Earth* (Akinboyewa et al., 2024; Li & Ning, 2023; Ning et al., 2024) *Remote Sensing* (Janga et al., 2023; Quamar et al., 2023; Sharma et al., 2024), *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (Guo et al., 2023; Thombre et al., 2020), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (Yang et al., 2024), *Sensors* (Elhashash et al., 2022), *Ocean Engineering* (Liang et al., 2024), *Safety Science* (Gil et al., 2020), dan *Expert Systems with Applications* (Emmens et al., 2021). Penelusuran dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci seperti "*Geographic Information System*", "*Autonomous GIS*", "*Decision Support System*", "*Maritime Domain Awareness*", "*AIS data*", "*vessel detection*", dan "*maritime surveillance*", yang disesuaikan dengan fokus masing-masing subbab pembahasan. Artikel yang digunakan dalam penelitian ini merupakan artikel yang telah dipublikasikan pada jurnal internasional bereputasi dan telah melalui proses peer review, dengan rentang topik yang mencakup aspek teknis, konseptual, maupun aplikatif dari SIG dan DSS. Seluruh tautan DOI dari artikel-artikel yang disebutkan di atas dapat ditelusuri secara lengkap pada Daftar Pustaka. Proses seleksi dilakukan dengan mempertimbangkan relevansi tematik terhadap fokus penelitian, yaitu keterkaitan antara teknologi geospasial dan pengambilan keputusan dalam domain keamanan maritim, sehingga literatur yang tidak memiliki keterkaitan konseptual yang jelas dengan tema tersebut tidak dimasukkan ke dalam analisis. Dengan demikian, korpus literatur yang digunakan dalam penelitian ini bersifat terfokus dan telah melalui proses kurasi yang cermat untuk memastikan relevansi dan kualitas argumentasi yang dibangun.

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tiga tahapan yang saling berkaitan, yaitu analisis isi (*content analysis*), sintesis literatur, dan analisis komparatif. Analisis isi dilakukan untuk mengidentifikasi tema-tema utama, konsep kunci, dan temuan signifikan dari setiap sumber literatur yang telah dikumpulkan,

dengan cara membaca secara mendalam dan mengkategorikan informasi berdasarkan relevansinya terhadap subbab-subbab pembahasan yang telah dirancang. Sintesis literatur kemudian dilakukan untuk merangkai temuan-temuan dari berbagai sumber yang berbeda menjadi satu narasi yang koheren dan saling menguatkan, sehingga mampu menggambarkan keterkaitan antara perkembangan SIG, integrasi data, pemanfaatan sensor, dan implikasinya terhadap *Maritime Domain Awareness*. Analisis komparatif diterapkan untuk membandingkan berbagai pendekatan, teknologi, dan temuan penelitian terdahulu, sehingga dapat diidentifikasi persamaan, perbedaan, kelebihan, dan keterbatasan dari masing-masing pendekatan tersebut ketika diterapkan dalam konteks keamanan maritim. Kombinasi ketiga teknik analisis ini memungkinkan penelitian menghasilkan pembahasan yang tidak hanya deskriptif, tetapi juga kritis dan argumentatif.

Tahapan penelitian dilaksanakan secara sistematis melalui lima tahap utama, dimulai dari tahap identifikasi topik dan perumusan kerangka konseptual, dilanjutkan dengan tahap penelusuran dan pengumpulan literatur yang relevan, tahap seleksi dan kurasi literatur berdasarkan kriteria relevansi tematik, tahap analisis isi dan sintesis terhadap literatur terpilih, hingga tahap akhir berupa penarikan simpulan dan perumusan rekomendasi. Setiap tahapan dilaksanakan secara berurutan namun tetap bersifat iteratif, di mana peneliti dapat kembali ke tahap sebelumnya apabila ditemukan kebutuhan untuk memperdalam kajian pada aspek tertentu. Pendekatan iteratif ini penting untuk memastikan bahwa sintesis yang dihasilkan benar-benar mencerminkan kompleksitas hubungan antara SIG, DSS, dan keamanan maritim, bukan sekadar rangkuman linear dari berbagai sumber literatur. Keseluruhan tahapan tersebut dirancang untuk menjawab tujuan penelitian secara sistematis dan dapat dipertanggungjawabkan secara metodologis. Alur tahapan penelitian tersebut dapat digambarkan melalui diagram berikut.



Gambar 1. Flowchart Tahapan Penelitian

(Sumber: diolah oleh peneliti berdasarkan pendekatan studi literatur, 2025)

Melalui rangkaian metode tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan pembahasan yang komprehensif, kritis, dan relevan dengan kebutuhan pengembangan Sistem Informasi Geografis sebagai instrumen pendukung keputusan dalam menjaga keamanan maritim nasional Indonesia. Metode kualitatif deskriptif berbasis studi literatur ini dinilai paling sesuai mengingat sifat penelitian yang eksploratif-konseptual, di mana tujuan utamanya adalah membangun pemahaman baru melalui sintesis pengetahuan yang telah ada, bukan menghasilkan data primer baru dari lapangan. Pendekatan ini juga memungkinkan penelitian untuk tetap relevan dengan perkembangan teknologi yang berlangsung sangat cepat, karena literatur yang digunakan mencakup publikasi-publikasi terkini mengenai *Autonomous GIS*, DSS berbasis AI, dan teknologi sensor maritim mutakhir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep Sistem Informasi Geografis dalam Keamanan Maritim

Sistem Informasi Geografis secara konseptual dapat dipahami sebagai suatu sistem terintegrasi yang dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menyajikan data yang memiliki referensi keruangan atau spasial. Sebagai suatu sistem, SIG tersusun atas lima komponen utama yang saling berkaitan, yaitu perangkat keras (*hardware*), perangkat lunak (*software*), data, prosedur analisis, dan sumber daya manusia yang mengoperasikannya. Kelima komponen tersebut bekerja secara simultan untuk mentransformasikan data mentah menjadi informasi yang bermakna dan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan spasial. Dalam konteks keamanan maritim, SIG berperan sebagai platform yang mampu mengintegrasikan berbagai sumber data pengawasan, mulai dari posisi kapal, jalur pelayaran, batas wilayah yurisdiksi, hingga pola cuaca dan arus laut, ke dalam satu kerangka analisis spasial yang koheren. Kemampuan SIG untuk menyajikan data secara visual dalam bentuk peta interaktif juga memberikan nilai tambah tersendiri bagi pengambil keputusan, karena pola-pola spasial yang kompleks dapat lebih mudah diinterpretasikan dibandingkan dengan data tabular semata. Karakteristik inilah yang menjadikan SIG sebagai fondasi teknologi yang relevan bagi pengembangan sistem pengawasan maritim modern.

Perkembangan SIG dari masa ke masa menunjukkan pergeseran paradigma yang signifikan, dari sistem yang bersifat statis dan sepenuhnya bergantung pada operasi manual oleh analis manusia, menuju sistem yang semakin adaptif dan cerdas. Pada generasi awal, SIG lebih banyak berfungsi sebagai alat pemetaan dan visualisasi pasif, di mana seluruh proses analisis, interpretasi, dan pengambilan keputusan sepenuhnya bergantung pada kemampuan dan pengalaman operator. Seiring dengan perkembangan kecerdasan buatan, muncul gagasan mengenai *Autonomous GIS* yang diperkenalkan oleh (Li & Ning, 2023), yaitu suatu generasi SIG yang mampu melakukan penalaran spasial, pengambilan keputusan, dan bahkan eksekusi tugas analitik secara mandiri tanpa memerlukan instruksi rinci dari penggunaannya. Konsep ini kemudian dikembangkan lebih lanjut melalui kerangka kerja agen GIS otonom yang secara khusus dirancang untuk melakukan pengambilan data geospasial secara mandiri dari berbagai sumber, termasuk basis data daring dan repositori citra satelit (Ning et al., 2024). Perkembangan ini menandai transisi penting dari SIG sebagai alat bantu pasif menjadi SIG sebagai agen aktif yang dapat berperan langsung dalam proses pengambilan keputusan operasional.

Kemunculan asisten geospasial berbasis kecerdasan buatan generatif semakin memperkuat arah perkembangan *Autonomous GIS* tersebut. *GeoGPT*, misalnya, dikembangkan sebagai asisten yang dirancang khusus untuk memahami dan memproses berbagai tugas geospasial melalui antarmuka bahasa alami, sehingga pengguna tidak perlu memiliki keahlian teknis mendalam dalam pemrograman spasial untuk dapat memanfaatkan kemampuan analitik SIG (Zhang et al., 2024). Perkembangan serupa juga ditunjukkan oleh *GIS Copilot*, yang dirancang sebagai agen otonom untuk mendukung analisis spasial secara *end-to-end*, mulai dari interpretasi permintaan pengguna hingga eksekusi analisis dan penyajian hasil (Akinboyewa et al., 2024). Kedua inovasi tersebut mengindikasikan bahwa batas antara SIG konvensional dan sistem kecerdasan buatan semakin kabur, di mana kemampuan pemrosesan bahasa alami dan penalaran otomatis kini menjadi bagian integral dari ekosistem SIG modern. Bagi konteks keamanan maritim, perkembangan ini membuka peluang bagi otoritas pengawasan untuk memperoleh insight analitik secara lebih cepat tanpa harus bergantung sepenuhnya pada ketersediaan analis spasial yang terlatih secara khusus, meskipun tetap perlu diimbangi dengan kehati-hatian terhadap keandalan dan akuntabilitas hasil analisis yang dihasilkan secara otomatis.

Hubungan antara SIG dan *Decision Support System* pada dasarnya bersifat komplementer dan saling menguatkan satu sama lain. SIG menyediakan kerangka spasial dan kapabilitas analitik keruangan, sementara DSS menyediakan struktur logika pengambilan keputusan yang mengintegrasikan berbagai kriteria dan skenario untuk menghasilkan rekomendasi tindakan. Ketika kedua sistem tersebut diintegrasikan, hasilnya adalah suatu platform yang tidak hanya mampu menampilkan "di mana" suatu peristiwa terjadi, tetapi juga mampu memberikan rekomendasi mengenai "apa yang sebaiknya dilakukan" berdasarkan analisis terhadap data spasial dan nonspasial secara simultan. Namun demikian, efektivitas DSS yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan sangat dipengaruhi oleh tingkat kepercayaan pengguna terhadap rekomendasi yang dihasilkan, yang pada gilirannya dipengaruhi oleh keahlian domain pengguna itu sendiri. Kajian mengenai peran keahlian domain dalam mempercayai dan mengikuti sistem pendukung keputusan yang dapat dijelaskan (*explainable AI*) menunjukkan bahwa pengguna dengan keahlian domain yang lebih tinggi cenderung lebih kritis dan selektif dalam mengikuti rekomendasi sistem, dibandingkan dengan pengguna yang kurang berpengalaman (Bayer et al., 2021). Temuan ini memiliki implikasi penting bagi penerapan SIG-DSS dalam konteks maritim, karena operator dan pengambil keputusan di lapangan perlu memiliki pemahaman yang memadai mengenai cara kerja sistem agar dapat memanfaatkan rekomendasi yang dihasilkan secara tepat dan tidak sekadar menerimanya secara pasif.

Kajian yang lebih luas mengenai penerapan kecerdasan buatan untuk sistem pendukung keputusan menegaskan bahwa keseimbangan antara akurasi, transparansi, dan kepercayaan merupakan faktor penentu keberhasilan implementasi DSS di berbagai sektor, termasuk sektor yang berkaitan dengan keselamatan dan keamanan (Kovari, 2024). Aspek transparansi menjadi krusial karena keputusan yang dihasilkan oleh DSS berbasis SIG dalam konteks keamanan maritim seringkali memiliki konsekuensi operasional yang signifikan, seperti keputusan untuk mengarahkan kapal patroli atau melakukan interogasi terhadap kapal yang terdeteksi mencurigakan. Tinjauan sistematis mengenai penerapan kecerdasan buatan praktis untuk ilmu kebumihanturutan mengonfirmasi tren peningkatan penggunaan model AI dalam pengolahan data penginderaan jauh untuk mendukung berbagai keputusan berbasis lokasi di berbagai sektor, termasuk sektor kemaritiman (Janga et al., 2023). Contoh implementasi konkret dari integrasi SIG dan DSS pada konteks maritim dapat dilihat dari sistem pendukung keputusan berbasis kapal yang dirancang untuk pencegahan kecelakaan, di mana kajian bibliometrik dan tinjauan sistematis menunjukkan tren penelitian yang terus meningkat pada domain ini sejak beberapa tahun terakhir (Gil et al., 2020). Perkembangan tersebut mengindikasikan bahwa integrasi SIG dan DSS bukan lagi sekadar konsep teoretis, melainkan telah menjadi arah pengembangan teknologi yang nyata dan terus mendapatkan perhatian dari komunitas ilmiah internasional.

Untuk memberikan gambaran yang lebih sistematis mengenai evolusi teknologi SIG menuju sistem yang otonom, berikut disajikan rangkuman perkembangan tersebut berdasarkan sintesis literatur yang telah dikaji. Tabel berikut memetakan karakteristik utama dari setiap generasi SIG, mulai dari sistem konvensional hingga sistem yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan generatif, disertai dengan sumber literatur pendukung untuk masing-masing tahapan perkembangan tersebut.

Tabel 1. Perkembangan Teknologi SIG menuju *Autonomous GIS*

Generasi	Karakteristik Utama	Tingkat Otonomi	Contoh/Referensi
SIG Konvensional	Visualisasi dan analisis spasial manual, bergantung penuh pada operator	Rendah (fully manual)	Sistem pemetaan dasar berbasis desktop
SIG Berbasis Web & Interoperabel	Integrasi data lintas platform, akses daring, kolaborasi multi-pengguna	Rendah–Sedang	Interoperabilitas data geospasial (Hu et al., 2023)
SIG Analitik Cerdas	Penerapan <i>algoritma machine learning</i> untuk klasifikasi dan clustering data spasial	Sedang	Klasterisasi perilaku kapal berbasis DBSCAN (Han et al., 2021)
Asisten Geospasial Berbasis AI Generatif	Pemrosesan bahasa alami untuk interpretasi permintaan dan eksekusi tugas geospasial	Sedang–Tinggi	GeoGPT (Zhang et al., 2024)
<i>Autonomous GIS</i>	Penalaran spasial mandiri, pengambilan keputusan otomatis, eksekusi analisis tanpa instruksi rinci	Tinggi	<i>Autonomous GIS</i> (Li & Ning, 2023); agen pengambilan data geospasial (Ning et al., 2024); GIS Copilot (Akinboyewa et al., 2024)

(Sumber: diolah dari berbagai literatur (Li & Ning, 2023; Ning et al., 2024; Akinboyewa et al., 2024; Zhang et al., 2024; Han et al., 2021; Hu et al., 2023))

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa transformasi SIG menuju sistem otonom berlangsung secara bertahap dan tidak terjadi secara instan, melainkan melalui akumulasi kapabilitas teknologi yang saling membangun satu sama lain. Transisi dari SIG konvensional menuju SIG berbasis web menunjukkan bahwa langkah awal transformasi lebih banyak berfokus pada aspek aksesibilitas dan interoperabilitas data, sebelum kemudian bergerak ke arah kapabilitas analitik yang lebih cerdas. Tahapan SIG analitik cerdas yang memanfaatkan algoritma *machine learning*, sebagaimana ditunjukkan oleh penerapan metode DBSCAN untuk klasterisasi perilaku kapal (Han et al., 2021), menjadi titik balik penting karena pada tahap inilah SIG mulai memiliki kemampuan untuk mengidentifikasi pola tanpa instruksi eksplisit dari pengguna. Tahapan berikutnya, yaitu kemunculan asisten geospasial berbasis AI generatif seperti GeoGPT, menandai pergeseran dari kapabilitas analitik pasif menuju interaksi yang lebih intuitif antara manusia dan sistem, di mana pengguna dapat berkomunikasi dengan sistem menggunakan bahasa alami tanpa perlu memahami sintaks pemrograman spasial secara mendalam. Puncak dari evolusi ini tercermin pada tahap *Autonomous GIS*, yang tidak hanya mampu merespons permintaan pengguna, tetapi juga mampu berinisiatif melakukan analisis dan pengambilan keputusan spasial secara mandiri. Pola perkembangan yang bertahap ini mengindikasikan bahwa adopsi *Autonomous GIS* dalam konteks keamanan maritim Indonesia juga sebaiknya dilakukan secara bertahap, dengan terlebih dahulu memastikan kematangan infrastruktur pada tahapan interoperabilitas dan analitik cerdas, sebelum bergerak menuju otonomi penuh yang memerlukan tingkat kepercayaan dan akuntabilitas sistem yang jauh lebih tinggi.

Integrasi Data Spasial dan Nonspasial

Efektivitas Sistem Informasi Geografis sebagai instrumen pendukung keputusan dalam konteks keamanan maritim sangat bergantung pada kemampuannya untuk mengintegrasikan berbagai jenis data yang bersumber dari sensor dan platform yang berbeda-beda. Secara konseptual, data yang diolah dalam SIG dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu data spasial dan data atribut atau data nonspasial. Data spasial merujuk pada informasi yang memiliki referensi keruangan eksplisit, seperti koordinat posisi kapal, batas wilayah yurisdiksi, atau jalur pelayaran, sementara data atribut merujuk pada informasi deskriptif yang melekat pada entitas spasial tersebut, seperti

identitas kapal, kecepatan, arah, dan status operasional. Kedua jenis data ini perlu diintegrasikan secara simultan agar SIG mampu menghasilkan analisis yang tidak hanya menunjukkan lokasi suatu peristiwa, tetapi juga konteks dan karakteristik dari peristiwa tersebut. Dalam konteks pengawasan maritim, kompleksitas integrasi data ini semakin meningkat karena sumber data yang harus digabungkan tidak hanya berasal dari satu jenis sensor, melainkan dari berbagai modalitas yang memiliki format, resolusi, dan frekuensi pembaruan yang berbeda-beda. Kebutuhan untuk menyatukan data heterogen inilah yang mendorong berkembangnya konsep sensor fusion sebagai pendekatan teknis untuk mengoptimalkan pemanfaatan data multimodal.

Sensor fusion dalam konteks pengawasan maritim merujuk pada proses penggabungan data dari berbagai sumber sensor untuk menghasilkan gambaran situasional yang lebih akurat dan komprehensif dibandingkan jika data tersebut dianalisis secara terpisah. Penelitian mengenai fusi data maritim multimodal berbasis pencocokan lintasan asinkron menunjukkan bahwa penggabungan data dari berbagai sumber, meskipun memiliki interval waktu pengambilan yang tidak seragam, tetap dapat menghasilkan rekonstruksi lintasan kapal yang akurat untuk keperluan pengawasan lalu lintas di perairan pedalaman (Guo et al., 2023). Pendekatan sensor fusion ini menjadi sangat relevan bagi konteks Indonesia mengingat karakteristik perairan nusantara yang sangat beragam, mulai dari perairan pedalaman, selat sempit, hingga laut lepas, di mana masing-masing karakteristik perairan tersebut memerlukan kombinasi sensor yang berbeda untuk menghasilkan cakupan pengawasan yang optimal. Data *Automatic Identification System* (AIS) menjadi salah satu sumber data utama dalam ekosistem sensor fusion maritim, karena AIS menyediakan informasi identitas, posisi, kecepatan, dan arah kapal secara *real-time* yang dipancarkan langsung oleh transponder yang terpasang pada kapal. Namun demikian, sebagaimana telah disinggung sebelumnya, data AIS memiliki keterbatasan berupa potensi manipulasi dan inkonsistensi yang dapat menurunkan keandalannya jika digunakan sebagai satu-satunya sumber data (Emmens et al., 2021). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, pengembangan metode pembersihan data AIS berbasis rekonstruksi lintasan kapal dalam kondisi data yang tidak pasti menjadi penting untuk memastikan kualitas data yang masuk ke dalam sistem analisis SIG (Liang et al., 2024).

Selain data AIS, integrasi data radar dan citra satelit turut memberikan kontribusi signifikan terhadap kelengkapan gambaran situasional maritim. Radar memiliki keunggulan dalam mendeteksi keberadaan objek di permukaan laut secara independen dari sistem pelaporan yang bergantung pada kesediaan kapal untuk memancarkan sinyal identifikasinya sendiri, sehingga radar menjadi instrumen penting untuk mendeteksi kapal yang sengaja menonaktifkan transpondernya. Kajian mengenai teknologi satelit untuk pengawasan maritim global menegaskan bahwa kombinasi antara data satelit optik dan *Synthetic Aperture Radar* (SAR) mampu memberikan cakupan pengawasan yang jauh lebih luas dibandingkan sistem berbasis daratan atau kapal patroli konvensional, khususnya untuk wilayah perairan yang jauh dari pantai (Soldi et al., 2020). Tinjauan literatur mengenai sinergi antara UAV dan satelit untuk aplikasi penginderaan jauh optik turut menunjukkan bahwa kombinasi kedua platform tersebut memungkinkan diperolehnya data dengan resolusi spasial dan temporal yang saling melengkapi, di mana satelit unggul dalam cakupan area yang luas sementara UAV unggul dalam resolusi detail pada area yang lebih spesifik (Emilien et al., 2021). Integrasi antara data AIS, radar, dan citra satelit inilah yang pada akhirnya membentuk lapisan-lapisan informasi yang saling menutupi kelemahan masing-masing sumber data, sehingga menghasilkan gambaran

situasional yang jauh lebih andal dibandingkan jika hanya mengandalkan satu jenis data saja.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) turut memperkaya ekosistem data yang dapat diintegrasikan ke dalam SIG maritim, khususnya melalui konsep *Marine IoT* yang menggabungkan jaringan sensor berbasis satelit, udara, dan laut secara terpadu. Penelitian mengenai sistem *Marine IoT* dengan jaringan terintegrasi ruang-udara-laut menunjukkan bahwa kombinasi antara satelit orbit rendah (LEO) dan komputasi tepi berbasis UAV mampu mendukung pengumpulan dan pemrosesan data maritim secara lebih efisien dan responsif (Jung et al., 2023). Konsep ini menjadi relevan mengingat kebutuhan untuk memproses data dalam volume besar secara mendekati waktu nyata, di mana pemrosesan yang sepenuhnya terpusat pada satu lokasi server dapat menimbulkan latensi yang tidak dapat diterima dalam konteks operasi keamanan yang membutuhkan respons cepat. Selain aspek jaringan sensor, keberhasilan integrasi data spasial dan nonspasial juga sangat bergantung pada ketersediaan basis data geospasial yang mampu menampung data dari berbagai format dan sumber secara interoperabel. Pengembangan benchmark dataset multimodal untuk penginderaan jauh menunjukkan bahwa standarisasi format data menjadi tantangan tersendiri ketika data yang digabungkan berasal dari sensor dengan karakteristik yang sangat berbeda, seperti citra hyperspectral, data SAR, dan data ketinggian digital (Hu et al., 2023). Tantangan interoperabilitas semacam ini perlu mendapatkan perhatian khusus dalam pengembangan SIG maritim nasional, mengingat data yang perlu diintegrasikan berasal dari berbagai instansi yang kemungkinan besar menggunakan standar dan format data yang berbeda-beda.

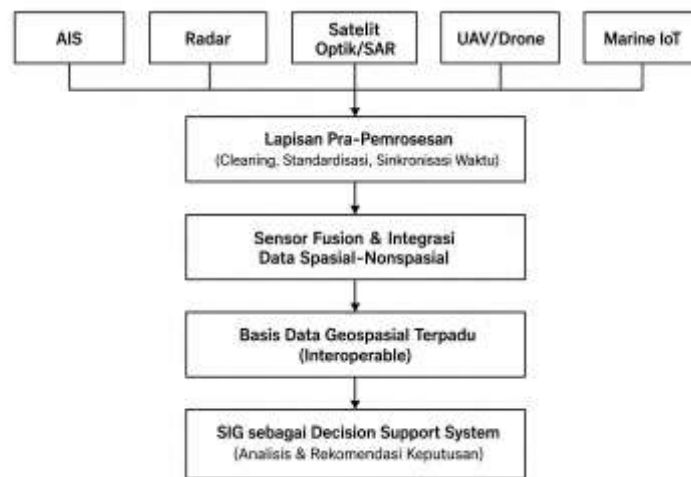
Untuk memberikan gambaran yang lebih terstruktur mengenai keragaman sumber data yang perlu diintegrasikan dalam SIG maritim, berikut disajikan klasifikasi jenis data tersebut beserta karakteristik dan kontribusinya terhadap analisis situasional maritim. Klasifikasi ini disusun berdasarkan sintesis dari berbagai literatur yang membahas masing-masing jenis sumber data secara spesifik.

Tabel 2. Jenis Data yang Diintegrasikan dalam SIG Maritim

Jenis Data	Sumber/Platform	Karakteristik Utama	Kontribusi terhadap Analisis	Referensi
Data AIS	Transponder kapal	Identitas, posisi, kecepatan, arah real-time; rentan manipulasi	Identifikasi dan pelacakan pergerakan kapal	Emmens et al. (2021); Liang et al. (2024)
Data Radar	Stasiun pantai/kapal patroli	Deteksi objek independen dari pelaporan kapal	Deteksi kapal yang menonaktifkan AIS (<i>dark vessel</i>)	Soldi et al. (2020)
Citra Satelit Optik & SAR	Satelit orbit rendah	Cakupan area luas, dapat menembus awan (SAR)	Pemantauan wilayah luas dan lepas pantai	Soldi et al. (2020); Emilien et al. (2021)
Data UAV/Drone	Wahana udara tanpa awak	Resolusi tinggi, fleksibel, cakupan area spesifik	Verifikasi lapangan dan pemetaan detail pesisir	Ekaso et al. (2020); Quamar et al. (2023)
Data <i>Marine IoT</i>	Jaringan sensor laut-udara-satelit	Pemrosesan tepi (<i>edge</i>), latensi rendah	Respons cepat dan pemrosesan data mendekati real-time	Jung et al. (2023)
Data Multimodal Penginderaan Jauh	Kombinasi sensor heterogen	Hyperspectral, SAR, DEM dengan format beragam	Basis interoperabilitas data geospasial	Hu et al. (2023)

(Sumber: diolah dari berbagai literatur (Emmens et al., 2021; Liang et al., 2024; Soldi et al., 2020; Emilien et al., 2021; Ekaso et al., 2020; Quamar et al., 2023; Jung et al., 2023; Hu et al., 2023))

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa tidak ada satu jenis data pun yang dapat secara mandiri memberikan gambaran situasional maritim yang lengkap dan andal, sehingga strategi integrasi multisumber menjadi keharusan, bukan sekadar pilihan tambahan. Data AIS, meskipun menjadi sumber informasi paling kaya dalam hal identitas dan atribut kapal, memiliki kerentanan mendasar terhadap manipulasi yang hanya dapat dikompensasi melalui verifikasi silang dengan data radar dan citra satelit yang bersifat independen dari kesediaan kapal untuk melaporkan dirinya sendiri. Pola saling melengkapi ini juga terlihat pada hubungan antara citra satelit dan data UAV, di mana satelit unggul dalam cakupan wilayah yang luas namun terbatas dalam resolusi detail, sementara UAV mampu memberikan resolusi tinggi namun hanya untuk area yang terbatas cakupannya. Kehadiran *Marine IoT* dengan kapabilitas *edge computing* kemudian berperan sebagai lapisan infrastruktur yang menjembatani seluruh sumber data tersebut agar dapat diproses secara efisien tanpa harus membebani satu titik pemrosesan pusat secara berlebihan. Tantangan interoperabilitas data multimodal yang diidentifikasi oleh (Hu et al., 2023) semakin menegaskan bahwa keberhasilan integrasi data bukan semata-mata persoalan ketersediaan teknologi sensor, melainkan juga persoalan standarisasi format dan protokol pertukaran data lintas platform. Implikasinya, pengembangan SIG maritim nasional Indonesia perlu memberikan perhatian yang seimbang antara investasi pada perangkat sensor itu sendiri dan investasi pada infrastruktur middleware yang mampu menyatukan data dari berbagai sumber tersebut ke dalam satu platform analisis yang koheren. Alur integrasi data dari berbagai sumber tersebut hingga menghasilkan informasi yang siap digunakan untuk pengambilan keputusan dapat digambarkan melalui diagram berikut.



Gambar 2. Alur Integrasi Data dalam SIG Maritim

(Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan sintesis literatur (2025))

Diagram tersebut menggambarkan bahwa proses integrasi data dalam SIG maritim tidak berlangsung secara instan, melainkan melalui serangkaian tahapan pra-pemrosesan yang krusial sebelum data dari berbagai sumber dapat digabungkan secara bermakna. Tahap pra-pemrosesan, yang mencakup pembersihan data, standarisasi format, dan sinkronisasi temporal, menjadi tahapan yang seringkali kurang mendapatkan perhatian dibandingkan tahapan analisis itu sendiri, padahal kualitas hasil analisis pada tahap akhir sangat bergantung pada kualitas proses pra-pemrosesan ini. Setelah melalui tahap sensor fusion, data yang telah terintegrasi kemudian disimpan dalam basis data geospasial terpadu yang bersifat interoperabel, sehingga dapat diakses dan dimanfaatkan oleh berbagai modul analisis maupun oleh berbagai instansi yang berwenang. Pada tahap akhir, seluruh data terintegrasi tersebut menjadi masukan bagi SIG yang berfungsi

sebagai *Decision Support System*, di mana sistem akan menghasilkan analisis situasional dan rekomendasi tindakan berdasarkan pola-pola yang teridentifikasi dari data multisumber tersebut. Alur ini menegaskan bahwa kualitas keputusan yang dihasilkan pada tahap akhir sesungguhnya merupakan cerminan dari kualitas proses integrasi data pada tahapan-tahapan sebelumnya, sehingga investasi pada infrastruktur integrasi data hulu menjadi determinan penting bagi keandalan keputusan yang dihasilkan pada hilir sistem.

Pemanfaatan AIS, Radar, Drone, Satelit, dan Sensor dalam Pengawasan Maritim

Automatic Identification System merupakan salah satu instrumen paling fundamental dalam ekosistem pengawasan maritim modern, karena sistem ini menyediakan data identitas dan pergerakan kapal secara otomatis dan berkelanjutan melalui transponder yang wajib dipasang pada kapal-kapal berukuran tertentu sesuai dengan regulasi internasional. Data yang dihasilkan oleh AIS mencakup informasi identitas kapal, posisi geografis, kecepatan, arah haluan, serta status navigasi, yang secara kolektif membentuk jejak digital pergerakan kapal dari waktu ke waktu. Kajian mengenai potensi dan risiko data AIS menegaskan bahwa meskipun sistem ini menawarkan kemudahan luar biasa dalam pelacakan kapal secara masif, keandalannya tetap perlu diwaspadai karena data tersebut pada dasarnya bergantung pada kesediaan dan itikad baik operator kapal untuk memancarkan sinyal secara jujur dan konsisten (Emmens et al., 2021). Untuk mengoptimalkan pemanfaatan data AIS yang sangat besar volumenya, berbagai penelitian telah mengembangkan metode analisis berbasis clustering guna mengidentifikasi pola perilaku kapal secara otomatis. Penerapan algoritma *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) yang telah dioptimalkan terbukti mampu mengelompokkan data AIS berdasarkan pola pergerakan kapal secara efektif, sehingga memudahkan identifikasi rute pelayaran umum sekaligus mendeteksi penyimpangan dari pola tersebut (Han et al., 2021). Kemampuan analitik semacam ini menjadi krusial dalam konteks keamanan maritim, karena penyimpangan dari pola pergerakan normal seringkali menjadi indikator awal terhadap aktivitas yang berpotensi ilegal.

Selain analisis pola pergerakan, tantangan teknis lain dalam pemanfaatan data AIS adalah persoalan kualitas data itu sendiri, mengingat data yang diterima seringkali mengandung kekosongan sinyal, duplikasi, atau ketidaksesuaian akibat gangguan transmisi maupun manipulasi yang disengaja. Pengembangan metode pembersihan data AIS yang berorientasi pada rekonstruksi lintasan kapal dalam kondisi ketidakpastian menunjukkan bahwa kualitas data dapat ditingkatkan secara signifikan melalui pendekatan algoritmik yang mampu mengisi kekosongan data dan mengoreksi anomali transmisi tanpa mengorbankan akurasi keseluruhan lintasan (Liang et al., 2024). Pendekatan pembersihan data ini menjadi prasyarat penting sebelum data AIS dapat diandalkan sebagai masukan bagi algoritma prediksi perilaku kapal yang lebih kompleks. Salah satu pengembangan penting dalam hal ini adalah kerangka kerja pembelajaran mendalam untuk memprediksi perilaku kapal secara regional berbasis data AIS, yang menunjukkan bahwa model prediktif berbasis *deep learning* mampu mengantisipasi potensi risiko keselamatan dan keamanan pelayaran dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi apabila dilatih menggunakan data historis yang memadai (Murray & Perera, 2021). Kapabilitas prediktif semacam ini memiliki nilai strategis besar bagi otoritas maritim Indonesia, karena memungkinkan tindakan pencegahan dilakukan sebelum suatu insiden benar-benar terjadi, bukan sekadar merespons setelah insiden berlangsung.

Di samping AIS, teknologi penginderaan jauh berbasis satelit turut memainkan peran vital dalam memperluas cakupan pengawasan maritim, khususnya untuk wilayah

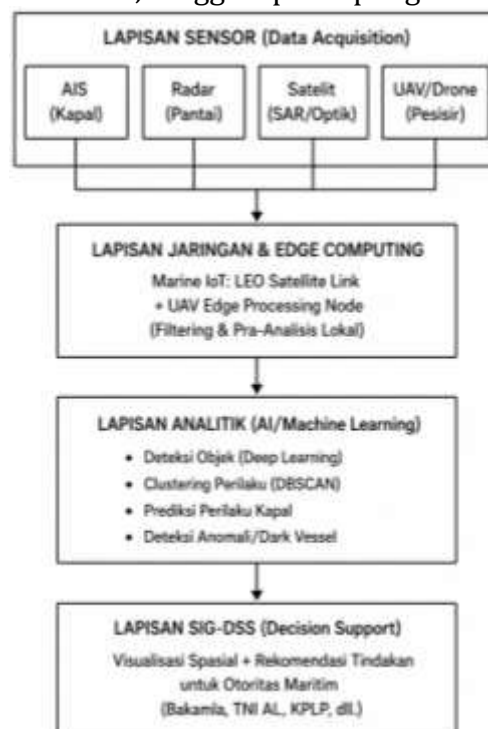
perairan yang jauh dari jangkauan infrastruktur pengawasan berbasis daratan. Kombinasi antara citra satelit optik dan *Synthetic Aperture Radar* (SAR) menawarkan keunggulan yang saling melengkapi, di mana citra optik memberikan detail visual yang kaya namun terbatas oleh kondisi cuaca dan pencahayaan, sementara SAR mampu menembus tutupan awan dan beroperasi pada kondisi malam hari sehingga menyediakan cakupan pengawasan yang lebih konsisten sepanjang waktu (Soldi et al., 2020). Pemanfaatan citra satelit untuk deteksi kapal juga semakin didukung oleh kemajuan pesat dalam bidang deep learning, sebagaimana ditunjukkan oleh studi eksperimental mengenai deteksi kapal otomatis berbasis citra satelit yang mengonfirmasi bahwa model-model deep learning kontemporer mampu mencapai tingkat akurasi deteksi yang tinggi meskipun dihadapkan pada tantangan variasi ukuran kapal, kondisi cuaca, dan resolusi citra yang beragam (Patel et al., 2022). Pengembangan lebih lanjut dalam bidang segmentasi citra penginderaan jauh, seperti jaringan fusi domain spasial dan frekuensi berbasis wavelet, juga menunjukkan peningkatan kemampuan sistem dalam memisahkan objek kapal dari latar belakang laut yang kompleks, termasuk pada kondisi citra dengan derau atau gangguan visual yang tinggi (Yang et al., 2024). Perkembangan algoritma-algoritma ini memperkuat argumen bahwa penginderaan jauh berbasis satelit, ketika dipadukan dengan kecerdasan buatan, mampu memberikan kapabilitas deteksi yang jauh melampaui kemampuan interpretasi visual manual oleh analis citra.

Wahana udara tanpa awak atau UAV, yang lebih populer dikenal sebagai drone, melengkapi ekosistem sensor maritim dengan menyediakan fleksibilitas pengumpulan data pada area-area spesifik yang memerlukan resolusi tinggi namun tidak memerlukan cakupan area yang seluas satelit. Kajian mengenai akurasi pengukuran real-time kinematics pada UAV menunjukkan bahwa teknologi geo-referensi langsung pada wahana tanpa awak telah mencapai tingkat presisi yang memadai untuk keperluan pemetaan rinci wilayah pesisir dan perairan dangkal, suatu area yang seringkali sulit dijangkau oleh sensor satelit maupun radar berbasis daratan (Ekaso et al., 2020). Tinjauan komprehensif mengenai perkembangan dan aplikasi teknologi drone yang terintegrasi dengan SIG turut menegaskan bahwa kombinasi kedua teknologi tersebut telah meluas penggunaannya ke berbagai sektor, termasuk sektor kemaritiman, karena kemampuannya dalam menyediakan data yang responsif terhadap kebutuhan verifikasi lapangan secara cepat (Quamar et al., 2023). Selain UAV, perkembangan sistem pemetaan bergerak (*mobile mapping systems*) yang mengintegrasikan berbagai sensor pada satu platform bergerak, baik berbasis darat, udara, maupun laut, turut memperkaya opsi teknologi yang tersedia bagi otoritas pengawas untuk melakukan pemetaan dan verifikasi kondisi lapangan secara lebih efisien (Elhashash et al., 2022). Ketersediaan berbagai pilihan platform sensor ini memungkinkan otoritas maritim untuk menyesuaikan strategi pengumpulan data dengan karakteristik spesifik dari masing-masing area pengawasan, alih-alih menerapkan satu pendekatan seragam untuk seluruh wilayah yurisdiksi yang sangat luas dan beragam.

Keseluruhan sensor dan platform tersebut pada akhirnya memerlukan infrastruktur jaringan dan pemrosesan yang mampu menangani volume data besar secara efisien dan responsif. Konsep *Marine IoT* yang mengintegrasikan jaringan satelit orbit rendah dengan komputasi tepi berbasis UAV menawarkan solusi arsitektural yang relevan untuk kebutuhan ini, karena pendekatan *edge computing* memungkinkan sebagian pemrosesan data dilakukan lebih dekat dengan sumber data, sehingga mengurangi beban pada infrastruktur jaringan pusat sekaligus mempercepat waktu respons sistem terhadap peristiwa yang terdeteksi (Jung et al., 2023). Kombinasi antara kapabilitas edge computing dan algoritma *machine learning* yang semakin efisien memungkinkan

terciptanya sistem pengawasan yang tidak hanya mengumpulkan data secara pasif, tetapi juga mampu melakukan analisis awal secara terdesentralisasi sebelum data yang telah tersaring dikirimkan ke pusat komando untuk analisis lebih lanjut. Tinjauan komprehensif mengenai penerapan kecerdasan buatan dan machine learning untuk penelitian berbasis data AIS menegaskan bahwa tren riset di bidang ini terus berkembang pesat, dengan cakupan aplikasi yang semakin meluas dari sekadar visualisasi pergerakan kapal menuju analisis prediktif dan preskriptif yang lebih kompleks (Zhang et al., 2024). Perkembangan ini menegaskan bahwa masa depan pengawasan maritim akan semakin bertumpu pada arsitektur sistem yang terdistribusi, adaptif, dan didukung oleh kecerdasan buatan pada berbagai lapisan pemrosesannya, bukan lagi arsitektur terpusat yang sepenuhnya bergantung pada satu titik pengambilan keputusan.

Untuk menggambarkan bagaimana keseluruhan komponen sensor dan infrastruktur pemrosesan tersebut bekerja secara terintegrasi dalam satu sistem pengawasan maritim, berikut disajikan ilustrasi konseptual mengenai arsitektur sistem yang menghubungkan lapisan sensor, lapisan pemrosesan, hingga lapisan pengambilan keputusan.



Gambar 3. Arsitektur Sistem Pengawasan Maritim Terintegrasi
(Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan sintesis literatur, (2025))

Arsitektur yang digambarkan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa sistem pengawasan maritim terintegrasi tersusun atas empat lapisan yang saling bergantung dan bekerja secara berurutan namun tetap dengan mekanisme umpan balik antarlapisan. Lapisan sensor berfungsi sebagai titik akuisisi data awal yang menangkap informasi mentah dari berbagai modalitas, mulai dari sinyal AIS yang dipancarkan kapal, pantulan gelombang radar, citra satelit optik maupun SAR, hingga data yang dikumpulkan oleh UAV pada area-area spesifik. Data mentah dari lapisan sensor tersebut kemudian tidak langsung dikirimkan seluruhnya ke pusat pemrosesan, melainkan terlebih dahulu melalui lapisan jaringan dan edge computing yang melakukan penyaringan dan pra-analisis lokal, sebuah pendekatan yang esensial mengingat volume data mentah dari seluruh sensor tersebut akan sangat membebani infrastruktur jaringan apabila dikirimkan secara utuh tanpa penyaringan awal (Jung et al., 2023). Setelah melalui tahap penyaringan, data yang telah lebih terstruktur kemudian diproses pada lapisan analitik yang memanfaatkan

berbagai algoritma kecerdasan buatan, mulai dari deteksi objek berbasis deep learning (Patel et al., 2022), klasterisasi perilaku kapal (Han et al., 2021), hingga model prediksi perilaku dan deteksi anomaly (Murray & Perera, 2021). Hasil dari lapisan analitik tersebut pada akhirnya menjadi masukan bagi lapisan SIG-DSS, yang tidak hanya menyajikan visualisasi spasial dari situasi maritim terkini, tetapi juga menghasilkan rekomendasi tindakan konkret yang dapat digunakan oleh otoritas maritim, seperti Bakamla, TNI Angkatan Laut, maupun Kesatuan Penjagaan Laut dan Pantai, untuk mengambil keputusan operasional secara lebih cepat dan berbasis bukti. Keterhubungan antarlapisan yang bersifat sekuensial namun tetap adaptif ini menegaskan bahwa kegagalan pada satu lapisan, misalnya rendahnya kualitas data pada lapisan sensor, akan berdampak secara akumulatif terhadap keandalan rekomendasi yang dihasilkan pada lapisan akhir, sehingga investasi pengembangan sistem perlu dilakukan secara seimbang pada seluruh lapisan arsitektur, bukan hanya berfokus pada satu lapisan tertentu seperti algoritma analitik semata.

Peran SIG dalam *Maritime Domain Awareness*

Maritime Domain Awareness merupakan konsep yang mengacu pada pemahaman efektif terhadap segala sesuatu yang berkaitan dengan domain maritim, mencakup aktivitas, infrastruktur, orang, kargo, maupun kapal yang berpotensi memengaruhi keamanan, keselamatan, ekonomi, maupun lingkungan suatu negara. Konsep ini tidak dapat direduksi menjadi sekadar aktivitas pemantauan posisi kapal secara pasif, melainkan mencakup proses kognitif yang lebih kompleks berupa interpretasi, kontekstualisasi, dan prediksi terhadap makna dari pola-pola pergerakan dan aktivitas yang teramati. Kajian mengenai sensor dan teknik kecerdasan buatan untuk kesadaran situasional pada kapal otonom menegaskan bahwa MDA yang efektif memerlukan kemampuan sistem untuk mengintegrasikan berbagai modalitas sensor secara simultan, sekaligus melakukan penalaran terhadap keterkaitan antarperistiwa yang teramati pada waktu dan lokasi yang berbeda (Thombre et al., 2020). Dalam kerangka inilah SIG menempati posisi sentral, karena kapabilitas SIG dalam menyajikan data secara spasial dan temporal secara simultan memungkinkan terbentuknya pemahaman situasional yang koheren dari data yang pada awalnya tersebar dan terfragmentasi. Tanpa dukungan SIG sebagai platform integrasi, upaya membangun MDA akan menghadapi kesulitan besar dalam menyatukan informasi dari berbagai sumber ke dalam satu kerangka interpretasi yang konsisten.

Salah satu kontribusi paling signifikan dari SIG terhadap MDA adalah kemampuannya mendukung deteksi aktivitas illegal fishing dan fenomena dark vessel, yaitu kapal yang sengaja menonaktifkan transponder AIS untuk menghindari deteksi ketika melakukan aktivitas ilegal. Penelitian mengenai kerangka kerja terdistribusi untuk ekstraksi pola lalu lintas maritim menunjukkan bahwa analisis pola pergerakan kapal secara sistematis mampu mengungkap rute-rute yang secara konsisten digunakan untuk aktivitas tertentu, termasuk pola yang mengindikasikan penyimpangan dari jalur pelayaran komersial normal (Kontopoulos et al., 2020). Ketika data AIS mengalami kekosongan pada suatu periode tertentu, sebagaimana ditemukan pada kapal-kapal yang diduga melakukan aktivitas dark vessel, kombinasi dengan data radar dan citra satelit menjadi mekanisme verifikasi yang krusial untuk mengonfirmasi keberadaan kapal pada koordinat yang seharusnya kosong menurut data AIS (Han et al., 2021). Kemampuan verifikasi silang semacam ini menjadi elemen kunci dalam mendeteksi aktivitas illegal fishing di perairan Indonesia, mengingat luasnya wilayah perairan yang harus diawasi menjadikan pendekatan verifikasi manual oleh kapal patroli fisik menjadi sangat tidak efisien apabila

tidak didahului oleh penyaringan berbasis data yang mengarahkan sumber daya pengawasan ke titik-titik yang paling mencurigakan.

Selain *illegal fishing*, SIG turut berperan dalam mendukung deteksi aktivitas smuggling, human trafficking, dan piracy melalui analisis perilaku pergerakan kapal yang menyimpang dari pola normal. Kerangka kerja pembelajaran mendalam untuk prediksi perilaku kapal secara regional menunjukkan bahwa model prediktif berbasis data AIS historis mampu mengidentifikasi indikasi awal perilaku berisiko, seperti perubahan rute mendadak, penurunan kecepatan yang tidak wajar pada lokasi tertentu, atau pola pertemuan antarkapal yang tidak konsisten dengan aktivitas pelayaran komersial biasa (Murray & Perera, 2021). Pola-pola semacam ini seringkali menjadi indikator terjadinya transfer muatan ilegal di tengah laut atau pertemuan yang berkaitan dengan aktivitas perdagangan manusia. Pendekatan pemodelan spasial terdistribusi untuk memetakan rute maritim turut memperkuat kapabilitas analitik ini, karena pemetaan rute yang konsisten memungkinkan sistem untuk secara otomatis menandai penyimpangan signifikan dari rute yang telah teridentifikasi sebagai rute normal berdasarkan data historis dalam jumlah besar (Zissis et al., 2020). Meskipun deteksi *piracy* secara spesifik memerlukan pertimbangan konteks tambahan seperti wilayah rawan yang telah diketahui secara historis, integrasi antara analisis pola pergerakan dan data geografis mengenai zona berisiko tinggi tetap memberikan nilai tambah signifikan bagi upaya mitigasi risiko pembajakan di perairan tertentu.

Kontribusi SIG terhadap MDA juga mencakup dimensi lingkungan, khususnya dalam pemantauan pencemaran laut (*marine pollution*) yang dapat diidentifikasi melalui analisis citra satelit dan penginderaan jauh. Kajian mengenai penginderaan jauh dan SIG dalam manajemen sumber daya alam menegaskan bahwa integrasi antara data penginderaan jauh dan data lapangan (in-situ) menjadi krusial untuk menghasilkan pemantauan lingkungan yang akurat, karena data penginderaan jauh semata seringkali memerlukan validasi lapangan untuk memastikan interpretasi yang tepat terhadap fenomena yang teramati dari citra (Sharma et al., 2024). Prinsip ini juga relevan diterapkan pada konteks pemantauan pencemaran laut, di mana deteksi awal tumpahan minyak atau limbah melalui citra satelit perlu dikonfirmasi melalui verifikasi lapangan sebelum tindakan penanggulangan dilakukan. Dimensi lingkungan ini menegaskan bahwa cakupan MDA sesungguhnya lebih luas daripada sekadar aspek keamanan dalam pengertian penegakan hukum, melainkan juga mencakup aspek keberlanjutan lingkungan yang pada akhirnya turut memengaruhi keamanan maritim dalam pengertian yang lebih luas, termasuk keamanan pangan dari sektor perikanan yang bergantung pada kualitas ekosistem laut.

Keseluruhan kapabilitas deteksi tersebut pada akhirnya bermuara pada fungsi utama SIG sebagai penyedia dukungan pengambilan keputusan bagi otoritas maritim. Kajian bibliometrik mengenai sistem pendukung keputusan berbasis kapal untuk pencegahan kecelakaan menegaskan bahwa tren penelitian pada domain ini terus berkembang dengan penekanan yang semakin besar pada integrasi data multisensor untuk menghasilkan rekomendasi keputusan yang lebih akurat dan tepat waktu (Gil et al., 2020). Demikian pula, kajian mengenai sensor dan kecerdasan buatan untuk kesadaran situasional pada kapal otonom menekankan bahwa nilai strategis dari MDA tidak terletak pada volume data yang berhasil dikumpulkan, melainkan pada kemampuan sistem untuk mentransformasikan data tersebut menjadi rekomendasi tindakan yang actionable bagi pengambil keputusan pada tingkat operasional maupun strategis (Thombre et al., 2020). Untuk merangkum keterkaitan antara berbagai kapabilitas SIG dengan dimensi-dimensi

spesifik dari MDA yang telah dibahas, berikut disajikan pemetaan kontribusi tersebut secara lebih sistematis.

Tabel 3. Kontribusi SIG terhadap *Maritime Domain Awareness*

Dimensi Ancaman/Fenomena	Kapabilitas SIG yang Relevan	Mekanisme Deteksi/Analisis	Referensi Pendukung
Illegal Fishing & Dark Vessel	Verifikasi silang AIS-radar-satelit, clustering perilaku	Deteksi kekosongan sinyal AIS dan anomali klaster pergerakan	Han et al. (2021); Kontopoulos et al. (2020)
Smuggling & Human Trafficking	Analisis prediktif perilaku kapal, deteksi pertemuan antarkapal	Identifikasi rute menyimpang dan pola pertemuan tidak wajar	Murray & Perera (2021); Zissis et al. (2020)
Piracy	Pemetaan zona risiko historis, analisis rute maritim	Overlay data spasial rute dengan zona rawan pembajakan	Zissis et al. (2020)
Marine Pollution	Interpretasi citra satelit, integrasi data in-situ	Deteksi visual anomali permukaan laut dan validasi lapangan	Sharma et al. (2024)
Dukungan Keputusan Operasional	Sintesis multisensor menjadi rekomendasi tindakan	Transformasi data situasional menjadi rekomendasi actionable	Gil et al. (2020); Thombre et al. (2020)

(Sumber: diolah dari berbagai literatur (Han et al., 2021; Kontopoulos et al., 2020; Murray & Perera, 2021; Zissis et al., 2020; Sharma et al., 2024; Gil et al., 2020; Thombre et al., 2020))

Data pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa peran SIG dalam mendukung MDA bersifat lintas dimensi, mencakup tidak hanya ancaman yang bersifat kriminal seperti *illegal fishing*, *smuggling*, dan *piracy*, tetapi juga dimensi lingkungan seperti pencemaran laut, yang seringkali kurang mendapatkan perhatian setara dibandingkan ancaman keamanan konvensional dalam wacana kebijakan maritim nasional. Pola yang konsisten teramati pada tabel tersebut adalah bahwa hampir seluruh mekanisme deteksi bergantung pada prinsip verifikasi silang antarsumber data, baik itu antara AIS dengan radar, antara data historis dengan pola real-time, maupun antara citra satelit dengan data lapangan. Prinsip verifikasi silang ini menegaskan bahwa keandalan MDA pada dasarnya bersifat emergent, muncul dari interaksi antarsumber data, bukan melekat pada satu sumber data tunggal betapapun canggihnya sumber data tersebut. Perbedaan mendasar juga terlihat antara mekanisme deteksi yang bersifat reaktif, seperti verifikasi kekosongan sinyal AIS setelah anomali terjadi, dengan mekanisme yang bersifat prediktif, seperti analisis pola pergerakan untuk mengantisipasi potensi ancaman sebelum benar-benar terwujud. Implikasi penting dari temuan ini bagi konteks Indonesia adalah bahwa pengembangan SIG maritim nasional sebaiknya tidak hanya berfokus pada peningkatan kapabilitas deteksi pada masing-masing dimensi ancaman secara terpisah, melainkan juga pada penguatan mekanisme integrasi lintas dimensi, mengingat dalam praktiknya berbagai jenis ancaman tersebut seringkali saling berkaitan, misalnya kapal yang terlibat dalam illegal fishing juga berpotensi terlibat dalam praktik perdagangan manusia melalui eksploitasi awak kapal asing yang dipekerjakan secara tidak layak.

Rekomendasi Pengembangan SIG Nasional

Pengembangan Sistem Informasi Geografis sebagai instrumen pendukung keputusan bagi keamanan maritim nasional tidak dapat dilepaskan dari konteks kelembagaan yang menaungi urusan kemaritiman di Indonesia, mengingat kewenangan pengawasan dan penegakan hukum di laut tersebar pada berbagai instansi dengan mandat yang berbeda-beda. Badan Keamanan Laut (Bakamla), Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut (TNI AL), Kesatuan Penjagaan Laut dan Pantai (KPLP), Badan Informasi Geospasial (BIG), Pusat Hidrografi dan Oseanografi TNI AL (Pushidrosal), Badan Meteorologi Klimatologi dan

Geofisika (BMKG), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), serta Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) masing-masing memiliki peran strategis yang berbeda namun saling berkaitan dalam ekosistem keamanan maritim nasional. Fragmentasi kelembagaan semacam ini, meskipun mencerminkan pembagian kerja yang terspesialisasi, berpotensi menimbulkan silo data apabila tidak diimbangi dengan kerangka interoperabilitas yang memadai antarinstansi tersebut. Tantangan interoperabilitas data yang telah dibahas sebelumnya dalam konteks integrasi sensor multimodal (Hu et al., 2023) pada dasarnya juga berlaku secara analog pada level kelembagaan, di mana data yang dikumpulkan oleh satu instansi seringkali tidak dapat diakses atau dimanfaatkan secara optimal oleh instansi lain akibat perbedaan standar, format, maupun kebijakan pengelolaan data. Pengembangan SIG nasional yang efektif oleh karena itu memerlukan bukan hanya investasi teknologi, tetapi juga penataan kerangka kelembagaan yang memungkinkan pertukaran data secara aman dan terstandardisasi antarlembaga yang berwenang.

Kebutuhan akan kemandirian data satelit nasional menjadi salah satu prioritas strategis yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan SIG maritim Indonesia jangka panjang, mengingat ketergantungan pada data satelit asing dapat menimbulkan kerentanan strategis, baik dari sisi keberlanjutan akses data maupun dari sisi kedaulatan informasi. Sebagaimana ditunjukkan oleh kajian mengenai teknologi satelit untuk pengawasan maritim global, kombinasi antara citra optik dan SAR memberikan kapabilitas pengawasan yang sangat luas cakupannya (Soldi et al., 2020), namun kapabilitas tersebut idealnya didukung oleh infrastruktur satelit yang dapat dikendalikan secara mandiri oleh negara, alih-alih sepenuhnya bergantung pada penyedia data komersial asing yang aksesnya dapat dibatasi oleh pertimbangan geopolitik maupun komersial di masa mendatang. Selain investasi pada infrastruktur satelit, migrasi menuju arsitektur *cloud* GIS juga menjadi kebutuhan mendesak, mengingat volume data yang harus diproses dari berbagai sumber sensor sebagaimana telah dipetakan pada Tabel 2 memerlukan kapasitas komputasi dan penyimpanan yang jauh melampaui kapabilitas infrastruktur *on-premise* konvensional. Pendekatan *cloud* GIS yang dipadukan dengan kapabilitas *edge computing* pada titik-titik pengumpulan data, sebagaimana diilustrasikan oleh konsep *Marine IoT* dengan pemrosesan tepi berbasis UAV (Jung et al., 2023), menawarkan arsitektur hybrid yang mampu menyeimbangkan antara kebutuhan pemrosesan terdesentralisasi untuk respons cepat dan kebutuhan analisis terpusat untuk pengambilan keputusan strategis jangka panjang.

Pemanfaatan kecerdasan buatan dan big data analytics dalam pengembangan SIG nasional Indonesia sebaiknya mengadopsi lintasan perkembangan yang telah dipetakan pada Tabel 1, yaitu bergerak secara bertahap dari kapabilitas analitik cerdas menuju kapabilitas otonom, tanpa melompati tahapan pematangan infrastruktur dan kepercayaan pengguna yang menjadi prasyarat keberhasilan adopsi *Autonomous* GIS. Kajian mengenai keseimbangan antara akurasi, transparansi, dan kepercayaan dalam sistem pendukung keputusan berbasis AI menegaskan bahwa adopsi teknologi yang terlalu cepat tanpa membangun fondasi kepercayaan pengguna justru dapat menghasilkan resistensi institusional yang menghambat pemanfaatan teknologi secara optimal (Kovari, 2024). Konsep *digital twin*, yang memungkinkan representasi virtual dari kondisi maritim secara *real-time* untuk keperluan simulasi dan perencanaan skenario, juga berpotensi menjadi arah pengembangan lanjutan setelah fondasi integrasi data dan interoperabilitas kelembagaan tercapai, meskipun implementasi konsep ini memerlukan kematangan data historis dan *real-time* yang sangat tinggi sebagai prasyaratnya. Peran Badan Riset dan Inovasi Nasional menjadi krusial dalam konteks ini sebagai lembaga yang dapat mengoordinasikan riset dan pengembangan teknologi

geospasial mutakhir, sementara Badan Informasi Geospasial berperan sebagai pemegang otoritas data dasar geospasial nasional yang menjadi fondasi bagi seluruh aplikasi SIG tematik, termasuk aplikasi untuk keamanan maritim.

Dimensi kebijakan nasional turut menjadi faktor penentu keberhasilan pengembangan SIG maritim yang tidak kalah penting dibandingkan dimensi teknologi itu sendiri. Kebijakan yang mengatur standar data, protokol berbagi data antarlembaga, serta mekanisme akuntabilitas terhadap keputusan yang dihasilkan oleh sistem berbasis kecerdasan buatan perlu dirumuskan secara eksplisit, mengingat keputusan yang dihasilkan oleh DSS maritim dapat berdampak signifikan terhadap operasi penegakan hukum yang menyangkut hak asasi dan keselamatan manusia. Kebutuhan akan kerangka kebijakan semacam ini sejalan dengan temuan mengenai pentingnya keahlian domain dalam mempercayai dan mengikuti rekomendasi sistem pendukung keputusan yang dapat dijelaskan (Bayer et al., 2021), yang mengindikasikan bahwa keberhasilan implementasi teknologi tidak dapat dilepaskan dari kesiapan kapasitas sumber daya manusia yang mengoperasikannya. Oleh karena itu, kebijakan pengembangan SIG nasional idealnya tidak hanya berfokus pada pengadaan teknologi, tetapi juga pada penguatan kapasitas kelembagaan, termasuk pelatihan analis geospasial yang memiliki keahlian domain memadai untuk dapat mengevaluasi secara kritis rekomendasi yang dihasilkan oleh sistem, alih-alih menerima seluruh rekomendasi tersebut secara pasif.

Untuk merangkum arah pengembangan SIG nasional yang telah dibahas, berikut disajikan roadmap konseptual yang menggambarkan tahapan pengembangan berdasarkan tingkat kematangan infrastruktur, kelembagaan, dan teknologi.

Tabel 4. Jenis Data yang Diintegrasikan dalam SIG Maritim

Tahap	Fokus Utama	Pemangku Kepentingan Kunci	Prasyarat Teknologi	Landasan Konseptual
Jangka Pendek	Interoperabilitas data antarlembaga, standardisasi format	BIG, Bakamla, KPLP, TNI AL, Pushidrosal	Basis data geospasial terpadu	Hu et al. (2023)
Jangka Menengah	Migrasi ke <i>cloud</i> GIS, penguatan <i>edge computing</i>	BRIN, BMKG, KKP, penyedia infrastruktur	<i>Marine</i> IoT, komputasi tepi	Jung et al. (2023)
Jangka Menengah-Panjang	Kemandirian data satelit nasional, integrasi SAR-optik	BIG, Pushidrosal, lembaga antariksa nasional	Satelit nasional, SAR & optik	Soldi et al. (2020); Emilien et al. (2021)
Jangka Panjang	Adopsi bertahap Autonomous GIS & AI generatif	BRIN, seluruh instansi maritim	Kapasitas analis terlatih, kerangka akuntabilitas AI	Li & Ning (2023); Bayer et al. (2021); Kovari (2024)
Jangka Panjang (Lanjutan)	<i>Digital twin</i> domain maritim, simulasi skenario	Seluruh pemangku kepentingan lintas sektor	Data historis- <i>real time</i> terintegrasi penuh	Thombre et al. (2020)

(Sumber: diolah dari berbagai literatur (Emmens et al., 2021; Liang et al., 2024; Soldi et al., 2020; Emilien et al., 2021; Ekaso et al., 2020; Quamar et al., 2023; Jung et al., 2023; Hu et al., 2023))

Roadmap pada Tabel 4 menegaskan suatu prinsip penting bahwa pengembangan SIG nasional untuk keamanan maritim tidak dapat dilakukan secara instan atau dengan mengadopsi teknologi paling mutakhir tanpa memperhatikan kesiapan fondasi yang mendasarinya. Urutan tahapan yang disajikan, mulai dari interoperabilitas data hingga adopsi *Autonomous* GIS dan *digital twin*, mencerminkan logika bahwa setiap tahapan lanjutan bertumpu pada keberhasilan tahapan sebelumnya, sehingga upaya melompati tahapan tertentu berisiko menghasilkan investasi teknologi yang tidak dapat dimanfaatkan secara optimal akibat lemahnya fondasi data maupun kelembagaan.

Pengamatan kritis yang perlu digarisbawahi adalah bahwa keterlibatan pemangku kepentingan pada setiap tahapan bersifat kumulatif, bukan tergantikan, artinya lembaga-lembaga yang berperan pada tahap awal seperti BIG dan Bakamla tetap harus terlibat aktif pada tahapan-tahapan selanjutnya, karena data dasar geospasial dan operasi penegakan hukum tetap menjadi elemen fundamental meskipun sistem telah bertransformasi menuju kapabilitas yang lebih otonom. Tantangan terbesar dalam implementasi roadmap semacam ini kemungkinan besar bukan terletak pada aspek teknologi, yang relatif dapat diakses melalui kerja sama internasional maupun pengembangan domestik, melainkan pada aspek koordinasi kelembagaan dan komitmen kebijakan jangka panjang yang konsisten, mengingat pengembangan kapabilitas sebagaimana digambarkan pada tabel tersebut memerlukan rentang waktu yang melampaui satu periode perencanaan pembangunan maupun satu periode kepemimpinan politik. Konsistensi kebijakan lintas periode inilah yang pada akhirnya akan menentukan apakah Indonesia mampu mentransformasikan potensi teknologi SIG-DSS yang telah dipetakan dalam kajian ini menjadi kapabilitas keamanan maritim yang nyata dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Kajian ini menegaskan bahwa transformasi Sistem Informasi Geografis dari instrumen visualisasi pasif menuju agen analitik yang semakin otonom membuka lintasan baru bagi penguatan keamanan maritim Indonesia, namun lintasan tersebut tidak dapat ditempuh secara linear tanpa memperhatikan kesiapan fondasi data, kelembagaan, dan kepercayaan pengguna. Sintesis atas berbagai literatur yang dikaji memperlihatkan suatu benang merah bahwa nilai strategis SIG sebagai *Decision Support System* tidak bersumber dari kecanggihan satu teknologi tunggal, melainkan dari kapasitasnya untuk merajut data yang terfragmentasi seperti AIS, radar, citra satelit, UAV, dan *Marine IoT*, menjadi satu kerangka pemahaman situasional yang koheren dan dapat ditindaklanjuti.

Prinsip verifikasi silang antarsumber data yang berulang kali muncul dalam pembahasan, mulai dari deteksi dark vessel hingga pemantauan pencemaran laut, mengindikasikan bahwa keandalan *Maritime Domain Awareness* bersifat *emergent* dan relasional, bukan melekat pada satu jenis sensor betapapun mutakhirnya. Temuan ini sekaligus mengungkap bahwa kesenjangan penelitian yang menjadi titik tolak kajian ini, yaitu minimnya sintesis lintas domain antara *Autonomous GIS*, DSS berbasis AI, dan konteks kelembagaan keamanan maritim nasional, memang nyata dan memerlukan kerangka konseptual seperti yang ditawarkan dalam kajian ini untuk menjembatani literatur teknis global dengan kebutuhan kebijakan domestik.

Secara akademik, kajian ini berkontribusi dengan menawarkan pemetaan konseptual yang menghubungkan evolusi teknologi SIG, arsitektur integrasi sensor multimodal, dan dimensi-dimensi spesifik *Maritime Domain Awareness* ke dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi, sesuatu yang sejauh ini masih jarang ditemukan dalam literatur nasional yang cenderung membahas masing-masing teknologi secara terisolasi. Kerangka ini diharapkan dapat menjadi rujukan awal bagi penelitian-penelitian lanjutan yang hendak mendalami interseksi antara geoinformatika, kecerdasan buatan, dan studi keamanan di Indonesia. Secara praktis, roadmap bertahap yang dirumuskan dalam kajian ini menawarkan panduan bagi pemangku kepentingan seperti Bakamla, TNI AL, BIG, dan BRIN untuk memprioritaskan investasi pada interoperabilitas data dan penguatan kapasitas analisis sebelum bergerak menuju adopsi teknologi otonom yang lebih kompleks, sehingga risiko investasi teknologi yang tidak termanfaatkan secara optimal dapat diminimalkan.

Kajian ini memiliki keterbatasan karena bersifat konseptual dan berbasis sintesis literatur global yang belum diverifikasi melalui data empiris spesifik konteks Indonesia. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada studi kasus implementasi SIG-DSS pada instansi maritim tertentu, evaluasi tingkat kepercayaan operator terhadap rekomendasi sistem berbasis AI di lapangan, serta kajian kuantitatif mengenai efektivitas integrasi data multisensor terhadap penurunan angka pelanggaran di perairan Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Akinboyewa, T., Li, Z., Ning, H., & Lessani, M. (2024). GIS Copilot: Towards an autonomous GIS agent for spatial analysis. *International Journal of Digital Earth*, 18. <https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2497489>
- Bayer, S., Gimpel, H., & Markgraf, M. (2021). The role of domain expertise in trusting and following explainable AI decision support systems. *Journal of Decision Systems*, 32, 110–138. <https://doi.org/10.1080/12460125.2021.1958505>
- Ekaso, D., Nex, F., & Kerle, N. (2020). Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. *Geo-Spatial Information Science*, 23, 165–181. <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1710437>
- Elhashash, M., Albanwan, H., & Qin, R. (2022). A Review of Mobile Mapping Systems: From Sensors to Applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22. <https://doi.org/10.3390/s22114262>
- 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>
- Emmens, T., Amrit, C., Abdi, A., & Ghosh, M. (2021). The promises and perils of Automatic Identification System data. *Expert Syst. Appl.*, 178, 114975. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114975>
- Gil, M., Wróbel, K., Montewka, J., & Goerlandt, F. (2020). A bibliometric analysis and systematic review of shipboard Decision Support Systems for accident prevention. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104717>
- 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>
- Han, X., Armenakis, C., & Jadidi, M. (2021). Modeling Vessel Behaviours by Clustering AIS Data Using Optimized DBSCAN. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su13158162>
- Hu, J., Liu, R., Hong, D., Camero, A., Yao, J., Schneider, M., Kurz, F., Segl, K., & Zhu, X. (2023). MDAS: a new multimodal benchmark dataset for remote sensing. *Earth System Science Data*. <https://doi.org/10.5194/essd-15-113-2023>
- 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>
- Jung, S., Jeong, S., Kang, J., & Kang, J. (2023). Marine IoT Systems With Space–Air–Sea Integrated Networks: Hybrid LEO and UAV Edge Computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 10, 20498–20510. <https://doi.org/10.1109/jiot.2023.3287196>
- Kontopoulos, I., Varlamis, I., & Tserpes, K. (2020). A distributed framework for extracting maritime traffic patterns. *International Journal of Geographical Information Science*, 35, 767–792. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1792914>

- Kovari, A. (2024). AI for Decision Support: Balancing Accuracy, Transparency, and Trust Across Sectors. *Inf.*, 15, 725. <https://doi.org/10.3390/info15110725>
- 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>
- Liang, M., Su, J., Liu, R. W., & Lam, J. S. L. (2024). AISClean: AIS data-driven vessel trajectory reconstruction under uncertain conditions. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117987>
- Murray, B., & Perera, L. (2021). An AIS-based deep learning framework for regional ship behavior prediction. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 215, 107819. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107819>
- Ning, H., Li, Z., Akinboyewa, T., & Lessani, M. (2024). An autonomous GIS agent framework for geospatial data retrieval. *International Journal of Digital Earth*, 18. <https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2458688>
- Patel, K., Bhatt, C., & Mazzeo, P. (2022). Deep Learning-Based Automatic Detection of Ships: An Experimental Study Using Satellite Images. *Journal of Imaging*, 8. <https://doi.org/10.3390/jimaging8070182>
- Quamar, M., Al-Ramadan, B., Khan, K., 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>
- Sharma, S., Beslity, J. O., Rustad, L., Shelby, L., Manos, P., Khanal, P., Reinmann, A., & Khanal, C. (2024). Remote Sensing and GIS in Natural Resource Management: Comparing Tools and Emphasizing the Importance of In-Situ Data. *Remote. Sens.*, 16, 4161. <https://doi.org/10.3390/rs16224161>
- Soldi, G., Gaglione, D., Forti, N., Simone, A., Daffinà, F., Bottini, G., Quattrocioni, D., Millefiori, L., Braca, P., Carniel, S., Willett, P., Iodice, A., Riccio, D., & Farina, A. (2020). Space-Based Global Maritime Surveillance. Part I: Satellite Technologies. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36, 8–28. <https://doi.org/10.1109/maes.2021.3070862>
- Thombre, S., Zhao, Z., Ramm-Schmidt, H., Garcia, J., Malkamaki, T., Nikolskiy, S., Hammarberg, T., Nuortie, H., Bhuiyan, M., Särkkä, S., & Lehtola, V. (2020). Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23, 64–83. <https://doi.org/10.1109/tits.2020.3023957>
- Yang, Y., Yuan, G., & Li, J. (2024). SFFNet: A Wavelet-Based Spatial and Frequency Domain Fusion Network for Remote Sensing Segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–17. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2024.3427370>
- Zhang, Y., Wei, C., He, Z., & Yu, W. (2024). GeoGPT: An assistant for understanding and processing geospatial tasks. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 131, 103976. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103976>
- Zissis, D., Chatzikokolakis, K., Spiliopoulos, G., & Vodas, M. (2020). A Distributed Spatial Method for Modeling Maritime Routes. *IEEE Access*, 8, 47556–47568. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2979612>