

Integrasi Sistem Informasi Geospasial untuk Penguatan Keamanan Maritim Indonesia: Perspektif Decision Support System dan Transformasi Digital

Dwi Wahyu Febriyanto^{1*}, Hidayaturrehman², Amin Lestari³, Nefra Firdaus⁴,
Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶, Lukman Yudho Prakoso⁷

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

dwi.febriyanto@km.idu.ac.id¹, hidayaturrehman@idu.ac.id², amin.lestari@idu.ac.id³,
nefra.firdaus@idu.ac.id⁴, harri.dolli@idu.ac.id⁵, yuniar@idu.ac.id⁶, lukman.prakoso@idu.ac.id⁷

Article Info

Article history:

Received : 13 July, 2026

Revised : 13 July, 2026

Accepted : 14 July, 2026

Kata Kunci:

Analisis Spasial,
Big Data Geospasial;
Indonesia Emas 2045;
Laut Natuna Utara;
Maritime Domain Awareness;
Transformasi Digital.

Abstrak

Wilayah laut Indonesia yang sangat luas menghadirkan tantangan pengawasan yang tidak sebanding dengan kapasitas metode konvensional yang selama ini digunakan, sementara ancaman seperti *illegal fishing*, penyelundupan, perdagangan manusia, pencemaran laut, dan pelanggaran wilayah terus berlangsung di wilayah laut Indonesia. Penelitian ini bertujuan menganalisis peran Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai instrumen pendukung keputusan dalam mendukung keamanan maritim nasional. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif berbasis studi pustaka, dengan sumber data berupa artikel jurnal ilmiah terindeks Scopus kategori Q1 dan Q2 yang relevan dengan tema keamanan maritim dan teknologi geospasial. Hasil kajian menunjukkan bahwa SIG telah bergeser fungsinya dari sekadar alat pemetaan menjadi *Decision Support System* yang mengintegrasikan data spasial dan nonspasial dari berbagai sumber, termasuk citra satelit, sistem identifikasi otomatis kapal, radar, dan sensor wahana tanpa awak, sehingga membentuk kesadaran situasional laut yang lebih menyeluruh. Penerapan analisis spasial pada studi kasus Laut Natuna Utara memperlihatkan bahwa pemetaan kerawanan berbasis data mampu mengidentifikasi wilayah yang selama ini luput dari pengawasan meskipun tidak menunjukkan riwayat pelanggaran yang tinggi. Rancangan sistem informasi geospasial yang terintegrasi lintas instansi terbukti dapat mengurangi duplikasi data dan memperkuat koordinasi antarlembaga keamanan maritim. Selain itu, disusun pula strategi transformasi digital jangka panjang yang mencakup penguatan infrastruktur teknologi, kesiapan sumber daya manusia, kebijakan nasional, keamanan siber, serta integrasi dengan kecerdasan buatan, big data, *Internet of Things*, komputasi awan, dan digital twin, sebagai kerangka menuju Indonesia Emas 2045. Penelitian ini merekomendasikan pembentukan badan koordinasi data geospasial maritim nasional serta pergeseran strategi pengawasan dari pola konvensional menuju pendekatan berbasis analisis risiko keruangan.

PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia memiliki wilayah laut seluas lebih dari 6,4 juta kilometer persegi dengan garis pantai yang membentang lebih dari 108 ribu kilometer. Luasnya wilayah ini menjadikan laut bukan sekadar batas administratif, melainkan ruang hidup, jalur perdagangan, sekaligus sumber penghidupan bagi sebagian besar penduduknya. Di balik kekayaan tersebut, tersimpan pula kerentanan yang tidak kecil. *Illegal fishing*, penyelundupan barang dan manusia, pencemaran laut, hingga pelanggaran wilayah oleh kapal asing masih terus berulang di berbagai perairan, sementara kapasitas pengawasan yang tersedia belum sebanding dengan luasnya area yang harus dijaga (Talpur et al., 2025).

Persoalan tersebut bertambah rumit karena cara pengawasan yang selama ini dijalankan, seperti patroli kapal dan pemantauan langsung oleh personel, memiliki batas kemampuan yang sulit ditembus hanya dengan menambah jumlah kapal atau anggota patroli. (Talpur et al., 2025) mengidentifikasi setidaknya tiga kelemahan utama dari pendekatan semacam ini: adanya celah pengawasan di perairan lepas, kemudahan kapal menghindari deteksi dengan mematikan sinyal identifikasinya, serta ketidakanggupan mengolah data yang terus membesar dalam waktu yang memadai. Kelemahan ini bukan sekadar dugaan. (Thompson et al., 2026) menemukan bahwa cukup banyak kapal yang seharusnya bisa dilacak justru menghilang dari sistem identifikasi otomatis, dan pola ini paling sering muncul justru ketika persaingan ekonomi di laut sedang memuncak. Kondisi semacam inilah yang mendorong munculnya kebutuhan pada pendekatan yang berbeda, salah satunya melalui teknologi geospasial. Sistem Informasi Geografis memungkinkan berbagai sumber data, baik citra satelit, sinyal identifikasi kapal, radar, maupun sensor dari wahana tanpa awak, disatukan dan diolah menjadi gambaran situasi laut yang lebih menyeluruh dan bisa segera ditindaklanjuti (Ray et al., 2019; Karountzos et al., 2023).

Namun persoalan yang ingin diangkat dalam penelitian ini tidak berhenti pada ketersediaan teknologinya semata. Yang lebih menentukan justru bagaimana teknologi tersebut dirancang dan dikelola agar sungguh-sungguh berfungsi sebagai penopang pengambilan keputusan. Sejauh ini, data maritim di Indonesia masih tersebar di berbagai instansi tanpa keterhubungan yang memadai. Badan Keamanan Laut, TNI Angkatan Laut, dan Kementerian Kelautan dan Perikanan masing-masing mengumpulkan datanya sendiri, sehingga tidak jarang muncul duplikasi informasi sekaligus celah koordinasi yang sulit dijematani. Di sisi lain, sejumlah wilayah strategis seperti Laut Natuna Utara menghadapi ancaman yang bersifat sangat spesifik akibat tumpang tindih klaim wilayah, sehingga menuntut pendekatan analisis spasial yang terukur, bukan sekadar mengandalkan pengalaman dan intuisi di lapangan (Handrisal et al., 2026; Adi et al., 2026).

Dari latar belakang tersebut, penelitian ini disusun untuk menjawab empat pertanyaan. Pertama, sejauh mana Sistem Informasi Geografis dapat berfungsi sebagai *Decision Support System* dalam mendukung keamanan maritim Indonesia, termasuk konsep dasarnya, cara mengintegrasikan data spasial dan nonspasial, ragam sumber data yang dapat dimanfaatkan, serta kontribusinya terhadap *Maritime Domain Awareness*. Kedua, bagaimana analisis spasial dapat diterapkan untuk memetakan wilayah rawan ancaman laut, dengan Laut Natuna Utara sebagai studi kasus, mulai dari karakteristik geografisnya, variabel spasial yang relevan, metode overlay yang digunakan, hingga penyusunan peta kerawanan dan penentuan prioritas pengawasan. Ketiga, bagaimana model Sistem Informasi Geospasial Nasional dapat dirancang untuk mengintegrasikan data lintas instansi, mencakup arsitektur sistemnya, sumber datanya, mekanisme interoperabilitas, analisis big data geospasial, hingga pemanfaatan kecerdasan buatan di

dalamnya (Strain et al., 2006). Keempat, bagaimana strategi pengembangan Sistem Informasi Geografis nasional dapat dirumuskan untuk mendukung keamanan maritim Indonesia menuju Indonesia Emas 2045, dengan mempertimbangkan tantangan teknologi, kebutuhan sumber daya manusia, arah kebijakan nasional, keamanan siber, serta integrasinya dengan berbagai teknologi mutakhir (Dold & Groopman, 2017).

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih utuh mengenai peran Sistem Informasi Geografis dalam mendukung keamanan maritim Indonesia, sekaligus merumuskan langkah-langkah yang dapat menjadi pertimbangan bagi para pemangku kepentingan terkait. Alur pembahasannya bergerak dari konsep dasar, turun ke penerapan pada satu wilayah spesifik, kemudian naik lagi ke rancangan sistem yang lebih luas, dan diakhiri dengan strategi jangka panjang. Dengan susunan seperti ini, penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya diskusi akademik, tetapi juga memberi kontribusi yang lebih mbumi bagi upaya penguatan pertahanan dan keamanan maritim Indonesia ke depan.

METODE PENELITIAN

Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan basis studi pustaka (*literature review*). Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada sifat pertanyaan penelitian yang lebih menuntut sintesis konsep, analisis pola dari temuan penelitian terdahulu, dan perumusan rancangan strategis, dibandingkan pengujian hipotesis melalui pengumpulan data primer di lapangan. Data yang digunakan sepenuhnya bersifat sekunder, bersumber dari artikel jurnal ilmiah terindeks Scopus dengan kategori Q1 dan Q2, laporan resmi instansi terkait, serta dokumen kebijakan yang relevan dengan keamanan maritim dan Sistem Informasi Geografis.

Sumber data dikelompokkan ke dalam beberapa kategori sesuai kebutuhan tiap subbahasan. Untuk pembahasan mengenai konsep SIG sebagai *Decision Support System* dan Maritime Domain Awareness, data bersumber dari kajian yang membahas arsitektur sistem informasi maritim dan penerapan kecerdasan buatan dalam pengawasan laut (Talpur et al., 2025; Ray et al., 2019; Thompson et al., 2026). Untuk pembahasan analisis spasial daerah rawan, data bersumber dari kajian yang secara spesifik membahas Laut Natuna Utara dan metode geospasial berbasis risiko ((Adi et al., 2026; Handrisal et al., 2026). Sementara untuk pembahasan desain sistem terintegrasi dan strategi transformasi digital, data bersumber dari kajian mengenai infrastruktur data spasial, interoperabilitas, big data geospasial, dan kembaran digital (Strain et al., 2006; Dold & Groopman, 2017).

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran sistematis pada basis data jurnal ilmiah, dengan kata kunci yang disesuaikan pada setiap subbahasan, antara lain *maritime security*, *geographic information system*, *maritime domain awareness*, *spatial data infrastructure*, dan *digital twin*. Artikel yang diperoleh kemudian disaring berdasarkan relevansi tema, tahun terbit, dan kualitas jurnal, dengan prioritas pada artikel yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir agar perkembangan teknologi yang dibahas tetap mutakhir, meskipun beberapa rujukan konseptual yang sudah mapan tetap dipertahankan karena relevansinya belum tergantikan.

Setiap artikel yang terpilih dibaca secara menyeluruh, tidak hanya pada bagian abstrak, untuk memastikan pemahaman yang akurat terhadap metode, temuan, dan konteks penerapannya. Poin-poin penting dari setiap artikel kemudian dicatat dan dipetakan sesuai subbahasan yang relevan, sehingga satu artikel dapat digunakan pada

lebih dari satu bagian pembahasan apabila memang isinya mendukung beberapa aspek sekaligus.

Teknik Analisis Data

Data yang telah terkumpul dianalisis secara deskriptif-analitis dengan cara membandingkan, menghubungkan, dan mensintesis temuan dari berbagai sumber. Pada bagian pembahasan mengenai konsep SIG dan integrasi data, analisis dilakukan dengan menelusuri kesamaan dan perbedaan pendekatan antarstudi, misalnya dalam membandingkan metode ESDA dan LISA (Karountzos et al., 2023) dengan pendekatan *Kernel Density Estimation* (Adi et al., 2026), untuk memahami bagaimana masing-masing metode memetakan pola keruangan. Pada bagian pembahasan mengenai studi kasus Laut Natuna Utara, analisis dilakukan dengan menyusun kembali variabel spasial, metode overlay, dan hasil klasifikasi risiko yang telah dilaporkan dalam literatur, kemudian menghubungkannya dengan implikasi terhadap prioritas pengawasan. Pada bagian pembahasan mengenai desain sistem terintegrasi dan strategi transformasi digital, analisis dilakukan dengan menyusun kerangka konseptual berdasarkan prinsip-prinsip yang telah teruji pada konteks lain, seperti infrastruktur data spasial kelautan di Australia dan Eropa, kemudian mengadaptasikannya pada konteks kelembagaan Indonesia.

Validitas Data

Validitas data dijaga melalui triangulasi sumber, yaitu membandingkan temuan dari beberapa artikel yang berbeda untuk memastikan konsistensi informasi sebelum digunakan sebagai dasar argumen. Apabila ditemukan perbedaan pandangan antarsumber, perbedaan tersebut disajikan secara eksplisit dalam pembahasan alih-alih dipilih salah satu secara sepihak. Selain itu, seluruh sumber yang digunakan berasal dari jurnal terindeks dan bereputasi, sehingga kredibilitas metodologis dari masing-masing studi rujukan relatif terjaga. Untuk data yang bersifat spesifik pada konteks Indonesia, seperti kondisi Laut Natuna Utara, digunakan lebih dari satu sumber guna memastikan gambaran yang diperoleh tidak bertumpu pada satu perspektif tunggal saja.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ancaman terhadap keamanan maritim Indonesia pada dasarnya adalah persoalan ruang, di mana ancaman itu muncul, seberapa sering, dan bagaimana keterbatasan sumber daya pengawasan dapat dialokasikan secara tepat ke titik-titik tersebut. Pertanyaan semacam ini tidak dapat dijawab hanya dengan menambah jumlah kapal patrol atau personel, melainkan memerlukan kemampuan membaca pola keruangan dari data yang selama ini tersebar dan tidak saling terhubung. Sistem Informasi Geografis menjadi jembatan bagi persoalan tersebut, bukan sebagai alat bantu administratif, melainkan sebagai infrastruktur analitis yang memungkinkan data mentah dari berbagai sensor dan instansi diubah menjadi Keputusan operasional.

Luas laut Indonesia yang mencapai 6,4 juta km² bukan hanya sekadar angka statistik, ini adalah beban pengawasan nyata bagi aparat keamanan maritim di Indonesia. Illegal fishing, penyelundupan, perdagangan manusia, pencemaran laut, dan pelanggaran wilayah terjadi di ruang yang begitu luas sehingga metode konvensional seperti patrol kapal dan observasi manusia sulit menjangkaunya secara menyeluruh. (Talpur et al., 2025) mencatat setidaknya tiga keterbatasan mendasar dari pendekatan tradisional ini, adanya keterbatasan area cakupan (*coverage gaps*) di wilayah laut lepas, kerentanan terhadap taktik penghindaran seperti manipulasi sinyal AIS dan ketidakmampuan memproses banyaknya data yang terus berkembang secara real time. Sejak inilah Sistem Informasi Geografis (SIG) mulai bergeser fungsinya dari sekadar alat pemetaan menjadi instrumen analitis yang menopang pengambilan keputusan di ruang keamanan maritim.

SIG pada dasarnya adalah sistem yang mengumpulkan, menyimpan, menganalisis, dan memvisualisasikan data yang memiliki referensi keruangan. Namun dalam praktik keamanan maritim, fungsi SIG lebih dari itu. SIG berperan sebagai *Decision Support System* (DSS) yang membantu BAKAMLA, TNI AL, maupun KKP untuk merumuskan langkah operasional berdasarkan data spasial, bukan sekadar intuisi lapangan. (Karountzos et al., 2023) misalnya, memperlihatkan bagaimana kerangka kerja SIG-DSS dapat dipakai untuk mengevaluasi dan merestrukturisasi jaringan transportasi laut secara sistematis, dengan bantuan teknik *Exploratory Spatial Data Analysis* (ESDA) dan *Local Indicators of Spatial Association* (LISA) untuk menemukan pola secara statistik. SIG memungkinkan analisis memvisualisasikan area rawan, menentukan prioritas pengawasan, dan menguji skenario ancaman sebelum kejadian sesungguhnya terjadi di lapangan.

Yang membuat SIG bekerja efektif sebagai DSS maritim adalah kemampuannya menyatukan dua jenis data yang selama ini sering tidak terintegrasi. Data spasial (koordinat, jalur pelayaran, batas wilayah) dan data nonspasial (identitas kapal, jenis muatan, Riwayat pelanggaran, laporan intelijen). Ray et al. (2019) memberi contoh konkret soal ini melalui basis data maritim terpadu yang mereka bangun, mencakup empat kategori data sekaligus, data navigasi dari AIS (posisi, kecepatan, arah), data kapal (registrasi, jenis, dimensi), data geografis (pelabuhanm garis Pantai, batas ZEE, kawasan lindung laut), dan data lingkungan (gelombang, cuaca). Semua kategori data ini disimpan dalam satu basis data spasial realasional berbasis PostgreSQL/PostGIS, sehingga memungkinkan analisis silang, misalnya menyatukan posisi kapal tertentu dengan status zona lindung atau kondisi cuaca saat itu. Pendekatan semacam ini pada dasarnya adalah wujud nyata dari dua komponen *Maritime Domain Awareness* yang disebut Thompson et al. (2026) : *data fusion* dan *data analysis*, yaitu proses mengubah data-data statis dan dinamis menjadi informasi yang bisa langsung dipahami dan ditindaklanjuti.

Tidak ada satu jenis sensor yang cukup untuk menggambarkan situasi laut secara utuh, masing-masing memiliki keunggulan dan titik lemahnya sendiri. Tabel 1 merangkum karakteristik sumber data yang paling umum digunakan, berdasarkan tinjauan Talpur et al. (2025), Ray et al. (2019), dan Thompson et al. (2026).

Tabel 1. Karakteristik sumber data utama dalam SIG Maritim

Sumber Data	Karakteristik Utama	Keunggulan	Keterbatasan
Citra Satelit Optik (RGB)	Menangkap cahaya tampak, resolusi spasial tinggi	Detail visual jenis dan bentuk kapal	Tidak efektif saat malam hari/berawan
SAR (<i>Synthetic Aperture Radar</i>)	Gelombang mikro, menembus awan	Deteksi segala cuaca dan malam hari	Biaya dan kompleksitas pemrosesan tinggi
AIS (<i>Automatic Identification System</i>)	Transmisi radio VHF, ID unik (MMSI)	Jangkauan luas, murah, resolusi temporal tinggi	Dapat dimatikan/dimanipulasi (<i>dark vessel</i>)
VMS (<i>Vessel Monitoring System</i>)	Transmisi satelit, wajib untuk kapal tertentu	Akurasi tinggi, standar penegakan hukum	Akses terbatas/rahasia, biaya tinggi
Radar Pesisir (<i>Coastal Radar</i>)/Radar Kapal	Gelombang radio jarak menengah	Deteksi objek tanpa AIS	Jangkauan terbatas garis pandang (<i>Line of Sight</i>)
Drone/UAV & USV	Sensor kamera, termal, LiDAR	Resolusi tinggi, fleksibel, <i>real time</i>	Daya jelajah dan waktu terbatas

(Sumber: diolah penulis. 2026)

Salah satu temuan yang cukup mengejutkan datang dari (Thompson et al., 2026) yang meneliti perairan selat Bering, bahwa sebanyak 11%-15% kapal yang terdeteksi VMS ternyata sama sekali tidak muncul di data AIS, dan puncaknya justru ketika musim penangkapan ikan sedang terjadi, hal ini mengindikasikan kemungkinan besar AIS

dimatikan secara sengaja untuk menyembunyikan lokasi tangkapan yang menguntungkan. Studi yang sama juga menemukan pola sebaran yang berbeda, AIS lebih andal dalam menangkap aktivitas di perairan dangkal dekat pantai, sedangkan VMS justru lebih kuat di perairan dalam dekat batas maritim internasional. Temuan ini secara langsung mengonfirmasi apa yang ditekankan Talpur et al. (2025) mengenai pentingnya *multimodal data fusion* yang menggabungkan citra satelit, AIS, radar, dan senso pada UAV/USV, karena pada akhirnya memang tidak ada satu sensor pun yang bisa diandalkan sepenuhnya dalam seluruh kondisi operasional.

Manfaat SIG dalam *Maritime Domain Awareness* (MDA)

Dalam penelitiannya Thompson et al. (2026) mendefinisikan MDA sebagai pemahaman efektif atas seluruh fitur di ranah kelautan yang berpotensi memengaruhi keselamatan manusia, keamanan, ekonomi, atau lingkungan, dengan empat pilar : *data fusion*, *data analysis*, *awareness*, dan *engagement* lintas instansi. Di sinilah SIG menemukan posisinya yang paling strategis sebagai tulang punggung teknis yang menopang keempat pilar tersebut sekaligus. (Talpur et al., 2025) menggambarkan bagaimana arsitektur MDA modern bekerja, aliran data dari satelit, sensor, AIS, hingga *Open Source Intelligent* (OSINT) masuk ke satu jalur pemrosesan. Selanjutnya akan dianalisis di *edge computing* atau *cloud* untuk mendeteksi dan melacak kapal, mengklasifikasikan perilaku, serta menandai anomali secara *real time*, lalu hasilnya ditampilkan pada peta georeferensi yang bisa langsung dibaca oleh operator di lapangan. Sistem NATO VATOZ adalah salah satu contoh nyata, hasil deteksi visual ditampilkan langsung di atas peta operasional bersama (*common operational picture*). Contoh lain adalah jaringan *acoustic buoys* berbasis AI yang mampu mendeteksi kapal cepat dengan presisi hingga 90%. Dari sini terlihat bahwa peran SIG dalam MDA sudah jauh melampaui fungsi pemetaan statis, SIG menjadi mesin yang terus-menerus mengubah data mentah dari berbagai sensor menjadi Gambaran situasional yang *real time* dan dapat ditindaklanjuti kapan saja.

Pengembangan SIG Nasional untuk Pertahanan Maritim : Tinjauan Literatur

Dari keempat referensi yang dikaji, terlihat arah perkembangan SIG maritim yang cukup konsisten. (Ray et al., 2019) memperlihatkan bagaimana basis data maritim terpadu yang mengonsolidasikan data navigasi, kapal, geografis, dan lingkungan dalam satu arsitektur lintas instansi dapat dibangun secara teknis. (Thompson et al., 2026) justru menunjukan sisi lain, bahwa ketergantungan pada satu sumber data, terutama AIS, membawa risiko yang nyata, dan kombinasi AIS dengan VMS terbukti memberi gambaran situasi laut yang jauh lebih lengkap dibandingkan mengandalkan salah satunya saja. (Karountzos et al., 2023) menambahkan dimensi metodologis, memperlihatkan bahwa teknik analisis spasial statistik seperti ESDA dan LISA membuat identifikasi *cluster* dan pola anomaly menjadi lebih objektif dan terukur, bukan sekadar berdasarkan pengamatan kualitatif. Sementara itu (Talpur et al., 2025) mendokumentasikan tren yang sedang berjalan saat ini, yaitu integrasi kecerdasan buatan ke dalam arsitektur SIG untuk mengotomatisasi deteksi objek dan anomali secara *real time* meskipun tantangan seperti keterbatasan data, kebutuhan *computing edge*, dan *explainability* model AI masih menjadi persoalan terbuka yang belum tuntas terjawab. Keempat temuan ini bersama-sama menggambarkan *landscape* SIG maritim yang sedang berkembang, dari sistem pemetaan pasif menuju sistem analitik multisumber yang kian terintegrasi dengan kecerdasan buatan.

Analisis Spasial Daerah Rawan Ancaman Laut : Studi Kasus Laut Natuna Utara

Bagian ini menurunkan pembahasan SIG dari konsep umum ke satu wilayah konkret, yaitu Laut Natuna Utara. Wilayah ini dipilih karena klaim historis Tiongkok lewat *nine-*

dash line bersinggungan langsung dengan Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) Indonesia yang sah menurut UNCLOS 1982. (Handrisal et al., 2026) menyebutnya sebagai ruang tata kelola yang berada di persimpangan kontestasi geopolitik, dinamika ekonomi transnasional, dan fragmentasi kelembagaan, sehingga pendekatan penegakan hukum konvensional saja sulit mencukupi.

Natuna Utara terletak di ujung barat laut Indonesia, berbatasan langsung dengan Laut Cina Selatan, dan berada di jalur pelayaran internasional yang menghubungkan Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Posisi ini membuatnya menjadi salah satu perairan tersibuk dan terkaya sumber daya perikanannya di kawasan, sekaligus paling rentan disusupi kapal ikan asing. Adi et al. (2026) mencatat bahwa luasnya wilayah tanggung jawab (*Area of Responsibility*) membuat keterbatasan bahan bakar, ketersediaan kapal patroli, dan daya jelajah pesawat pengawas menciptakan celah pengawasan yang cukup lebar, mirip dengan persoalan celah cakupan (*coverage gaps*) yang secara umum dijelaskan (Talpur et al., 2025).

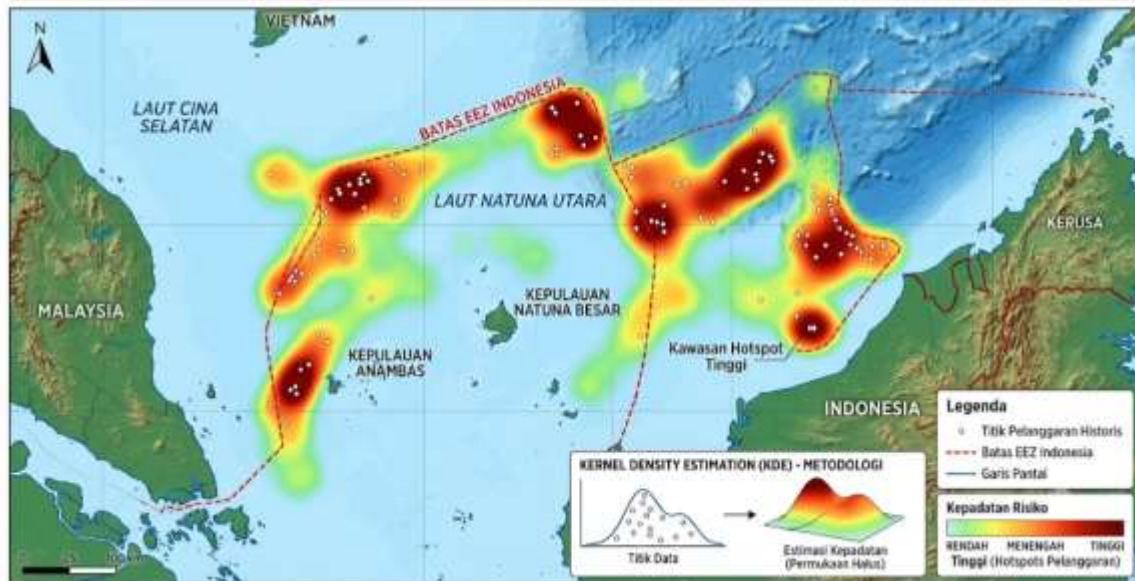
Le Tixerant et al. (2018) menunjukkan bahwa data AIS dapat diolah menjadi beberapa variabel spasial sekaligus, seperti kepadatan lalu lintas kapal, jalur pelayaran, dan zona yang diduga menjadi lokasi penangkapan ikan ilegal. Namun mengandalkan AIS saja punya risiko, sebagaimana ditunjukkan (Thompson et al., 2026), karena kapal dapat "menghilang" dari AIS terutama saat waktu tangkapan sedang berlangsung. (Adi et al., 2026) membangun model risiko di Natuna Utara berdasarkan 159 catatan pelanggaran maritim sepanjang 2021 sampai 2023, lalu mengolahnya melalui teknik *Kernel Density Estimation* (KDE). Tabel 2 merangkum variabel spasial yang umum digunakan dalam pendekatan semacam ini.

Tabel 2. Variabel spasial untuk analisis kerawanan di Laut Natuna Utara

Variabel Spasial	Sumber Data	Peran dalam Analisis
Titik pelanggaran historis (2021-2023)	Laporan patroli, catatan pelanggaran	Basis kepadatan risiko (KDE)
Kepadatan lalu lintas kapal	AIS	Identifikasi jalur ramai versus sepi pengawasan
Jarak dari garis pangkal/batas ZEE	Data geografis batas maritim	Penentuan sensitivitas wilayah
Pola pergerakan tidak wajar	AIS, radar	Indikasi aktivitas mencurigakan
Zona penangkapan ikan potensial	Citra satelit, data oseanografi	Estimasi daya tarik ekonomi wilayah
Cakupan patroli eksisting	Data operasional Bakamla/TNI Angkatan Laut	Identifikasi celah pengawasan

(Sumber: diolah penulis, 2026)

KDE menjadi pendekatan overlay utama yang diterapkan di Natuna Utara. Metode ini mengubah titik-titik pelanggaran yang tersebar menjadi permukaan secara terus-menerus, menjadi peta kepadatan yang memperlihatkan wilayah tempat pelanggaran cenderung berkumpul. (Adi et al., 2026) membuatnya dengan tahapan analisis strategis yang lain, yaitu PESTLE-SWOT dan *Analytical Network Process* untuk pemilihan platform pengawasan, sebelum hasil KDE digabungkan dengan optimasi jalur multiobjektif. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip ESDA/LISA yang dikembangkan (Karountzos et al., 2023), yaitu mengubah data titik yang berserakan menjadi pola keruangan yang teruji secara statistik. Pendekatan berbeda ditunjukkan (Zhao et al., 2018), yang membangun simulasi berbasis agen untuk menghitung probabilitas pertemuan antarkapal di Laut Bohai, Tiongkok, dengan memperlakukan tiap kapal sebagai agen yang perilaku navigasinya dipantau algoritma SIG. Seluruh proses *overlay* ini pada akhirnya bertumpu pada kualitas basis data AIS yang tersusun rapi, sebagaimana ditekankan (Ou & Zhu, 2008) maupun (Ray et al., 2019).



Gambar 1. Ilustrasi Peta Kepadatan Risiko (*Kernel Density Estimation*)

(Sumber: diolah penulis, diilustrasikan AI (2026))

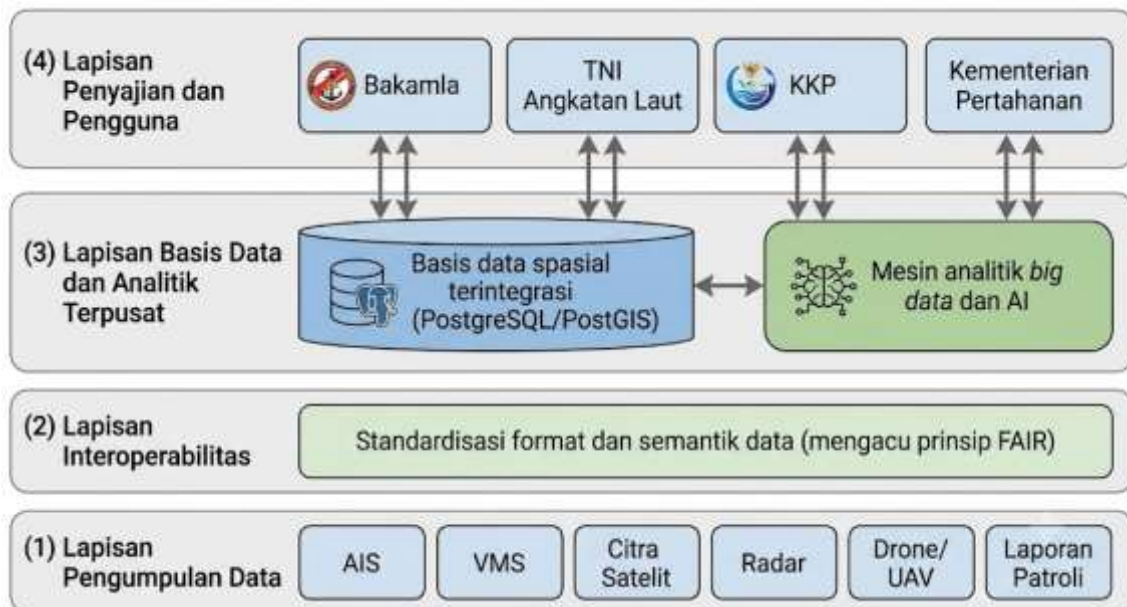
Hasil *overlay* biasanya divisualisasikan menjadi peta yang pembagian wilayahnya berdasarkan beberapa kelas risiko. (Adi et al., 2026) mengklasifikasikan wilayah tanggung jawab di Natuna Utara menjadi zona risiko tinggi dan zona risiko rendah, dengan temuan bahwa sekitar 83,3% dari total luas wilayah justru masuk kategori risiko rendah menurut kepadatan pelanggaran historis. Namun "risiko rendah" di sini bukan berarti aman, melainkan kawasan yang jarang terpantau sehingga aktivitas ilegal berpeluang lebih besar terjadi tanpa terdeteksi. Pola ini sejalan dengan fenomena kapal "gelap" (*dark vessel*) yang diungkap (Thompson et al., 2026), yaitu ketiadaan data bukan berarti ketiadaan ancaman.

Dari peta kerawanan tersebut, prioritas pengawasan dapat disusun lebih terarah dibandingkan pola patroli seragam. Rute UAV yang dioptimalkan (Adi et al., 2026) menjangkau baik *cluster* risiko tinggi maupun wilayah risiko rendah yang jarang terpantau, dengan hasil peningkatan efisiensi deteksi ancaman sebesar 43,7% dan cakupan risiko sebesar 89,3% dibandingkan rute patroli konvensional. Total rute sepanjang 2.447 kilometer masih dapat diselesaikan dalam 13,59 jam waktu terbang. (Zhou et al., 2020). menekankan pentingnya kerangka perencanaan jalur patroli yang sistematis, bukan rute yang disusun berdasarkan kebiasaan semata. Namun data spasial dan rute optimal saja tidak cukup tanpa dukungan kelembagaan yang solid. (Handrisal et al., 2026) mengevaluasi bagaimana Satgas 115 di bawah sistem penegakan hukum satu atap (*one roof enforcement*) berupaya mengintegrasikan berbagai instansi maritim Indonesia, meski kontribusinya terhadap ketahanan maritim jangka panjang masih perlu dikaji lebih jauh. Hal ini sejalan dengan gagasan MDA yang menekankan keterlibatan lintas instansi (Thompson et al., 2026). Verutes et al. (2020). menambahkan bahwa pada kondisi data historis terbatas, situasi yang lazim dijumpai di banyak perairan Indonesia, keterlibatan *stakeholder* lokal melalui SIG partisipatif dapat memperkaya keakuratan peta kerawanan, sejalan dengan model pengawasan berbasis SIG yang diterapkan Rosana et al. (2014) di perairan Indonesia Timur.

Persoalan yang melatarbelakangi bagian ini adalah fragmentasi data antarinstansi. Bakamla memiliki data patroli sendiri, TNI Angkatan Laut memiliki data pergerakan kapal sendiri, dan KKP memiliki data perikanan sendiri. (Handrisal et al., 2026) menyebut kondisi semacam ini sebagai fragmentasi kelembagaan, yaitu situasi ketika berbagai lembaga bekerja pada ruang yang sama tetapi dengan basis informasi yang terpisah.

Akibatnya adalah duplikasi data dan celah koordinasi yang justru melemahkan kesadaran situasional laut secara keseluruhan. Bagian ini mencoba merancang bagaimana sistem informasi geospasial nasional bisa menjembatani persoalan tersebut.

Strain et al. (2006) memperkenalkan konsep *Marine Spatial Data Infrastructure* (MSDI), yaitu kerangka infrastruktur data spasial yang secara khusus dirancang untuk mengintegrasikan data laut dari berbagai lembaga ke dalam satu sistem yang saling terhubung. Prinsip dasarnya sederhana, yaitu bukan setiap lembaga membangun basis data sendiri dari nol, melainkan seluruh lembaga berkontribusi dan mengakses satu infrastruktur data bersama yang mengikuti standar teknis yang sama. Arsitektur semacam ini idealnya terdiri atas beberapa lapisan, mulai dari lapisan pengumpulan data di tingkat operasional, lapisan penyimpanan dan pengolahan di tingkat pusat, hingga lapisan penyajian yang dapat diakses oleh pengguna di berbagai instansi sesuai kewenangannya. (Ray et al., 2019) memberikan contoh teknis yang cukup konkret soal ini melalui pengembangan basis data spasial relasional berbasis *PostgreSQL* dan *PostGIS*, yang menampung data navigasi, data kapal, data geografis, dan data lingkungan dalam satu skema terpadu. Arsitektur semacam ini dapat menjadi model dasar bagi sistem informasi geospasial nasional Indonesia, dengan penyesuaian pada skala dan kebutuhan koordinasi lintas instansi yang jauh lebih kompleks.



Gambar 2. Model arsitektur Sistem Informasi Geospasial Nasional untuk Keamanan Maritim
(Sumber: diolah penulis dan diilustrasikan AI (2026))

Sistem informasi geospasial terintegrasi pada dasarnya adalah kumpulan dari berbagai sumber data yang selama ini berjalan sendiri-sendiri. Sumber data tersebut mencakup citra satelit optik dan SAR, data AIS dan VMS, radar pesisir, sensor dari drone dan kapal tanpa awak, serta data lingkungan seperti gelombang dan cuaca (Talpur et al., 2025; Ray et al., 2019). Di luar data yang bersifat sensor, terdapat pula data administratif yang tidak kalah penting, seperti data batas wilayah, data registrasi kapal, dan data pelanggaran historis, sebagaimana ditunjukkan Adi et al. (2026) dalam membangun model risiko keruangan berbasis catatan pelanggaran maritim. Foglini & Grande, (2023), dalam kajian mereka atas MSDI di Laut Adriatik, menyoroti persoalan yang kerap luput dari perhatian, yaitu data geospasial kelautan sering bersifat multidisiplin, tidak seragam, dan terfragmentasi antarlembaga maupun antarnegara. Mereka mengusulkan penerapan prinsip FAIR, yaitu data yang mudah ditemukan, dapat diakses, dapat dipertukarkan, dan

dapat digunakan kembali, sebagai standar minimum agar data dari berbagai sumber dapat benar-benar digabungkan, bukan sekadar disimpan berdampingan.

Mengumpulkan data dari berbagai sumber ke satu tempat belum tentu membuat data tersebut bisa saling dipahami. Di sinilah persoalan interoperabilitas muncul. Brodeur et al. (2005) mengangkat isu ini melalui pendekatan geosemantik, yaitu upaya menjembatani perbedaan makna dan struktur data antarsistem yang berbeda, bukan hanya perbedaan format teknis semata. Sebagai contoh sederhana, satu instansi mungkin mendefinisikan kapal mencurigakan berdasarkan kecepatan dan pola gerak, sementara instansi lain mendefinisikannya berdasarkan status registrasi, sehingga tanpa kesepakatan semantik yang jelas, penggabungan data dari kedua sumber tersebut justru bisa menghasilkan kesimpulan yang keliru. (R. Li & Saxena, 1993), dalam pengembangan sistem informasi geografi kelautan terpadu, menunjukkan bahwa interoperabilitas juga menyangkut aspek teknis seperti kesamaan proyeksi peta, format data, dan protokol pertukaran, yang semuanya perlu distandarkan sejak tahap perancangan sistem. (Le Tixerant et al., 2018) menambahkan bahwa kerangka hukum turut menjadi bagian dari interoperabilitas, karena aturan mengenai siapa yang berhak mengakses dan menggunakan data tertentu perlu disepakati bersama sebelum integrasi data lintas instansi dapat berjalan tanpa hambatan.

Ketika data dari berbagai sumber sudah terintegrasi, volumenya akan membesar jauh melampaui kapasitas pengolahan manual. (Z. Li et al., 2020) menjelaskan bahwa data geospasial dalam skala besar menuntut pendekatan komputasi yang berbeda dari pengolahan data spasial konvensional, mencakup penyimpanan terdistribusi, pemrosesan paralel, dan kerangka kerja komputasi awan agar analisis dapat dilakukan dalam waktu yang wajar. Dalam konteks keamanan maritim, kebutuhan ini menjadi semakin nyata mengingat data AIS saja, sebagaimana ditunjukkan (Ray et al., 2019), dapat mencapai puluhan juta pesan hanya dalam periode enam bulan di satu wilayah perairan yang relatif terbatas. (Karountzos et al., 2023) memperlihatkan bahwa teknik analisis spasial statistik seperti ESDA dan LISA dapat diterapkan pada data dalam skala besar untuk mengidentifikasi kluster dan pola keruangan secara otomatis, sehingga pendekatan big data geospasial bukan sekadar soal menyimpan data dalam jumlah besar, melainkan juga soal mengekstraksi pola yang bermakna dari data tersebut secara efisien.

Forti et al. (2022) menggambarkan bahwa ranah maritim kini berada pada babak baru yang didorong oleh kemajuan otomasi, robotika, persepsi multisensor, dan kecerdasan buatan, yang secara bersamaan mengubah cara sistem pengawasan laut bekerja. Mereka menekankan bahwa kesadaran situasional generasi mendatang tidak lagi cukup mengandalkan deteksi objek semata, tetapi perlu mengintegrasikan kemampuan prediktif, yaitu memperkirakan perilaku kapal sebelum ancaman benar-benar terjadi. Talpur et al. (2025) memberikan gambaran teknis yang lebih rinci, mulai dari penggunaan CNN dan Transformer untuk deteksi objek, model sekuensial seperti LSTM untuk mengenali anomali pergerakan kapal, hingga arsitektur fusion yang menggabungkan berbagai jenis sensor menjadi satu keputusan deteksi yang lebih andal. Dalam sistem informasi geospasial nasional, AI idealnya ditempatkan sebagai lapisan analitik yang bekerja di atas basis data terintegrasi, mengolah data mentah dari berbagai sumber menjadi peringatan dini yang dapat langsung ditindaklanjuti operator di lapangan.

Pada akhirnya, seluruh elemen di atas, mulai dari arsitektur, sumber data, interoperabilitas, big data, hingga AI, bermuara pada satu tujuan, yaitu mendukung pengambil keputusan agar tidak lagi bekerja dengan potongan informasi yang terpisah-pisah. Strain et al. (2006) mencatat bahwa infrastruktur data spasial yang terintegrasi memberikan manfaat langsung berupa pengurangan duplikasi pengumpulan data,

peningkatan interoperabilitas antarlembaga, dan tata kelola yang lebih transparan. Thompson et al. (2026) menunjukkan hal serupa dari sisi praktis, yaitu ketika data dari sumber yang berbeda, seperti AIS dan VMS, digabungkan dan dibandingkan secara sistematis, pengambil keputusan memperoleh gambaran situasi laut yang jauh lebih lengkap dibandingkan hanya mengandalkan salah satu sumber saja. Bagi konteks Indonesia, sistem informasi geospasial terintegrasi semacam ini dapat menjadi dasar bagi Bakamla, TNI Angkatan Laut, KKP, dan Kementerian Pertahanan untuk merumuskan kebijakan operasional secara lebih cepat dan berbasis bukti, alih-alih menunggu proses koordinasi manual lintas instansi yang selama ini kerap memakan waktu dan berpotensi kehilangan momentum penindakan di lapangan.

Strategi Transformasi Digital SIG Menuju Indonesia Emas 2045

Kesenjangan kematangan digital menjadi persoalan paling mendasar dalam pengembangan SIG maritim nasional. Abdul Rahman et al. (2026) menggunakan kerangka *Digital Twin Maturity Model* (DTMM) yang membagi enam jenjang kematangan, mulai dari ML0 (belum memiliki kembar digital sama sekali) hingga ML5 (sistem otonom penuh). Studi mereka di Malaysia menemukan bahwa kebijakan yang ada baru mendukung jenjang ML1 sampai ML2, sebatas visualisasi dan integrasi data historis, sementara kemampuan prediktif dan otonom masih terhambat oleh interoperabilitas hukum dan fragmentasi kelembagaan. Kondisi serupa besar kemungkinan turut dihadapi Indonesia.

Persoalan tidak berhenti di situ. (Wang et al., 2013) menyoroti kebutuhan perangkat lunak SIG yang mampu memanfaatkan komputasi terdistribusi berkinerja tinggi melalui gagasan CyberGIS, sebuah aspek yang selama ini belum menjadi perhatian utama dalam pengembangan SIG nasional. Tanpa lompatan pada sisi infrastruktur komputasi, kapasitas analisis geospasial nasional akan tetap tertinggal dari kompleksitas data yang perlu diolah.

Teknologi tidak akan berfungsi optimal tanpa sumber daya manusia yang mampu mengoperasikannya. (Drummond & French, 2008) mengingatkan bahwa konvergensi teknologi kerap berbenturan dengan kepentingan pengguna yang berbeda-beda, sehingga keberhasilan penerapan SIG lebih ditentukan oleh kesiapan sumber daya manusianya dibandingkan kecanggihan perangkat itu sendiri.

Masser, (1999), melalui kajiannya atas generasi pertama infrastruktur data spasial nasional di berbagai negara, menunjukkan bahwa keberhasilan pembangunan infrastruktur data spasial selalu bertumpu pada kejelasan mandat kelembagaan. Tanpa kejelasan mengenai lembaga mana yang memegang fungsi koordinasi, setiap instansi cenderung membangun sistemnya masing-masing secara terpisah, sehingga duplikasi data dan celah komunikasi antarlembaga sulit dihindari. Bagi Indonesia, kebijakan nasional yang dibutuhkan idealnya berbentuk regulasi setingkat peraturan presiden yang menetapkan satu badan koordinasi data geospasial maritim, lengkap dengan kewenangan menetapkan standar teknis dan mekanisme pembagian akses antarinstansi.

Semakin terintegrasi suatu sistem, semakin besar pula risiko keamanannya. Data lokasi kapal patroli dan zona kerawanan merupakan informasi yang sangat sensitif, karena apabila bocor, informasi tersebut justru dapat dimanfaatkan pihak lain untuk menghindari pengawasan. (Forti et al., 2022) mengingatkan bahwa era otomasi dan konektivitas maritim yang semakin tinggi turut membuka celah kerentanan baru pada sistem siber yang mengendalikan sensor dan platform tanpa awak. Keamanan siber karenanya perlu dirancang sejak tahap awal pembangunan sistem, bukan ditambahkan setelah sistem beroperasi.

Titik temu dari berbagai teknologi tersebut terletak pada gagasan yang oleh (Dold & Groopman, 2017) disebut sebagai *perceptality*, yaitu peleburan antara dunia fisik dan

dunia digital sehingga persepsi geospasial dan realitas nyata menjadi semakin sulit dibedakan. Konvergensi sensor, robotika, pembelajaran mesin, dan komputasi awan memungkinkan suatu organisasi menangkap kondisi fisik secara langsung melalui representasi digitalnya.

Shi et al. (2023) memberikan contoh konkret dari gagasan tersebut melalui pengembangan model kota berbasis kembaran digital yang menggabungkan *Building Information Modelling* (BIM), SIG, dan *Internet of Things* ke dalam satu kerangka ontologi. Prinsip serupa dapat diterapkan pada konteks maritim, yaitu membangun kembaran digital wilayah laut Indonesia yang menggabungkan data SIG, sensor *Internet of Things* dari kapal dan pelampung, analisis big data geospasial, serta model kecerdasan buatan prediktif, seluruhnya berjalan di atas infrastruktur komputasi awan agar dapat diakses secara bersamaan oleh berbagai instansi. Wang et al. (2013). menyebut arah pengembangan semacam ini sebagai sesuatu yang tidak terelakkan bagi ilmu geospasial ke depan, mengingat volume dan kompleksitas data yang terus bertambah tidak lagi dapat ditangani oleh sistem SIG konvensional yang berdiri sendiri.

Penyusunan roadmap dua puluh tahun pada dasarnya menerjemahkan gagasan-gagasan di atas menjadi tahapan yang realistis, mengikuti jenjang kematangan DTMM.

Lima tahun pertama difokuskan pada konsolidasi data dan penetapan kebijakan nasional, yaitu membangun infrastruktur data spasial maritim terpadu, setara dengan jenjang ML1 hingga ML2. Periode lima hingga sepuluh tahun berikutnya difokuskan pada penguatan kemampuan analitik dan prediktif melalui integrasi kecerdasan buatan dan big data geospasial, setara dengan jenjang ML3. Periode sepuluh hingga lima belas tahun diarahkan pada optimasi sistem secara menyeluruh, termasuk penerapan kembaran digital pada wilayah laut strategis. Periode lima belas hingga dua puluh tahun terakhir diarahkan pada otonomi sistem, yaitu kemampuan SIG nasional mendeteksi, memprediksi, dan merekomendasikan tindakan secara mandiri dengan pengawasan manusia yang minimal, setara dengan jenjang ML5, sejalan dengan target pencapaian Indonesia Emas 2045.



Gambar 3. Roadmap Transformasi Digital SIG Nasional
(Sumber: Diolah penulis, dilustrasikan AI (2026))

KESIMPULAN

Kajian ini menegaskan bahwa peran Sistem Informasi Geografis dalam keamanan maritim Indonesia telah bertransformasi secara signifikan, dari sekadar alat pemetaan menjadi instrumen analitis inti yang berfungsi sebagai *Decision Support System*. Pergeseran ini dimungkinkan oleh kemampuannya mengintegrasikan data spasial dan nonspasial dari beragam sumber, seperti citra satelit, AIS, VMS, radar, dan sensor drone,

yang sebelumnya berjalan secara terpisah. Integrasi tersebut menjadi fondasi utama bagi terwujudnya *Maritime Domain Awareness* (MDA), yaitu pemahaman menyeluruh atas kondisi laut yang memungkinkan aparat keamanan bertindak lebih cepat, tepat sasaran, dan terkoordinasi dalam menghadapi berbagai ancaman di wilayah perairan nasional.

Penerapan konsep ini pada studi kasus di Laut Natuna Utara, khususnya melalui teknik Kernel Density Estimation, menghasilkan temuan krusial bahwa sebagian besar wilayah yang selama ini dikategorikan rawan justru tergolong berisiko rendah, bukan karena aman, melainkan karena jarang terpantau. Fakta ini menjadi pelajaran penting bagi perumusan strategi pengawasan, yang membuktikan bahwa pendekatan berbasis analisis risiko spasial jauh lebih efisien dibandingkan pola patroli seragam yang selama ini lazim diterapkan. Dengan demikian, prioritas pengawasan dapat disusun secara terukur dan responsif terhadap dinamika ancaman aktual di lapangan, sehingga alokasi sumber daya patroli menjadi lebih optimal dan berdampak.

Pada tataran kelembagaan, kajian ini mengidentifikasi fragmentasi data antarinstansi maritim sebagai persoalan nyata yang menghambat efektivitas pengawasan. Sebagai solusi, dirancang sistem informasi geospasial terintegrasi yang menggabungkan arsitektur data bersama, interoperabilitas, analisis big data, dan kecerdasan buatan, guna memungkinkan Bakamla, TNI AL, KKP, dan Kemhan bekerja dalam basis data yang sama, alih-alih membangun sistem masing-masing yang justru memperbesar duplikasi dan celah koordinasi. Ke depan, transformasi digital ini memerlukan strategi bertahap dua puluh tahun yang mencakup penguatan infrastruktur komputasi, penyiapan SDM, kejelasan mandat kebijakan nasional, penguatan keamanan siber data geospasial, serta integrasi dengan AI, *Internet of Things*, komputasi awan, dan kembaran digital, selaras dengan visi Indonesia Emas 2045, namun tetap bergantung pada konsistensi kebijakan dan komitmen anggaran jangka panjang.

Berdasarkan seluruh temuan, penelitian ini merekomendasikan lima langkah konkret. Pertama, pemerintah perlu segera menetapkan badan koordinasi data geospasial maritim nasional dengan mandat jelas untuk mengakhiri fragmentasi antarsektor. Kedua, strategi pengawasan maritim, khususnya di wilayah rawan seperti Laut Natuna Utara, harus bergeser dari pola konvensional menuju pendekatan berbasis analisis risiko keruangan. Ketiga, pengembangan kapasitas SDM di bidang geospasial dan AI perlu diintegrasikan sebagai bagian pokok investasi infrastruktur, bukan sekadar pelengkap. Keempat, aspek keamanan siber wajib dirancang sejak tahap awal pembangunan sistem mengingat sensitivitas data lokasi dan pola pengawasan. Kelima, transformasi menuju sistem geospasial yang cerdas dan otonom perlu dilakukan secara bertahap dan terukur, dengan evaluasi berkala agar arah pengembangan tetap sejalan dengan kebutuhan keamanan maritim nasional yang senantiasa dinamis dan terus berubah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Rahman, S., Shahrudin, S., Shapiai, M., & Ahmad, A. (2026). From BIM and geospatial technology to AI-driven digital twins: Integrating policy, geospatial intelligence, and technological synergies in Malaysia. *International Journal of Geoinformatics*, 22(1), 12–23. <https://doi.org/10.52939/ijg.v22i1.4713>
- Adi, A. P., Aritonang, S., Sarjito, S., & Navalino, R. D. A. (2026). A risk-based geospatial optimization framework for UAV maritime surveillance path planning in the North Natuna Sea. *International Journal of Geoinformatics*, 22(3), 169–187. <https://doi.org/10.52939/ijg.v22i3.4877>

- Brodeur, J., Bédard, Y., & Moulin, B. (2005). A geosemantic proximity-based prototype for the interoperability of geospatial data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(6), 669–698.
- Dold, J., & Groopman, J. (2017). The future of geospatial intelligence. *Geo-Spatial Information Science*, 20(2), 151–162. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1337318>
- Drummond, W. J., & French, S. P. (2008). The future of GIS in planning: Converging technologies and diverging interests. *Journal of the American Planning Association*, 74(2), 161–174.
- Foglioni, F., & Grande, V. (2023). A Marine Spatial Data Infrastructure to manage multidisciplinary, inhomogeneous and fragmented geodata in a FAIR perspective: The Adriatic Sea experience. *Oceanologia*, 65(1), 260–277. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.11.002>
- Forti, N., d’Afflisio, E., Braca, P., Millefiori, L. M., Carniel, S., & Willett, P. (2022). Next-gen intelligent situational awareness systems for maritime surveillance and autonomous navigation [Point of View]. *Proceedings of the IEEE*, 110(10), 1532–1537.
- Handrisal, H., Armawi, A., Triyana, H. J., & Arsana, I. M. A. (2026). From enforcement to resilience: Evaluating Indonesia’s one roof enforcement system to combat illegal fishing in the North Natuna Sea. *F1000Research*, 15, 709.
- Karountzos, O., Kagkelis, G., & Kepaptoglou, K. (2023). A decision support GIS framework for establishing zero-emission maritime networks: The case of the Greek coastal shipping network. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 7(16). <https://doi.org/10.1007/s41651-023-00145-1>
- Le Tixerant, M., Le Guyader, D., Gourmelon, F., & Queffelec, B. (2018). How can Automatic Identification System (AIS) data be used for maritime spatial planning? *Ocean & Coastal Management*, 166, 18–30.
- Li, R., & Saxena, N. K. (1993). Development of an integrated marine geographic information system. *Marine Geodesy*, 16(4), 293–307.
- Li, Z., Tang, W., Huang, Q., Shook, E., & Guan, Q. (2020). Introduction to big data computing for geospatial applications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 487.
- Masser, I. (1999). All shapes and sizes: The first generation of national spatial data infrastructures. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(1), 67–84.
- Ou, Z., & Zhu, J. (2008). AIS database powered by GIS technology for maritime safety and security. *The Journal of Navigation*, 61(4), 655–665.
- Ray, C., Dreo, R., Camossi, E., Joussetme, A.-L., & Iphar, C. (2019). Heterogeneous integrated dataset for maritime intelligence, surveillance, and reconnaissance. *Data in Brief*, 25, 104141. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104141>
- Rosana, N., Prasita, V. D., & Tambun, R. (2014). GIS for monitoring the operation on inspection and termination of fishing vessels in the Eastern Indonesian waters. *The International Journal of Engineering and Science*, 3(3), 20–28.
- Shi, J., Pan, Z., Jiang, L., & Zhai, X. (2023). An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102114.
- Strain, L., Rajabifard, A., & Williamson, I. (2006). Marine administration and spatial data infrastructure. *Marine Policy*, 30(4), 431–441.

- Talpur, K., Hasan, R., Gocer, I., Ahmad, S., & Bhuiyan, Z. (2025). AI in maritime security: Applications, challenges, future directions, and key data sources. *Information*, 16(8), 658. <https://doi.org/10.3390/info16080658>
- Thompson, L. M., Vlietstra, L. S., Watson, J. R., & Harte, M. (2026). Improving maritime domain awareness using vessel location data in Bering Sea fisheries. *Frontiers in Marine Science*, 13, 1844404. <https://doi.org/10.3389/fmars.2026.1844404>
- Verutes, G. M., Johnson, A. F., Caillat, M., Ponnampalam, L. S., Peter, C., Vu, L., Junchompoo, C., Lewison, R. L., & Hines, E. M. (2020). Using GIS and stakeholder involvement to innovate marine mammal bycatch risk assessment in data-limited fisheries. *PLOS ONE*, 15(8), e0237835.
- Wang, S., Anselin, L., Bhaduri, B., Crosby, C., Goodchild, M. F., Liu, Y., & Nyerges, T. L. (2013). CyberGIS software: A synthetic review and integration roadmap. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(11), 2122–2145.
- Zhao, M., Yao, X., Sun, J., Zhang, S., & Bai, J. (2018). GIS-based simulation methodology for evaluating ship encounters probability to improve maritime traffic safety. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 323–337.
- Zhou, X., Cheng, L., Li, W., Zhang, C., Zhang, F., Zeng, F., Yan, Z., Ruan, X., & Li, M. (2020). A comprehensive path planning framework for patrolling marine environment. *Ocean Engineering*, 198.