

Strategi Transformasi Digital Sistem Informasi Geografis Nasional dalam Mendukung Keamanan Maritim Indonesia Menuju Indonesia Emas 2045

Felix David Christiant Pandapotan, Lukman Yudho Prakoso², Arifuddin Uksman³, Nefra Firdaus⁴, Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶, Lukman Yudho Prakoso⁷

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

Felix.pandapotan@km.idu.ac.id¹, arifuddin.uksan@idu.ac.id², brorivai@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 : 15 Juli, 2026

Accepted : 16 Juli, 2026

Kata Kunci:

GeoAI;

Indonesia Emas 2045;

Keamanan Maritim;

Kebijakan Geospasial Nasional;

Sistem Informasi Geospasial;

Transformasi Digital.

Abstrak

Indonesia menghadapi tekanan ganda dalam pengelolaan wilayah laut dengan luas yurisdiksi maritim yang mencapai lebih dari 6,4 juta km² berhadapan dengan keterbatasan armada, personel, dan sistem pengawasan yang belum terintegrasi secara menyeluruh. Praktik *illegal, unreported, and unregulated* (IUU) *fishing*, pelanggaran jalur pelayaran oleh kapal asing, serta aktivitas *grey zone* di Laut Natuna Utara memperlihatkan bahwa kedaulatan maritim tidak lagi cukup dijaga dengan kekuatan fisik semata, melainkan memerlukan kapasitas deteksi dan analisis spasial yang presisi. Sistem Informasi Geografis (SIG) nasional berperan sebagai tulang punggung kemampuan tersebut, namun transformasi digitalnya masih berjalan tersendat akibat fragmentasi data antarlembaga, kesenjangan infrastruktur, dan minimnya sumber daya manusia yang menguasai teknologi geospasial mutakhir. Artikel ini disusun melalui pendekatan library research untuk mengkaji strategi transformasi digital SIG nasional sebagai penopang keamanan maritim dalam koridor Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025–2045 menuju visi Indonesia Emas 2045. Kajian menelusuri tantangan interoperabilitas data, kesiapan kelembagaan, kebutuhan kompetensi sumber daya manusia, risiko keamanan siber data geospasial, serta peluang integrasi kecerdasan buatan, *big data*, *Internet of Things*, *digital twin*, dan GeoAI dalam membentuk ekosistem geospasial maritim yang adaptif. Hasil kajian dirumuskan menjadi peta jalan implementasi tiga fase hingga tahun 2045 beserta rekomendasi kebijakan lintas kementerian dan lembaga. Artikel ini memberikan kontribusi berupa kerangka konseptual yang menghubungkan transformasi digital geospasial dengan agenda ketahanan nasional secara terpadu, sesuatu yang selama ini dibahas secara terpisah dalam literatur SIG dan literatur keamanan maritim Indonesia.

PENDAHULUAN

Wilayah laut Indonesia bukan sekadar ruang geografis, melainkan aset strategis yang menopang kedaulatan, ekonomi, dan konektivitas antarpulau. Luasnya mendekati dua

pertiga dari total wilayah nasional, sementara garis pantainya termasuk yang terpanjang di dunia. Kondisi geografis ini menuntut kapasitas pengawasan yang jauh melampaui kemampuan patroli konvensional. Kementerian Kelautan dan Perikanan mencatat bahwa luas laut yang harus diawasi membuat pengawasan sulit dan mahal, sementara jumlah armada dan personel jauh tertinggal dibandingkan intensitas pelanggaran yang terjadi (KKP, 2025). Modus pelanggaran pun berkembang, mulai dari pemalsuan dokumen izin, penggantian bendera kapal, hingga penonaktifan *Vessel Monitoring System* untuk menghindari deteksi (KKP, 2025). Di Laut Natuna Utara, pergerakan kapal riset dan penjaga pantai asing menambah kompleksitas ancaman, yang oleh sejumlah pengamat keamanan regional diproyeksikan akan terus berlangsung dalam dua dekade ke depan (IOJI (2024)). Situasi ini menegaskan bahwa penguatan keamanan maritim Indonesia memerlukan basis data spasial yang akurat, mutakhir, dan dapat diakses lintas lembaga secara *real time*.

Sistem Informasi Geografis telah lama menjadi instrumen utama pengelolaan wilayah, namun perannya kini bertransformasi dari sekadar alat pemetaan menjadi infrastruktur pengambilan keputusan berbasis data. Dangermond dan Goodchild (2019) menegaskan bahwa infrastruktur geospasial yang kuat menjadi fondasi bagi kebijakan publik yang berbasis bukti, sementara (Scott & Rajabifard, 2017) memperlihatkan bagaimana kapabilitas geospasial nasional perlu diselaraskan dengan agenda pembangunan berkelanjutan secara strategis. Perkembangan teknologi turut mempercepat pergeseran ini. Integrasi *big data* dan komputasi awan memungkinkan pengolahan data spasial dalam skala yang sebelumnya mustahil dicapai (Yang et al., 2017), sementara kehadiran teknologi drone memperluas jangkauan akuisisi data ke wilayah yang sulit dijangkau moda konvensional Quamar et al. (2023). Pada tahap yang lebih maju, kemunculan *autonomous GIS* berbasis kecerdasan buatan mulai menggeser peran analis manusia dalam sebagian proses interpretasi spasial (Li & Ning, 2023) dan model bahasa besar mulai dieksplorasi untuk mempercepat sintesis informasi geospasial dari data tidak terstruktur (Y. Yang et al., 2022a). Di ranah maritim secara spesifik, penerapan pembelajaran mesin pada analisis spasial telah terbukti mampu memprediksi risiko kecelakaan lalu lintas laut, sebagaimana ditunjukkan pada studi di perairan Fujian (Yang et al., 2022), sebuah preseden yang relevan bagi konteks perairan Indonesia yang jauh lebih kompleks.

Urgensi penggunaan SIG dalam OMSP terletak pada kemampuannya menyatukan berbagai sumber data, mulai dari citra satelit, data AIS kapal, hingga informasi lapangan, ke dalam satu platform analitis yang mendukung pengambilan keputusan cepat dan tepat sasaran. Dalam konteks bencana, misalnya, SIG memungkinkan identifikasi area terdampak secara akurat sebelum tim penyelamat tiba di lokasi. Dalam konteks SAR, analisis jaringan dan algoritma pencarian jalur terpendek dapat mempercepat penentuan area pencarian korban di laut. Dalam konteks pengawasan jalur pelayaran, integrasi AIS dengan SIG memungkinkan deteksi anomali pergerakan kapal secara langsung (Y. Yang et al., 2022b)), sebuah preseden yang relevan bagi konteks perairan Indonesia yang jauh lebih kompleks.

Meski peluang teknologi terbuka lebar, transformasi digital SIG nasional Indonesia berjalan tidak merata. Data antarkementerian dan lembaga masih tersebar dalam format dan standar yang berbeda, sehingga proses integrasi menjadi lambat dan rawan duplikasi. Koldasbayeva et al. (2024) mengingatkan bahwa pemodelan geospasial berbasis data menghadapi tantangan mendasar berupa kualitas data yang tidak konsisten dan keterbatasan interoperabilitas antarsistem, sebuah persoalan yang juga tampak nyata dalam tata kelola geospasial Indonesia. Di sisi kelembagaan, upaya besar seperti

Kebijakan Satu Peta telah berjalan lebih dari satu dekade, namun harmonisasi data antara Badan Informasi Geospasial, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Badan Keamanan Laut, Pusat Hidrografi dan Oseanografi TNI Angkatan Laut, serta Kementerian Kelautan dan Perikanan masih menyisakan celah koordinasi. Padahal, kapasitas tata kelola digital yang solid terbukti menjadi prasyarat bagi kota dan wilayah yang adaptif terhadap tantangan pembangunan berkelanjutan Das (2024) dan Costa et al. (2024).

Momentum untuk membenahi persoalan ini datang dari agenda pembangunan jangka panjang nasional. Melalui Undang-Undang Nomor 59 Tahun 2024 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025–2045, pemerintah menetapkan Visi Indonesia Emas 2045 sebagai Negara Kesatuan Republik Indonesia yang bersatu, berdaulat, maju, dan berkelanjutan, dengan penguatan ketahanan dan kedaulatan nasional sebagai salah satu pilar utamanya (PPN/Bappenas, 2024). Pencapaian visi ini menuntut Indonesia keluar dari pendekatan pembangunan yang bersifat rutin dan beralih ke transformasi yang menyeluruh dan koheren antarsektor, termasuk sektor kelautan yang menyumbang target kontribusi produk domestik bruto maritim yang signifikan pada 2045.

Literatur SIG selama ini banyak membahas transformasi digital dalam konteks kota pintar, pertanian, atau mitigasi bencana (Mortaheb & Jankowski, 2022; Pandey & Pandey, (2023); Franch-Pardo et al., (2020); Pardo et al., 2020), sementara literatur keamanan maritim Indonesia lebih banyak berfokus pada aspek hukum, kelembagaan, dan operasional penegakan hukum di laut (Nadhila 2023). Kesenjangan penelitian muncul pada titik pertemuan keduanya: belum tersedia kajian komprehensif yang merumuskan strategi transformasi digital SIG nasional secara spesifik sebagai instrumen keamanan maritim dalam kerangka waktu menuju Indonesia Emas 2045. Artikel ini mengisi celah tersebut dengan menawarkan kebaruan berupa kerangka strategis yang mengintegrasikan aspek teknologi, sumber daya manusia, kebijakan, dan keamanan siber geospasial ke dalam satu peta jalan implementasi tiga fase. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis tantangan transformasi digital SIG nasional, merumuskan kebutuhan kompetensi sumber daya manusia yang relevan, mengevaluasi kebijakan dan sinergi kelembagaan yang ada, serta menyusun peta jalan strategis implementasi geospasial maritim Indonesia hingga tahun 2045.

TINJAUAN PUSTAKA

Transformasi Digital dan Evolusi Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis pada mulanya berkembang sebagai alat pemetaan dan penyimpanan data spasial, namun literatur terbaru memperlihatkan pergeseran fungsinya menjadi infrastruktur pengambilan keputusan. Dangermond dan Goodchild (2019) menempatkan infrastruktur geospasial sebagai barang publik yang perlu dibangun secara kolektif, bukan sekadar sistem milik satu lembaga. Gagasan ini diperkuat oleh Scott dan Rajabifard (2017), yang menunjukkan bahwa kapabilitas geospasial nasional perlu diselaraskan dengan agenda kebijakan global agar tidak berhenti sebagai proyek teknis semata. Perkembangan lebih lanjut membawa SIG memasuki fase otomatisasi. Li dan Ning (2023) memperkenalkan istilah *autonomous GIS* untuk menggambarkan sistem yang mampu melakukan sebagian tugas analisis spasial tanpa campur tangan penuh manusia, sementara (Y. Yang et al., 2022) menelusuri bagaimana model bahasa besar mulai diintegrasikan ke dalam alur kerja geospasial untuk mempercepat ekstraksi informasi dari data tidak terstruktur. Kedua studi ini menjadi rujukan utama bagi pembahasan kompetensi SDM pada subbab 3.2 dan integrasi

teknologi pada subbab 3.5, karena memperlihatkan arah perkembangan SIG yang harus diantisipasi oleh kebijakan nasional.

Keamanan Maritim dan Peran Data Geospasial

Pada ranah keamanan maritim, literatur menunjukkan bahwa analisis spasial berbasis data memiliki kapasitas prediktif yang signifikan. Yang et al. (2022) membuktikan bahwa pembelajaran mesin yang diterapkan pada data spasial mampu memprediksi risiko kecelakaan lalu lintas laut di perairan Fujian, sebuah temuan yang relevan sebagai preseden metodologis bagi konteks pengawasan perairan Indonesia yang jauh lebih luas dan kompleks. Sementara itu, kajian keamanan laut domestik lebih banyak menyoroti aspek kelembagaan dan penegakan hukum. Nadhila (2023) memetakan strategi penanganan keamanan maritim Indonesia dari sudut pandang regulasi dan peran aktor non-negara, sedangkan laporan *IOJI* (2024) memberikan gambaran empiris terkini mengenai pola pelanggaran IUU *fishing* dan aktivitas *grey zone* di Laut Natuna Utara. Kesenjangan antara kedua kelompok literatur ini, yaitu literatur teknis geospasial yang berorientasi algoritma dan literatur keamanan maritim yang berorientasi kelembagaan, menjadi titik pijak bagi kerangka analisis pada subbab dibawah ini, yang berupaya menjembatani keduanya melalui peta jalan kebijakan yang eksplisit.

Teknologi Mutakhir dalam Ekosistem Geospasial

Kelompok literatur ketiga membahas teknologi pendukung yang memperluas kapabilitas SIG. (C. Yang et al., 2017) mengulas bagaimana big data dan komputasi awan mengubah skala pengolahan data geospasial, dari yang semula terbatas pada perangkat lokal menjadi terdistribusi dan elastis. Quamar et al. (2023) menelaah integrasi drone ke dalam SIG sebagai solusi atas keterbatasan interval pembaruan citra satelit, sementara Sharma et al. (2024) mengingatkan pentingnya validasi data lapangan sebagai pelengkap data penginderaan jauh, bukan pengganti sepenuhnya. Pada dimensi simulasi, Batty, (2024) dan Broo dan Schooling, (2021) sama-sama menegaskan bahwa digital twin hanya efektif apabila didukung data yang berkualitas dan mengalir secara konsisten, sebuah prasyarat yang langsung berkaitan dengan persoalan interoperabilitas data yang dibahas Koldasbayeva et al., (2024). Rangkaian studi ini membentuk kerangka konseptual bagi subbab mengenai tantangan teknis transformasi digital dan subbab mengenai integrasi teknologi menuju Smart Maritime Geospatial Ecosystem.

Tata Kelola, Kebijakan, dan Keberlanjutan Geospasial

Kelompok literatur terakhir menyoroti sisi kelembagaan dan kebijakan. Bachmann et al., (2022) menunjukkan bahwa teknologi berbasis data baru memberi dampak nyata terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan apabila diiringi penguatan kapasitas kelembagaan, sejalan dengan temuan Das (2024) dan Costa et al. (2024) mengenai pentingnya tata kelola digital yang solid bagi kota dan wilayah yang berkelanjutan. Mortaheb & Jankowski, (2022) memperlihatkan bagaimana GeoAI dapat diintegrasikan ke dalam perencanaan kota pintar, sebuah model yang relevan diadaptasi untuk konteks maritim meskipun literatur yang secara spesifik menautkan GeoAI dengan keamanan maritim Indonesia masih sangat terbatas. Kekosongan inilah yang menjadi dasar argumen novelty penelitian ini, sebagaimana telah disinggung pada bagian Pendahuluan, sekaligus menjadi kerangka bagi subbab mengenai kebijakan nasional dan subbab mengenai keamanan siber data geospasial.

METODE PENELITIAN

Metode Penelitian: Studi Pustaka (*Library Research*)

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif-analitis dengan metode *library research*. Pendekatan ini dipilih karena objek kajian, yaitu strategi transformasi

digital Sistem Informasi Geografis nasional dalam konteks keamanan maritim, bersifat konseptual dan berorientasi kebijakan jangka panjang. Fenomena semacam ini lebih tepat dipahami melalui penelusuran dan sintesis terhadap dokumen akademik, laporan kelembagaan, dan regulasi yang telah tersedia, dibandingkan melalui pengumpulan data primer di lapangan yang membutuhkan akses langsung ke sistem operasional lembaga pertahanan dan keamanan maritim, sebagian besar bersifat terbatas atau rahasia.

Alasan Penggunaan Studi Pustaka

Data dikumpulkan dari tiga kategori sumber. *Pertama*, artikel jurnal terindeks Scopus dan *Web of Science* yang membahas SIG, GeoAI, *digital twin*, dan keamanan siber geospasial, sebagian besar bersumber dari daftar pustaka yang telah disediakan. *Kedua*, dokumen kebijakan resmi pemerintah, termasuk Undang-Undang Nomor 59 Tahun 2024 tentang RPJPN 2025–2045, publikasi Bappenas, serta rilis resmi Kementerian Kelautan dan Perikanan. *Ketiga*, laporan lembaga riset dan organisasi masyarakat sipil yang memantau keamanan laut Indonesia, seperti IOJI (2024), yang memberikan konteks empiris terkini mengenai dinamika ancaman di lapangan. Penelusuran dilakukan dengan kata kunci kombinasi seperti "geospasial digital transformation", "maritime domain awareness", "GeoAI Indonesia", dan "kebijakan satu peta" pada basis data akademik serta situs resmi lembaga terkait.

Teknik Analisis dan Sintesis Literatur

Analisis dilakukan melalui tiga tahap. Tahap identifikasi memilah sumber berdasarkan relevansi terhadap enam tema utama: interoperabilitas data, kompetensi sumber daya manusia, kebijakan nasional, keamanan siber geospasial, integrasi teknologi mutakhir, dan peta jalan implementasi. Tahap kategorisasi mengelompokkan temuan dari tiap sumber ke dalam matriks tematik, memungkinkan perbandingan pola argumen antarpenulis secara sistematis. Tahap sintesis menghubungkan temuan lintas tema menjadi narasi argumentatif yang koheren, dengan menempatkan konteks Indonesia sebagai titik tumpu analisis. Proses ini mengikuti prinsip sintesis naratif, di mana penulis tidak sekadar merangkum tiap sumber secara terpisah, melainkan membangun argumen baru dari keterkaitan antarsumber tersebut. Triangulasi dilakukan dengan membandingkan temuan literatur akademik internasional, regulasi nasional, dan laporan situasi terkini, sehingga hasil kajian tidak hanya berpijak pada teori tetapi juga relevan dengan kondisi aktual keamanan maritim Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tantangan Transformasi Digital SIG Nasional

Transformasi digital Sistem Informasi Geografis nasional Indonesia berhadapan dengan persoalan mendasar sebelum berbicara soal teknologi mutakhir, yaitu interoperabilitas data. Setiap kementerian dan lembaga cenderung membangun sistem geospasialnya sendiri, dengan format, skala, dan standar metadata yang berbeda-beda. Akibatnya, data yang seharusnya dapat dipertukarkan secara langsung justru memerlukan proses konversi berulang yang memakan waktu dan membuka ruang kesalahan. Dangermond dan Goodchild (2019) menyebut kondisi ini sebagai kegagalan membangun infrastruktur geospasial sebagai barang publik yang dapat diakses lintas sektor, padahal fungsi utamanya justru untuk menyatukan, bukan memisahkan, data antarlembaga.

Persoalan kualitas data memperparah situasi ini. Koldasbayeva et al. (2024) mengidentifikasi bahwa pemodelan geospasial berbasis data sering terjebak pada masalah ketidaklengkapan, bias spasial, dan resolusi temporal yang tidak konsisten, sehingga hasil analisis rawan menyesatkan pengambil kebijakan. Di sisi infrastruktur komputasi, migrasi menuju *cloud GIS* memang menawarkan skalabilitas pengolahan data dalam volume besar (Yang et al., 2017), namun adopsinya di lingkungan pemerintahan

Indonesia masih terhambat oleh kekhawatiran terhadap kedaulatan data dan keterbatasan anggaran infrastruktur digital di daerah..

Pada sisi akuisisi data, kombinasi sensor satelit, drone, dan penginderaan jauh telah memperluas jangkauan pemantauan wilayah laut yang luas dan sulit dijangkau Quamar et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi drone ke dalam SIG memberi fleksibilitas akuisisi data pada area yang sebelumnya bergantung sepenuhnya pada citra satelit dengan interval pembaruan terbatas. Meski demikian, Sharma et al. (2024) mengingatkan bahwa data penginderaan jauh tidak dapat berdiri sendiri; validasi lapangan atau data *in-situ* tetap diperlukan untuk menjaga akurasi, sebuah tahap yang sering terlewat karena keterbatasan sumber daya operasional di lembaga pengelola wilayah laut Indonesia.

Tabel berikut merangkum lima tantangan utama transformasi digital SIG nasional beserta dampaknya terhadap kapasitas pengawasan maritim.

Tabel 1. Tantangan Transformasi Digital SIG Nasional dan Dampaknya terhadap Pengawasan Maritim

No.	Tantangan	Deskripsi Singkat	Dampak terhadap Keamanan Maritim
1	Interoperabilitas data	Format dan standar berbeda antar lembaga	Data pengawasan lambat terintegrasi lintas instansi
2	Kualitas data	Data tidak lengkap, bias spasial, resolusi rendah	Deteksi pelanggaran wilayah menjadi kurang akurat
3	Adopsi <i>cloud GIS</i>	Kekhawatiran kedaulatan data dan anggaran terbatas	Pengolahan data skala besar berjalan lambat
4	Ketergantungan sensor tunggal	Minim validasi lapangan atas data satelit/drone	Potensi kesalahan interpretasi aktivitas kapal
5	Kesenjangan infrastruktur daerah	Konektivitas terbatas di wilayah kepulauan terluar	Titik buta pengawasan di perbatasan maritim

(Sumber: Diolah Penulis (2026), disintesis dari Dangermond dan Goodchild (2019), Koldasbayeva et al. (2024), Yang et al. (2017), Quamar et al. (2023), dan Sharma et al. (2024))

Tabel di atas memperlihatkan bahwa setiap tantangan teknis memiliki konsekuensi langsung terhadap efektivitas pengawasan maritim, bukan sekadar persoalan administratif sistem informasi. Kesenjangan infrastruktur di wilayah kepulauan terluar, misalnya, menciptakan titik buta yang justru menjadi wilayah paling rentan terhadap pelanggaran batas laut. Dengan demikian, penguatan SIG nasional perlu dipandang sebagai bagian tidak terpisahkan dari strategi pertahanan, bukan semata proyek modernisasi teknologi administratif.



Gambar 1. Arsitektur Transformasi Digital SIG Nasional
(Sumber: Diolah Penulis dan Diilustrasikan oleh AI (2026))

Diagram tersebut menggambarkan alur idealnya, dari akuisisi data multisensor menuju lapisan pengolahan terpusat yang menstandarkan format sebelum data didistribusikan ke lembaga pengguna. Kesenjangan antara kondisi ideal ini dan praktik lapangan yang masih terfragmentasi menjadi latar bagi pembahasan kebutuhan sumber daya manusia pada subbab berikutnya.

Kebutuhan SDM Menuju Indonesia Emas 2045

Teknologi secanggih apa pun tidak akan memberi manfaat optimal tanpa operator dan analis yang memahami cara kerjanya. Transformasi digital SIG nasional menuntut kompetensi yang jauh lebih luas dibandingkan keahlian kartografi dan digitasi peta konvensional. Li & Ning (2023) memperlihatkan bahwa kemunculan *autonomous GIS* berbasis kecerdasan buatan mengubah peran analis geospasial, dari yang sebelumnya melakukan interpretasi manual menjadi pengawas dan pengarah sistem otomatis. Pergeseran ini menuntut penguasaan baru atas kecerdasan buatan dan ilmu data, bukan sekadar penguasaan perangkat lunak SIG konvensional.

Kebutuhan ini semakin nyata dengan masuknya model bahasa besar ke dalam ekosistem geospasial. Wang et al. (2024) mencatat bahwa kemampuan model bahasa besar untuk mengekstraksi informasi lokasi dari teks tidak terstruktur membuka peluang baru dalam analisis intelijen maritim, misalnya dari laporan pelayaran atau pemberitaan aktivitas kapal asing, namun pemanfaatannya memerlukan analis yang memahami baik sisi teknis model maupun konteks domain maritim. Di sisi lain, penguatan kapasitas ini tidak dapat dilepaskan dari kebijakan pembangunan sumber daya manusia yang lebih luas. Bachmann et al. (2022) menegaskan bahwa teknologi berbasis data hanya memberi kontribusi nyata terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan apabila diiringi peningkatan kapasitas kelembagaan dan individu secara paralel, sementara Das (2024) menunjukkan bahwa tata kelola digital yang efektif bergantung pada sinergi antara infrastruktur, layanan, dan kualitas aparatur.

Tabel 2. Kompetensi SDM Geospasial Maritim yang Dibutuhkan Menuju 2045

Domain Kompetensi	Kebutuhan Spesifik	Relevansi terhadap Keamanan Maritim
GIS Lanjutan	Analisis spasial multi-sumber, pemodelan prediktif	Deteksi pola pelanggaran wilayah laut
Kecerdasan Buatan (AI)	<i>Machine learning, computer vision</i> untuk citra satelit	Klasifikasi otomatis aktivitas kapal mencurigakan
Big Data	Pengolahan data volume besar, <i>data pipeline</i>	Integrasi data lintas lembaga secara <i>real time</i>
<i>Cloud Computing</i>	Manajemen infrastruktur awan, keamanan akses	Skalabilitas sistem pengawasan nasional
IoT	Pengelolaan jaringan sensor laut dan buoy pemantau	Pemantauan kondisi perairan secara kontinu
<i>Cybersecurity</i>	Proteksi data, deteksi intrusi sistem	Perlindungan data geospasial strategis
<i>Digital Twin</i>	Simulasi dan pemodelan wilayah laut virtual	Perencanaan skenario respons ancaman
<i>Remote Sensing</i>	Interpretasi citra satelit dan drone	Pemantauan wilayah perbatasan dan ZEE
<i>Data Science</i>	Statistik terapan, visualisasi data kebijakan	Dukungan pengambilan keputusan berbasis bukti

(Sumber: Diolah Penulis (2026), disintesis dari Li dan Ning (2023), Wang et al. (2024), Bachmann et al. (2022), dan Das (2024))

Sembilan domain kompetensi pada tabel tersebut memperlihatkan bahwa kebutuhan SDM tidak lagi berpusat pada satu bidang ilmu tunggal, melainkan pada kemampuan lintas disiplin yang saling melengkapi. Kebijakan peningkatan kapasitas SDM perlu diarahkan pada pembentukan jalur pendidikan dan pelatihan yang menggabungkan

geoinformatika dengan ilmu komputer dan keamanan siber, baik melalui kurikulum perguruan tinggi maupun program pelatihan berkelanjutan bagi aparaturnya di Bakamla, Pushidrosal, dan KKP. Tanpa investasi SDM ini, infrastruktur teknologi yang dibangun berisiko menjadi aset yang tidak dimanfaatkan secara optimal.

Kebijakan Nasional

Kerangka kebijakan geospasial Indonesia sesungguhnya sudah cukup mapan di atas kertas. Kebijakan Satu Peta digagas untuk menyatukan data spasial lintas kementerian dalam satu referensi tunggal, sementara *National Spatial Data Infrastructure* (NSDI) dirancang sebagai fondasi tata kelola data geospasial nasional, sejalan dengan gagasan Scott dan Rajabifard (2017) bahwa kapabilitas geospasial nasional perlu diselaraskan secara strategis dengan agenda pembangunan yang lebih besar. Persoalannya terletak pada implementasi. Wewenang atas data kelautan tersebar di banyak lembaga: Badan Informasi Geospasial mengelola referensi peta dasar, Badan Riset dan Inovasi Nasional mendorong riset dan inovasi teknologi, Badan Keamanan Laut menjalankan fungsi penjagaan dan penegakan hukum, Pusat Hidrografi dan Oseanografi TNI Angkatan Laut menyediakan data hidrografi untuk kepentingan navigasi dan pertahanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan mengawasi aktivitas perikanan, dan Badan Siber dan Sandi Negara menjaga keamanan infrastruktur digital nasional.

Fragmentasi kewenangan ini membuat koordinasi menjadi tantangan tersendiri. Forum diskusi keamanan laut yang digagas IOJI (2024) mencatat bahwa penguatan sistem keamanan laut nasional memerlukan penguatan regulasi, infrastruktur, dan kelembagaan secara simultan, karena penanganan ancaman non-tradisional seperti IUU *fishing* dan pelanggaran jalur pelayaran tidak dapat diselesaikan oleh satu lembaga saja. Momentum RPJPN 2025–2045 sesungguhnya membuka peluang untuk mengikat seluruh lembaga tersebut dalam kerangka kerja yang lebih terpadu, mengingat visi Indonesia Emas 2045 secara eksplisit menempatkan ketahanan dan kedaulatan nasional sebagai salah satu agenda pembangunan utama (PPN/Bappenas, 2024).

Tabel 3. Analisis Peran dan Titik Sinergi Lembaga dalam Tata Kelola Geospasial Maritim

Lembaga	Peran Utama	Titik Sinergi yang Perlu Diperkuat
BIG	Referensi peta dasar dan Kebijakan Satu Peta	Standarisasi data lintas lembaga
BRIN	Riset dan inovasi teknologi geospasial	Transfer hasil riset ke sistem operasional
Bakamla	Penjagaan dan patroli keamanan laut	Akses data terpadu untuk respons cepat
Pushidrosal TNI AL	Data hidrografi dan navigasi	Interoperabilitas data pertahanan-sipil
KKP	Pengawasan sumber daya perikanan	Integrasi data VMS dengan sistem nasional
BSSN	Keamanan siber infrastruktur digital	Standar keamanan data geospasial

(Sumber: Diolah Penulis (2026), disintesis dari Scott dan Rajabifard (2017), Bappenas (2024), dan IOJI (2024))

Tabel tersebut menegaskan bahwa setiap lembaga memiliki mandat yang jelas, namun titik lemahnya justru berada pada ruang antarlembaga, bukan pada kapasitas masing-masing institusi. Sinergi lintas kementerian perlu didorong bukan melalui pembentukan lembaga baru, melainkan melalui protokol berbagi data yang mengikat secara hukum dan didukung oleh platform teknis bersama, sehingga data yang telah dikumpulkan satu lembaga dapat segera dimanfaatkan lembaga lain tanpa hambatan birokratis.

Keamanan Siber Data Geospasial

Semakin terintegrasinya data geospasial maritim ke dalam sistem digital nasional, semakin besar pula risiko yang menyertainya. Data lokasi kapal patroli, jalur pelayaran

strategis, dan titik lemah pengawasan wilayah perbatasan merupakan informasi yang sangat sensitif bagi kepentingan pertahanan. Koldasbayeva et al. (2024) memperingatkan bahwa sistem geospasial berbasis data rentan terhadap gangguan integritas data, baik akibat kesalahan teknis maupun manipulasi yang disengaja, sebuah risiko yang berdampak jauh lebih serius ketika data tersebut menyangkut keamanan nasional dibandingkan sekadar riset lingkungan

Prinsip *Zero Trust* menjadi relevan dalam konteks ini karena mengasumsikan setiap permintaan akses, baik dari dalam maupun luar jaringan, harus diverifikasi ketat sebelum diberikan izin. Pendekatan ini berbeda dari model keamanan tradisional yang cenderung mempercayai penuh perangkat di dalam jaringan internal. Migrasi data geospasial ke *cloud* pun perlu diimbangi dengan tata kelola keamanan yang setara, mengingat efisiensi komputasi awan (Yang et al., 2017) tidak serta-merta menjamin keamanan data jika kebijakan enkripsi dan kontrol akses tidak diterapkan secara konsisten. Isu kedaulatan digital juga menjadi pertimbangan strategis, karena penyimpanan data geospasial pertahanan pada infrastruktur *cloud* yang dikelola pihak asing berpotensi menimbulkan ketergantungan yang membahayakan kepentingan nasional dalam jangka panjang.

Tabel 4. Ancaman Keamanan Siber Data Geospasial Maritim dan Strategi Mitigasi

Jenis Ancaman	Contoh Risiko	Strategi Mitigasi
Manipulasi data lokasi	Pemalsuan koordinat kapal pengawas	Verifikasi data multi-sumber, <i>data integrity check</i>
Akses tidak sah	Peretasan sistem pemantauan	Penerapan arsitektur <i>Zero Trust</i>
Kebocoran data strategis	Kebocoran jalur patroli ke pihak asing	Enkripsi data dan segmentasi akses berlapis
Ketergantungan infrastruktur asing	Penyimpanan data di <i>cloud</i> luar negeri	Pengembangan <i>cloud</i> nasional berdaulat
Gangguan operasional sistem	Serangan siber terhadap pusat data	Kerangka <i>cyber resilience</i> dan pemulihan cepat

(Sumber: Diolah Penulis (2026), disintesis dari Koldasbayeva et al. (2024) dan Yang et al. (2017))

Kelima jenis ancaman tersebut memperlihatkan bahwa keamanan siber data geospasial tidak dapat diserahkan sepenuhnya kepada satu lembaga teknis. Diperlukan kerangka kebijakan yang menempatkan Badan Siber dan Sandi Negara sebagai pengawas standar keamanan lintas sistem, sementara lembaga pemilik data tetap bertanggung jawab atas keakuratan dan integritas informasi yang dihasilkan. Kedaulatan digital dalam pengelolaan data geospasial maritim pada akhirnya menjadi prasyarat, bukan pelengkap, bagi keberhasilan transformasi digital SIG nasional.

Integrasi SIG dengan Teknologi Mutakhir: Membentuk *Smart Maritime Geospatial Ecosystem*

Potensi terbesar transformasi digital SIG nasional muncul ketika berbagai teknologi tidak berdiri sendiri-sendiri, melainkan saling terhubung dalam satu ekosistem. Kecerdasan buatan memungkinkan sistem mengenali pola anomali pergerakan kapal secara otomatis, sementara *big data* menyediakan kapasitas untuk mengolah volume data dari ribuan titik sensor sekaligus. *Internet of Things* memperluas jaringan pemantauan melalui buoy dan sensor laut yang mengirimkan data secara kontinu, dan komputasi awan memberi daya olah yang dibutuhkan untuk memproses seluruh aliran data tersebut secara *real time* (Yang et al., 2017).

Digital twin menambahkan dimensi baru berupa replika virtual wilayah laut yang memungkinkan simulasi skenario ancaman sebelum kejadian nyata terjadi. Batty, (2024) menunjukkan bagaimana *digital twin* telah digunakan dalam perencanaan kota untuk menguji dampak kebijakan secara virtual, sebuah pendekatan yang dapat diadaptasi untuk menguji efektivitas penempatan armada patroli sebelum dieksekusi di lapangan. Broo dan Schooling (2021) menambahkan bahwa keberhasilan *digital twin* infrastruktur

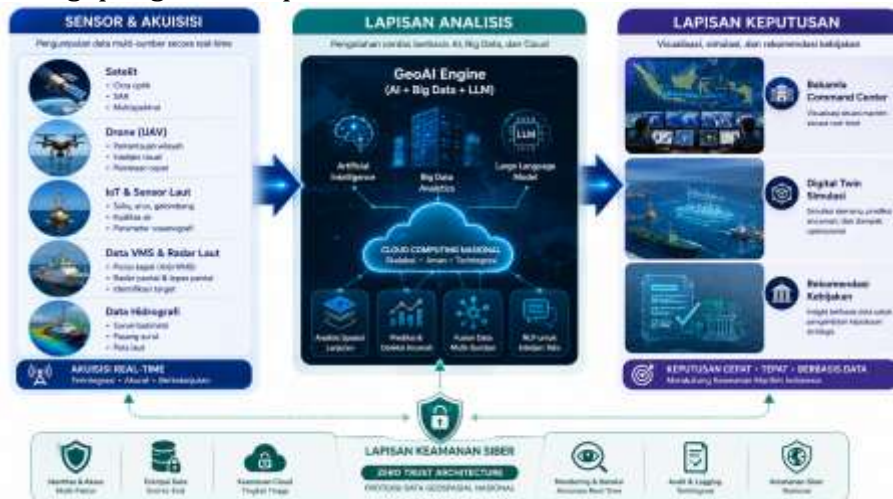
sangat bergantung pada kualitas data yang mengalir ke dalamnya, mengaitkan kembali persoalan ini dengan tantangan interoperabilitas data yang dibahas pada subbab 3.1. Sementara itu, drone berfungsi sebagai mata tambahan yang menjangkau area sulit (Quamar et al., 2023), model bahasa besar mempercepat sintesis intelijen dari teks tidak terstruktur (Wang et al., 2024), dan pendekatan GeoAI menyatukan seluruh kapabilitas ini ke dalam kerangka analisis spasial otomatis yang adaptif terhadap kondisi lapangan (Li & Ning, 2023; Mortaheb & Jankowski, 2022).

Tabel 5. Integrasi Teknologi dalam *Smart Maritime Geospatial Ecosystem*

Teknologi	Fungsi Utama dalam Ekosistem	Kontribusi terhadap Keamanan Maritim
<i>Artificial Intelligence</i>	Deteksi pola dan anomali otomatis	Identifikasi dini aktivitas mencurigakan
<i>Big Data</i>	Pengolahan data volume dan kecepatan tinggi	Analisis tren pelanggaran wilayah
IoT	Jaringan sensor laut kontinu	Pemantauan kondisi perairan <i>real time</i>
Cloud Computing	Daya olah dan penyimpanan terpusat	Skalabilitas sistem pengawasan nasional
<i>Digital Twin</i>	Simulasi virtual wilayah laut	Perencanaan skenario respons ancaman
Drone	Akuisisi data area sulit dijangkau	Perluasan cakupan pengawasan
LLM	Ekstraksi informasi dari teks tidak terstruktur	Percepatan analisis intelijen maritim
GeoAI	Analisis spasial otomatis terintegrasi	Penyatuan seluruh kapabilitas menjadi sistem tunggal

(Sumber: Diolah Penulis (2026), disintesis dari Batty (2024), Broo dan Schooling (2021), Li dan Ning (2023), Wang et al. (2024), Mortaheb dan Jankowski (2022), dan Quamar et al. (2023))

Tabel tersebut memperlihatkan bahwa setiap teknologi memiliki fungsi spesifik, namun nilai tambah sejatinya muncul dari keterhubungan antarteknologi tersebut, bukan dari penerapan masing-masing secara terpisah. GeoAI berperan sebagai lapisan penyatu yang mengorkestrasi input dari AI, IoT, drone, dan LLM menjadi satu keluaran analisis yang koheren bagi pengambil keputusan.



Gambar 2. Arsitektur Sistem Nasional *Smart Maritime Geospatial Ecosystem*

(Sumber: Diolah Penulis dan di ilustrasikan oleh AI (2026))

Arsitektur pada gambar tersebut menempatkan lapisan keamanan siber sebagai fondasi yang menopang seluruh proses analisis, bukan sebagai lapisan tambahan yang dipasang belakangan. Susunan ini menegaskan bahwa integrasi teknologi tanpa kerangka keamanan yang kokoh justru akan memperbesar permukaan risiko, sebagaimana telah dibahas pada subbab.

Roadmap Implementasi 2025–2045

Mewujudkan *Smart Maritime Geospatial Ecosystem* memerlukan tahapan bertahap yang selaras dengan periodisasi RPJPN 2025–2045 (PPN/Bappenas, 2024). Fase pertama menekankan pembangunan fondasi, fase kedua berfokus pada integrasi dan penguatan kapasitas, dan fase ketiga mengarah pada kematangan sistem yang otonom dan adaptif.

Fase I (2025–2030): Fondasi. Prioritas diarahkan pada harmonisasi standar data melalui percepatan Kebijakan Satu Peta, pembangunan infrastruktur *cloud GIS* nasional yang berdaulat, dan penyusunan regulasi berbagi data lintas lembaga. Pada fase ini, penguatan kapasitas SDM dasar di bidang GIS dan analisis data menjadi prioritas, seiring pembangunan kerangka keamanan siber awal untuk melindungi data geospasial strategis.

Fase II (2031–2037): Integrasi dan Penguatan Kapasitas. Fase ini menekankan interoperabilitas penuh antarsistem lembaga, penerapan *digital twin* untuk simulasi wilayah maritim strategis, serta perluasan jaringan sensor IoT dan drone untuk pengawasan wilayah perbatasan. Kompetensi SDM diarahkan pada penguasaan kecerdasan buatan dan ilmu data tingkat lanjut, sementara kerangka *Zero Trust* diterapkan secara menyeluruh pada seluruh sistem geospasial pertahanan.

Fase III (2038–2045): Kematangan Ekosistem Adaptif. Sistem GeoAI nasional diharapkan mampu beroperasi secara semi-otonom dalam mendeteksi dan merespons ancaman maritim, didukung *Maritime Domain Awareness* yang terintegrasi penuh lintas lembaga. Pada fase ini, Indonesia diharapkan mencapai kemandirian teknologi geospasial pertahanan, sejalan dengan target Indonesia Emas 2045 sebagai negara maju, berdaulat, dan berkelanjutan (PPN/Bappenas, 2024).



Gambar 3. Timeline Roadmap Transformasi Digital SIG Nasional 2025–2045
(Sumber: Diolah Penulis (2026))

Timeline tersebut menegaskan bahwa pencapaian ekosistem geospasial maritim yang matang pada 2045 tidak mungkin diraih tanpa fondasi yang kokoh pada periode 2025–2030. Ketertundaan pada fase awal, khususnya dalam harmonisasi data dan pembangunan *cloud* nasional, berisiko menggeser seluruh jadwal fase berikutnya dan menghambat pencapaian target ketahanan maritim yang telah ditetapkan dalam RPJPN 2025–2045.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Transformasi digital Sistem Informasi Geografis nasional merupakan prasyarat kedaulatan maritim, bukan sekadar agenda modernisasi teknis. Kajian ini mengidentifikasi bahwa tantangan utama bukan pada ketiadaan teknologi, melainkan pada fragmentasi data antarlembaga, kesenjangan kompetensi sumber daya manusia, lemahnya sinergi kebijakan lintas kementerian, serta buruknya interoperabilitas yang menciptakan titik buta pengawasan. Adopsi cloud GIS yang belum merata turut memperlambat kapasitas pengolahan data berskala besar. Meskipun kerangka regulasi seperti Kebijakan Satu Peta dan National Spatial Data Infrastructure telah memadai secara konseptual, implementasinya terhambat oleh fragmentasi kewenangan antara Badan Informasi Geospasial, BRIN, Bakamla, Pushidrosal, TNI AL, KKP, dan BSSN. Keamanan siber data geospasial menjadi dimensi kritis yang tak boleh diabaikan, mengingat sifat data lokasi dan jalur pengawasan maritim yang sangat strategis bagi pertahanan negara.

Integrasi kecerdasan buatan, *big data*, IoT, *cloud computing*, *digital twin*, drone, model bahasa besar, dan GeoAI membuka peluang terwujudnya *Smart Maritime Geospatial Ecosystem*, sebuah sistem yang menyatukan seluruh kapabilitas teknologi ke dalam kerangka pengambilan keputusan yang responsif. Untuk mewujudkannya, peta jalan tiga fase dirumuskan: pembangunan fondasi data dan infrastruktur (2025–2030), integrasi dan penguatan kapasitas (2031–2037), serta kematangan ekosistem adaptif (2038–2045). Keberhasilan menuju keamanan maritim berbasis geospasial yang matang pada 2045 sangat bergantung pada konsistensi kebijakan sejak tahap paling awal; kegagalan membangun fondasi pada fase pertama akan menggeser seluruh capaian pada fase berikutnya. Oleh karena itu, strategi transformasi digital SIG nasional harus diposisikan sebagai bagian tak terpisahkan dari agenda ketahanan nasional dalam RPJPN 2025–2045, sejalan dengan cita-cita Indonesia Emas 2045.

Rekomendasi kebijakan diarahkan kepada seluruh pemangku kepentingan. Pemerintah lintas kementerian/lembaga perlu menerbitkan payung regulasi yang mengikat dan mewajibkan berbagi data geospasial maritim, dilengkapi dengan mekanisme insentif dan sanksi yang jelas. BIG diminta mempercepat penetapan standar metadata tunggal serta memperluas cakupan kebijakan satu peta hingga mencakup data operasional pengawasan laut. BRIN perlu mengarahkan riset GeoAI dan digital twin maritim pada skema kolaborasi terapan bersama Bakamla dan Pushidrosal, agar hasil riset tidak berhenti pada publikasi akademik. Bakamla wajib memprioritaskan integrasi data lintas lembaga secara real-time dalam pengembangan pusat komando nasionalnya. Pushidrosal dan TNI AL perlu membuka jalur berbagi data hidrografi non-rahasia kepada lembaga sipil untuk memperkaya basis data nasional, sedangkan KKP perlu memperluas cakupan dan kewajiban penggunaan VMS pada seluruh kapal perikanan serta mengintegrasikannya secara langsung ke sistem pengawasan maritim terpadu.

Bagi perguruan tinggi, pengembangan kurikulum lintas disiplin yang menggabungkan geoinformatika, kecerdasan buatan, dan keamanan siber sangat mendesak, disertai pembukaan jalur riset kolaboratif dengan lembaga pemerintah untuk menjembatani kesenjangan antara riset akademik dan kebutuhan operasional lapangan. Sementara itu, industri geospasial nasional perlu didorong untuk mengembangkan solusi cloud GIS dan GeoAI yang berdaulat, guna mengurangi ketergantungan terhadap infrastruktur asing dalam pengelolaan data geospasial yang bersifat strategis bagi pertahanan negara. Melalui sinergi seluruh pihak dan komitmen anggaran yang berkelanjutan, transformasi digital SIG nasional dapat berjalan terarah, terukur, dan adaptif menjadi fondasi kokoh

bagi sistem keamanan maritim yang tangguh, terintegrasi, dan berkelanjutan dalam mewujudkan kedaulatan maritim Indonesia menuju 2045.

DAFTAR PUSTAKA

- Bachmann, N., Tripathi, S., Brunner, M., & Jodlbauer, H. (2022). The Contribution of Data-Driven Technologies in Achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14052497>
- Batty, M. (2024). Digital twins in city planning. *Nature Computational Science*, 4, 192–199. <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00606-7>
- Broo, D. G., & Schooling, J. (2021). Digital twins in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies. *International Journal of Construction Management*, 23, 1254–1263. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>
- Costa, D. G., Bittencourt, J. C. N., Oliveira, F., Peixoto, J. P. J., & Jesus, T. C. (2024). Achieving Sustainable Smart Cities through Geospatial Data-Driven Approaches. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16020640>
- Dangermond, J., & Goodchild, M. (2019). Building geospatial infrastructure. *Geo-Spatial Information Science*, 23, 1–9. <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1698274>
- Das, D. K. (2024). Exploring the Symbiotic Relationship between Digital Transformation, Infrastructure, Service Delivery, and Governance for Smart Sustainable Cities. *Smart Cities*. <https://doi.org/10.3390/smartcities7020034>
- Franch-Pardo, I., Napoletano, B. M., Rosete-Verges, F. A., & Billa, L. (2020). Spatial analysis and GIS in the study of COVID-19. A review. *The Science of the Total Environment*, 739, 140033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140033>
- Initiative, I. O. J. (2024). *Membangun Sistem Keamanan Laut Indonesia untuk Mengawal Target-Target Pembangunan Jangka Panjang Indonesia 2025-2045*. IOJI. <https://oceanjusticeIOJI.org/id/membangun-sistem-keamanan-laut-indonesia-untuk-mengawal-target-target-pembangunan-jangka-panjang-indonesia-2025-2045/>
- Koldasbayeva, D., Tregubova, P., Gasanov, M., Zaytsev, A., Petrovskaja, A., & Burnaev, E. (2024). Challenges in data-driven geospatial modeling for environmental research and practice. *Nature Communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55240-8>
- 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>
- Mortaheb, R., & Jankowski, P. (2022). Smart city re-imagined: City planning and GeoAI in the age of big data. *Journal of Urban Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.08.001>
- Nadhila, M. S. (2023). Strategi Penanganan Keamanan Maritim Indonesia. *Spektrum*, 20(1).
- Pandey, P. C., & Pandey, M. (2023). Highlighting the role of agriculture and geospatial technology in food security and sustainable development goals. *Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1002/sd.2600>
- PPN/Bappenas, K. (2024). *Undang-Undang Nomor 59 Tahun 2024 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025-2045*. Kementerian PPN/Bappenas. <https://www.bappenas.go.id/>
- Quamar, M. I., Al-Ramadan, B., Khan, K. A., Shafiullah, M., & El-Ferik, S. (2023). Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information

- System Technology - A Review. *Remote Sensing*, 15, 5039. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>
- Scott, G., & Rajabifard, A. (2017). Sustainable development and geospatial information: a strategic framework for integrating a global policy agenda into national geospatial capabilities. *Geo-Spatial Information Science*, 20, 59–76. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1325594>
- Sharma, S., Beslity, J. O., Rustad, L., Shelby, L. J., Manos, P. T., 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 Sensing*, 16, 4161. <https://doi.org/10.3390/rs16224161>
- Wang, S., Hu, T., Xiao, H., Li, Y., Zhang, C., Ning, H., Zhu, R., Li, Z., & Ye, X. (2024). GPT, large language models (LLMs) and generative artificial intelligence (GAI) models in geospatial science: a systematic review. *International Journal of Digital Earth*, 17. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2353122>
- Yang, C., Huang, Q., Li, Z., Liu, K., & Hu, F. (2017). Big Data and cloud computing: innovation opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 10, 13–53. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1239771>
- Yang, Y., Shao, Z., Hu, Y., Mei, Q., Pan, J., Song, R., & Wang, P. (2022a). Geographical spatial analysis and risk prediction based on machine learning for maritime traffic accidents: A case study of Fujian sea area. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113106>
- Yang, Y., Shao, Z., Hu, Y., Mei, Q., Pan, J., Song, R., & Wang, P. (2022b). Geographical spatial analysis and risk prediction based on machine learning for maritime traffic accidents: A case study of Fujian sea area. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113106>