

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

Mochamad Zulham Adhi Syahputra Akta^{1*}, Asep Adang Supriyadi², Bonan Dolok Oktavianus Siagian³, Nefra Firdaus⁴, Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶, Lukman Yudho Prakoso⁷

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

mochamad.akta@km.idu.ac.id^{1*}, aadangsupriyadi@gmail.com², bonan.dolok@idu.ac.id³, nefra.firdaus@idu.ac.id⁴, harri.dolli@idu.ac.id⁵, yuniar@idu.ac.id⁶, kamaledumplek@gmail.com⁷

*Corresponding Author

Article Info

Article history:

Received : 04 Juli, 2026

Revised : 06 Juli, 2026

Accepted : 06 Juli, 2026

Kata Kunci:

Indonesia Emas 2045;
Keamanan Maritim;
Sistem Informasi Geografis Nasional;
Spatial Data Infrastrusture;
Transformasi Digital.

Abstrak

Keamanan maritim Indonesia menghadapi kesenjangan struktural antara luas yurisdiksi laut yang harus diawasi dan kapasitas Sistem Informasi Geografis (SIG) Nasional yang masih terfragmentasi antarlembaga, belum sepenuhnya terintegrasi dengan teknologi digital mutakhir, dan rentan terhadap ancaman siber yang terus berkembang. Literatur yang membahas transformasi digital, geoinformatika, dan keamanan maritim selama ini berkembang secara terpisah menurut disiplin masing-masing, sehingga belum tersedia kerangka strategi yang menautkan seluruh dimensi tersebut secara terintegrasi bagi konteks kepulauan Indonesia menuju Indonesia Emas 2045. Penelitian ini mengembangkan strategi transformasi digital SIG Nasional sebagai fondasi keamanan maritim melalui integrasi kecerdasan buatan, *big data*, *Internet of Things*, *cloud computing*, *digital twin*, penginderaan jauh, *Spatial Data Infrastructure*, dan *Marine Spatial Data Infrastructure*. Penelitian menggunakan *Systematic Literature Review* mengikuti protokol PRISMA 2020, dipadukan dengan *narrative synthesis*, *thematic analysis*, dan *critical literature synthesis*. Pencarian pada basis data *Scopus* dan *Web of Science* menghasilkan 70 rekaman awal, yang setelah penghapusan duplikasi, penyaringan judul-abstrak, dan penilaian kualitas menggunakan kriteria CASP dan AACODS, menyisakan 47 artikel sebagai korpus akhir. Hasil sintesis menunjukkan bahwa transformasi digital SIG Nasional menghadapi empat lapis tantangan yang saling mengunci, yaitu fragmentasi data, kerentanan siber, kesenjangan kompetensi sumber daya manusia, dan ketiadaan kebijakan yang mengikat lintas instansi. Penelitian ini merumuskan kerangka kompetensi SDM tiga jenjang, empat elemen kebijakan nasional, empat pilar keamanan siber data geospasial, rantai nilai integrasi teknologi enam lapisan, lima prinsip strategi nasional, serta roadmap implementasi empat fase sepanjang 2025–2045. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan transformasi digital ditentukan oleh urutan pembangunan kapasitas pada keempat lapis

tersebut, bukan oleh kecanggihan teknologi semata. Penelitian ini berkontribusi memperluas kerangka transformasi digital ke ranah geospasial-maritim, menawarkan pendekatan sintesis kritis lintas disiplin, dan menyediakan peta jalan operasional bagi Badan Informasi Geospasial, Kementerian Pertahanan, dan Badan Keamanan Laut dalam merancang arsitektur SIG Nasional yang tangguh menuju Indonesia Emas 2045.

PENDAHULUAN

Revolusi Industri 4.0 dan visi Society 5.0 mengubah cara negara memandang data spasial. Data yang dahulu berfungsi sebagai pelengkap administrasi kini menjadi tulang punggung pengambilan keputusan strategis, mulai dari mitigasi bencana hingga pertahanan wilayah. Kajian sistematis terhadap literatur transformasi digital menunjukkan bahwa fenomena ini telah menghasilkan berbagai definisi dan pemahaman yang terfragmentasi mengenai bagaimana teknologi digital mengubah organisasi secara mendasar, sebuah kondisi yang juga tercermin pada cara pemerintah memperlakukan data geospasial sebagai aset strategis (Hanelt et al., 2021). Kajian lain menegaskan bahwa transformasi digital, meskipun menjadi salah satu tren riset manajemen yang paling berkembang, masih menyisakan ruang besar untuk penelitian lanjutan karena sifatnya yang multidimensi dan lintas sektor (Nadkarni & Prügl, 2021).

Paralel dengan itu, konsep Digital Government dan Digital Resilience mendorong negara-negara untuk memandang infrastruktur data spasial nasional bukan sekadar alat pemetaan, melainkan sistem saraf yang menghubungkan kebijakan, keamanan, dan ekonomi biru. Pergeseran ini menempatkan *Geographic Information System* pada posisi baru: dari alat visualisasi peta menjadi infrastruktur pengambilan keputusan lintas sektor yang menentukan kecepatan dan akurasi respons negara terhadap ancaman maupun peluang di wilayahnya, termasuk di ruang laut yang secara historis paling sulit diawasi.

Di balik optimisme transformasi digital, praktik pengelolaan data geospasial di banyak negara berkembang justru masih dibebani persoalan mendasar. Tinjauan sistematis terhadap penerapan GIS di sektor maritim-pelabuhan menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi ini masih terpusat pada fungsi pemetaan dan perencanaan spasial, dengan integrasi lintas sistem yang belum berkembang secara merata (Isbaex et al., 2025). Pola serupa muncul pada level infrastruktur kritis secara umum, di mana tinjauan lintas bidang terhadap *risk governance* dan ilmu informasi geografis mengidentifikasi kesenjangan yang konsisten antara kemajuan teknis pemetaan risiko dan kapasitas kelembagaan untuk memanfaatkannya dalam pengambilan keputusan (Arvidsson et al., 2021).

Persoalan ini diperparah oleh warisan sistem lama yang dibangun tanpa mempertimbangkan interoperabilitas; penelitian mengenai perencanaan tata ruang laut menunjukkan bahwa integritas data spasial kerap terganggu oleh kurangnya mekanisme umpan balik pemangku kepentingan yang terstruktur, sehingga data yang dikumpulkan satu lembaga sulit diverifikasi ulang atau digunakan lembaga lain (Flynn et al., 2023). Kondisi ini bukan sekadar persoalan teknis penyimpanan data, melainkan cerminan dari tata kelola yang belum dirancang untuk dunia yang saling terhubung. Ketika kerucut persoalan ini diarahkan ke konteks Indonesia, tantangannya menjadi berlipat: negara kepulauan dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai terpanjang kedua di dunia menghadapi fragmentasi data geospasial antarkementerian, duplikasi pemetaan, standar metadata yang tidak seragam, dan kapasitas pemantauan maritim *real-time* yang jauh dari memadai dibandingkan luas yurisdiksi yang harus diawasi.

Kesenjangan tata kelola data geospasial bukan persoalan administratif belaka; ia berkorelasi langsung dengan kemampuan negara mempertahankan kedaulatan di wilayah lautnya. Penelitian yang menelusuri peran satelit kecil dan big data dalam keamanan maritim menyimpulkan bahwa kemampuan mengungkap aktivitas yang sebelumnya tidak terlihat di laut lepas mengubah keseimbangan kekuatan pengawasan antarnegara, sebuah temuan yang relevan langsung dengan posisi Indonesia sebagai poros maritim dunia (Pekkanen et al., 2022). Ketertinggalan dalam kapasitas geospasial digital berarti ketertinggalan dalam mendeteksi illegal fishing, pelanggaran batas wilayah, dan pergerakan kapal mencurigakan sebelum insiden terjadi, bukan sesudahnya. Dimensi ini menautkan langsung pada agenda *Blue Economy*, karena pemantauan yang lemah menghambat eksploitasi sumber daya laut yang berkelanjutan dan mengurangi kepercayaan investor terhadap tata kelola maritim nasional.

Signifikansi ini bergerak lebih jauh ke arah ketahanan nasional dan pertahanan negara: sistem geospasial yang tangguh menjadi prasyarat bagi *Maritime Domain Awareness* yang kredibel, dan pada gilirannya menjadi salah satu pilar yang menentukan apakah visi Indonesia Emas 2045, dengan target sebagai kekuatan ekonomi dan maritim dunia, dapat dicapai atau justru terhambat oleh kerentanan struktural yang dibiarkan berlarut-larut.

Perkembangan teknologi tidak berhenti pada perbaikan akurasi peta. SIG generasi terbaru bertransformasi menjadi ekosistem yang menyatukan kecerdasan buatan, big data, komputasi awan, *Internet of Things*, *digital twin*, penginderaan jauh, pengamatan bumi berbasis satelit, dan kesadaran domain maritim ke dalam satu rantai pengambilan keputusan. Studi mengenai analitik risiko maritim berbasis *Discrete Global Grid System* menunjukkan bahwa penggabungan data geospasial heterogen dengan kerangka analitik cerdas memungkinkan penilaian risiko yang sebelumnya mustahil dilakukan secara manual (Rawson et al., 2022).

Kapasitas ini semakin diperkuat oleh kehadiran big data maritim; penelitian mengenai antarmuka komunikasi geospasial menegaskan bahwa membangun gambaran situasi maritim yang utuh pada era big data menuntut arsitektur yang mampu menyerap data dari sumber yang sangat beragam secara hampir seketika (Syms et al., 2021). Pada saat bersamaan, penginderaan jauh berkembang menjadi tulang punggung pemantauan lalu lintas laut skala luas; kajian tentang pemanfaatan penginderaan jauh untuk pemahaman lalu lintas maritim menunjukkan bahwa kombinasi citra satelit dan model analitik dapat mendeteksi pola pergerakan kapal yang sulit ditangkap oleh sistem pengawasan konvensional (Reggiannini et al., 2024). Namun kemajuan ini membawa konsekuensi baru: semakin banyak titik data yang terhubung, semakin luas pula permukaan serangan siber yang harus diamankan, sehingga kapasitas teknis dan kapasitas keamanan harus berkembang secara berimbang, bukan berurutan.

Indonesia telah merintis sejumlah inisiatif untuk merapikan tata kelola data spasialnya, di antaranya Kebijakan Satu Peta yang dikoordinasikan Badan Informasi Geospasial sebagai upaya mengintegrasikan data spasial tematik dari berbagai kementerian dan lembaga ke dalam satu basis referensi. Inisiatif ini berjalan beriringan dengan agenda transformasi pemerintahan digital yang lebih luas, yang menuntut interoperabilitas data lintas sektor sebagai prasyarat layanan publik berbasis bukti. Di ranah maritim, kebutuhan ini menjadi lebih mendesak karena kewenangan pengawasan laut tersebar di berbagai instansi, dari Badan Keamanan Laut, Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut, Kementerian Kelautan dan Perikanan, hingga Direktorat Jenderal Perhubungan Laut, yang masing-masing mengoperasikan sistem informasi geografisnya sendiri.

Kajian mengenai transformasi kebijakan maritim di era digital menegaskan bahwa peran teknologi menjadi penentu efektivitas dan keamanan pengelolaan laut Indonesia, namun implementasinya masih menghadapi hambatan koordinasi lintas sektor (Deanto & Marzaman, 2024). Temuan ini konsisten dengan kajian tentang pemanfaatan geospatial intelligence untuk keamanan dan pengelolaan maritim Indonesia, yang menyoroti bahwa kapasitas geoint nasional masih perlu diperkuat agar sejalan dengan kompleksitas ancaman di wilayah laut Indonesia (Kusmantoro et al., 2024). Ketika kedua kajian ini dibaca bersama visi Indonesia Emas 2045, tampak jelas bahwa arah kebijakan sudah tersedia, tetapi belum diterjemahkan menjadi arsitektur digital yang terintegrasi dan terukur.

Artikel ini membangun argumen di sekitar sebelas variabel yang saling bertaut: transformasi digital, SIG Nasional, keamanan maritim, kecerdasan buatan, big data, Internet of Things, cloud computing, digital twin, keamanan siber, sumber daya manusia, dan kebijakan nasional. Kebijakan nasional berfungsi sebagai variabel pengunci yang menentukan apakah investasi pada teknologi mutakhir dapat terserap secara institusional. Sumber daya manusia menjadi variabel penghubung antara ketersediaan teknologi dan kualitas pemanfaatannya, karena secanggih apa pun infrastruktur digital, ia tidak akan menghasilkan keputusan yang lebih baik tanpa operator dan analis yang memahami cara membacanya.

Keamanan siber berperan sebagai prasyarat kepercayaan: tanpa jaminan integritas data, output dari kecerdasan buatan maupun digital twin kehilangan nilai strategisnya. *Cloud computing* dan *Internet of Things* berfungsi sebagai lapisan infrastruktur yang memungkinkan aliran data *real-time* dari sensor lapangan menuju pusat analitik, sementara big data dan kecerdasan buatan mengubah aliran data tersebut menjadi peringatan dini dan rekomendasi keputusan. Rangkaian keterkaitan inilah yang pada akhirnya menentukan kapasitas SIG Nasional dalam menopang keamanan maritim, dan pada gilirannya menentukan sejauh mana Indonesia siap memasuki 2045 dengan sistem pertahanan laut yang adaptif.

Literatur yang ada memberikan fondasi penting namun terfragmentasi menurut disiplin masing-masing. Pada satu sisi, literatur manajemen transformasi digital, sebagaimana disintesis oleh Hanelt et al. (2021) dan Nadkarni dan Prügl (2021), memetakan transformasi digital sebagai fenomena organisasional lintas sektor, tetapi keduanya tidak menyentuh secara spesifik bagaimana data geospasial dan keamanan maritim menjadi objek transformasi tersebut. Pada sisi lain, literatur maritim-teknis cenderung berfokus pada aplikasi tunggal: tinjauan tentang *integrasi edge computing* dengan kecerdasan buatan dan *blockchain* pada domain maritim, sistem aerial, dan IoT menghasilkan peta teknologi yang kaya, tetapi minim pembahasan tentang kerangka kebijakan yang mengikatnya menjadi satu strategi nasional (Alanhdi & Toka, 2024).

Kesenjangan metodologis juga tampak jelas; survei tentang ancaman keamanan siber pada industri maritim berbasis IoT mengidentifikasi kerentanan teknis secara mendalam, namun tidak menautkannya dengan kapasitas sumber daya manusia maupun kesiapan kelembagaan negara berkembang untuk meresponsnya (Ashraf et al., 2023). Kesenjangan empiris muncul secara khusus pada konteks Indonesia; kajian tentang transformasi digital pada industri maritim Indonesia menyoroti peluang dan tantangan pada level sektor pelayaran, tetapi belum menjangkau level SIG Nasional sebagai infrastruktur lintas sektor yang menopang keamanan maritim secara menyeluruh (Margaretha et al., 2024).

Kesenjangan kebijakan menjadi yang paling mencolok karena riset yang membahas MSDI dan tata kelola geospasial maritim, sebagaimana kajian tentang peran strategis *Marine Spatial Data Infrastructure* dalam mendukung keamanan maritim dan

perlindungan biodiversitas laut, umumnya dikembangkan pada konteks negara lain seperti Oman, sehingga rekomendasinya tidak secara langsung dapat diterapkan pada struktur kelembagaan dan geografi kepulauan Indonesia yang jauh lebih kompleks (Al-Subhiyah, 2025). Dengan membandingkan persamaan, perbedaan, dan keterbatasan dari kelima aliran literatur ini, tampak bahwa belum ada penelitian yang menyusun strategi transformasi digital SIG Nasional secara terintegrasi, yang secara eksplisit menautkan teknologi, sumber daya manusia, kebijakan, dan keamanan siber sebagai satu kerangka menuju target jangka panjang Indonesia Emas 2045.

Bertolak dari kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan strategi transformasi digital Sistem Informasi Geografis Nasional sebagai fondasi penguatan keamanan maritim Indonesia menuju Indonesia Emas 2045, melalui integrasi kecerdasan buatan, big data analytics, *Internet of Things*, *cloud computing*, *digital twin*, penginderaan jauh, *Spatial Data Infrastructure*, *Marine Spatial Data Infrastructure*, serta tata kelola digital nasional yang menyertainya.

Penelitian ini memberikan empat kontribusi. Secara teoretis, artikel ini memperluas kerangka transformasi digital yang selama ini didominasi perspektif manajemen organisasi ke ranah geospasial-maritim, dengan menempatkan data spasial sebagai objek transformasi yang memiliki karakteristik risiko dan tata kelola tersendiri. Secara metodologis, penelitian ini menunjukkan bagaimana sintesis kritis lintas disiplin, yang menggabungkan literatur manajemen, geoinformatika, dan keamanan maritim, dapat menghasilkan kerangka konseptual yang tidak dapat diperoleh dari salah satu disiplin secara terpisah. Secara praktis, artikel ini merumuskan peta jalan implementasi empat fase sepanjang 2025–2045 yang dapat menjadi rujukan operasional bagi Badan Informasi Geospasial, Kementerian Pertahanan, dan Badan Keamanan Laut. Secara kebijakan, temuan ini menawarkan basis argumentasi bagi penyusunan regulasi yang mengikat integrasi data geospasial maritim nasional, sekaligus memperkuat posisi tawar Indonesia dalam forum tata kelola maritim regional dan global.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengikuti alur pelaporan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020 (Page et al., 2021) sebagai kerangka utama, dipadukan dengan *narrative synthesis* (Popay et al., 2007) dan *thematic analysis* (Braun & Clarke, 2006) pada tahap sintesis. Kombinasi ini mengikuti pendekatan yang lazim dipakai pada SLR manajemen dan kebijakan yang tujuannya menyusun argumen konseptual lintas disiplin, bukan menghitung *effect size* dari suatu intervensi (Denyer & Tranfield, 2009; Tranfield et al., 2003). PRISMA menjaga keterlacakan proses seleksi (Page et al., 2021); *narrative synthesis* merangkai temuan dari studi yang secara metodologis terlalu heterogen untuk digabung secara statistik (Popay et al., 2007); *thematic analysis* mengorganisasikan data ke dalam tema yang menjawab pertanyaan penelitian melalui enam tahap baku yaitu, familiarisasi data, pembuatan kode awal, pencarian tema, peninjauan tema, penamaan tema, dan penyusunan laporan (Braun & Clarke, 2006). Kami menambahkan *critical literature synthesis* pada level tema, mengikuti prinsip *critical review* Grant dan Booth (2009), agar setiap tema menghasilkan penilaian atas persamaan, perbedaan, dan keterbatasan antarstudi, bukan sekadar rangkuman.

Sumber Data dan Strategi Pencarian

Korpus disusun dari basis data *Scopus* dan *Web of Science*, mencakup penerbit *Elsevier* (ScienceDirect), *IEEE Xplore*, *Springer*, *Wiley*, *MDPI* (ISPRS International Journal of Geo-

Information, Remote Sensing, Sustainability), dan *Taylor & Francis*, ditambah *arXiv* untuk artikel keamanan siber maritim dengan relevansi tinggi. *Scopus* dan *Web of Science* dipilih karena keduanya menjadi standar cakupan pada SLR multidisiplin di bidang manajemen dan teknologi (Mongeon & Paul-Hus, 2016), sedangkan *MDPI* dan *IEEE Xplore* ditambahkan untuk menjangkau literatur teknis geospasial dan siber yang cakupannya lemah di dua basis data utama.

Pencarian menggunakan operator Boolean yang menautkan empat kluster konsep: kluster geospasial ("Geographic Information System" OR "spatial data infrastructure" OR "marine spatial data infrastructure" OR "remote sensing"), kluster teknologi digital ("digital transformation" OR "artificial intelligence" OR "big data" OR "Internet of Things" OR "digital twin"), kluster maritim ("maritime security" OR "maritime domain awareness" OR "blue economy" OR "maritime governance"), dan kluster tata kelola ("cybersecurity" OR "digital policy" OR "governance"), digabungkan dengan AND antarkluster, struktur kluster-Boolean ini mengikuti rekomendasi Kitchenham (2007) untuk SLR yang menautkan konsep lintas domain teknis. Rentang publikasi mencakup 2012–2026, dengan penekanan 2019–2026 untuk menjaga relevansi terhadap perkembangan teknologi terkini, tanpa mengabaikan studi rintisan yang membangun konsep dasar interoperabilitas data geospasial. Pencarian dilakukan pada 4 Juli 2026, menghasilkan 70 rekaman awal.

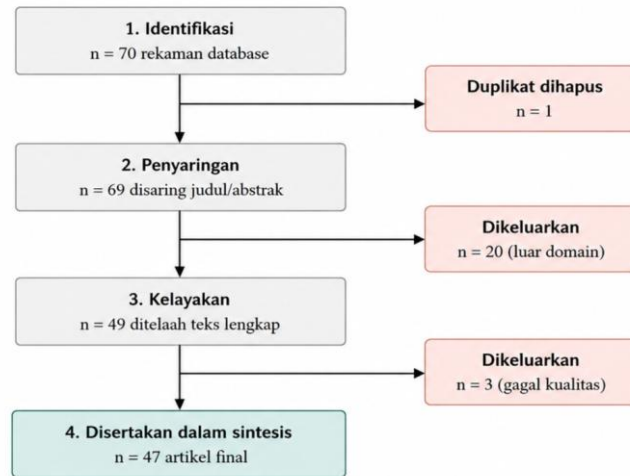
Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Artikel dimasukkan ke dalam korpus apabila memenuhi seluruh kriteria berikut: (1) diterbitkan dalam bahasa Inggris atau Indonesia pada jurnal, prosiding konferensi, atau laporan teknis yang melalui tinjauan sejawat; (2) membahas eksplisit minimal satu tema Sistem Informasi Geografis, transformasi digital, keamanan maritim, keamanan siber infrastruktur geospasial, atau *Spatial/Marine Spatial Data Infrastructure*; (3) memberikan kontribusi konseptual, empiris, atau teknis yang argumentasinya dapat ditelusuri dari abstrak dan isi artikel; dan (4) tersedia teks lengkap atau abstrak terstruktur yang memadai untuk proses coding.

Artikel dikeluarkan apabila: (1) berupa editorial pendek, opini tanpa dasar argumentasi ilmiah, atau abstrak konferensi tanpa data pendukung; (2) membahas Geographic Information System atau transformasi digital pada konteks yang sepenuhnya lepas dari domain maritim atau keamanan tanpa keterkaitan konseptual yang dapat disintesis; dan (3) merupakan duplikasi dari versi lain yang telah tercakup dalam korpus.

Proses Identifikasi dan Seleksi

Proses seleksi mengikuti empat tahap PRISMA yaitu, identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan penyertaan (Page et al., 2021). Metode penelitian dirancang mengikuti alur seleksi literature secara sistematis, proses seleksi disajikan pada Gambar 1.



Keterangan: Gray = tahap proses; Coral = dikeluarkan; Teal = korpus final.

Gambar 1. Diagram alir seleksi literatur pada penelitian ini
(Sumber: Diolah oleh penulis)

Setelah penghapusan satu rekaman duplikat (Dangermond dan Goodchild, 2020, yang muncul pada dua klaster pencarian berbeda) berdasarkan judul, penulis, dan DOI, 69 rekaman dibawa ke tahap penyaringan judul dan abstrak.

Pada tahap penyaringan, dua penulis memeriksa judul dan abstrak secara independen untuk menilai relevansi awal terhadap ruang lingkup penelitian; ketidaksepakatan diselesaikan melalui diskusi hingga tercapai konsensus, mengikuti prosedur *dual-reviewer* yang direkomendasikan Higgins et al. (2019) untuk mengurangi bias seleksi tunggal. Sebanyak 20 rekaman dikeluarkan pada tahap ini karena membahas Sistem Informasi Geografis atau transformasi digital pada konteks *smart city*, *digital twin* perkotaan, *e-government*, dan GIScience umum yang sepenuhnya lepas dari domain maritim atau keamanan, tanpa keterkaitan konseptual yang dapat disintesis (kriteria eksklusif kedua). Sebanyak 49 rekaman dibawa ke tahap kelayakan.

Pada tahap kelayakan, teks lengkap ditelaah untuk memastikan pemenuhan kriteria inklusi dan kedalaman argumentasi yang memadai untuk coding. Tiga rekaman dikeluarkan pada tahap ini karena tidak memenuhi standar minimal pada dimensi metode atau konsistensi temuan saat dinilai dengan kriteria CASP/AACODS, meskipun ketiganya relevan secara tematik terhadap teknologi geospasial di sektor maritim. Proses ini menghasilkan korpus akhir 47 artikel yang secara kolektif merepresentasikan lima aliran literatur: manajemen transformasi digital, aplikasi geospasial domain maritim, keamanan siber infrastruktur kritis dan maritim, tata kelola dan kebijakan geospasial-maritim, serta integrasi teknologi mutakhir (AI, big data, digital twin) pada konteks kelautan.

Penelitian Kualitas

Setiap artikel yang lolos tahap kelayakan dinilai kualitasnya menggunakan kombinasi kriteria yang diadaptasi dari *Critical Appraisal Skills Programme* atau CASP (Singh, 2013) untuk studi empiris, dan kerangka *Authority, Accuracy, Coverage, Objectivity, Date, Significance* atau AACODS (Tyndall, 2010) untuk literatur abu-abu dan laporan teknis. Penilaian mencakup empat dimensi; kejelasan rumusan masalah dan tujuan penelitian, ketepatan metode terhadap pertanyaan penelitian, konsistensi temuan dengan data yang disajikan, serta relevansi dan kebaruan kontribusi terhadap domain geospasial-maritim. Artikel yang tidak memenuhi standar minimal pada dimensi metode atau konsistensi temuan tidak disertakan dalam sintesis akhir, sekalipun secara tematik relevan,

mengikuti praktik *exclusion-by-quality* yang dianjurkan Petticrew dan Roberts (2006) untuk menjaga keandalan *argumen review*.

Coding dan Thematic Analysis

Proses coding dilakukan manual dengan pendekatan deduktif-induktif gabungan, mengikuti model lima langkah Mayring (2014): (1) menyusun kerangka kode dari pertanyaan penelitian, (2) mengkode bagian teks yang relevan, (3) merevisi kerangka, (4) mengkode ulang dengan kerangka revisi, dan (5) menafsirkan hasil akhir. Kerangka kode awal disusun deduktif dari enam pertanyaan penelitian: tantangan teknologi, kompetensi sumber daya manusia, kebijakan nasional, keamanan siber, model integrasi teknologi, dan roadmap implementasi. Kode tambahan dikembangkan induktif dari pembacaan berulang terhadap isi artikel, menangkap subtema yang tidak tercakup kerangka awal, seperti interoperabilitas kelembagaan, kesenjangan investasi infrastruktur digital di negara berkembang, dan pola kegagalan implementasi teknologi maritim serta konsisten dengan prinsip *inductive category development* Mayring (2014) untuk menangkap temuan di luar kerangka a priori. Dua penulis mengkode independen pada satu subset artikel untuk memeriksa keandalan antar-pengkode; ketidaksepakatan didiskusikan hingga konsensus, sejalan dengan prosedur cross-checking yang dipakai Karhunen et al. (2018) pada SLR serupa. Setiap kutipan atau simpulan yang relevan diberi label kode, dikelompokkan ke dalam tema, kemudian disusun ulang menjadi kategori yang lebih luas melalui tahapan *thematic analysis* Braun dan Clarke (2006).

Narrative Synthesis dan Critical Literature Synthesis

Narrative synthesis merangkai temuan dari studi dengan metode dan konteks geografis berbeda ke dalam alur argumentasi yang mengikuti logika pertanyaan penelitian, tanpa memaksakan homogenitas metodologis yang tidak dimiliki korpus (Popay et al., 2007). Pada setiap tema, kami menerapkan *critical literature synthesis* dengan membandingkan tiga hingga lima studi dalam satu paragraf, mengidentifikasi titik temu, titik beda, keterbatasan metodologis atau kontekstual masing-masing, dan implikasinya bagi konteks Indonesia dengan mengikuti logika *critical review* Grant dan Booth (2009), di mana sintesis wajib menghasilkan argumen baru, bukan sekadar rangkuman literatur. Pendekatan ini memastikan bagian Hasil dan Pembahasan tidak berhenti pada rangkuman literatur, melainkan menghasilkan sintesis kritis yang menjawab keenam pertanyaan penelitian secara terintegrasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tantangan Transformasi Digital SIG Nasional

Pembahasan tantangan transformasi digital SIG Nasional tidak dapat dipisahkan dari kenyataan bahwa persoalan teknis, kelembagaan, dan sumber daya manusia berjalan saling mengunci, bukan berurutan. Membaca literatur secara terpisah per isu justru menyembunyikan pola ini. Tinjauan sistematis terhadap penerapan GIS pada sektor maritim-pelabuhan menemukan bahwa sebagian besar implementasi masih berhenti pada fungsi pemetaan dasar dan perencanaan spasial, tanpa berkembang menjadi sistem pendukung keputusan yang terintegrasi (Isbaex et al., 2025). Temuan ini sejalan dengan hasil kajian terhadap sektor pelayaran di Turki, yang mendapati bahwa hambatan digitalisasi bukan semata soal ketersediaan teknologi, melainkan kesenjangan kesiapan organisasi dan pemahaman manajerial terhadap manfaat jangka panjang investasi digital (Koca & Erdoğan, 2024). Pola serupa muncul pada tinjauan sistematis tata kelola maritim digital di Bangladesh, yang menyimpulkan bahwa negara berkembang cenderung mengadopsi teknologi secara parsial dan reaktif, tanpa kerangka kebijakan yang mengikat arah transformasi secara menyeluruh (Bashir & Zakaria, 2025). Ketiga studi ini, meski

berasal dari konteks geografis berbeda, menunjuk pada akar masalah yang sama: teknologi tersedia, tetapi kapasitas kelembagaan untuk mengonversinya menjadi nilai strategis tertinggal jauh di belakang.

Persoalan fragmentasi data memperoleh penguatan dari sisi infrastruktur data spasial itu sendiri. Kajian mengenai pembangunan infrastruktur geospasial menegaskan bahwa kegagalan paling umum dalam pengembangan *Spatial Data Infrastructure* bukan terletak pada teknologi penyimpanan data, melainkan pada ketiadaan standar berbagi data yang disepakati lintas lembaga sejak awal perancangan sistem (Dangermond & Goodchild, 2020). Argumen ini diperkuat oleh tinjauan lintas bidang terhadap *risk governance*, yang mendapati bahwa kesenjangan antara kapasitas teknis pemetaan risiko dan kapasitas kelembagaan untuk memanfaatkannya justru melebar ketika jumlah lembaga yang terlibat dalam satu domain risiko bertambah banyak (Arvidsson et al., 2021). Pada konteks perencanaan tata ruang laut, kondisi ini terlihat konkret: penelitian mengenai integritas data spasial dalam perencanaan tata ruang laut menemukan bahwa data yang dikumpulkan satu lembaga sering kali tidak dapat diverifikasi ulang atau digunakan lembaga lain karena minimnya mekanisme umpan balik pemangku kepentingan yang terstruktur (Flynn et al., 2023). Ditambah dengan temuan tentang hambatan implementasi teknologi geospasial dalam perencanaan tata ruang laut yang menunjukkan bahwa praktisi lapangan kerap menghadapi resistensi organisasi dan keterbatasan anggaran sebagai penghambat utama, bukan keterbatasan algoritma atau perangkat lunak (Schwartz-Belkin & Portman, 2024), tampak jelas bahwa fragmentasi data geospasial adalah gejala dari tata kelola yang tidak dirancang untuk interoperabilitas, bukan sekadar kelemahan teknis semata.

Dimensi keamanan siber memperlihatkan pola tantangan yang berbeda karakter, meskipun akar penyebabnya tetap berpaut pada kelambanan tata kelola. Survei tentang ancaman keamanan siber pada industri maritim berbasis IoT mengidentifikasi bahwa perluasan konektivitas perangkat di lingkungan maritim menciptakan permukaan serangan yang tumbuh lebih cepat daripada kapasitas mitigasi yang tersedia (Ashraf et al., 2023). Tinjauan komprehensif mengenai keamanan siber maritim menegaskan simpulan serupa dari sudut pandang berbeda, yaitu bahwa kerentanan pada sistem maritim modern kerap berasal dari integrasi sistem lama dengan teknologi baru tanpa audit keamanan yang memadai pada titik pertemuan keduanya (Li et al., 2024). Studi kasus penguatan keamanan siber pada pelabuhan Durres menambahkan dimensi praktis atas temuan ini, dengan menunjukkan bahwa strategi keamanan siber pelabuhan sering disusun terpisah dari strategi transformasi digital pelabuhan itu sendiri, sehingga keduanya berjalan dengan prioritas yang tidak selalu selaras (Golgota & Çerma, 2024). Pembacaan gabungan atas ketiga studi ini menunjukkan bahwa keamanan siber pada ekosistem geospasial maritim tidak bisa diperlakukan sebagai lapisan tambahan yang dipasang setelah sistem berjalan, melainkan harus menjadi bagian dari arsitektur sejak tahap perancangan.

Tantangan sumber daya manusia dan koordinasi kelembagaan menjadi benang merah yang menghubungkan seluruh persoalan di atas. Kajian mengenai tantangan digitalisasi pada domain maritim di India menyimpulkan bahwa keterbatasan personel yang memiliki kemampuan analisis data menjadi hambatan yang lebih besar dibandingkan keterbatasan infrastruktur perangkat keras (Kallimani, 2018). Temuan ini konsisten dengan kajian mengenai transformasi digital dan kerentanan pada ekosistem maritim dan galangan kapal, yang menemukan bahwa proyek digitalisasi kerap terhenti pada tahap uji coba karena organisasi tidak memiliki jalur pengembangan kompetensi digital yang berkelanjutan bagi staf operasionalnya (Diaz et al., 2023). Pada level nasional, kajian

mengenai pendekatan sistemik keamanan siber dalam transformasi digital maritim menegaskan bahwa kesenjangan kompetensi ini berdampak ganda, karena organisasi yang kekurangan tenaga ahli digital sekaligus kekurangan tenaga ahli keamanan siber, sehingga kedua kerentanan tersebut saling memperkuat satu sama lain (Kechagias et al., 2022). Terakhir, kajian tentang faktor penyebab kegagalan transformasi digital pada perusahaan pelayaran kecil dan menengah menunjukkan bahwa kombinasi keterbatasan kapabilitas dinamis organisasi dan ketiadaan dukungan kebijakan dari otoritas terkait menjadi penyebab utama proyek digital berhenti sebelum memberikan dampak nyata (Nguyen & Le, 2025).

Ketika kelima kelompok temuan ini dibaca sebagai satu kesatuan, bukan sebagai daftar masalah yang berdiri sendiri, terlihat bahwa transformasi digital SIG Nasional Indonesia menghadapi empat lapis tantangan yang saling menopang: lapis data (fragmentasi dan ketiadaan standar interoperabilitas), lapis keamanan (kerentanan siber yang tumbuh seiring konektivitas), lapis manusia (kesenjangan kompetensi digital dan analitik), dan lapis kelembagaan (koordinasi lintas instansi yang lemah dan kebijakan yang belum mengikat). Argumen ini menolak pandangan yang menempatkan transformasi digital semata sebagai persoalan pengadaan teknologi, dan sebaliknya menegaskan bahwa keberhasilan transformasi digital SIG Nasional bergantung pada penyelarasan keempat lapis tersebut secara bersamaan.

Table 1. Ringkasan Tantangan Transformasi Digital SIG Nasional Berdasarkan Sintesis Literatur

Kategori Tantangan	Temuan Kunci	Sumber
Fragmentasi data dan ketiadaan standar interoperabilitas	SIG masih berfungsi sebagai alat pemetaan, belum terintegrasi lintas sistem	Dangermond dan Goodchild, (2020); Isbaex et al. (2025)
Kesenjangan kapasitas kelembagaan	Kapasitas teknis pemetaan risiko tidak diimbangi kapasitas kelembagaan untuk memanfaatkannya	Arvidsson et al. (2021); Flynn et al. (2023)
Resistensi organisasi dan keterbatasan anggaran	Hambatan implementasi lebih banyak berasal dari faktor organisasi daripada teknologi	Koca & Erdoğan, (2024); Schwartz-Belkin dan Portman, (2024)
Kerentanan keamanan siber	Perluasan konektivitas IoT memperluas permukaan serangan tanpa diimbangi mitigasi	Ashraf et al. (2023); Golgota dan Çerma (2024); Li et al. (2024)
Keterbatasan kompetensi digital SDM	Kekurangan tenaga analitik data dan keamanan siber menjadi hambatan utama	Kallimani (2018); Kechagias et al. (2022)
Ketiadaan kebijakan pengikat dan dukungan kelembagaan	Proyek digital berhenti pada tahap uji coba tanpa dukungan kebijakan berkelanjutan	Bashir dan Zakaria (2025); Diaz et al. (2023); Nguyen dan Le (2025)

(Sumber: Diolah oleh penulis)

Pola tantangan berlapis ini membawa argumentasi pada pertanyaan berikutnya: kompetensi seperti apa yang harus dibangun pada sumber daya manusia agar mampu menjembatani keempat lapis persoalan tersebut. Bagian berikut menelusuri jawaban atas pertanyaan itu.

Pengembangan Kompetensi Sumber Daya Manusia

Bagian sebelumnya menunjukkan bahwa kesenjangan kompetensi digital menjadi salah satu dari empat lapis tantangan yang saling mengunci dalam transformasi SIG Nasional. Bagian ini menelusuri lebih jauh kompetensi seperti apa yang sebenarnya dibutuhkan, dan mengapa pendekatan pelatihan teknis semata tidak cukup untuk menjawab persoalan tersebut.

Literatur mengenai kompetensi digital maritim menunjukkan pergeseran penting dari keterampilan teknis tunggal menuju kompetensi hibrida yang menggabungkan

penguasaan teknologi dengan pemahaman domain. Kajian mengenai pengembangan kompetensi digital maritim menegaskan bahwa standar kompetensi pelaut dan operator sistem maritim harus diperbarui secara berkelanjutan seiring masuknya otomatisasi dan sistem cerdas ke dalam operasi maritim, karena kompetensi yang dirancang untuk sistem manual tidak lagi memadai untuk mengoperasikan sistem yang mengandalkan analitik data (Hopcraft, 2021). Argumen ini selaras dengan simpulan yang lebih umum dari kajian sistematis transformasi digital, yang menegaskan bahwa keberhasilan transformasi digital pada organisasi mana pun ditentukan oleh kemampuan sumber daya manusia menerjemahkan kapabilitas teknis menjadi keputusan strategis, bukan oleh kecanggihan teknologi itu sendiri (Hanelt et al., 2021). Kedua kajian ini, meski satu berfokus pada domain maritim dan satu lagi pada organisasi secara umum, menunjuk pada kesimpulan yang sama: kompetensi digital yang dibutuhkan bersifat hibrida, menggabungkan literasi teknologi dengan penguasaan konteks operasional tempat teknologi tersebut diterapkan.

Pola kegagalan pada organisasi yang tidak berhasil mengembangkan kompetensi ini memberikan pelajaran yang lebih konkret. Kajian mengenai faktor penyebab kegagalan transformasi digital pada perusahaan pelayaran kecil dan menengah, dengan menggunakan perspektif *dynamic capability theory*, menemukan bahwa organisasi yang gagal bertransformasi bukan karena kekurangan akses teknologi, melainkan karena tidak memiliki kapabilitas dinamis untuk terus menyesuaikan kompetensi tenaga kerjanya seiring perubahan teknologi (Nguyen & Le, 2025). Temuan ini memperkuat hasil kajian mengenai digitalisasi transportasi maritim, yang mendapati bahwa hambatan utama adopsi teknologi digital pada sektor ini berasal dari kesenjangan pemahaman manajerial terhadap manfaat jangka panjang investasi digital, bukan dari keterbatasan anggaran semata (Sanchez-Gonzalez et al., 2019). Kedua studi ini menunjukkan bahwa persoalan kompetensi SDM tidak berhenti pada level operator lapangan, tetapi menjangkau level manajerial yang bertanggung jawab merancang arah investasi digital jangka panjang. Sebuah organisasi dapat memiliki operator yang terampil mengoperasikan perangkat baru, namun tetap gagal bertransformasi apabila manajemennya tidak memiliki kapabilitas menyusun strategi adopsi teknologi yang berkelanjutan.

Kebutuhan kompetensi menjadi semakin kompleks ketika SIG Nasional diarahkan untuk berintegrasi dengan kecerdasan buatan, big data, dan keamanan siber sekaligus. Kajian mengenai penerapan penginderaan jauh, data geospasial, dan teknik AI/ML pada ekonomi biru India menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi tersebut secara optimal menuntut tenaga kerja yang menguasai analitik data geospasial sekaligus memahami konteks kebijakan kelautan tempat data tersebut digunakan, sebuah kombinasi keahlian yang jarang tersedia dalam satu jenjang pendidikan formal (Agarwal et al., 2025). Kebutuhan lintas disiplin ini diperparah oleh dimensi keamanan siber; kajian mengenai pendekatan sistemik keamanan siber dalam transformasi digital maritim menegaskan bahwa organisasi kerap kekurangan tenaga ahli yang memahami keamanan siber sekaligus memahami sistem operasional maritim secara mendalam, sehingga kedua bidang keahlian tersebut cenderung berkembang secara terpisah, padahal keduanya seharusnya saling menginformasikan (Kechagias et al., 2022). Kajian yang lebih lama mengenai tantangan digitalisasi dan analisis data pada domain maritim India telah mengidentifikasi gejala serupa jauh sebelum isu ini menjadi perhatian global, dengan menyimpulkan bahwa keterbatasan personel yang mampu menganalisis data dalam jumlah besar menjadi hambatan struktural yang lebih signifikan dibandingkan keterbatasan perangkat keras (Kallimani, 2018). Ketiga studi ini, yang terpisah baik secara waktu maupun konteks geografis, secara konsisten menunjukkan bahwa kompetensi yang dibutuhkan bukan sekadar kompetensi tunggal di bidang geospasial,

data sains, atau keamanan siber, melainkan kompetensi antarmuka yang menghubungkan ketiganya.

Pada level sektoral dan nasional, pola serupa terkonfirmasi dengan penekanan yang sedikit berbeda. Kajian sistematis mengenai transformasi digital pada sektor transportasi maritim menyimpulkan bahwa organisasi yang berhasil bertransformasi umumnya membangun program pengembangan kompetensi secara bertahap dan berkelanjutan, alih-alih mengandalkan pelatihan satu kali yang terpisah dari kebutuhan operasional harian (Tijan et al., 2021). Pada konteks Indonesia, kajian mengenai transformasi digital industri maritim menegaskan bahwa peluang besar dari digitalisasi sektor ini berisiko tidak termanfaatkan apabila tidak diikuti penguatan kapasitas sumber daya manusia secara paralel, terutama pada instansi yang bertanggung jawab atas pengelolaan data dan keamanan maritim (Margaretha et al., 2024). Temuan ini relevan untuk dibandingkan dengan kajian tentang hambatan digitalisasi pada sektor maritim Turki, yang menunjukkan bahwa negara dengan struktur kelembagaan maritim yang terfragmentasi cenderung mengalami kesenjangan kompetensi yang lebih lebar dibandingkan negara dengan struktur kelembagaan yang lebih terpusat, karena program pengembangan kompetensi sulit diselaraskan lintas instansi yang berbeda kewenangan (Koca & Erdoğan, 2024). Kondisi ini memiliki relevansi langsung bagi Indonesia, mengingat kewenangan pengawasan maritim yang tersebar di berbagai kementerian dan lembaga sebagaimana diuraikan pada bagian Pendahuluan, sehingga pengembangan kompetensi SDM SIG Nasional tidak dapat dirancang secara terpisah oleh masing-masing instansi tanpa kerangka kompetensi bersama di tingkat nasional.

Menyatukan kelima kelompok temuan di atas menghasilkan argumen bahwa strategi pengembangan kompetensi SDM untuk SIG Nasional Indonesia perlu dibangun pada tiga jenjang sekaligus: jenjang operasional yang menguasai keterampilan teknis pengolahan data geospasial dan sistem sensor, jenjang analitik yang menguasai penggabungan data geospasial dengan big data dan kecerdasan buatan untuk menghasilkan rekomendasi keputusan, dan jenjang manajerial-strategis yang mampu menerjemahkan kapabilitas teknis tersebut menjadi kebijakan lintas instansi. Ketiadaan salah satu jenjang ini akan menghasilkan kesenjangan yang sama, sekalipun jenjang lainnya sudah kuat, sebagaimana ditunjukkan berulang kali oleh literatur pada berbagai konteks negara.

Tabel 2. Kerangka Kompetensi SDM untuk Transformasi Digital SIG Nasional

Jenjang Kompetensi	Fokus Keahlian	Risiko Apabila Tidak Terpenuhi	Sumber Rujukan
Operasional	Pengolahan data geospasial, pengoperasian sensor dan sistem pemantauan	Data terkumpul namun tidak terkelola secara konsisten	Hopcraft, (2021); Kallimani (2018)
Analitik	Integrasi big data, AI/ML, dan analisis geospasial untuk mendukung keputusan	Data tersedia namun tidak menghasilkan wawasan yang dapat ditindaklanjuti	Agarwal et al. (2025); Kechagias et al. (2022)
Manajerial-Strategis	Perumusan kebijakan, koordinasi lintas instansi, perencanaan investasi digital jangka panjang	Investasi teknologi terhenti pada tahap uji coba tanpa keberlanjutan	Nguyen dan Le (2025); Sanchez-Gonzalez et al. (2019); Tijan et al. (2021)
Kontekstual-Kelembagaan	Pemahaman struktur kewenangan maritim nasional dan kebutuhan koordinasi antarlembaga	Program pengembangan SDM berjalan sendiri-sendiri tanpa standar bersama	Koca dan Erdoğan, (2024); Margaretha et al. (2024)

(Sumber: Diolah oleh penulis)

Kerangka kompetensi tiga jenjang ini tidak akan berfungsi tanpa payung kebijakan yang mengikatnya menjadi program nasional yang konsisten, bukan inisiatif parsial

masing-masing instansi. Bagian berikutnya membahas kebijakan nasional seperti apa yang diperlukan untuk mewujudkan hal tersebut.

Kebijakan Nasional untuk Transformasi Digital SIG

Kerangka kompetensi SDM yang diuraikan pada bagian sebelumnya hanya akan bertahan sebagai inisiatif jangka pendek apabila tidak disokong oleh kebijakan yang mengikat lintas instansi. Bagian ini menelusuri bagaimana literatur memandang peran kebijakan nasional dalam mengarahkan transformasi digital SIG, dan mengapa ketiadaan kebijakan yang eksplisit menjadi salah satu penyebab paling konsisten dari kegagalan implementasi yang telah dibahas sebelumnya.

Kajian mengenai transformasi kebijakan maritim di era digital menegaskan bahwa efektivitas dan keamanan pengelolaan laut Indonesia sangat bergantung pada sejauh mana teknologi digital diintegrasikan ke dalam kerangka regulasi yang mengikat, bukan sekadar diadopsi secara sukarela oleh masing-masing instansi (Deanto & Marzaman, 2024). Argumen ini memperoleh dukungan dari konteks yang berbeda melalui kajian sistematis tata kelola maritim digital di Bangladesh, yang menyimpulkan bahwa negara berkembang cenderung terjebak pada adopsi teknologi yang bersifat proyek per proyek tanpa payung kebijakan nasional yang mengarahkan investasi digital secara terkoordinasi, sehingga hasil dari satu proyek jarang direplikasi atau diperluas ke instansi lain (Bashir & Zakaria, 2025). Ketika kedua temuan ini dibaca bersama, tampak pola yang berulang pada negara berkembang dengan struktur kelembagaan maritim yang terfragmentasi: kebijakan hadir dalam bentuk visi umum, tetapi belum diterjemahkan menjadi instrumen regulasi yang secara spesifik mengatur integrasi data, standar interoperabilitas, dan alokasi tanggung jawab antarlembaga.

Pengalaman negara lain dalam merancang kebijakan geospasial maritim memberikan pembandingan yang berguna bagi Indonesia. Kajian mengenai peran strategis Marine Spatial Data Infrastructure dalam mendukung keamanan maritim dan perlindungan biodiversitas laut di Oman menunjukkan bahwa kebijakan nasional yang eksplisit mengatur pengelolaan MSDI menjadi prasyarat sebelum teknologi seperti kecerdasan buatan dan blockchain dapat diintegrasikan secara efektif ke dalam sistem pengawasan maritim (Al-Subhiyah, 2025). Argumen ini diperkuat oleh kajian lanjutan mengenai integrasi kecerdasan buatan dan blockchain pada infrastruktur data spasial laut, yang menegaskan bahwa keberhasilan integrasi teknologi tersebut pada konteks Oman tidak lepas dari keberadaan kerangka kebijakan Visi 2040 yang secara eksplisit menempatkan transformasi digital maritim sebagai agenda strategis nasional, lengkap dengan pembagian tanggung jawab antarlembaga yang jelas (Al Subhi & Al Suqri, 2025). Kajian lain yang membahas integrasi teknologi, keberlanjutan, dan ekonomi biru dalam memperkuat keamanan maritim dan ketahanan iklim di bawah Visi Oman 2040 turut menegaskan bahwa keberhasilan tersebut bertumpu pada keselarasan antara kebijakan ekonomi biru, kebijakan keamanan maritim, dan kebijakan transformasi digital yang dirancang sebagai satu kesatuan, bukan sebagai kebijakan sektoral yang berjalan sendiri-sendiri (Subhi & Suqri, 2025). Ketiga kajian ini secara konsisten menunjukkan bahwa kebijakan nasional yang efektif bukan sekadar mendorong adopsi teknologi, melainkan mengikat teknologi tersebut ke dalam kerangka tata kelola yang mengatur kewenangan, tanggung jawab, dan standar data secara eksplisit.

Namun demikian, keberhasilan pendekatan semacam ini pada konteks Oman tidak dapat dipindahkan begitu saja ke Indonesia tanpa penyesuaian struktural. Oman merupakan negara dengan struktur pemerintahan yang relatif tersentralisasi dan garis pantai yang jauh lebih pendek dibandingkan Indonesia, sehingga koordinasi kebijakan lintas lembaga dapat dilakukan dengan kompleksitas yang jauh lebih rendah. Indonesia,

sebagaimana diuraikan pada bagian Pendahuluan, memiliki kewenangan pengawasan maritim yang tersebar di berbagai kementerian dan lembaga dengan garis pantai dan wilayah yurisdiksi laut yang jauh lebih luas. Perbedaan struktural ini menjadi salah satu bentuk kesenjangan kontekstual yang telah diidentifikasi pada bagian Pendahuluan, dan menjadi alasan mengapa kerangka kebijakan MSDI yang berhasil di Oman perlu diadaptasi, bukan direplikasi secara langsung, ke dalam konteks kelembagaan Indonesia yang lebih terdesentralisasi dan lebih kompleks.

Pada level infrastruktur data yang lebih mendasar, kebijakan standar dan interoperabilitas data menjadi elemen yang berulang kali ditekankan sebagai prasyarat teknis dari kebijakan yang lebih luas. Kajian mengenai pembangunan infrastruktur geospasial menegaskan bahwa keberhasilan *Spatial Data Infrastructure* pada skala nasional bergantung pada kesepakatan standar data yang mengikat secara hukum, bukan sekadar kesepakatan teknis antarlembaga yang bersifat sukarela (Dangermond & Goodchild, 2020). Argumen ini relevan untuk dibandingkan dengan kajian mengenai kerangka pengembangan Marine Spatial Data Infrastructure pada studi kasus Kroasia, yang menemukan bahwa proses harmonisasi data spasial laut antarlembaga berjalan lambat justru karena regulasi yang mewajibkan berbagi data antarinstansi belum sepenuhnya berlaku secara efektif, meskipun kerangka teknisnya sudah tersedia (Tavra et al., 2017). Kedua studi ini, yang membahas infrastruktur data spasial dari sudut pandang berbeda, menegaskan simpulan yang sama dengan temuan pada bagian sebelumnya mengenai fragmentasi data: persoalan interoperabilitas data geospasial pada dasarnya adalah persoalan kebijakan yang mengatur kewajiban berbagi data, bukan semata persoalan format atau standar teknis.

Dimensi kebijakan keamanan siber turut memperlihatkan pola yang sejalan. Kajian mengenai pendekatan sistemik keamanan siber dalam transformasi digital maritim menegaskan bahwa organisasi maritim memerlukan kerangka kebijakan keamanan siber yang terintegrasi dengan strategi transformasi digital sejak awal, bukan disusun sebagai kebijakan tambahan setelah insiden keamanan terjadi (Kechagias et al., 2022). Pola ini konsisten dengan temuan dari studi kasus penguatan keamanan siber pada pelabuhan Durres, yang menunjukkan bahwa strategi keamanan siber yang disusun terpisah dari strategi transformasi digital menyebabkan kebijakan keduanya berjalan dengan prioritas yang tidak selaras, sehingga celah keamanan justru muncul pada titik pertemuan antara sistem lama dan sistem baru (Golgota & Çerma, 2024). Temuan ini memberikan dasar argumentasi bagi kebutuhan kebijakan keamanan siber data geospasial nasional, namun pada level kebijakan makro, kedua studi ini menegaskan bahwa kebijakan transformasi digital SIG Nasional dan kebijakan keamanan siber nasional tidak dapat dirumuskan sebagai dua dokumen kebijakan yang terpisah.

Menyatukan seluruh temuan di atas, kebijakan nasional yang dibutuhkan Indonesia untuk mewujudkan transformasi digital SIG Nasional perlu mencakup empat elemen yang saling terkait: pertama, kerangka regulasi yang mewajibkan interoperabilitas dan berbagi data geospasial antarlembaga, bukan sekadar mendorongnya secara sukarela; kedua, pembagian kewenangan dan tanggung jawab yang eksplisit antara Badan Informasi Geospasial, Badan Keamanan Laut, Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut, Kementerian Kelautan dan Perikanan, dan Direktorat Jenderal Perhubungan Laut dalam pengelolaan data geospasial maritim; ketiga, integrasi kebijakan keamanan siber ke dalam kerangka kebijakan transformasi digital SIG sejak tahap perancangan; dan keempat, keselarasan antara kebijakan transformasi digital SIG dengan agenda ekonomi biru dan visi jangka panjang Indonesia Emas 2045, mengikuti pola yang ditunjukkan oleh

pengalaman Oman, namun disesuaikan dengan kompleksitas kelembagaan dan geografi kepulauan Indonesia yang jauh lebih besar.

Tabel 3. Elemen Kebijakan Nasional yang Diperlukan untuk Transformasi Digital SIG

Elemen Kebijakan	Fungsi Strategis	Preseden atau Dasar Argumentasi	Sumber Rujukan
Kewajiban interoperabilitas dan berbagi data	Mengatasi fragmentasi data dan duplikasi pemetaan antarlembaga	Kegagalan harmonisasi data pada MSDI Kroasia akibat regulasi yang belum mengikat	Dangermond dan Goodchild (2020); Tavra et al. (2017)
Pembagian kewenangan lintas lembaga yang eksplisit	Mengurangi tumpang tindih dan kekosongan tanggung jawab pengawasan maritim	Fragmentasi kelembagaan sebagai penyebab lambannya adopsi teknologi terkoordinasi	Bashir dan Zakaria, (2025); Deanto dan Marzaman (2024)
Integrasi kebijakan keamanan siber dengan kebijakan transformasi digital	Menutup celah keamanan pada titik pertemuan sistem lama dan baru	Ketidakselarasan strategi keamanan siber dan digitalisasi di pelabuhan Durres	Golgota dan Çerma, (2024); Kechagias et al. (2022)
Keselarasan kebijakan MSDI dengan agenda ekonomi biru dan visi jangka panjang	Menjadikan transformasi digital SIG sebagai agenda strategis nasional, bukan proyek sektoral	Model kebijakan Visi Oman 2040 yang mengikat MSDI dengan agenda ekonomi biru dan keamanan maritim	Al-Subhiyah (2025); Subhi dan Suqri (2025)

(Sumber: Diolah oleh penulis)

Kebijakan yang mewajibkan berbagi data dan mengintegrasikan keamanan siber sejak tahap perancangan, sebagaimana diuraikan di atas, hanya akan berarti apabila diikuti oleh strategi keamanan siber data geospasial yang konkret dan operasional. Bagian berikutnya menelusuri strategi tersebut secara lebih mendalam.

Keamanan Siber Data Geospasial Nasional

Bagian sebelumnya menyimpulkan bahwa kebijakan keamanan siber tidak dapat dirumuskan terpisah dari kebijakan transformasi digital SIG. Bagian ini menelusuri lebih dalam bentuk konkret strategi keamanan siber yang dibutuhkan, dengan menempatkan data geospasial maritim sebagai objek perlindungan yang memiliki karakteristik risiko tersendiri dibandingkan data pemerintahan pada umumnya.

Karakteristik risiko itu pertama-tama muncul dari sifat konektivitas perangkat pengumpul data geospasial maritim. Survei tentang ancaman keamanan siber pada industri maritim berbasis IoT menunjukkan bahwa perangkat sensor, buoy pemantau, dan sistem identifikasi otomatis kapal umumnya dirancang dengan prioritas pada keandalan operasional, bukan pada ketahanan terhadap serangan siber, sehingga celah keamanan sering kali baru diketahui setelah perangkat tersebut telah beroperasi bertahun-tahun di lapangan (Ashraf et al., 2023). Tinjauan komprehensif mengenai keamanan siber maritim memperkuat gambaran ini dengan menunjukkan bahwa kerentanan paling signifikan justru muncul pada titik pertemuan antara sistem operasional lama yang tidak pernah dirancang untuk terhubung ke jaringan luar dan sistem informasi baru yang menuntut konektivitas penuh, sebuah kombinasi yang menciptakan celah yang tidak terlihat oleh audit keamanan konvensional (Li et al., 2024). Kedua kajian ini, meski menyoroti sudut pandang yang berbeda, yaitu perangkat keras di satu sisi dan arsitektur sistem di sisi lain, sama-sama menegaskan bahwa kerentanan siber pada domain maritim bukan kelemahan yang dapat ditambal dengan satu jenis solusi teknis, melainkan produk dari cara sistem lama dan baru dipertemukan tanpa perencanaan keamanan yang menyeluruh.

Dimensi digital twin dan Internet of Underwater Things menambah lapisan risiko yang belum banyak dibahas pada kerangka keamanan siber konvensional. Kajian mengenai keamanan pada digital twin sistem transportasi maritim berbasis IoT menunjukkan bahwa representasi digital dari aset fisik maritim, apabila tidak dilindungi

dengan baik, dapat menjadi titik masuk baru bagi peretas untuk memanipulasi data yang pada akhirnya memengaruhi keputusan operasional di dunia nyata, bukan sekadar mencuri data (Liu et al., 2021). Risiko ini berbeda karakter dari kebocoran data biasa, karena kerusakan yang ditimbulkan bersifat operasional dan dapat langsung berdampak pada keselamatan navigasi maritim. Temuan ini relevan dibaca bersama kajian mengenai integrasi *edge computing* dengan kecerdasan buatan dan blockchain pada domain maritim, sistem aerial, dan IoT, yang menyoroti bahwa arsitektur *edge computing*, meskipun mengurangi latensi pengambilan keputusan, justru memperluas jumlah titik pemrosesan data yang harus diamankan secara individual, alih-alih terpusat pada satu titik kendali (Alanhdhi & Toka, 2024). Kombinasi kedua temuan ini menunjukkan bahwa semakin canggih arsitektur teknologi yang diadopsi, semakin kompleks pula permukaan serangan yang harus dikelola, sehingga strategi keamanan siber harus berkembang setara dengan kecepatan adopsi teknologi baru, bukan menyusul di belakangnya.

Pengalaman sektoral memberikan pelajaran konkret mengenai bagaimana kesenjangan antara strategi digital dan strategi keamanan siber terjadi dalam praktik. Studi kasus penguatan keamanan siber pada pelabuhan Durres menunjukkan bahwa strategi keamanan siber pelabuhan tersebut disusun sebagai dokumen terpisah dari peta jalan transformasi digital pelabuhan, sehingga investasi keamanan siber baru dialokasikan setelah kerangka digitalisasi utama sudah berjalan, meninggalkan jendela kerentanan pada masa transisi (Golgota & Çerma, 2024). Kajian mengenai pendekatan sistemik keamanan siber dalam transformasi digital maritim menawarkan perspektif yang melengkapi temuan tersebut, dengan menegaskan bahwa pendekatan sistemik yang mengintegrasikan penilaian risiko siber ke dalam setiap tahap transformasi digital, mulai dari perencanaan hingga operasi, terbukti lebih efektif mencegah insiden dibandingkan pendekatan yang menambahkan kontrol keamanan setelah sistem berjalan (Kechagias et al., 2022). Perbandingan kedua studi ini menegaskan argumen yang telah dibangun dimana keamanan siber data geospasial nasional harus menjadi bagian dari arsitektur sejak tahap perancangan SIG Nasional, bukan lapisan tambahan yang dipasang kemudian.

Skala data yang dikelola turut memperbesar taruhan dari setiap kerentanan yang dibiarkan. Kajian mengenai penerapan big data dan analisis geospasial dalam manajemen keselamatan transportasi maritim menunjukkan bahwa volume data yang terus bertambah dari berbagai sumber sensor dan citra satelit menciptakan tantangan tersendiri dalam menjaga integritas data sepanjang siklus pengumpulan, penyimpanan, dan analisisnya, karena setiap titik dalam rantai tersebut berpotensi menjadi celah manipulasi data jika tidak diverifikasi silang (Zhou et al., 2025). Risiko manipulasi data ini memiliki konsekuensi yang lebih serius dibandingkan sekadar kebocoran data pada konteks maritim, karena keputusan mengenai rute kapal, penegakan hukum di laut, dan respons terhadap potensi ancaman keamanan sangat bergantung pada keakuratan data yang mendasarinya. Kajian mengenai kumpulan data terintegrasi untuk intelijen, pengawasan, dan pengintaian maritim menambahkan dimensi teknis atas persoalan ini, dengan menunjukkan bahwa penggabungan data dari berbagai sumber sensor yang heterogen, meskipun memperkaya gambaran situasi maritim, juga meningkatkan kompleksitas verifikasi asal dan keaslian data pada setiap titik penggabungan (Ray et al., 2019). Kedua kajian ini menegaskan bahwa strategi keamanan siber data geospasial nasional tidak dapat berhenti pada perlindungan infrastruktur jaringan semata, tetapi harus mencakup mekanisme verifikasi integritas data di sepanjang rantai pengolahannya.

Menggabungkan kelima kelompok temuan tersebut menghasilkan argumen bahwa strategi keamanan siber data geospasial nasional Indonesia perlu dibangun di atas empat pilar yang saling menopang. Pilar pertama adalah keamanan pada tingkat perangkat dan

sensor, yang menuntut standar keamanan minimum bagi setiap perangkat pengumpul data geospasial maritim sebelum diintegrasikan ke jaringan nasional. Pilar kedua adalah keamanan arsitektur sistem, yang menuntut audit keamanan khusus pada setiap titik pertemuan antara sistem lama dan sistem baru, termasuk pada implementasi digital twin dan edge computing. Pilar ketiga adalah keamanan tata kelola, yang menuntut integrasi penilaian risiko siber ke dalam setiap tahap perencanaan transformasi digital, bukan sebagai kontrol tambahan setelah sistem berjalan. Pilar keempat adalah keamanan integritas data, yang menuntut mekanisme verifikasi silang pada proses penggabungan data dari berbagai sumber sensor dan citra satelit, mengingat keputusan strategis keamanan maritim sangat bergantung pada keakuratan data yang mendasarinya.

Pilar Strategi Keamanan Siber Data Geospasial Nasional



Gambar 2. Pilar Strategi Keamanan Siber Data Geospasial Nasional

(Sumber: Diolah oleh penulis)

Keempat pilar keamanan siber ini menjadi prasyarat yang harus terpenuhi sebelum teknologi mutakhir seperti kecerdasan buatan, big data, Internet of Things, dan digital twin dapat diintegrasikan secara andal ke dalam SIG Nasional. Bagian berikutnya menelusuri model integrasi teknologi tersebut secara lebih rinci, dengan tetap merujuk pada empat pilar keamanan yang telah diuraikan di atas sebagai kerangka pengaman yang menyertainya.

Model Integrasi SIG dengan Teknologi Mutakhir

Pilar keamanan siber yang diuraikan pada bagian sebelumnya menjadi kerangka pengaman yang harus melekat pada setiap teknologi yang dibahas berikut ini. Bagian ini menelusuri bagaimana literatur memandang integrasi SIG dengan kecerdasan buatan, big data, komputasi awan, *Internet of Things*, *Internet of Underwater Things*, *digital twin*, penginderaan jauh, teknologi satelit, *Marine Spatial Data Infrastructure*, dan *Maritime Domain Awareness*, tidak sebagai kumpulan teknologi yang berdiri sendiri, melainkan sebagai satu rantai nilai yang saling menopang.

Kecerdasan Buatan, Machine Learning, dan Big Data

Kombinasi ketiga teknologi ini paling sering dibahas literatur sebagai lapisan analitik yang mengubah data geospasial mentah menjadi peringatan dini dan rekomendasi keputusan. Kajian mengenai analitik risiko maritim berbasis *Discrete Global Grid System*

menunjukkan bahwa penggabungan data geospasial heterogen dengan kerangka analitik cerdas memungkinkan penilaian risiko yang sebelumnya mustahil dilakukan secara manual, karena algoritma dapat memproses variasi skala dan resolusi data secara serentak (Rawson et al., 2022). Kapasitas ini diperkuat pada level operasional oleh sistem BATMAN, sebuah pendekatan yang terinspirasi cara kerja otak manusia untuk melacak aktivitas maritim, yang menunjukkan bahwa arsitektur *machine learning* yang meniru pola pengenalan bertingkat dapat mendeteksi anomali pergerakan kapal dengan tingkat kepekaan yang lebih tinggi dibandingkan sistem aturan tetap konvensional (Jones et al., 2023).

Pada skala ekonomi biru yang lebih luas, kajian mengenai penerapan penginderaan jauh, data geospasial, dan teknik AI/ML di India menunjukkan bahwa kombinasi ketiganya mempercepat identifikasi potensi zona tangkapan ikan dan pemantauan aktivitas penangkapan ikan ilegal, sekaligus mendukung perencanaan ekonomi biru secara lebih presisi (Agarwal et al., 2025). Sementara itu, kajian mengenai penerapan big data dan analisis geospasial pada manajemen keselamatan transportasi maritim menegaskan bahwa manfaat AI dan big data hanya terwujud apabila kualitas dan integritas data yang menjadi input tetap terjaga sepanjang rantai pengolahannya, sebuah pengingat yang menautkan kembali pembahasan ini pada pilar keamanan integritas data yang telah dibahas sebelumnya (Zhou et al., 2025). Keempat kajian ini menunjukkan pola yang konsisten: nilai strategis AI dan big data pada domain maritim tidak terletak pada kecanggihan algoritmanya semata, melainkan pada kualitas data geospasial yang menjadi bahan bakunya dan pada sejauh mana keluarannya benar-benar digunakan dalam siklus pengambilan keputusan operasional.

Cloud Computing, Internet of Things, dan Internet of Underwater Things

Ketiga teknologi ini berfungsi sebagai lapisan infrastruktur yang memungkinkan data mengalir dari sensor lapangan menuju pusat analitik secara hampir seketika. Kajian mengenai integrasi *edge computing* dengan kecerdasan buatan dan *blockchain* pada domain maritim menunjukkan bahwa arsitektur edge computing, yang memproses sebagian data di dekat sumbernya sebelum dikirim ke cloud, mengurangi latensi pengambilan keputusan pada sistem pemantauan maritim, meskipun konsekuensinya adalah bertambahnya titik pemrosesan data yang harus diamankan secara individual (Alanhdi & Toka, 2024).

Pada sisi rantai pasok, kajian mengenai informasi digital pada rantai pasok maritim dengan blockchain dan platform cloud menunjukkan bahwa adopsi platform cloud bersama antarpemangku kepentingan pelayaran meningkatkan transparansi pergerakan barang, tetapi implementasinya masih terhambat oleh keengganan sebagian pelaku industri untuk berbagi data operasional secara terbuka (Surucu-Balci et al., 2024). Persoalan keengganan berbagi data ini konsisten dengan temuan mengenai ancaman keamanan siber pada industri maritim berbasis IoT, yang menunjukkan bahwa perluasan konektivitas perangkat menciptakan permukaan serangan yang tumbuh lebih cepat daripada kapasitas mitigasi yang tersedia (Ashraf et al., 2023), sehingga keengganan berbagi data sebagian dapat dipahami sebagai respons rasional terhadap risiko keamanan yang belum tertangani. Perbandingan ketiga kajian ini menunjukkan bahwa adopsi cloud dan IoT pada domain maritim menghadapi *trade-off* yang belum banyak dibahas secara eksplisit dalam literatur, yaitu antara kebutuhan interoperabilitas data yang menuntut keterbukaan dan kebutuhan keamanan yang menuntut kontrol akses yang ketat.

Digital Twin

Digital twin menempati posisi khusus karena merepresentasikan aset fisik maritim secara virtual dan *real-time*, sehingga kegagalan pada representasi ini berdampak langsung pada keputusan operasional. Kajian mengenai keamanan pada *digital twin* sistem transportasi maritim berbasis IoT menunjukkan bahwa manipulasi data pada representasi digital dapat mendorong operator mengambil keputusan yang keliru terhadap aset fisik yang direpresentasikannya, sebuah risiko yang secara kualitatif berbeda dari kebocoran data biasa (Liu et al., 2021). Temuan ini memberi konteks tambahan bagi roadmap jangka panjang, karena *digital twin* baru dapat diterapkan secara andal apabila pilar keamanan arsitektur sistem, sebagaimana diuraikan telah terpenuhi terlebih dahulu.

Penginderaan Jauh, Earth Observation, dan Teknologi Satelit

Penginderaan jauh dan teknologi satelit menjadi sumber data utama yang menjangkau area laut yang tidak terjangkau sensor darat. Kajian awal mengenai integrasi penginderaan jauh satelit dengan *Automatic Identification System* (AIS) menunjukkan bahwa pemanfaatan berbagai sumber data geospasial secara terpadu mampu meningkatkan cakupan pemantauan wilayah laut yang luas, memperpendek waktu pembaruan informasi kapal, serta memperkuat kemampuan deteksi aktivitas maritim. Melalui analisis konstelasi satelit.

Graziano et al. (2012). menunjukkan bahwa sinergi antara data AIS berbasis satelit dan citra penginderaan jauh, khususnya *Synthetic Aperture Radar* (SAR), dapat menghasilkan sistem pengawasan maritim yang lebih efektif dibandingkan penggunaan satu sumber data secara terpisah. Temuan tersebut menjadi salah satu fondasi bagi berkembangnya sistem pengawasan maritim berbasis data multisumber yang kemudian diadopsi dalam konsep Maritime Domain Awareness (MDA), yaitu integrasi berbagai informasi geospasial untuk mendukung deteksi dini, pemantauan lalu lintas kapal, dan pengambilan keputusan keamanan maritim secara lebih komprehensif. Kapasitas ini berkembang signifikan seiring miniaturisasi satelit; kajian mengenai peran satelit kecil dan big data dalam keamanan maritim menunjukkan bahwa konstelasi satelit kecil berbiaya rendah memungkinkan negara dengan anggaran terbatas untuk memperoleh citra dengan frekuensi pembaruan yang jauh lebih tinggi dibandingkan era satelit tunggal berukuran besar, sehingga mengubah keseimbangan kemampuan pengawasan antarnegara (Pekkanen et al., 2022).

Pada sisi analitik citra, kajian mengenai pemanfaatan penginderaan jauh untuk pemahaman lalu lintas maritim menunjukkan bahwa kombinasi citra satelit dan model analitik dapat mendeteksi pola pergerakan kapal yang sulit ditangkap sistem pengawasan konvensional, termasuk kapal yang mematikan transpondernya (Reggiannini et al., 2024). Penerapan yang lebih luas pada konteks kebencanaan ditunjukkan oleh kajian mengenai lingkungan geospasial untuk penilaian risiko badai, yang menunjukkan bahwa integrasi data penginderaan jauh dengan model geospasial mendukung kesadaran situasional dan perencanaan ketahanan yang lebih responsif terhadap ancaman berbasis cuaca ekstrem (Kijewski-Correa et al., 2020), sebuah kapasitas yang relevan mengingat Indonesia juga menghadapi ancaman iklim di wilayah pesisir dan lautnya. Keempat kajian ini menunjukkan evolusi yang jelas: dari integrasi dasar remote sensing dan GIS menuju kapasitas deteksi anomali berbasis konstelasi satelit yang lebih murah dan lebih sering diperbarui, dengan aplikasi yang meluas dari pengawasan keamanan hingga mitigasi bencana.

Maritime Domain Awareness dan Decision Support System

Maritime Domain Awareness berfungsi sebagai titik temu dari seluruh teknologi yang dibahas sebelumnya, karena kesadaran situasional maritim yang utuh membutuhkan integrasi data dari sensor, satelit, dan sistem analitik ke dalam satu gambaran operasional. Kajian mengenai antarmuka komunikasi geospasial menunjukkan bahwa membangun gambaran situasi maritim yang utuh pada era big data menuntut arsitektur yang mampu menyerap data dari sumber yang sangat beragam secara hampir seketika, dan bahwa kegagalan mengintegrasikan sumber data yang berbeda format menjadi hambatan teknis paling umum dalam praktiknya (Syms et al., 2021). Kajian mengenai analisis keselamatan dan keamanan sistem pengawasan maritim pada area laut kritis menambahkan bahwa efektivitas sistem pengawasan tidak hanya ditentukan oleh cakupan sensor, tetapi juga oleh kemampuan sistem mengintegrasikan informasi keselamatan pelayaran dan informasi keamanan secara bersamaan dalam satu kerangka pengambilan keputusan (Şengül et al., 2023).

Pada level pemodelan rute, kajian mengenai metode spasial terdistribusi untuk pemodelan rute maritim menunjukkan bahwa model prediktif rute kapal berbasis data historis dapat mendukung Decision Support System dalam mengidentifikasi penyimpangan rute yang mengindikasikan potensi pelanggaran, meskipun akurasi model tersebut sangat bergantung pada kelengkapan data historis yang tersedia (Zissis et al., 2020). Dimensi penegakan hukum turut diperkuat oleh kajian mengenai strategi inovatif penegakan hukum maritim digital di Tiongkok, yang menunjukkan bahwa integrasi *Maritime Domain Awareness* dengan sistem penegakan hukum digital mempercepat respons terhadap pelanggaran di laut, namun efektivitasnya bergantung pada kewenangan hukum yang jelas bagi aparat untuk bertindak berdasarkan data digital tersebut (Wang, 2024). Empat kajian ini bersama-sama menegaskan bahwa *Maritime Domain Awareness* dan *Decision Support System* bukan produk akhir dari integrasi teknologi, melainkan lapisan yang menuntut keselarasan antara kelengkapan data, kemampuan integrasi lintas format, dan kejelasan kewenangan hukum untuk menindaklanjuti hasil analisisnya.

Spatial Data Infrastructure dan Marine Spatial Data Infrastructure sebagai Fondasi Integrasi

Seluruh teknologi yang dibahas di atas bertumpu pada satu prasyarat yang sama, yaitu keberadaan *Spatial Data Infrastructure* dan *Marine Spatial Data Infrastructure* yang berfungsi sebagai kerangka referensi bersama. Kajian mengenai penyediaan data spasial untuk ketahanan komunitas pesisir menunjukkan bahwa manfaat data spasial bagi pengambilan keputusan pesisir baru terwujud apabila data tersebut dikelola dengan tata kelola yang jelas dan dapat diakses oleh pemangku kepentingan yang relevan, bukan hanya tersimpan pada basis data teknis (Huang et al., 2021). Argumen ini konsisten dengan kajian mengenai adaptasi risiko pesisir melalui big data geospasial yang dapat diakses publik, yang menunjukkan bahwa ketersediaan data spasial berkualitas tinggi secara terbuka meningkatkan kapasitas perencanaan adaptif pada level lokal, dengan syarat data tersebut disertai metadata yang memadai agar dapat digunakan secara tepat (Rumson et al., 2017).

Pada level tata kelola militer dan pertahanan, kajian mengenai perancangan kerangka sistem pertahanan militer untuk tata kelola geoinformasi menunjukkan bahwa integrasi data geospasial pada domain pertahanan menuntut kerangka tata kelola yang secara khusus mengatur klasifikasi kerahasiaan data, sesuatu yang tidak selalu dibutuhkan pada SDI untuk keperluan sipil (Jardim et al., 2022). Pada konteks pengembangan pelabuhan, kajian mengenai integrasi GIS dalam pengembangan pelabuhan maritim untuk perencanaan sumber daya menunjukkan bahwa SDI yang terintegrasi dengan data

operasional pelabuhan mempercepat perencanaan kapasitas dan alokasi sumber daya, namun manfaat ini baru optimal ketika data pelabuhan terhubung dengan data spasial dari otoritas maritim yang lebih luas (Ramesh & Bhaskaran, 2025).

Sebagai pembanding dari isu tata kelola data lintas batas, kajian mengenai tata kelola data maritim hijau Arktik dalam konteks koridor pelayaran hijau menunjukkan bahwa regulasi data lintas batas, seperti Undang-Undang Data Uni Eropa, mulai memengaruhi bagaimana data spasial maritim dikelola dan dipertukarkan antarnegara, sebuah tren regulasi yang berpotensi memengaruhi standar internasional yang perlu diantisipasi Indonesia dalam merancang MSDI nasionalnya (Lim et al., 2026). Kelima kajian ini menegaskan bahwa SDI dan MSDI bukan sekadar basis data spasial, melainkan kerangka tata kelola yang harus mengakomodasi kebutuhan berbeda dari sektor sipil, pertahanan, dan komersial secara bersamaan, sekaligus mengantisipasi perkembangan regulasi data internasional yang terus bergerak.

Rantai Nilai Integrasi Teknologi SIG Nasional

Menyatukan keenam kelompok temuan di atas menunjukkan bahwa integrasi SIG dengan teknologi mutakhir membentuk rantai nilai berurutan, bukan kumpulan teknologi yang dapat diadopsi secara acak. *Spatial Data Infrastructure* dan *Marine Spatial Data Infrastructure* berfungsi sebagai fondasi yang menyediakan referensi data bersama. Di atas fondasi ini, penginderaan jauh dan teknologi satelit menyediakan aliran data mentah berskala luas. *Cloud computing*, IoT, dan IoUT menjadi jalur distribusi data tersebut secara *real-time*. Kecerdasan buatan, *machine learning*, dan big data mengubah aliran data menjadi analisis dan peringatan dini. Digital twin memberikan representasi virtual yang memungkinkan simulasi skenario sebelum keputusan diambil di dunia nyata. *Maritime Domain Awareness* dan *Decision Support System* menjadi titik akhir yang menyatukan seluruh lapisan tersebut ke dalam keputusan operasional. Kegagalan pada satu lapisan, sebagaimana ditunjukkan berulang kali oleh literatur di atas, akan membatasi manfaat lapisan-lapisan yang berada di atasnya, betapapun canggih teknologi yang digunakan pada lapisan tersebut.



Gambar 3. Rantai Nilai Integrasi Teknologi SIG Nasional untuk Keamanan Maritim
(Sumber: Diolah oleh penulis)

Rantai nilai berurutan ini menjadi dasar argumentasi bagi strategi nasional transformasi digital SIG yang akan dibahas pada bagian berikutnya, karena urutan pembangunan kapasitas pada setiap lapisan menentukan pentahapan yang realistis dalam roadmap implementasi 2025–2045.

Strategi Nasional Transformasi Digital SIG

Rantai nilai yang diuraikan pada bagian sebelumnya, mulai dari fondasi data hingga keputusan operasional, hanya dapat berjalan apabila disatukan oleh strategi nasional yang eksplisit. Bagian ini menyintesis temuan menjadi kerangka strategi yang menjawab bagaimana Indonesia dapat menyelaraskan tantangan, kompetensi SDM, kebijakan, keamanan siber, dan integrasi teknologi ke dalam satu arah gerak yang koheren.

Titik tolak strategi ini adalah pengakuan bahwa urutan pembangunan kapasitas menentukan keberhasilan, bukan kelengkapan teknologi semata. Kajian sistematis mengenai transformasi digital menegaskan bahwa organisasi yang mencoba mengadopsi banyak teknologi secara bersamaan tanpa fondasi kapabilitas yang memadai cenderung mengalami apa yang disebut sebagai transformasi yang dangkal, yaitu perubahan pada permukaan proses tanpa perubahan substansial pada cara organisasi mengambil keputusan (Hanelt et al., 2021). Argumen ini relevan langsung dengan temuan yang menunjukkan bahwa Indonesia menghadapi kesenjangan berlapis pada data, keamanan, SDM, dan kelembagaan secara bersamaan. Kajian mengenai tinjauan sistematis tata kelola maritim digital di Bangladesh memperkuat argumen ini dengan menunjukkan bahwa negara berkembang yang mencoba mengadopsi teknologi maritim canggih tanpa terlebih dahulu membenahi fondasi data dan kelembagaannya cenderung menghasilkan proyek percontohan yang tidak pernah diperluas menjadi sistem nasional (Bashir & Zakaria, 2025). Kedua kajian ini menunjukkan bahwa strategi nasional transformasi digital SIG Indonesia perlu bersifat bertahap dan berurutan, bukan simultan pada seluruh lapisan teknologi.

Prinsip pentahapan ini memperoleh dukungan konkret dari pengalaman negara yang berhasil mengintegrasikan kebijakan, teknologi, dan agenda ekonomi biru secara bersamaan. Kajian mengenai peran strategis *Marine Spatial Data Infrastructure* di Oman menunjukkan bahwa keberhasilan integrasi MSDI dengan teknologi kecerdasan buatan pada negara tersebut dibangun secara bertahap, dimulai dari penguatan tata kelola data dasar sebelum masuk ke tahap integrasi teknologi analitik lanjutan (Al-Subhiyah, 2025). Pola bertahap yang sama ditemukan pada kajian mengenai integrasi kecerdasan buatan dan blockchain pada infrastruktur data spasial laut, yang menegaskan bahwa penerapan teknologi mutakhir tersebut baru dilakukan setelah kerangka kebijakan Visi 2040 menetapkan pembagian tanggung jawab kelembagaan yang jelas terlebih dahulu (Subhi & Suqri, 2025). Perbandingan pengalaman Oman dengan kondisi Indonesia yang telah dibahas menegaskan kembali bahwa strategi nasional Indonesia perlu menempatkan penguatan kebijakan dan kelembagaan sebagai prasyarat awal, bukan sebagai agenda paralel yang berjalan bersamaan dengan adopsi teknologi lanjutan, mengingat kompleksitas kelembagaan Indonesia yang jauh lebih besar dibandingkan Oman.

Dimensi keberlanjutan investasi menjadi elemen strategi yang sering terlewat dalam perancangan roadmap teknologi. Kajian mengenai faktor penyebab kegagalan transformasi digital pada perusahaan pelayaran kecil dan menengah menunjukkan bahwa proyek digital yang paling sering gagal bukan pada tahap peluncuran awal, melainkan pada tahap pemeliharaan dan pembaruan berkelanjutan setelah investasi awal terpakai habis (Nguyen & Le, 2025). Temuan ini relevan dibaca bersama kajian mengenai tinjauan sistematis transformasi digital pada sektor transportasi maritim, yang menunjukkan bahwa organisasi yang berhasil mempertahankan manfaat transformasi

digital dalam jangka panjang umumnya memiliki mekanisme evaluasi dan pembaruan strategi yang berjalan secara berkala, bukan strategi yang disusun sekali kemudian dijalankan tanpa peninjauan ulang (Tijan et al., 2021). Kedua kajian ini menegaskan bahwa strategi nasional transformasi digital SIG Indonesia perlu menyertakan mekanisme evaluasi berkala yang eksplisit, bukan hanya menetapkan target akhir pada tahun 2045 tanpa titik-titik pemeriksaan di sepanjang jalan menuju target tersebut.

Elemen strategi berikutnya menyangkut bagaimana investasi teknologi disinkronkan dengan pengembangan kompetensi SDM, mengingat temuan sebelumnya menunjukkan bahwa kompetensi berjenjang, dari operasional hingga manajerial-strategis, harus dibangun secara paralel dengan teknologi yang diadopsi. Kajian mengenai pengembangan kompetensi digital maritim menegaskan bahwa standar kompetensi perlu diperbarui secara berkelanjutan seiring masuknya teknologi baru, sehingga pembaruan kompetensi tidak dapat diperlakukan sebagai kegiatan satu kali di awal program transformasi (Hopcraft, 2021). Sinkronisasi ini menjadi penting karena, sebagaimana ditunjukkan pada bagian E, setiap lapisan rantai nilai teknologi menuntut jenis kompetensi yang berbeda, mulai dari kompetensi operasional untuk mengelola sensor dan data mentah, kompetensi analitik untuk mengoperasikan sistem kecerdasan buatan dan big data, hingga kompetensi manajerial untuk menerjemahkan keluaran *Decision Support System* menjadi kebijakan operasional di lapangan.

Menyatukan keempat elemen di atas, strategi nasional transformasi digital SIG Indonesia perlu dibangun di atas lima prinsip. Pertama, prinsip pentahapan, yang menempatkan penguatan fondasi data, kebijakan, dan kelembagaan sebagai prasyarat sebelum integrasi teknologi analitik lanjutan. Kedua, prinsip keselarasan kebijakan dan keamanan siber, yang mengharuskan setiap tahap adopsi teknologi disertai kerangka keamanan yang sepadan, sebagaimana diuraikan sebelumnya. Ketiga, prinsip pengembangan kompetensi paralel, yang menyelaraskan investasi teknologi dengan pembangunan kompetensi SDM pada jenjang yang sesuai. Keempat, prinsip evaluasi berkala, yang menetapkan titik pemeriksaan periodik untuk menilai apakah pentahapan strategi berjalan sesuai rencana atau memerlukan penyesuaian. Kelima, prinsip adaptasi kontekstual, yang mengakui bahwa preseden keberhasilan dari negara lain, seperti Oman, perlu disesuaikan dengan kompleksitas geografi kepulauan dan struktur kelembagaan Indonesia yang jauh lebih besar.

5 Prinsip Strategi Nasional Transformasi Digital SIG

Lima prinsip utama yang menjadi landasan menuju SIG Nasional yang modern, aman, dan berkelanjutan



Gambar 4. Lima Prinsip Strategi Nasional Transformasi Digital SIG
(Sumber: Diolah oleh penulis)

Kelima prinsip ini menjadi kerangka acuan bagi penyusunan roadmap implementasi jangka panjang, karena setiap fase dalam roadmap tersebut perlu mencerminkan urutan pentahapan, keselarasan keamanan, dan penyesuaian kontekstual yang telah diuraikan di atas. Bagian berikutnya menerjemahkan kelima prinsip ini menjadi roadmap implementasi empat fase sepanjang 2025–2045.

Roadmap Implementasi Transformasi Digital SIG Nasional 2025-2045



Gambar 5. Roadmap Implementasi Transformasi Digital SIG Nasional 2025-2045

(Sumber: Diolah oleh penulis)

Kelima prinsip strategi menuntut penerjemahan menjadi tahapan waktu yang konkret. Roadmap di atas menyusun empat fase implementasi selama dua puluh tahun, dengan setiap fase membangun fondasi bagi fase berikutnya sesuai prinsip pentahapan yang telah diuraikan.

Fase I (2025–2030): Fondasi Digital. Fase ini berfokus pada penguatan *Spatial Data Infrastructure* nasional, migrasi sistem GIS lama ke platform *cloud*, penetapan standar keamanan siber dasar, dan uji coba terbatas kecerdasan buatan pada domain deteksi anomali kapal. Tujuan utamanya adalah menghilangkan fragmentasi data dan menyepakati standar interoperabilitas antarlembaga, sebagaimana ditegaskan kebutuhannya oleh kajian mengenai pembangunan infrastruktur geospasial (Dangermond & Goodchild, 2020) dan kajian mengenai kerangka pengembangan *Marine Spatial Data Infrastructure* di Kroasia yang menekankan pentingnya regulasi berbagi data sejak tahap awal (Tavra et al., 2017). Program utama mencakup penyusunan regulasi kewajiban berbagi data geospasial maritim, pembentukan unit keamanan siber khusus data geospasial, serta pelatihan dasar analitik data bagi operator SIG di instansi terkait. Pemangku kepentingan inti pada fase ini adalah Badan Informasi Geospasial sebagai koordinator standar data, Badan Siber dan Sandi Negara untuk kerangka keamanan, serta Badan Keamanan Laut dan Kementerian Kelautan dan Perikanan sebagai pengguna utama. Indikator keberhasilan mencakup tersedianya satu standar metadata nasional yang disepakati seluruh instansi dan berkurangnya duplikasi pemetaan pada wilayah maritim prioritas. Risiko utama fase ini adalah resistensi kelembagaan terhadap kewajiban berbagi data, sejalan dengan temuan mengenai hambatan implementasi geospasial akibat faktor organisasi (Schwartz-Belkin & Portman, 2024); mitigasinya adalah menjadikan kewajiban tersebut mengikat secara regulasi, bukan imbauan administratif.

Fase II (2030–2035): Konektivitas. Fase kedua memperluas interoperabilitas antarsistem melalui penerapan *Internet of Things* pada jaringan sensor maritim, integrasi kecerdasan buatan skala lebih luas untuk analitik prediktif, perluasan pemanfaatan

penginderaan jauh dan citra satelit, serta pembangunan jenjang kompetensi digital tenaga kerja secara sistematis. Kebutuhan fase ini bertumpu pada argumen bahwa cloud computing dan IoT berfungsi sebagai jalur distribusi data yang menghubungkan sensor lapangan dengan pusat analitik (Alanhdi & Toka, 2024), serta pada kebutuhan pengembangan kompetensi berjenjang yang telah dibahas sebelumnya (Hopcraft, 2021). Program utama mencakup pembangunan jaringan sensor IoT maritim terintegrasi, kerja sama pemanfaatan data satelit dengan mitra internasional, dan penyusunan kurikulum kompetensi digital geospasial bagi aparaturnya. Pemangku kepentingan meluas mencakup Kementerian Komunikasi dan Digital untuk infrastruktur konektivitas, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional untuk data penginderaan jauh, dan lembaga pendidikan tinggi untuk pengembangan kurikulum. Indikator keberhasilan mencakup cakupan sensor pemantauan maritim real-time pada jalur pelayaran strategis dan jumlah aparaturnya yang tersertifikasi kompetensi analitik geospasial. Risiko utama adalah kesenjangan investasi infrastruktur antarwilayah, mengingat luasnya geografi kepulauan Indonesia; mitigasinya adalah memprioritaskan jalur pelayaran dan titik rawan keamanan maritim terlebih dahulu, bukan pemerataan serentak di seluruh wilayah.

Fase III (2035–2040): *Twin* dan Prediksi. Fase ketiga memperkenalkan digital twin untuk simulasi skenario maritim, penguatan kapasitas big data untuk pemantauan maritim real-time berskala nasional, dan pembangunan Decision Support System nasional yang mengintegrasikan seluruh sumber data yang telah dibangun pada dua fase sebelumnya. Landasan argumentasi fase ini bertumpu pada temuan bahwa digital twin memungkinkan simulasi skenario sebelum keputusan diambil di dunia nyata, dengan syarat keamanan arsitekturnya telah teruji (Liu et al., 2021), serta pada kebutuhan integrasi lintas format data yang telah dibahas sebelumnya (Syms et al., 2021). Program utama mencakup pengembangan purwarupa *digital twin* untuk pelabuhan dan jalur pelayaran strategis, pembangunan pusat komando *Maritime Domain Awareness* nasional, dan penerapan model prediktif untuk deteksi dini pelanggaran wilayah. Pemangku kepentingan inti mencakup Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut dan Badan Keamanan Laut sebagai pengguna utama *Decision Support System*, didukung oleh lembaga riset nasional untuk pengembangan model prediktif. Indikator keberhasilan mencakup waktu respons terhadap indikasi pelanggaran wilayah yang terukur lebih singkat dibandingkan fase sebelumnya dan tingkat akurasi model prediktif yang tervalidasi. Risiko utama adalah kerentanan siber pada sistem *digital twin* sebagaimana diperingatkan oleh kajian keamanan *digital twin* maritim (Liu et al., 2021); mitigasinya adalah menerapkan audit keamanan independen pada setiap purwarupa sebelum diperluas ke skala operasional penuh.

Fase IV (2040–2045): Maritim Otonom. Fase terakhir mengarah pada ekosistem SIG yang mendekati otonom, dengan kemampuan deteksi dan respons yang berjalan dengan intervensi manusia yang lebih minim pada tahap deteksi awal, didukung *National Digital Twin* yang mengintegrasikan seluruh domain maritim, darat, dan udara ke dalam satu kerangka kesadaran situasional. Argumentasi fase ini merujuk pada evolusi *Maritime Domain Awareness* yang menyatukan seluruh lapisan rantai nilai teknologi menjadi keputusan operasional, serta pada kebutuhan keselarasan kebijakan ekonomi biru dan keamanan maritim yang telah dibuktikan pada pengalaman Oman (Al-Subhiyah, 2025; Subhi & Suqri, 2025), meskipun tetap disesuaikan dengan kompleksitas kelembagaan Indonesia. Program utama mencakup integrasi penuh *Maritime Domain Awareness* lintas kementerian dan lembaga, penerapan sistem penegakan hukum maritim digital yang terhubung langsung dengan data SIG Nasional, serta evaluasi menyeluruh atas capaian

tiga fase sebelumnya sebagai dasar penyempurnaan kebijakan jangka panjang berikutnya. Pemangku kepentingan mencakup seluruh instansi yang telah dilibatkan pada fase-fase sebelumnya, dengan koordinasi tingkat tertinggi berada pada lembaga yang secara khusus diberi mandat mengoordinasikan keamanan maritim nasional. Indikator keberhasilan mencakup tingkat integrasi data lintas domain yang terukur dan kontribusi terukur sistem ini terhadap capaian target ekonomi biru dalam kerangka Indonesia Emas 2045. Risiko utama pada fase ini adalah ketergantungan berlebihan pada sistem otomatis tanpa mekanisme pengawasan manusia yang memadai, mengingat konsekuensi kesalahan keputusan pada domain keamanan bersifat tidak dapat diputar kembali; mitigasinya adalah mempertahankan mekanisme tinjauan manusia (*human-in-the-loop*) pada setiap keputusan yang berimplikasi hukum atau penggunaan kekuatan, sekalipun sistem deteksi telah berjalan secara otonom.

Keempat fase ini menunjukkan bahwa perjalanan menuju Indonesia Emas 2045 pada domain SIG Nasional bukan lompatan teknologi tunggal, melainkan akumulasi kapasitas yang dibangun berlapis, dengan setiap fase menjadi prasyarat teknis, kelembagaan, dan keamanan bagi fase berikutnya. Bagian selanjutnya menerjemahkan keseluruhan hasil dan pembahasan ini menjadi implikasi kebijakan yang lebih ringkas dan dapat ditindaklanjuti.

KESIMPULAN

Temuan utama sintesis kritis ini adalah bahwa keberhasilan transformasi digital Sistem Informasi Geografis Nasional untuk keamanan maritim Indonesia bukan ditentukan oleh kecanggihan teknologi yang diadopsi, melainkan oleh urutan pembangunan kapasitas pada empat lapis yang saling mengunci: fondasi data dan interoperabilitas, keamanan siber, kompetensi sumber daya manusia, dan kebijakan kelembagaan yang mengikat lintas instansi. Kegagalan pada satu lapis membatasi manfaat investasi pada lapis lainnya, sebuah pola yang muncul konsisten di berbagai konteks negara yang ditelaah dalam penelitian ini, dan yang menjadi dasar argumentasi bahwa Indonesia memerlukan satu dokumen kebijakan payung yang menyatukan Badan Informasi Geospasial, Badan Keamanan Laut, Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut, Kementerian Kelautan dan Perikanan, dan Direktorat Jenderal Perhubungan Laut ke dalam satu arah transformasi digital, alih-alih membiarkan setiap instansi menyusun peta jalannya sendiri-sendiri.

Penelitian ini memberikan tiga kontribusi yang saling melengkapi. Secara teoretis, penelitian ini memperluas kerangka transformasi digital yang selama ini didominasi perspektif manajemen organisasi ke ranah geospasial-maritim, dengan menempatkan data spasial sebagai objek transformasi yang memiliki karakteristik risiko dan tata kelola tersendiri. Secara metodologis, pendekatan sintesis kritis lintas disiplin yang digunakan menunjukkan bagaimana literatur manajemen, geoinformatika, dan keamanan maritim yang selama ini berkembang terpisah dapat disatukan menjadi satu kerangka argumentasi yang koheren. Secara praktis dan kebijakan, roadmap empat fase yang dihasilkan menawarkan urutan pentahapan yang dapat diadaptasi oleh pembuat kebijakan, sekaligus menegaskan bahwa preseden keberhasilan dari negara lain, seperti Oman, tidak dapat direplikasi langsung tanpa penyesuaian terhadap kompleksitas kelembagaan dan geografi kepulauan Indonesia yang jauh lebih besar.

Penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu diakui secara terbuka. Sebagai kajian yang berbasis sintesis literatur, argumentasi yang dibangun bertumpu pada temuan yang telah dipublikasikan pada konteks negara lain, sehingga sebagian rekomendasi bersifat inferensial dan belum diuji secara empiris pada kondisi lapangan Indonesia. Penelitian ini

juga tidak melibatkan data primer dari instansi pengelola SIG Nasional Indonesia, seperti wawancara dengan pemangku kepentingan atau audit langsung terhadap sistem yang sedang berjalan, sehingga gambaran tantangan yang disajikan bersifat umum dan memerlukan verifikasi lapangan lebih lanjut. Selain itu, dinamika teknologi digital yang bergerak sangat cepat berarti sebagian temuan literatur yang menjadi rujukan, khususnya pada domain kecerdasan buatan dan keamanan siber, berpotensi mengalami pergeseran signifikan dalam beberapa tahun mendatang.

Bertolak dari keterbatasan tersebut, penelitian lanjutan perlu diarahkan pada tiga agenda. Pertama, penelitian empiris berbasis studi kasus atau survei terhadap instansi pengelola SIG maritim Indonesia diperlukan untuk menguji sejauh mana kerangka strategi dan roadmap yang diusulkan dalam penelitian ini sesuai dengan kondisi kelembagaan yang sebenarnya. Kedua, penelitian mengenai model tata kelola data lintas kementerian yang secara khusus menautkan kewajiban hukum berbagi data dengan mekanisme insentif kelembagaan perlu dikembangkan lebih lanjut, mengingat resistensi kelembagaan teridentifikasi sebagai risiko utama pada seluruh fase roadmap. Ketiga, penelitian mengenai kerangka evaluasi kuantitatif untuk mengukur kematangan digital SIG Nasional secara berkala akan melengkapi roadmap kualitatif yang dihasilkan penelitian ini, sehingga kemajuan menuju Indonesia Emas 2045 dapat dipantau dengan indikator yang lebih terukur dan dapat dipertanggungjawabkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, N., Sahay, A., Shah, S. M., Babu, K. N., Thapliyal, P. K., Dube, N., Sharma, R., & Desai, N. M. (2025). Remote sensing, geospatial and AI/ML techniques: Catalysing growth in India's blue economy. *CSI Transactions on ICT*, 13(1), 27–42. <https://doi.org/10.1007/s40012-025-00408-w>
- Al Subhi, N. H., & Al Suqri, M. N. (2025). Integrating AI and Blockchain in Marine Spatial Data Infrastructure: Enhancing Cybersecurity and Business Intelligence for Maritime Innovation. *2025 International Conference on Business Intelligence for Technology Innovation (ICBITI)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICBITI65527.2025.11500914>
- Alanhdi, A., & Toka, L. (2024). A Survey on Integrating Edge Computing With AI and Blockchain in Maritime Domain, Aerial Systems, IoT, and Industry 4.0. *IEEE Access*, 12, 28684–28709. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3367118>
- Al-Subhiyah, N. H. (2025). ADVANCING MARITIME SECURITY AND MARINE BIODIVERSITY PROTECTION UNDER OMAN VISION 2040: THE STRATEGIC ROLE OF MARINE SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE (MSDI). *Journal of Strategic and Defense Studies (JSDS)*, 1(1), e453. <https://doi.org/10.66209/jsds.2025.453>
- Arvidsson, B., Johansson, J., & Guldåker, N. (2021). Critical infrastructure, geographical information science and risk governance: A systematic cross-field review. *Reliability Engineering & System Safety*, 213, 107741. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107741>
- Ashraf, I., Park, Y., Hur, S., Kim, S. W., Alroobaea, R., Zikria, Y. B., & Nosheen, S. (2023). A Survey on Cyber Security Threats in IoT-Enabled Maritime Industry. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(2), 2677–2690. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3164678>
- Bashir, M. O. I., & Zakaria, N. M. G. (2025). Systematic Review of Digital Transformation in Maritime Governance in Developing Nations: The Case of Bangladesh. *BUP Journal*, 12(1), 15–46. <https://doi.org/10.63888/bj/chsr/25a/sdtmg>

- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Dangermond, J., & Goodchild, M. F. (2020). Building geospatial infrastructure. *Geo-Spatial Information Science*, 23(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1698274>
- Deanto, M. A. R., & Marzaman, A. P. (2024). Transformasi Kebijakan Maritim dalam Era Digital: Peran Teknologi dalam Meningkatkan Efektivitas dan Keamanan Lautan di Indonesia. *Journal of International and Local Studies*, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.56326/jils.v8i1.3678>
- Denyer, D., & Tranfield, D. (2009). Producing a Systematic Review. *The SAGE Handbook of Organizational Research Methods*, 671–689.
- Diaz, R., Smith, K., Bertagna, S., & Bucci, V. (2023). Digital Transformation, Applications, and Vulnerabilities in Maritime and Shipbuilding Ecosystems. *Procedia Computer Science*, 217, 1396–1405. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.338>
- Flynn, S., Tray, E., Woolley, T., Leadbetter, A., Heney, K., O'Driscoll, D., Nic Aonghusa, C., & Conway, A. (2023). Management of spatial data integrity including stakeholder feedback in Maritime Spatial Planning. *Marine Policy*, 156, 105799. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105799>
- Golgota, A., & Çerma, U. (2024). Securing Durres Port's Digital Transformation: Cybersecurity Strategy for Maritime Industry. *2024 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/MECO62516.2024.10577771>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Graziano, M. D., D'Errico, M., & Razzano, E. (2012). Constellation analysis of an integrated AIS/remote sensing spaceborne system for ship detection. *Advances in Space Research*, 50(3), 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.020>
- Hanelt, A., Bohnsack, R., Marz, D., & Antunes Marante, C. (2021). A Systematic Review of the Literature on Digital Transformation: Insights and Implications for Strategy and Organizational Change. *Journal of Management Studies*, 58(5), 1159–1197. <https://doi.org/10.1111/joms.12639>
- Higgins, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. A. (Eds.). (2019). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119536604>
- Hopcraft, R. (2021). Developing Maritime Digital Competencies. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(3), 12–18. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.101.2000073>
- Huang, X., Song, Y., & Hu, X. (2021). Deploying Spatial Data for Coastal Community Resilience: A Review from the Managerial Perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 830. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020830>
- Isbaex, C., Costa, F. D. R. F., & Batista, T. (2025). Application of GIS in the Maritime-Port Sector: A Systematic Review. *Sustainability*, 17(8), 3386. <https://doi.org/10.3390/su17083386>
- Jardim, R., Dos Santos, M., Neto, E., Muradas, F. M., Santiago, B., & Moreira, M. (2022). Design of a framework of military defense system for governance of geoinformation. *Procedia Computer Science*, 199, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.022>

- Jones, A., Koehler, S., Jerge, M., Graves, M., King, B., Dalrymple, R., Freese, C., & Von Albade, J. (2023). BATMAN: A Brain-like Approach for Tracking Maritime Activity and Nuance. *Sensors*, 23(5), 2424. <https://doi.org/10.3390/s23052424>
- Kallimani, J. G. (2018). The Challenges of Digitisation and Data Analysis in the Maritime Domain. *Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India*, 14(1), 36–50. <https://doi.org/10.1080/09733159.2018.1478433>
- Karhunen, P., Kankaanranta, A., Louhiala-Salminen, L., & Piekari, R. (2018). Let's Talk about Language: A Review of Language-Sensitive Research in International Management. *Journal of Management Studies*, 55(6), 980–1013. <https://doi.org/10.1111/joms.12354>
- Kechagias, E. P., Chatzistelios, G., Papadopoulos, G. A., & Apostolou, P. (2022). Digital transformation of the maritime industry: A cybersecurity systemic approach. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 37, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2022.100526>
- Kijewski-Correa, T., Taflanidis, A., Vardeman, C., Sweet, J., Zhang, J., Snaiki, R., Wu, T., Silver, Z., & Kennedy, A. (2020). Geospatial Environments for Hurricane Risk Assessment: Applications to Situational Awareness and Resilience Planning in New Jersey. *Frontiers in Built Environment*, 6, 549106. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.549106>
- Kitchenham, B. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. *Technical Report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE*, undefined-undefined.
- Koca, Y. N., & Erdoğan, S. (2024). Are We Ready for Digitalisation? A Study of the Challenges and Barriers to Digitalisation and Technology Use in the Turkish Maritime Sector. *Polish Maritime Research*, 31(2), 132–139. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0029>
- Kusmanto, Y., Trismadi, T., & Harsono, G. (2024). Pemanfaatan Teknologi Geospatial Intelligence (GEOINT) untuk Peningkatan Keamanan dan Pengelolaan Maritim di Indonesia. *Journal on Education*, 7(1), 8218–8235. <https://doi.org/10.31004/joe.v7i1.7653>
- Li, M., Zhou, J., Chattopadhyay, S., & Goh, M. (2024). *Maritime Cybersecurity: A Comprehensive Review* (arXiv:2409.11417). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.11417>
- Lim, H., Jeong, M., Lee, J., Jeon, S., & Lee, C. (2026). Arctic Green Maritime Data Governance for Green Shipping Corridors: Interpreting the EU Data Act. *Sustainability*, 18(2), 577. <https://doi.org/10.3390/su18020577>
- Liu, J., Li, C., Bai, J., Luo, Y., Lv, H., & Lv, Z. (2021). Security in IoT-Enabled Digital Twins of Maritime Transportation Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3122566>
- Margaretha, R., Syuzairi, M., & Mahadiansar, M. (2024). Digital Transformation in the Maritime Industry; Opportunities and Challenges for Indonesia. *Journal of Maritime Policy Science*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.31629/jmps.v1i1.7003>
- Mayring, P. (2014). Qualitative content analysis: Theoretical foundation, basic procedures and software solution (free download via Social Science Open Access Repository SSOAR). *Forum Qualitative Sozialforschung/Forum: Qualitative Social Research*, (10), 1–143.
- Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: A comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>

- Nadkarni, S., & Prügl, R. (2021). Digital transformation: A review, synthesis and opportunities for future research. *Management Review Quarterly*, 71(2), 233–341. <https://doi.org/10.1007/s11301-020-00185-7>
- Nguyen, T.-N.-L., & Le, S.-T. (2025). Factors Leading to the Digital Transformation Dead Zone in Shipping SMEs: A Dynamic Capability Theory Perspective. *Sustainability*, 17(12), 5553. <https://doi.org/10.3390/su17125553>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pekkanen, S. M., Aoki, S., & Mittleman, J. (2022). Small Satellites, Big Data: Uncovering the Invisible in Maritime Security. *International Security*, 47(2), 177–216. https://doi.org/10.1162/isec_a_00445
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470754887>
- Popay, J., Baldwin, S., Arai, L., Britten, N., Petticrew, M., Rodgers, M., & Sowden, A. (2007). Guidance on the Conduct of Narrative Synthesis in Systematic Reviews. *ESRC Methods Programme*, (January), undefined-undefined.
- Ramesh, K., & Bhaskaran, B. (2025). Integrating Geographic Information Systems in Maritime Port Development for Enhanced Resource Planning. *Indian Journal of Information Sources and Services*, 15(4), 320–324. <https://doi.org/10.51983/ijiss-2025.IJISS.15.4.36>
- Rawson, A., Sabeur, Z., & Brito, M. (2022). Intelligent geospatial maritime risk analytics using the Discrete Global Grid System. *Big Earth Data*, 6(3), 294–322. <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1965370>
- Ray, C., Dréo, R., Camossi, E., Jousset, 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>
- Reggiannini, M., Salerno, E., Bacciu, C., D'Errico, A., Lo Duca, A., Marchetti, A., Martinelli, M., Mercurio, C., Mistretta, A., Righi, M., Tampucci, M., & Paola, C. D. (2024). Remote Sensing for Maritime Traffic Understanding. *Remote Sensing*, 16(3), 557. <https://doi.org/10.3390/rs16030557>
- Rumson, A. G., Hallett, S. H., & Brewer, T. R. (2017). Coastal risk adaptation: The potential role of accessible geospatial Big Data. *Marine Policy*, 83, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.05.032>
- Sanchez-Gonzalez, P.-L., Díaz-Gutiérrez, D., Leo, T. J., & Núñez-Rivas, L. R. (2019). Toward Digitalization of Maritime Transport? *Sensors*, 19(4), 926. <https://doi.org/10.3390/s19040926>
- Schwartz-Belkin, I., & Portman, M. E. (2024). Exploring barriers to the implementation of geospatial technologies in marine spatial planning: Reports from practitioners. *Marine Policy*, 159, 105891. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105891>
- Şengül, B., Yilmaz, F., & Uğurlu, Ö. (2023). Safety–Security Analysis of Maritime Surveillance Systems in Critical Marine Areas. *Sustainability*, 15(23), 16381. <https://doi.org/10.3390/su152316381>
- Singh, J. (2013). Critical appraisal skills programme. *Journal of Pharmacology and Pharmacotherapeutics*, 4(1), 76–77. <https://doi.org/10.4103/0976-500X.107697>
- Subhi, N. H. A., & Suqri, M. N. A. (2025). Integrating Technology, Sustainability, and the Blue Economy to Strengthen Maritime Security and Climate Resilience under

- Oman's Vision 2040. *Hong Kong Journal of Social Sciences*, (0), 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.55463/hkjss.issn.1021-3619.66.9>
- Surucu-Balci, E., Iris, Ç., & Balci, G. (2024). Digital information in maritime supply chains with blockchain and cloud platforms: Supply chain capabilities, barriers, and research opportunities. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 122978. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122978>
- Syms, M. S., Isenor, A. W., Chivari, B., DeBaie, A., Hogue, A., & Glessing, B. (2021). Building a Maritime Picture in the Era of Big Data: The Development of the Geospatial Communication Interface+. *2021 International Conference on Military Communication and Information Systems (ICMCIS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICMCIS52405.2021.9486392>
- Tavra, M., Jajac, N., & Cetl, V. (2017). Marine Spatial Data Infrastructure Development Framework: Croatia Case Study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 117. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040117>
- Tijan, E., Jović, M., Aksentijević, S., & Pucihar, A. (2021). Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, 120879. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120879>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Tyndall, J. (2010). AACODS Checklist. *Chinese Journal of Evidence-Based Medicine*, 7(1), 507–513.
- Wang, W. (2024). Innovative strategies and forward thinking on China's digital maritime law enforcement. *Marine Policy*, 169, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106369>
- Zhou, X., Huang, Z., Xia, T., Zhang, X., Duan, Z., Wu, J., & Zhou, G. (2025). The integrated application of big data and geospatial analysis in maritime transportation safety management: A comprehensive review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 138, 104444. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104444>
- Zissis, D., Chatzikokolakis, K., Spiliopoulos, G., & Voudas, M. (2020). A Distributed Spatial Method for Modeling Maritime Routes. *IEEE Access*, 8, 47556–47568. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979612>