

Digital Maritime Twin Berbasis Geographic Information System Sebagai Masa Depan Sistem Keamanan Maritim Indonesia

Muhammad Anta Azka*, Hudiarto Krisno Utomo², Panji Suwarno³, Nefra

Firdaus⁴, Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶, Lukman Yudho Prakoso⁷

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

muhammad.azka@km.idu.ac.id^{1*}, krisno@me.com², panji.suwarno@idu.ac.id³,
nefra.firdaus@idu.ac.id⁴, harri.dolli@idu.ac.id⁵, yuniar@idu.ac.id⁶, lukman.prakoso@idu.ac.id⁷

*Corresponding Author

Article Info

Article history:

Received : 12 Juli, 2026

Revised : 13 Juli, 2026

Accepted : 13 Juli, 2026

Kata Kunci:

Digital Maritime Twins;
GIS;
Keamanan Maritim;
Big Data;
Sistem Keamanan.

Abstrak

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki tantangan geopolitik dan keamanan maritim yang sangat kompleks di wilayah ALKI (Alur Laut Kepulauan Indonesia). Keterbatasan sistem *Maritime Domain Awareness* (MDA) konvensional dalam mengintegrasikan data dinamis secara *real-time* melatarbelakangi urgensi adopsi teknologi mutakhir. Artikel ini mengonseptualisasikan implementasi *Digital Maritime Twin* (DMT) terintegrasi dengan *Geographic Information System* (GIS) sebagai arsitektur masa depan sistem keamanan maritim Indonesia. Menggunakan metode *semi-systematic literature review* dan pemodelan konseptual, penelitian ini merumuskan arsitektur *multi-layer* DMT berbasis GIS yang mampu mengintegrasikan *big data* maritim (AIS, VMS, Satelit, Radar, dan sensor oseanografi). Hasil pembahasan Hasil kajian menunjukkan bahwa DMT-GIS berpotensi memberikan manfaat lintas sektor pada bidang pertahanan, keamanan, keselamatan pelayaran, pemantauan lingkungan, dan logistik maritim, meskipun implementasinya menghadapi tantangan signifikan pada aspek infrastruktur data, interoperabilitas kelembagaan, dan kesiapan sumber daya manusia. Artikel ini merekomendasikan pendekatan bertahap dan kolaboratif lintas kementerian/lembaga sebagai fondasi menuju sistem keamanan maritim Indonesia yang adaptif dan berbasis data.

PENDAHULUAN

Posisi geografis Indonesia sebagai negara kepulauan (*archipelagic state*) dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai terpanjang kedua di dunia menempatkannya pada posisi strategis sekaligus rentan. Wilayah laut Indonesia menjadi jalur pelayaran internasional utama, termasuk tiga Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI), yang menjadikannya titik simpul lalu lintas maritim global. Kompleksitas geografis ini berbanding lurus dengan kompleksitas ancaman keamanan maritim, mulai dari pelanggaran kedaulatan oleh kapal asing, aktivitas ilegal, unreported, and unregulated (IUU) *fishing*, penyelundupan senjata dan narkoba, hingga potensi bencana lingkungan laut akibat tumpahan minyak dan degradasi ekosistem pesisir.

Selama ini, sistem keamanan maritim Indonesia mengandalkan berbagai platform pengawasan yang dikelola oleh instansi berbeda seperti TNI Angkatan Laut, Bakamla, KKP, serta Kementerian Perhubungan yang seringkali beroperasi secara tersekat (*silo*) tanpa interoperabilitas data yang memadai. Ketidadaan gambaran situasional tunggal (*single source of truth*) mengakibatkan keterlambatan pengambilan keputusan, duplikasi

sumber daya pengawasan, dan celah keamanan pada zona-zona yang tidak terpantau secara simultan.

Konsep digital twin, yang pada mulanya berkembang di industri manufaktur dan penerbangan, kini mulai diadopsi secara luas dalam domain maritim. Sejumlah kajian menunjukkan bahwa digital twin mampu merepresentasikan siklus hidup kapal secara virtual untuk mendukung perancangan, operasi, dan pemeliharaan (Mauro & Kana, 2023), serta telah diterapkan pada level pelabuhan untuk mendukung dekarbonisasi dan efisiensi operasional (Eom et al., 2023). Transfer pengetahuan dari industri otomotif dan penerbangan turut mempercepat pematangan konsep digital twin di sektor maritim (Mao et al., 2025). Namun, sebagian besar penerapan yang ada masih berfokus pada objek tunggal satu kapal atau satu pelabuhan dan belum banyak dieksplorasi dalam skala kewilayahan yang mengintegrasikan aspek keamanan nasional.

Di sinilah urgensi penggabungan digital twin dengan Geographic Information System (GIS) menjadi relevan. GIS memungkinkan penempatan entitas maritim baik kapal, infrastruktur pelabuhan, maupun objek ancaman dalam konteks spasial yang kaya, meliputi batas wilayah, zona ekonomi eksklusif, jalur pelayaran, dan data lingkungan. Penggabungan ini melahirkan konsep *Digital Maritime Twin* berbasis GIS (DMT-GIS): representasi virtual dinamis dari ekosistem maritim yang tidak hanya menampilkan kondisi objek secara individual, tetapi juga interaksinya dengan ruang geografis secara real-time. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara konseptual bagaimana DMT-GIS dapat diarahkan sebagai fondasi masa depan sistem keamanan maritim Indonesia, dengan menelaah arsitektur teknis, mekanisme integrasi data, alur simulasi, manfaat strategis lintas sektor, tantangan implementasi, serta menyusun peta jalan pengembangan hingga tahun 2045.

Pengembangan DMT-GIS di Indonesia tidak hanya dipandang sebagai inovasi teknologi, tetapi juga sebagai pendekatan baru dalam tata kelola keamanan maritim yang berorientasi pada integrasi informasi. Selama ini, proses pengambilan keputusan strategis masih sangat bergantung pada laporan dari berbagai pusat komando yang dikompilasi secara bertahap. Pola tersebut berpotensi menimbulkan perbedaan persepsi situasi antarlembaga, terutama ketika menghadapi kejadian yang berkembang secara cepat di wilayah laut. Kehadiran DMT-GIS menawarkan mekanisme yang memungkinkan seluruh pemangku kepentingan mengakses representasi situasi maritim yang sama secara waktu nyata (*real-time*), sehingga koordinasi operasional dapat berlangsung lebih cepat, konsisten, dan berbasis data yang terintegrasi.

Dari perspektif keamanan maritim, kemampuan melakukan simulasi sebelum suatu keputusan diambil merupakan nilai strategis yang belum banyak dimanfaatkan dalam sistem pengawasan nasional. Melalui DMT-GIS, berbagai skenario seperti pergerakan kapal mencurigakan, potensi tabrakan, penyebaran pencemaran laut, hingga respons terhadap bencana alam dapat dimodelkan dalam lingkungan virtual sebelum diterapkan pada kondisi nyata. Pendekatan ini memungkinkan pemerintah mengurangi ketidakpastian dalam pengambilan keputusan, meningkatkan efektivitas penempatan aset patroli, serta mengoptimalkan penggunaan sumber daya yang tersedia berdasarkan tingkat risiko pada masing-masing wilayah perairan.

Selain mendukung operasi keamanan, DMT-GIS juga berpotensi menjadi fondasi bagi pembangunan ekosistem data maritim nasional yang lebih terpadu. Integrasi data hidrografi, oseanografi, meteorologi, lalu lintas pelayaran, pemanfaatan ruang laut, dan infrastruktur pesisir ke dalam satu platform geospasial akan menghasilkan gambaran situasional yang lebih komprehensif dibandingkan sistem yang berjalan saat ini. Kondisi tersebut tidak hanya mendukung pengawasan wilayah laut, tetapi juga memperkuat

proses perencanaan pembangunan, pengelolaan sumber daya kelautan, mitigasi bencana, serta evaluasi kebijakan berbasis bukti (*evidence-based policy*). Dengan demikian, pengembangan DMT-GIS memiliki relevansi yang melampaui aspek teknologi semata dan dapat menjadi salah satu pilar transformasi digital dalam tata kelola maritim Indonesia menuju tahun 2045.

METODE

Kajian ini menggunakan pendekatan *semi-systematic literature review* yang mengacu pada Snyder (2019). Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan sintesis dan integrasi berbagai temuan penelitian dari berbagai sumber untuk membangun kerangka konseptual serta mengidentifikasi arah pengembangan suatu bidang kajian. Dalam penelitian ini, kajian dilakukan melalui analisis terhadap dua puluh publikasi ilmiah internasional yang membahas penerapan *digital twin* dalam konteks maritim, pelabuhan, dan operasi kelautan yang diterbitkan pada rentang tahun 2021–2025. Sumber literatur diperoleh dari jurnal internasional bereputasi seperti *Ocean Engineering*, *Journal of Marine Science and Engineering*, *IEEE Access*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, serta prosiding konferensi internasional yang berfokus pada teknologi maritim, sistem informasi geospasial, dan transformasi digital sektor kelautan. Pemilihan literatur dilakukan dengan mempertimbangkan relevansi terhadap topik penelitian, kebaruan publikasi, serta kontribusinya dalam menjelaskan perkembangan konsep, arsitektur, dan implementasi *Digital Maritime Twin* (DMT).

Proses kajian dilaksanakan melalui empat tahapan utama. Tahap pertama adalah identifikasi literatur, yaitu mengumpulkan referensi yang membahas arsitektur *digital twin*, integrasi *big data*, pemanfaatan sensor dan *Internet of Things* (IoT), keselamatan pelayaran, serta implementasi *digital twin* pada kapal, pelabuhan, dan pengawasan wilayah maritim. Tahap kedua merupakan kategorisasi tematik dengan mengelompokkan setiap referensi berdasarkan fokus pembahasannya, meliputi arsitektur teknis, aplikasi operasional, manajemen risiko dan keselamatan maritim, serta aspek keberlanjutan lingkungan dan dekarbonisasi sektor pelayaran. Selanjutnya, pada tahap sintesis konseptual dilakukan analisis komparatif terhadap berbagai temuan untuk merumuskan kerangka arsitektur DMT berbasis *Geographic Information System* (GIS) yang sesuai dengan karakteristik geografis Indonesia sebagai negara kepulauan, sekaligus mempertimbangkan aspek kelembagaan, interoperabilitas data, dan kebutuhan pengambilan keputusan secara real-time. Tahap terakhir adalah perumusan rekomendasi yang mencakup penyusunan alur simulasi sistem, identifikasi manfaat strategis bagi keamanan maritim nasional, analisis tantangan implementasi, serta penyusunan peta jalan (*roadmap*) pengembangan DMT-GIS di Indonesia.

Pendekatan yang digunakan bersifat kualitatif-konseptual dan tidak melibatkan pengumpulan data primer di lapangan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menguji kinerja suatu sistem secara empiris, melainkan menyusun kerangka konseptual yang komprehensif sebagai landasan awal (*conceptual groundwork*) bagi pengembangan Digital Maritime Twin berbasis GIS di Indonesia. Kerangka tersebut diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian lanjutan yang mencakup studi kelayakan teknis, pengujian prototipe, analisis interoperabilitas antarlembaga, serta penyusunan kebijakan implementasi pada sistem keamanan maritim nasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Sistem Informasi Keamanan Maritim Dunia Saat Ini

Sistem informasi keamanan dan tata kelola maritim global tengah berada pada fase transisi menuju digitalisasi ekstrem (Mouzakitis et al., 2022). Negara-negara maju di kawasan Eropa dan Amerika Utara telah bergeser dari sistem pemantauan radar berbasis pantai tradisional menuju platform terintegrasi yang memanfaatkan komputasi awan dan analisis prediktif. Tren global saat ini mengarah pada pemanfaatan Digital Twin bukan hanya untuk manajemen kapal tunggal (Mauro & Kana, 2023), melainkan untuk skala kawasan makro seperti pelabuhan otomatis (Ding et al., 2023; Eom et al., 2023) dan ekosistem maritim nasional (Zeneli & Marinova, 2024).

Pada level arsitektur yang lebih luas, konsep *smart city* dan *supply chain twinning* turut memberi inspirasi bagi pengembangan *digital twin* pelabuhan yang terintegrasi dengan ekosistem logistik yang lebih besar (Klar et al., 2023). Integrasi tersebut menunjukkan bahwa digital twin tidak lagi dipandang sebagai representasi virtual suatu objek tunggal, melainkan sebagai platform yang mampu menghubungkan berbagai sistem dan pemangku kepentingan dalam satu ekosistem digital yang saling terintegrasi. Proyek seperti *VesselAI* di Eropa menunjukkan bagaimana analitik skala ekstrem, kecerdasan buatan, dan *digital twin* dapat digabungkan dalam satu arsitektur untuk mendukung digitalisasi maritim menyeluruh (Mouzakitis et al., 2022).

Meskipun demikian, tantangan universal yang dihadapi dunia internasional adalah masalah interoperabilitas data inter-organisasi dan penanganan volume big data maritim yang sangat masif. Indonesia berada pada posisi yang tertinggal karena masih berkatat pada kendala ego sektoral kelembagaan, di mana pertukaran data antar-pusat komando kendali (Puskodal) masih bersifat manual atau belum terotomatisasi secara *seamless*. Oleh sebab itu, adopsi DMT berbasis GIS dipandang sebagai solusi integratif mutakhir untuk menyatukan ekosistem informasi maritim nasional

Selain berfungsi sebagai media visualisasi, Digital Maritime Twin (DMT) memiliki potensi untuk mengubah paradigma pengambilan keputusan dalam keamanan maritim dari pendekatan yang bersifat reaktif menuju pendekatan yang lebih prediktif dan antisipatif. Integrasi data spasial, temporal, dan operasional memungkinkan terbentuknya representasi virtual wilayah maritim yang dapat diperbarui secara *real-time*, sehingga kondisi aktual di lapangan dapat dipantau sekaligus dianalisis melalui berbagai skenario simulasi sebelum suatu keputusan operasional ditetapkan. Kemampuan tersebut memberikan nilai strategis bagi pusat komando dan pengendalian karena tidak hanya membantu mengidentifikasi potensi risiko sejak dini, tetapi juga memungkinkan analisis terhadap kemungkinan dampak suatu kejadian terhadap wilayah lain serta evaluasi berbagai alternatif respons secara lebih cepat, akurat, dan terukur. Dengan pendekatan ini, DMT dapat memperkuat proses pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*) dalam menghadapi dinamika ancaman keamanan maritim yang semakin kompleks.

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan luas perairan yang mencapai sekitar dua pertiga wilayah nasional, menuntut kebutuhan terhadap sistem yang mampu mengintegrasikan informasi lintas sektor menjadi semakin mendesak. Saat ini berbagai data maritim telah dihasilkan oleh beragam kementerian dan lembaga, namun masih tersebar dalam platform yang berbeda dengan standar dan mekanisme pertukaran data yang belum sepenuhnya seragam. Kondisi tersebut menyebabkan proses pembentukan *common operational picture* sering kali membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan dinamika ancaman yang berkembang di lapangan. Pengembangan DMT berbasis GIS menawarkan pendekatan yang mampu menyatukan berbagai sumber data tersebut ke

dalam satu lingkungan geospasial terpadu sehingga setiap pemangku kepentingan dapat mengakses informasi yang konsisten sesuai dengan kewenangan masing-masing.

Lebih jauh, implementasi DMT berbasis GIS tidak hanya relevan untuk mendukung operasi keamanan maritim, tetapi juga dapat menjadi fondasi transformasi tata kelola maritim nasional. Integrasi data pengawasan pelayaran, pemanfaatan ruang laut, kondisi lingkungan, infrastruktur pelabuhan, hingga aktivitas ekonomi kelautan memungkinkan pemerintah memperoleh gambaran situasional yang lebih komprehensif. Dengan demikian, kebijakan yang dihasilkan tidak hanya berorientasi pada respons terhadap ancaman, tetapi juga mendukung perencanaan pembangunan, pengelolaan sumber daya kelautan secara berkelanjutan, serta peningkatan efisiensi koordinasi antarinstansi. Melalui pendekatan tersebut, DMT berbasis GIS memiliki potensi menjadi infrastruktur digital strategis yang memperkuat ketahanan maritim Indonesia sekaligus mendukung terwujudnya sistem keamanan maritim yang adaptif, terintegrasi, dan berbasis data.

Arsitektur *Digital Maritime Twin* Berbasis GIS

Arsitektur DMT berbasis GIS dirancang dengan model empat lapisan utama yang menjamin keandalan aliran data dari sensor fisik di laut hingga tampilan visual di ruang kendali strategis. Detail komponen dan fungsi masing-masing lapisan dijelaskan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Desain Konseptual Arsitektur DMT-GIS

Lapisan (Layer)	Komponen Infrastruktur	Fungsi Utama dalam Keamanan Maritim
Lapisan Akuisisi Data (<i>Physical Layer</i>)	AIS (Terrestrial & Satelit), VMS, Radar Pantai, Satelit ISR, Sensor IoT Oseanografi, Kamera Drone UAV, Laporan Intelijen.	Menangkap seluruh data mentah pergerakan kapal, kondisi cuaca, dan anomali visual di wilayah yurisdiksi maritim Indonesia secara <i>real-time</i> .
Lapisan Mesin Spasial GIS (<i>Data & GIS Engine</i>)	Geodatabase Spasial, Server GIS, <i>Geoprocessing Server</i> , Peta Dasar Batimetri, ALKI Layer, Batas ZEE & Laut Teritorial.	Melakukan standarisasi koordinat, proyeksi peta, <i>spatial indexing</i> , dan <i>overlay</i> data dinamis di atas peta batas kedaulatan negara.
Lapisan Analitik & Simulasi (<i>Analytics Layer</i>)	Algoritma AI/ML, Pemodelan Prediktif Kognitif, Kontrol Prediktif Model Non-linear (NMPC), <i>Reinforcement Learning</i> .	Mendeteksi perilaku anomali kapal, memprediksi rute penyelundupan, mensimulasikan penyebaran tumpahan minyak, dan mengevaluasi risiko taktis.
Lapisan Visualisasi & Keputusan (<i>Application/UI Layer</i>)	Dashboard 3D/4D GIS Web-Based, Sistem Pendukung Keputusan (DSS), <i>Alert System</i> , Integrasi VR/AR untuk Operasi Taktis.	Menyajikan visualisasi situasi maritim yang komprehensif bagi Panglima TNI, Kepala Bakamla, dan pengambil kebijakan guna merespons ancaman secara instan.

(Sumber : Diolah penulis (2026))

Integrasi *Big Data* Maritim

Kekuatan utama DMT-GIS terletak pada kemampuannya mengintegrasikan big data dari sumber yang sangat beragam. Data tersebut meliputi data posisi kapal (AIS/VMS), citra satelit, data cuaca dan oseanografi, data logistik pelabuhan, hingga data historis insiden keamanan. Pendekatan digitalisasi maritim skala ekstrem menunjukkan bahwa integrasi *big data* dan AI dapat meningkatkan kualitas prediksi dan pengambilan keputusan operasional secara signifikan (Mouzakitis et al., 2022).

Machine learning berperan penting dalam memproses data volume besar ini menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti. Semua data multi-sumber ini diikat secara spasial dalam koordinat geografis GIS sehingga menghasilkan satu kesatuan pemahaman situasi maritim yang utuh (*Single Maritime Common Operating Picture*). Sebagai contoh, penerapan pembelajaran mesin untuk meningkatkan prediksi manuver kapal berdasarkan data perekaman skala penuh menunjukkan bagaimana model prediktif dapat memperkaya akurasi digital twin kapal secara signifikan (Nielsen et al., 2022). Dalam keamanan maritim Indonesia, kemampuan prediktif semacam ini dapat diarahkan untuk mendeteksi pola pergerakan kapal yang mencurigakan, seperti manuver tidak lazim yang berasosiasi dengan aktivitas *illegal fishing* atau penyelundupan.

Selain itu, integrasi big data juga mencakup dimensi manusia dalam sistem maritim. Pendekatan human digital twin yang memodelkan proses kognitif eksplisit kru kapal menunjukkan potensi analisis risiko maritim yang mempertimbangkan faktor manusia, tidak hanya faktor teknis kapal (Han et al., 2024). Pendekatan ini relevan untuk memperkaya DMT-GIS dengan dimensi human factor dalam analisis risiko keselamatan pelayaran.

Kerangka integrasi *big data* yang komprehensif tidak hanya berfokus pada penggabungan berbagai sumber data maritim, tetapi juga perlu mengakomodasi dimensi matematis dan komputasional yang mampu mendukung analisis lintas fungsi secara terpadu. Dimensi tersebut mencakup aspek navigasi, keteknikan kelautan, logistik maritim, keselamatan pelayaran, hingga analisis risiko yang saling berinteraksi dalam suatu ekosistem digital. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *integrated digital twin* untuk matematika maritim yang dikemukakan oleh Can (2025), yang menempatkan *digital twin* sebagai platform analitik multidisiplin untuk melakukan simulasi, prediksi, optimasi, dan pengambilan keputusan berbasis data secara real time. Dalam konteks Indonesia sebagai negara kepulauan dengan kompleksitas wilayah laut yang tinggi, kerangka tersebut dapat dijadikan sebagai acuan dalam merancang model *Digital Maritime Twin berbasis Geographic Information System* (DMT-GIS) yang tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi spasial, tetapi juga sebagai sistem analitik multifungsi yang mampu mengintegrasikan data geospasial, hidrografi, meteorologi, lalu lintas pelayaran, kondisi oseanografi, hingga data keamanan maritim ke dalam satu platform yang adaptif, interoperabel, dan mendukung pengambilan keputusan strategis.

Simulasi Digital Maritime Twin

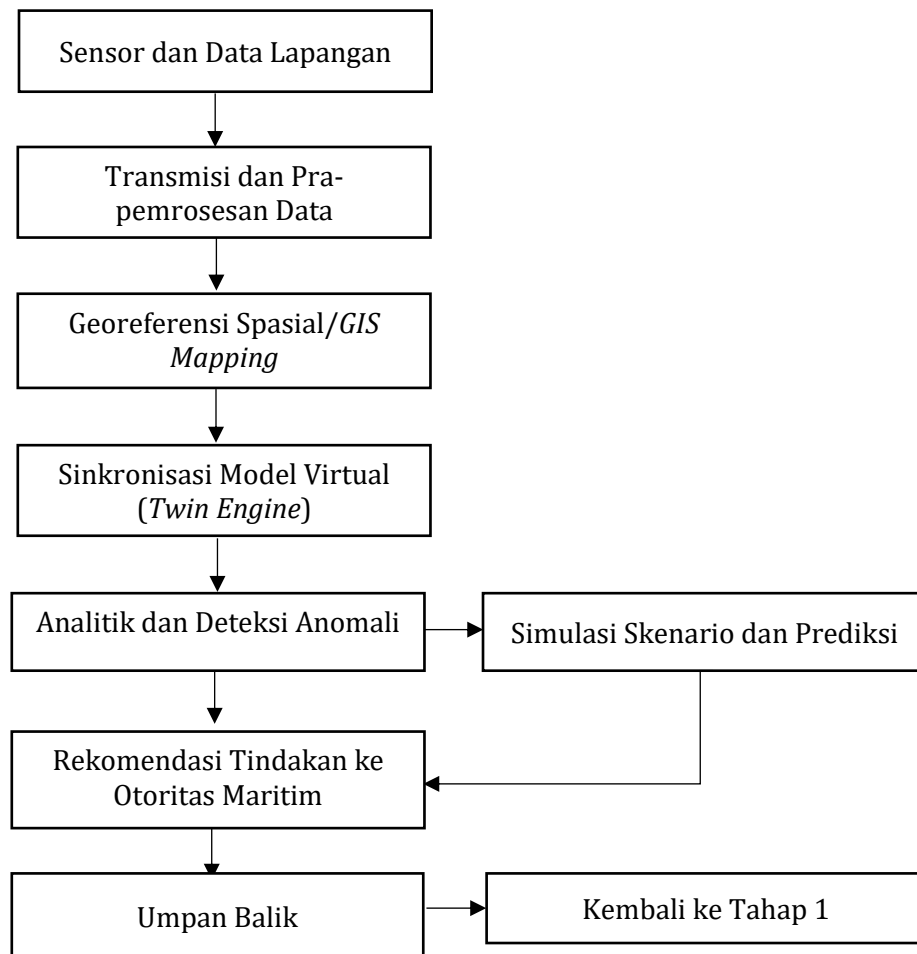
Keunggulan utama DMT berbasis GIS dibandingkan sistem pemantauan maritim tradisional adalah kemampuannya dalam menjalankan simulasi prediktif dan skenario "*what-if*" secara *real-time*. Kemampuan ini memungkinkan pengambil keputusan untuk memahami pola ancaman, menguji berbagai alternatif respons, serta menentukan strategi mitigasi sebelum suatu kejadian berkembang menjadi krisis. Mekanisme pelaksanaan simulasi tersebut melibatkan beberapa tahapan utama yang menggambarkan hubungan antara proses deteksi, analisis, prediksi, dan respons terhadap ancaman maritim sebagaimana ditampilkan pada Tabel berikut.

Tabel 2. Simulasi Digital Maritime Twin

Tahap	Proses	Tindakan
Tahap 1	Akuisisi Data Lapangan	Data dikumpulkan secara kontinu dari AIS, radar pesisir, citra satelit, sensor lingkungan, dan laporan unit patroli laut.
Tahap 2	Transmisi dan Pra-pemrosesan Data	Data mentah dikirim melalui jaringan komunikasi (satelit/terestrial) ke pusat data, kemudian dibersihkan dan distandarisasi formatnya (<i>data cleansing</i> dan normalisasi).
Tahap 3	Georeferensi Spasial (<i>GIS Mapping</i>)	Setiap entitas dan peristiwa diberi koordinat geografis dan dipetakan terhadap lapisan batas wilayah, ZEE, ALKI, serta zona rawan ancaman.
Tahap 4	Sinkronisasi Model Virtual	Model virtual (<i>twin</i>) diperbarui secara real-time agar merepresentasikan kondisi fisik terkini, mengikuti prinsip sinkronisasi digital twin berbasis pembelajaran penguatan untuk objek maritim dinamis (Berg et al., 2025).
Tahap 5	Analitik dan Deteksi Anomali	Algoritma AI/machine learning menganalisis pola pergerakan dan mendeteksi anomali, seperti kapal yang mematikan AIS, memasuki zona terlarang, atau menunjukkan pola manuver mencurigakan.
Tahap 6	Simulasi Skenario dan Prediksi	Sistem menjalankan simulasi skenario (<i>what-if analysis</i>), misalnya proyeksi pergerakan kapal, potensi tumpahan minyak, atau eskalasi insiden, untuk mendukung kesiapsiagaan.
Tahap 7	Rekomendasi dan Umpan Balik Tindakan	Hasil analisis disampaikan kepada otoritas terkait (TNI AL, Bakamla, KKP) dalam bentuk rekomendasi tindakan, yang kemudian ditindaklanjuti di lapangan, menghasilkan data baru yang kembali masuk ke Tahap 1 sehingga siklus berlangsung terus-menerus.

(Sumber: Analisis Penulis (2026))

Berdasarkan arsitektur dan komponen sistem yang telah diuraikan pada tabel sebelumnya, representasi mekanisme kerja *Digital Maritime Twin* (DMT) berbasis *Geographic Information System* (GIS) secara skematis dapat digambarkan melalui diagram alur berikut. Diagram tersebut menggambarkan keterkaitan antarproses dalam sistem, mulai dari pengumpulan dan integrasi data maritim dari berbagai sumber, pengolahan serta analisis berbasis teknologi geospasial dan kecerdasan digital, hingga proses simulasi dan visualisasi informasi strategis. Melalui alur tersebut, DMT mampu membangun representasi kondisi maritim secara dinamis yang mendukung pemantauan, prediksi ancaman, serta pengambilan keputusan strategis dalam sistem keamanan maritim secara berkelanjutan.



Gambar 1. Diagram Alur Sistem *Digital Maritime Twin* Berbasis GIS

(Sumber : Analisis Penulis (2026))

Diagram alur pada Gambar 1 mengilustrasikan mekanisme kerja sistem *Digital Maritime Twin* berbasis GIS (DMT-GIS) yang dirancang sebagai solusi holistik untuk memantau dan mengamankan wilayah perairan Indonesia. Proses dimulai dari tahap Sensor dan Data Lapangan, di mana berbagai data mentah seperti posisi kapal, kondisi cuaca, dan aktivitas maritim dikumpulkan secara real-time. Data tersebut kemudian memasuki fase Transmisi dan Pra-pemrosesan Data untuk dibersihkan, diformat, dan disiapkan sebelum akhirnya menjalani proses Georeferensi Spasial/GIS Mapping, yang memetakan informasi ke dalam peta digital berbasis lokasi. Tahap inti sistem adalah Sinkronisasi Model Virtual (*Twin Engine*), yang menciptakan representasi digital (*digital twin*) dari kondisi laut aktual. Dari sini, sistem melakukan Analitik dan Deteksi Anomali untuk mengidentifikasi potensi pelanggaran atau bahaya, yang kemudian diteruskan ke Rekomendasi Tindakan ke Otoritas Maritim sebagai langkah respons awal. Selain itu, sistem juga mampu melakukan Simulasi Skenario dan Prediksi untuk mengantisipasi kejadian di masa depan. Seluruh proses ini menghasilkan Umpan Balik yang berharga, yang akan Kembali ke Tahap 1 (pengumpulan data), sehingga membentuk siklus tertutup (*closed-loop*). Siklus ini memastikan bahwa DMT-GIS senantiasa memperbarui dirinya, mencerminkan kondisi laut Indonesia secara mutakhir, dan secara adaptif merespons dinamika ancaman yang terus berkembang.

Manfaat Strategis

Implementasi *Digital Maritime Twin* (DMT) berbasis *Geographic Information System* (GIS) di Indonesia memiliki potensi untuk memberikan dampak strategis terhadap berbagai sektor nasional, khususnya dalam memperkuat kapasitas negara dalam mengelola wilayah laut yang luas dan kompleks. Pemanfaatan teknologi ini tidak hanya berfungsi sebagai instrumen pemantauan kondisi maritim secara real-time, tetapi juga menjadi sistem pendukung keputusan yang mampu mengintegrasikan data, melakukan analisis prediktif, serta menghasilkan rekomendasi strategis dalam menghadapi berbagai tantangan keamanan, keselamatan, lingkungan, dan ekonomi maritim. Dampak implementasi DMT berbasis GIS tersebut dapat dikategorikan ke dalam lima bidang strategis nasional, yaitu pertahanan, keamanan, keselamatan, lingkungan, dan logistik.

Dalam aspek pertahanan, implementasi DMT berbasis GIS dapat menjadi instrumen pendukung dalam memperkuat postur pertahanan negara melalui peningkatan kemampuan *maritime domain awareness* (MDA) secara menyeluruh. Sistem ini memungkinkan integrasi berbagai sumber data, seperti sensor maritim, citra satelit, sistem pemantauan kapal, dan data intelijen untuk mendeteksi secara dini potensi ancaman, termasuk aktivitas intrusi militer asing di wilayah perbatasan laut Indonesia. Selain itu, DMT dapat membantu proses perencanaan dan optimalisasi pengerahan kekuatan pertahanan laut, khususnya dalam menentukan pola operasi dan penempatan Kapal Perang Republik Indonesia (KRI) berdasarkan kondisi wilayah, tingkat ancaman, serta kebutuhan strategis. Pemanfaatan simulasi digital juga memungkinkan evaluasi berbagai skenario operasi sebelum diterapkan di lapangan, sehingga meningkatkan efektivitas penggunaan sumber daya pertahanan. Di sisi lain, teknologi ini mendukung pengelolaan siklus hidup persenjataan dan aset pertahanan maritim secara lebih efisien melalui pemantauan kondisi teknis, prediksi kebutuhan pemeliharaan, serta optimalisasi kesiapan operasional alutsista (Zocco et al., 2023).

Pada bidang keamanan, DMT berbasis GIS berperan penting dalam memperkuat sistem keamanan laut nasional melalui peningkatan integrasi antarinstansi dalam menghadapi berbagai ancaman konvensional maupun nonkonvensional. Karakteristik wilayah Indonesia sebagai negara kepulauan menyebabkan pengawasan laut menghadapi tantangan berupa luasnya wilayah yurisdiksi, keterbatasan sumber daya pengawasan, serta meningkatnya aktivitas kejahatan lintas batas. Melalui integrasi data dari berbagai lembaga seperti TNI Angkatan Laut, Bakamla, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Kepolisian, serta instansi terkait lainnya, DMT mampu menciptakan gambaran situasi maritim yang lebih komprehensif dan terpadu. Sistem ini dapat mendukung deteksi pola aktivitas mencurigakan, identifikasi ancaman hibrida, pencegahan kejahatan lintas negara terorganisir (*transnational organized crimes*), pengawasan aktivitas *illegal, unreported, and unregulated fishing* (IUU Fishing), serta meningkatkan koordinasi operasi patroli lintas instansi. Dengan adanya kemampuan analisis dan prediksi berbasis data, pengambilan keputusan keamanan maritim dapat dilakukan secara lebih cepat, akurat, dan adaptif terhadap dinamika ancaman yang berkembang (Markopoulos et al., 2024).

Dalam aspek keselamatan, penerapan DMT berbasis GIS dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan keselamatan pelayaran dan mengurangi risiko

kecelakaan laut di wilayah perairan Indonesia. Sistem ini memungkinkan pengembangan manajemen risiko pelayaran berbasis digital melalui pemantauan kondisi kapal, jalur pelayaran, kepadatan lalu lintas laut, serta faktor lingkungan seperti gelombang tinggi, badai, dan perubahan cuaca ekstrem secara *real-time*. Kemampuan simulasi yang dimiliki DMT dapat digunakan untuk memprediksi potensi bahaya pelayaran dan memberikan rekomendasi jalur alternatif yang lebih aman bagi pengguna laut. Selain itu, dalam konteks operasi pencarian dan penyelamatan (*Search and Rescue/SAR*), DMT dapat menyediakan informasi taktis mengenai posisi korban, kondisi lingkungan laut, serta pergerakan aset penyelamat sehingga meningkatkan kecepatan dan efektivitas respons darurat. Pendekatan berbasis data tersebut memungkinkan pengelolaan keselamatan maritim yang lebih proaktif, bukan hanya merespons kejadian setelah terjadi, tetapi juga mampu melakukan mitigasi risiko sejak tahap awal (Wang et al., 2024).

Dalam ranah keberlanjutan lingkungan, DMT berbasis GIS memiliki peran strategis dalam mendukung pengelolaan keberlanjutan ekosistem laut dan transformasi menuju sektor maritim yang lebih ramah lingkungan. Teknologi ini dapat digunakan untuk memantau kondisi lingkungan laut secara berkelanjutan, termasuk perubahan kualitas perairan, aktivitas eksploitasi sumber daya, serta potensi kerusakan ekosistem pesisir dan laut. Dalam mendukung agenda dekarbonisasi sektor maritim, DMT mampu mengintegrasikan data operasional kapal, konsumsi bahan bakar, dan emisi karbon untuk melakukan analisis tingkat efisiensi energi serta merancang strategi pengurangan emisi gas rumah kaca (Eom et al., 2023). Selain itu, sistem ini dapat digunakan untuk melakukan pemantauan tingkat intensitas karbon kapal (*carbon intensity indicator*) sebagai bagian dari upaya mencapai pelayaran berkelanjutan (Vasilakis et al., 2023). Kemampuan pemodelan spasial juga memungkinkan prediksi penyebaran polusi akibat tumpahan minyak (*oil spill*), sehingga mendukung proses mitigasi dan pemulihan lingkungan secara lebih cepat. Dalam konteks konservasi, DMT dapat menjadi alat pendukung dalam perlindungan kawasan konservasi laut nasional melalui pemantauan aktivitas manusia yang berpotensi merusak ekosistem.

Dalam sektor logistik, implementasi DMT berbasis GIS dapat meningkatkan efisiensi rantai pasok maritim dan mendukung transformasi pelabuhan menuju konsep Smart Port. Sistem ini memungkinkan integrasi data mengenai pergerakan kapal, aktivitas terminal, kondisi infrastruktur pelabuhan, serta arus distribusi barang secara real-time. Melalui kemampuan analisis prediktif, DMT dapat membantu mengoptimalkan jadwal kedatangan dan keberangkatan kapal, mengurangi kepadatan pelabuhan, mempercepat proses bongkar muat komoditas, serta menurunkan waktu tunggu kapal (*dwelling time*) pada pelabuhan utama Indonesia. Selain itu, penerapan teknologi ini mendukung efisiensi operasional melalui pemanfaatan data dalam perencanaan logistik, pengelolaan sumber daya pelabuhan, dan peningkatan konektivitas antarwilayah kepulauan. Penguatan sistem logistik berbasis digital tersebut menjadi faktor penting dalam meningkatkan daya saing ekonomi maritim nasional serta mendukung pembangunan ekonomi biru yang berkelanjutan (Klar et al., 2023).

Tantangan Implementasi

Mewujudkan DMT berbasis GIS berskala nasional di Indonesia dihadapkan pada sejumlah tantangan pelaksana yang kompleks. Pertama, keterbatasan infrastruktur konektivitas internet berkecepatan tinggi dan jaringan sensor satelit ISR mandiri di area-area terluar Indonesia. Kedua, tantangan keamanan siber (*cybersecurity*), mengingat platform terintegrasi ini menjadi target bernilai tinggi bagi serangan siber aktor negara maupun non-negara yang berniat melumpuhkan sistem pertahanan nasional. Ketiga, aspek tata kelola dan regulasi, yang membutuhkan payung hukum setingkat Undang-Undang guna memaksa seluruh kementerian/lembaga maritim meruntuhkan tembok ego sektoral demi integrasi data nasional di bawah koordinasi satu pintu komando.

Selain tantangan tersebut, aspek sumber daya manusia dan kesiapan teknologi juga menjadi faktor krusial dalam implementasi DMT berbasis GIS secara nasional. Pengoperasian sistem yang menggabungkan teknologi kecerdasan buatan, analisis geospasial, pemodelan prediktif, serta integrasi data multi-domain membutuhkan tenaga ahli yang memiliki kompetensi lintas bidang, baik dalam aspek teknologi informasi, kelautan, pertahanan, maupun analisis strategis. Kesenjangan kemampuan digital antarinstansi serta keterbatasan tenaga profesional yang mampu mengelola dan memanfaatkan sistem berbasis *digital twin* dapat menjadi hambatan dalam optimalisasi manfaat teknologi tersebut. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengembangan kapasitas sumber daya manusia, peningkatan literasi digital maritim, serta pembangunan ekosistem riset dan inovasi nasional agar implementasi DMT tidak hanya berhenti pada pembangunan infrastruktur teknologi, tetapi mampu berkembang menjadi sistem pengambilan keputusan strategis yang berkelanjutan.

Roadmap Indonesia 2026-2045

Guna memastikan keberlanjutan pembangunan teknologi DMT berbasis GIS ini, diperlukan dokumen strategis berupa cetak biru dan peta jalan yang selaras dengan Visi Indonesia Emas 2045, sebagaimana dipetakan pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. Roadmap Implementasi Indonesia pada DMT Berbasis GIS 2026-2045

Fase & Periode	Fokus Pengembangan & Target Teknologi	Output Strategis Nasional
Fase I (2026–2030)	Penyusunan regulasi integrasi data maritim satu pintu; standarisasi geodatabase GIS; implementasi prototipe DMT di ALKI I dan Selat Malaka; peningkatan kapasitas SDM pertahanan maritim.	Regulasi Satu Data Maritim Nasional; Terbentuknya pusat komando integrasi data taktis Bakamla-TNI AL generasi pertama.
Fase II (2031–2040)	Ekspansi cakupan DMT ke ALKI II dan III; integrasi penuh dengan konstelasi satelit LEO (<i>Low Earth Orbit</i>) nasional; adopsi kecerdasan buatan (AI) tingkat lanjut untuk deteksi anomali perilaku otomatis secara nasional.	Cakupan 100% wilayah yurisdiksi laut Indonesia oleh DMT berbasis GIS; Operasionalisasi <i>Smart Ports</i> terintegrasi penuh di seluruh pelabuhan hub utama.
Fase III (2041–2045)	Kematangan ekosistem DMT dengan integrasi armada kapal tanpa awak (<i>Autonomous Surface Vessels</i>); pemodelan kognitif prediktif hibrida; pencapaian kedaulatan teknologi pertahanan maritim total dalam rangka Indonesia Emas 2045.	Sistem Keamanan Maritim Otonom Berbasis AI-GIS; Kedaulatan penuh pertahanan siber-maritim di kawasan Indo-Pasifik.

(Sumber : Diolah Penulis (2026))

Tabel 3 menyajikan peta jalan strategis (*roadmap*) implementasi sistem *digital maritime twin* berbasis GIS di Indonesia yang dirancang dalam tiga fase besar hingga tahun 2045, sejalan dengan visi Indonesia Emas. Pada fase I (2026–2030), pengkonsentrasian upaya difokuskan pada peletakan fondasi dasar, meliputi harmonisasi regulasi untuk mewujudkan integrasi data maritim satu pintu, standarisasi geodatabase, serta uji coba prototipe dmt di jalur strategis alki i dan selat malaka, sembari memperkuat kapasitas sdm pertahanan maritim. Target nyata dari fase ini adalah terbitnya regulasi

satu data maritim nasional dan terbentuknya pusat komando taktis terintegrasi pertama antara bakamla dan tni al. Memasuki fase II (2031–2040), sistem diekspansi secara masif hingga menjangkau alki ii dan iii, didukung oleh integrasi penuh dengan konstelasi satelit leo nasional serta pemanfaatan kecerdasan buatan (AI) tingkat lanjut untuk mendeteksi anomali perilaku kapal secara otomatis di seluruh wilayah.

Pada tahap ini, ditargetkan cakupan DMT menjangkau 100% yurisdiksi laut indonesia dan operasionalisasi smart ports yang terintegrasi penuh di seluruh pelabuhan hub utama. Pada fase III (2041–2045), ekosistem dmt mencapai tingkat kematangan tertinggi melalui integrasi armada kapal tanpa awak (*autonomous surface vessels*) dan pemodelan kognitif prediktif hibrida, yang bertujuan mewujudkan kedaulatan teknologi pertahanan maritim total. Puncak dari seluruh *roadmap* ini adalah terbentuknya sistem keamanan maritim otonom berbasis AI-GIS serta terjaminnya kedaulatan penuh pertahanan siber-maritim indonesia di kawasan indo-pasifik, yang menjadi fondasi kokoh bagi cita-cita indonesia emas 2045.

KESIMPULAN

Pengembangan *Digital Maritime Twin* (DMT) berbasis *Geographic Information System* (GIS) bukan lagi sekadar pilihan inovasi teknologi, melainkan sebuah kebutuhan strategis yang mutlak demi mengamankan masa depan kedaulatan laut Indonesia. Melalui integrasi multi-layer arsitektur, platform ini mampu mengatasi keterbatasan sistem pemantauan konvensional yang terfragmentasi, menyatukan big data maritim secara real-time, serta menyajikan visualisasi operasional tunggal yang tepercaya bagi para pengambil keputusan tertinggi.

Keberhasilan implementasi DMT berbasis GIS ini sangat bergantung pada komitmen politik negara untuk mengatasi ego sektoral kelembagaan, membangun kemandirian infrastruktur sensor satelit dan siber, serta menyiapkan modal manusia yang unggul. Melalui pelaksanaan tahapan Peta Jalan 2026–2045 secara konsisten, Universitas Pertahanan RI bersama seluruh pemangku kepentingan pertahanan dapat mewujudkan Indonesia sebagai Poros Maritim Dunia yang tangguh, aman, dan berdaulat penuh di era digital.

Berdasarkan hasil analisis, pembahasan, dan tahapan peta jalan yang telah dirumuskan, penelitian ini merumuskan beberapa rekomendasi strategis bagi para pemangku kepentingan keamanan maritim di indonesia. Langkah awal yang paling krusial adalah penyusunan regulasi dan payung hukum yang kuat setingkat undang-undang atau peraturan presiden mengenai kebijakan satu data maritim nasional. Regulasi ini mutlak diperlukan sebagai landasan hukum formal untuk memaksa seluruh kementerian dan lembaga terkait, seperti TNI AL, BAKAMLA, Kementerian Kelautan dan Perikanan, dan Kementerian Perhubungan, agar meruntuhkan tembok ego sektoral demi mewujudkan integrasi data yang bersifat *seamless* dan otomatis di bawah satu komando. Selain regulasi, pemerintah disarankan menerapkan pendekatan implementasi secara bertahap dan kolaboratif, di mana fase i (2026–2030) diprioritaskan pada standarisasi *geodatabase* gis serta uji coba prototipe platform DMT-GIS pada wilayah kritis yang padat lalu lintas, seperti alki i dan selat malaka, sebelum nantinya diekspansikan ke Alki II dan III. Seiring dengan pengembangan platform, penguatan infrastruktur dan sistem pertahanan siber nasional juga harus ditingkatkan karena sistem terintegrasi ini merupakan target bernilai tinggi bagi ancaman siber dari aktor negara maupun non-negara. Terakhir, investasi pada jaringan konektivitas internet berkecepatan tinggi, satelit isr mandiri di wilayah terluar, serta peningkatan kapasitas sumber daya manusia (SDM) pertahanan maritim melalui pelatihan intensif di bidang *big data*, GIS, dan

kecerdasan buatan menjadi pilar utama guna memastikan sistem pendukung keputusan ini dapat dioperasikan secara optimal.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil maupun bagi pengembangan studi selanjutnya. Keterbatasan utama terletak pada pendekatan penelitian yang sepenuhnya bersifat kualitatif-konseptual dengan mengandalkan tinjauan literatur naratif-sistematis, sehingga tidak melibatkan pengumpulan data primer langsung dari lapangan. Hasil dari kajian ini baru berfungsi sebagai landasan pemikiran awal (*conceptual groundwork*) dan belum mencakup analisis kelayakan teknis maupun kelembagaan secara empiris, seperti pengujian kapasitas penyimpanan *big data* nasional, kemampuan komputasi mesin spasial GIS, hingga kesiapan anggaran dan birokrasi dari tiap instansi terkait di Indonesia. Selain itu, rumusan arsitektur dan alur simulasi yang dirancang dalam artikel ini memiliki ketergantungan yang tinggi pada validitas data pihak ketiga dari literatur sekunder internasional. Efektivitas nyata dari penerapan DMT-GIS di dalam negeri pada akhirnya akan sangat dipengaruhi oleh tingkat akurasi, ketersediaan, dan integrasi data mentah real-time (seperti AIS, VMS, dan sensor oseanografi) yang saat ini tata kelolanya masih tersekat di berbagai institusi yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Baylon, A. M., & Santos, E. (2025). Digital twin technology in maritime: A MAAP innovation strategy. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 19(4), 21. <https://doi.org/10.12716/1001.19.04.21>
- Berg, H. S., Menges, D., Tengesdal, T., & Rasheed, A. (2025). Digital twin syncing for autonomous surface vessels using reinforcement learning and nonlinear model predictive control. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93635-9>
- Can, E. (2025). An integrated digital twin framework for maritime mathematics: Navigation, engineering, logistics, and risk. *Journal of Marine and Engineering Technology*. <https://doi.org/10.58771/joinmet.1789608>
- Ding, Y.-Z., Zhang, Z., Chen, K.-T., Ding, H., Voß, S., Heilig, L., Chen, Y., & Chen, X. (2023). Real-time monitoring and optimal resource allocation for automated container terminals: A digital twin application at the Yangshan Port. *Journal of Advanced Transportation*, 2023, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2023/6909801>
- Eom, J.-O., Yoon, J., Yeon, J.-H., & Kim, S. (2023). Port digital twin development for decarbonization: A case study using the Pusan Newport International Terminal. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1777. <https://doi.org/10.3390/jmse11091777>
- Giering, J., & Dyck, A. (2021). Maritime digital twin architecture. *at - Automatisierungstechnik*, 69, 1081-1095. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0082>
- Han, S., Li, F., Lee, C.-H., Wang, T., & Diaconeasa, M. A. (2024). Mirror the mind of crew: Maritime risk analysis with explicit cognitive processes in a human digital twin. *Advanced Engineering Informatics*, 62, 102746. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102746>
- Klar, R., Fredriksson, A., & Angelakis, V. (2023). Digital twins for ports: Derived from smart city and supply chain twinning experience. *IEEE Access*, 11, 71777-71799. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3295495>
- Lv, Z., Lv, H., & Fridenfolk, M. (2023). Digital twins in the marine industry. *Electronics*, 12(9), 2025. <https://doi.org/10.3390/electronics12092025>

- Mao, R., Li, Y., Li, G., Hildre, H. P., & Zhang, H. (2025). A systematic survey of digital twin applications: Transferring knowledge from automotive and aviation to maritime industry. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26, 4240-4259. <https://doi.org/10.1109/tits.2025.3535593>
- Markopoulos, E., Markopoulos, P., Nandi, A., Faraclas, J., Leontopoulos, C., Meidanis, S., Monioudis, D., & Filahtos, G. (2024). The impact of digital twins technology in maritime fleet and safety management. *Accessibility, Assistive Technology and Digital Environments*. <https://doi.org/10.54941/ahfe1004619>
- Mauro, F., & Kana, A. (2023). Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113479>
- Mouzakitis, S., Kontzinos, C., Tsapelas, J., Kanellou, I., Kormpakis, G., Kapsalis, P., & Askounis, D. (2022). Enabling maritime digitalization by extreme-scale analytics, AI and digital twins: The Vesselai architecture. Dalam *International Conference on Database and Expert Systems Applications* (pp. 246-256). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16075-2_16
- Nezhad, M. M., Neshat, M., Sylaios, G., & Garcia, A. D. (2023). Marine energy digitalization digital twin's approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114065>
- Nielsen, R., Papageorgiou, D., Nalpantidis, L., Jensen, B. T., & Blanke, M. (2022). Machine learning enhancement of manoeuvring prediction for ship digital twin using full-scale recordings. *Ocean Engineering*, 111579. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111579>
- Snyder, H. (2019). *Literature review as a research methodology: An overview and guidelines*. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Vasilikis, N., Geertsma, R., & Coraddu, A. (2023). A digital twin approach for maritime carbon intensity evaluation accounting for operational and environmental uncertainty. *Ocean Engineering*, 115927. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115927>
- Wang, K., Xu, H., Wang, H., Qiu, R., Hu, Q., & Liu, X. (2024). Digital twin-driven safety management and decision support approach for port operations and logistics. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1455522. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1455522>
- Zeneli, M., & Marinova, G. (2024). Navigating the future: Digital twin in maritime industry. Dalam *2024 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cobcom62281.2024.10631195>
- Zocco, F., Wang, H.-C., & Van, M. (2023). Digital twins for marine operations: A brief review on their implementation. *arXiv preprint arXiv:2301.09574*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2301.09574>
- Zou, Y., Xiao, G., Li, Q., & Biancardo, S. A. (2025). Intelligent maritime shipping: A bibliometric analysis of internet technologies and automated port infrastructure applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(5), 979. <https://doi.org/10.3390/jmse13050979>