

Sistem Informasi Geografis sebagai Pilar *Decision Support System* dalam Mewujudkan *Maritime Domain Awareness* dan Ketahanan Maritim Nasional yang Terintegrasi

Cecillia Dyah Afsari^{1*}, Surachman Surjaatmadja², Steven Toar Sambouw³, Nefra Firdaus⁴, Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶, Lukman Yudho Prakoso⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Universitas Pertahanan RI, Indonesia, Kampus Salemba, Jl. Salemba Raya No. 14, Kenari, Kecamatan Senen. Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10440

cecillia.afsari@km.idu.ac.id^{1*}, surachman.surjaatmadj@idu.ac.id²,
steven.toar@idu.ac.id³, nefra.firdaus@idu.ac.id⁴, harri.dolli@idu.ac.id⁵,
yuniar@idu.ac.id⁶, lukman.prakoso@idu.ac.id⁷

*Corresponding Author

Article Info

Article history:

Received : 13 July 2026

Revised :

Accepted :

Kata Kunci:

Cetak Biru Poros Maritim Dunia;
Decision Support System;
Ketahanan Maritim Nasional;
Maritime Domain Awareness;
Sistem Informasi Geografis.

ABSTRAK

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.504 pulau, wilayah laut melebihi 3,1 juta kilometer persegi, dan Zona Ekonomi Eksklusif 2,7 juta kilometer persegi, Indonesia menghadapi kompleksitas ancaman maritim tradisional maupun non-tradisional yang menuntut kemampuan *Maritime Domain Awareness* (MDA) berbasis analisis spasial secara *real-time*. Penelitian ini membahas posisi Sistem Informasi Geografis sebagai pilar *Decision Support System* dalam mewujudkan *Maritime Domain Awareness* (MDA) dan ketahanan maritim nasional yang terintegrasi. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis empat fungsi inti SIG dalam arsitektur DSS, merancang arsitektur tiga lapis yang mengintegrasikan tiga belas lembaga maritim, serta mengidentifikasi tantangan dan rekomendasi strategis implementasinya. Pendekatan yang digunakan adalah tinjauan pustaka sistematis terhadap empat puluh tiga sumber terverifikasi periode 2002–2026 yang dianalisis secara tematik menggunakan teknik pengodean (*coding*), matriks interoperabilitas antarinstansi, dan analisis SWOT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SIG menjalankan empat fungsi utama DSS, yaitu integrasi data multi-sumber, visualisasi *Common Operational Picture*, analisis spasial ancaman melalui AHP–TOPSIS dan *Analytic Network Process*, serta diseminasi informasi bertahap kepada pengambil keputusan. Matriks interoperabilitas menunjukkan bahwa tiga belas lembaga maritim memiliki tingkat standarisasi, status interoperabilitas, dan tantangan yang beragam sehingga memerlukan regulasi metadata ISO 19115 secara nasional. Analisis SWOT menghasilkan tiga kelemahan utama, yaitu fragmentasi data antarinstansi, keterbatasan interoperabilitas teknologi, dan kesenjangan kapasitas sumber daya manusia, yang dapat diatasi melalui arsitektur tiga lapis yang terdiri atas *Data Layer*, *Service Layer*, dan *Decision Layer*. Simpulan artikel ini menegaskan

bahwa SIG bukan sekadar alat pemetaan melainkan pilar strategis DSS untuk *Maritime Domain Awareness* (MDA) dan ketahanan maritim nasional dalam menyongsong visi Poros Maritim Dunia.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang memiliki lebih dari 17.504 pulau dengan total wilayah mencapai 7,81 juta kilometer persegi, yang terdiri atas 2,01 juta kilometer persegi daratan, 3,1 juta kilometer persegi lautan, dan 2,7 juta kilometer persegi Zona Ekonomi Eksklusif. Posisi geo-strategis Indonesia yang terletak di antara dua samudera dan dua benua menjadikan wilayah lautnya sebagai persimpangan jalur perdagangan internasional. Setidaknya empat dari sembilan choke point strategis dunia dan tiga Alur Laut Kepulauan Indonesia berada di wilayah Indonesia, yang merupakan jalur vital perdagangan global dan Pangiutan menegaskan bahwa wilayah Indonesia membentang dari Sabang hingga Merauke, sehingga kompleksitas ancaman maritim yang dihadapi sangat tinggi (Rizkiyani et.al., 2024). Hasil dokumentasi yang dilakukan oleh Rachmaji memperlihatkan sedikitnya ada tiga belas lembaga yang menghasilkan data dan informasi arsitektur kemaritiman nasional, dengan format, kelas, dan aksesibilitas data yang berbeda-beda, termasuk dimensi arsip maritim yang masih belum terdigitalisasi secara konsisten sehingga menghambat integrasi secara optimal (Rachmaji, 2023). Kondisi ini berpotensi menciptakan inefisiensi besar dalam pengambilan keputusan apabila tidak disatukan melalui satu *platform interoperable*.

Ancaman maritim non-tradisional yang dihadapi Indonesia saat ini mencakup *illegal, unreported and unregulated fishing (IUU Fishing)*, penyelundupan, pembajakan, dan aktivitas zona abu-abu yang makin intens di kawasan strategis seperti Laut Natuna Utara dan Selat Malaka. Hal ini menjelaskan bahwa kemampuan mendeteksi, mengidentifikasi, dan merespons ancaman secara real-time merupakan kebutuhan imperatif bagi Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut dan Bakamla sebagai bagian dari optimalisasi MDA dalam deteksi dini ancaman maritim (Haryono et.al., 2025). Penelitian yang dilakukan oleh Dolonseda bahwa modernisasi kapabilitas kapal perang berbasis *Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* menjadi prasyarat utama pertahanan maritim masa depan (Dolonseda, 2022). Bakamla sebagai penjaga laut Indonesia masih menghadapi tantangan besar dalam meningkatkan keamanan dan keselamatan di perairan Indonesia karena keterbatasan armada dan jangkauan operasional (Nurdewi, 2024).

Konsep *Maritime Domain Awareness (MDA)* telah menjadi elemen fundamental bagi arsitektur keamanan maritim modern. Agastia dan Perwita menjelaskan secara komprehensif bahwa MDA merupakan elemen esensial dari visi *Global Maritime Fulcrum* dengan tantangan dan prospek yang harus dipecahkan secara bertahap (Agastia & Perwita, 2018). Para penulis yang sama menekankan bahwa Poros Maritim Dunia yang dicanangkan pada Konferensi Tingkat Tinggi Asia Timur pada November 2014 terdiri atas lima pilar utama: budaya maritim, ekonomi maritim, konektivitas maritim, diplomasi maritim, dan keamanan maritim. Terdapat tiga isu yang mendasar

dalam pembangunan MDA Indonesia, yaitu keterbatasan kapasitas untuk melakukan operasi MDA secara berkelanjutan, lemahnya koordinasi antarinstansi, dan masalah *maritime sense-making* (Agastia & Perwita, 2018). Hudaya dan Putra (2018) menambahkan bahwa tanpa MDA yang andal, prioritas sumber daya kemaritiman tidak dapat dialokasikan secara efektif ke area-area kunci yang menjadi perhatian strategi Poros Maritim Dunia, sehingga koreksi doktrin dan penanganan ancaman non-tradisional menjadi agenda mendesak. Yakti dan Susanto (2018) menjelaskan lebih lanjut bahwa Poros Maritim Dunia merupakan pendekatan strategis Indonesia yang bukan sekadar perubahan orientasi kebijakan melainkan sebuah kesinambungan strategi maritim jangka panjang. Implementasi Poros Maritim Dunia makin relevan ketika didukung teknologi cerdas, termasuk SIG dan kecerdasan buatan, yang memungkinkan otomatisasi fusi data multi-sumber dalam mewujudkan kedaulatan Indonesia (Setiawibawa et al., 2025).

Di sisi keselamatan pelayaran, mendokumentasikan bahwa implementasi *Traffic Separation Scheme* di Selat Sunda masih menghadapi berbagai hambatan (Priadi et.al., 2024). Ditemukan bahwa kebijakan *Vessel Traffic Services* Direktorat Jenderal Perhubungan Laut di Selat Sunda masih terkendala oleh komunikasi antarinstansi, kapasitas operator, dan sinkronisasi kebijakan (Redita et.al., 2020). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peran VTS menjadi semakin penting untuk mendukung TSS melalui fungsi *monitoring*, *alerting*, dan *respond* (Priyatna & Gatinaud, 2020). Pengembangan sistem berbasis komputer untuk meningkatkan keselamatan kapal niaga merupakan langkah preventif yang perlu didukung dengan sistem pendukung keputusan yang akurat (Murdjito et.al., 2023). dan berbagai tindakan preventif lain yang dilakukan untuk mengurangi kecelakaan pelayaran di Indonesia, yang semakin menegaskan pentingnya DSS berbasis spasial pada tataran operasional harian (Kendek et.al., 2024).

Untuk menjawab tantangan ini, pemanfaatan teknologi geospasial di Indonesia sudah berlangsung secara bertahap. Pemanfaatan Penginderaan Jauh dan SIG dalam pembangunan sektor kelautan telah membuka jalan bagi integrasi data spasial dalam mendukung pertahanan negara maritim (Shalihati, 2014). Pengadopsian *Geospatial Intelligence* di Indonesia masih menghadapi keterbatasan infrastruktur teknologi di daerah terpencil, persoalan interoperabilitas data antarinstansi, dan kebutuhan peningkatan kapasitas sumber daya manusia (Kusmantoro et.al., 2024). Portal web *Indonesian Hydrographic Data Center* masih menghadapi hambatan interoperabilitas yang signifikan karena tidak meratanya sistem digital, ketidakharmonisan kebijakan dan standar teknis antarinstansi, serta kendala perangkat lunak dan perangkat keras (Novianto et.al., 2024).

Secara global, SIG telah dimanfaatkan secara luas dalam konteks maritim. *Geographic Information Systems* menawarkan kemampuan untuk mengumpulkan, menyimpan, menganalisis, mengelola, dan menampilkan data yang tereferensi secara geografis dalam berbagai lapisan tematik (Bensalloua & Benameur, 2021). SIG telah menjadi komponen penting dalam arsitektur sistem navigasi dan pengawasan maritim modern karena kemampuannya mempertimbangkan lokasi, geometri, topologi, dan hubungan data geografis (Baylon & Santos, 2013). Dalam membangun *intelligent*

situation awareness yang efektif, perlu integrasi dua ontologi secara bersamaan, yaitu ontologi SIG dan ontologi *Situational Awareness*, dan pendekatan ini telah berhasil diterapkan pada operasi pencarian dan pertolongan maritim (Popovich et.al., 2006). Komando operasi militer Angkatan Laut (NAVOCEANO) Amerika Serikat telah mengembangkan arsitektur berbasis *ArcIMS* dan *ArcSDE* yang berfungsi sebagai *information broker* antara sumber data Meteorologi dan Oseanografi dengan kebutuhan spesifik misi militer (Dykes & Hancock, 2004). Implementasi arsitektur serupa di kawasan *Eastern Gulf of Mexico* yang mengintegrasikan data berbagai lembaga melalui satu aplikasi universal (Harbaugh, 2003).

Dari sisi *Decision Support System*, dijelaskan bahwa DSS berfungsi untuk menyediakan informasi secara grafis dan tepat waktu dalam lingkungan pertahanan dan keamanan multinasional dan multi-agen, membantu pengambil keputusan memahami situasi, memilih arah tindakan, memantau eksekusi operasi, dan mengevaluasi hasilnya (Eloi & Pierre, 2010). Pada tataran pengawasan pelabuhan, sistem fusi informasi multi-level berbasis konteks menggabungkan model ontologis di tingkat rendah dengan penalaran *belief-based* di tingkat tinggi untuk menilai ancaman kapal mencurigakan secara efektif (Gómez-Romero et.al., 2014). Untuk menghadapi lingkungan operasi maritim yang kompleks, DSS memerlukan arsitektur berbasis agen yang mengelola sumber daya geografis terdistribusi secara adaptif (Khalili-Araghi et.al., 2012). DSS maritim kontemporer semakin mengadopsi pendekatan *microtask* kontekstual dengan mekanisme umpan balik yang menjembatani manajemen *top-down* dengan operasi *bottom-up* di kawasan perbatasan maritim (Didachos et.al., 2026).

Pada tataran operasional harian di kawasan Asia Timur, kontribusi Kelompok Riset *Marine GIS* dari National Taiwan Ocean University melalui Kao dan kolaborator telah menunjukkan peran krusial SIG sebagai pilar DSS untuk pencegahan tubrukan kapal dan rekomendasi manuver aman. Para peneliti membuktikan bahwa Sistem Informasi Geografis kelautan atau *Marine GIS* mampu mendukung pencegahan tubrukan kapal dengan anjungan lepas pantai melalui integrasi *Station AIS* dengan algoritma *fuzzy logic* yang menghasilkan *guarding ring* dan *danger index* secara spasial (Kao et.al., 2021). Sistem ini penting karena tubrukan kapal dan kecelakaan sering disebabkan oleh kelalaian navigator terhadap fasilitas berbahaya di laut, termasuk turbin angin lepas pantai yang makin banyak dibangun di jalur pelayaran padat (Kao et.al., 2021). Pada tataran *Vessel Traffic Service*, sejak tahun 2006 telah dibuktikan bahwa penerapan metode *fuzzy logic* menghasilkan sistem peringatan dini tubrukan yang mampu meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan operator VTS melalui perhitungan *ship domain* dan gaya inersia kapal (Kao et.al., 2006). Integrasi MGIS dengan *dummy AIS* pada kapal, memungkinkan terciptanya *safeguarding ring* dinamis yang menyesuaikan dengan kecepatan relatif maksimum, kondisi laut, dan waktu melarikan diri (Kao & Chang, 2017). Penerapan algoritma genetik untuk rekomendasi jalur penghindaran tubrukan menghasilkan rekomendasi sudut belok aman, waktu pemulihan, dan sudut pemulihan yang memenuhi *International Regulations for Preventing Collisions at Sea* (COLREGS) (Tsou et.al., 2009). Argumen ini dilengkapi dengan bukti bahwa algoritma *Ant Colony* mampu mengkonstruksi model penghindaran tubrukan yang

menyeimbangkan keselamatan, ekonomi, dan kepatuhan terhadap COLREGS (Tsou & Hsueh, 2010). Pengintegrasian AIS, GIS, dan *e-chart* di Pelabuhan Kaohsiung mampu menyajikan data lingkungan, lalu lintas kapal, dan lokasi kecelakaan kemaritiman secara simultan sehingga operator pelabuhan dapat mengelola lalu lintas secara efisien dan menekan peluang kecelakaan (Chou et.al., 2022). Seluruh bukti internasional tersebut menegaskan bahwa pilar kedua dan ketiga dari fungsi SIG dalam MDA bukan konsep idealistik melainkan sudah diterapkan secara operasional di kawasan maritim maju.

Di Indonesia para peneliti telah merancang Antasena, yaitu sistem pengawasan maritim berbasis *artificial intelligence* yang dirancang khusus untuk keputusan keamanan, dengan mengintegrasikan *Automatic Identification System*, citra satelit, dan metrik konservasi ke dalam satu *dashboard* analisis (Badrudin et.al., 2026). Saat ini kapasitas patroli Bakamla masih belum ideal untuk mencakup seluruh wilayah yurisdiksi Indonesia, sehingga industri pertahanan memiliki peran strategis untuk menyiapkan kapal patroli, pesawat nirawak, dan sensor pendukung (Sholihah et al., 2025). Bakamla menghadapi kendala signifikan pada kapabilitas *surveillance* udara dan mengandalkan kolaborasi multipihak untuk mencegah tindak pidana transnasional di kawasan perbatasan negara seperti Kepulauan Riau (Aprilia et.al., 2023).

Pada tataran operasional TNI AL, penggunaan GIS untuk simulasi pendaratan amfibi masih terbatas, padahal GIS berpotensi menyimulasikan skenario pendaratan, mengidentifikasi hambatan medan, dan menyajikan *insight spasial* bagi keputusan taktis (SARJITO, 2025). Penggunaan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dan *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) telah tervalidasi untuk mengoptimalkan pemilihan unsur operasi TNI AL dalam menghadapi ancaman zona abu-abu di Laut Natuna Utara (Wardana et.al., 2025). Dalam penerapannya model *spatial decision-making* digunakan untuk memprioritaskan pembangunan stasiun *Coast Guard* Indonesia (Adiatmaja et.al., 2025). mengimplementasikan *multi-criteria decision making* untuk penanganan tindak pidana kemaritiman di ALKI II (Cahyadi et.al., 2021). Cahyadi, Bastari, dan M juga telah menganalisis pemilihan negara-negara ALKI untuk penanganan tindak pidana pelanggaran melalui pendekatan *Multi-Criteria Decision Making*).

Pada tataran hukum, kebijakan penenggelaman kapal pencuri ikan oleh Kementerian Kelautan dan Perikanan pada 2014–2018 telah menimbulkan dampak signifikan terhadap menurunnya kerugian negara akibat *illegal fishing*. Kebijakan tersebut memiliki implikasi hukum internasional yang kompleks (Putri et.al., 2018). Analisis dampak dari perspektif hukum internasional memerlukan keseimbangan antara kedaulatan maritim dan kewajiban internasional (Choiro et.al., 2025).

Pada tataran ketahanan siber, bahwa ancaman terhadap ruang siber kini menjadi komponen penting dari keamanan maritim modern, sehingga kerangka *Military Confidence Building Measures* perlu diterapkan untuk menjaga ketahanan nasional di ruang siber (Chotimah et.al., 2019).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini merumuskan dua pertanyaan riset sebagai berikut. (1) Bagaimana posisi strategis Sistem Informasi Geografis dalam arsitektur *Decision Support System* untuk mewujudkan *Maritime Domain Awareness* di

Indonesia? (2) Bagaimana model integrasi SIG-DSS-MDA dapat dibangun sehingga membentuk arsitektur ketahanan maritim nasional yang terintegrasi?.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan teknik tinjauan pustaka sistematis (*systematic literature review*). Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian bukan melakukan pengujian empiris melainkan membangun kerangka konseptual integrasi yang dapat diverifikasi melalui bukti literatur.

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga kanal utama. Pertama, pencarian basis data akademik pada Garuda, SINTA, dan Scopus menggunakan string kueri seperti *Geographic Information System AND Maritime Domain Awareness, Decision Support System AND maritime security Indonesia, interoperability AND maritime Indonesia, Geospatial Intelligence maritime Indonesia*, dan *marine GIS alert system*. Kedua, penelusuran dokumen kebijakan dari Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Bakamla, Pushidrosal, dan BIG. Ketiga, telaah literatur dari laporan kecelakaan KNKT, statistik KKP, dan laporan patroli Bakamla.

Kriteria inklusi mencakup relevansi dengan topik integrasi SIG-DSS-MDA dalam konteks keamanan maritim Indonesia dan kawasan Asia Pasifik, rentang waktu publikasi 2003–2026 untuk mencakup sumber-sumber klasik seperti *Naval Oceanographic Office* (NAVOCEANO), *Eastern Gulf of Mexico*, Tesnière Asia Timur MGIS, bahkan termasuk bukti kontemporer melalui jurnal internasional bereputasi, dan ketersediaan teks penuh dalam bahasa Inggris atau bahasa Indonesia. Total empat puluh lima sumber primer dan sekunder dipilih melalui *purposive sampling*. Analisis data menggunakan teknik *coding* tematik dengan empat noda yang telah ditentukan: fungsi SIG dalam operasional maritim, arsitektur DSS pada lingkungan multinasional dan multi-agen, tantangan implementasi MDA di Indonesia, dan desain arsitektur terintegrasi.

Untuk memetakan posisi strategis SIG sebagai pilar DSS, digunakan analisis SWOT. Matriks interoperabilitas dibangun untuk memetakan peran, format data, dan status interoperabilitas tiap lembaga maritim. Validitas dijaga melalui triangulasi sumber dengan membedakan data primer (laporan resmi) dari data sekunder (artikel jurnal).

Keterbatasan utama penelitian ini adalah tidak adanya uji lapangan (*field test*) terhadap model arsitektur tiga lapis yang dirancang, sehingga rekomendasi utama mencakup uji prototipe pada Selat Sunda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Posisi Strategis SIG sebagai Pilar DSS untuk MDA

Hasil analisis menunjukkan bahwa SIG menjalankan empat fungsi utama dalam arsitektur DSS untuk *Maritime Domain Awareness* yang saling memperkuat satu sama lain.

Tabel 1. Fungsi SIG dalam Setiap Pilar DSS-MDA

No.	Pilar DSS–MDA	Fungsi SIG	Sumber Data	Contoh Implementasi	Referensi
1	Integrasi Data Multi-Sumber	Menggabungkan data radar, AIS, citra satelit, hidrografi, dan sensor bawah air ke dalam satu basis data geospasial	NAVOCEANO broker; IHDC; Bakamla AIS	Platform Antasena TNI AL	(Badrudin et al., 2026; Bensalloua & Benameur, 2021; Dykes & Hancock, 2004)
2	Visualisasi <i>Common Operational Picture</i>	Menyajikan peta operasional bersama yang dapat diakses <i>real-time</i> oleh pengguna multi-lembaga	Peta ALKI; TSS Selat Sunda; Zona Maritim	FMGIS untuk kapal dagang dan kapal nelayan	(Harbaugh, 2003; Kao et.al., 2021; Kao & Chang, 2017; Priyatna & Gatinaud, 2020)
3	Analisis Spasial Ancaman	Menjalankan <i>buffer analysis, overlay</i> , ANP, AHP–TOPSIS untuk penilaian ancaman dan prioritas sumber daya	Data kecelakaan KNKT; sebaran <i>illegal fishing</i> ; perencanaan operasi Natuna	FMGIS+TSS+V TS; algoritma genetik; operasi Natuna	(Adiatmaja et.al., 2025; Cahyadi et.al., 2020; Kao et.al., 2021; Tsou et.al., 2009; Wardana et.al., 2025)
4	Diseminasi Informasi ke Pengambil Keputusan	Mendistribusikan peringatan dan rekomendasi berbasis lokasi dengan hak akses sesuai peran pengguna	Portal IHDC; <i>dashboard</i> Bakamla; <i>dashboard</i> Antasena	Fuzzy logic VTS; rekomendasi Ant Colony	(Aprilia et.al., 2023; Badrudin et.al., 2026; Kao et.al., 2006; Novianto et.all., 2024)

(Sumber : diolah penulis, 2026)

Tabel 1 menunjukkan bahwa setiap pilar DSS–MDA memiliki peran spesifik SIG yang saling melengkapi. Pilar pertama menjadikan SIG sebagai integrator data multi-sumber yang heterogen. Pilar kedua menggunakan kemampuan visualisasi untuk membangun *Common Operational Picture*. Pilar ketiga menjalankan analisis spasial untuk penilaian ancaman. Pilar keempat mendistribusikan hasil analisis kepada pengguna. Keempat fungsi ini selaras dengan empat fungsi sentral DSS menurut Éloi dan Pierre dalam lingkungan pertahanan dan keamanan multinasional dan multi-agen.

Optimalisasi MDA oleh TNI AL memerlukan SIG bukan sekadar sebagai lapisan peta di atas MDA, melainkan sebagai jembatan yang menghubungkan data multi-sumber dengan kebutuhan operasional pengambil keputusan dalam konteks deteksi dini ancaman maritim (Haryono et.al., 2025). Pada tataran pelabuhan, integrasi SIG dengan model ontologis di tingkat rendah dan penalaran belief-based di tingkat tinggi menghasilkan penilaian ancaman yang lebih akurat (Gómez-Romero et.al., 2014). Pendekatan serupa digunakan untuk operasi pencarian dan pertolongan maritim, dengan membangun *intelligent situation awareness on a GIS basis* (Popovich et.al., 2006).

Pada tataran operasional harian di kawasan Asia Timur, *Maritime Geographic Information System* (MGIS) mampu menjalankan fungsi pilar kedua dan ketiga secara nyata. Kombinasi algoritma *fuzzy logic* dengan *platform MGIS* menghasilkan sistem

peringatan dini tubrukan kapal secara spasial dengan *guarding ring* dan *danger index* yang presisi, di mana *guarding ring* dihasilkan melalui analisis *ship domain* terhadap fasilitas lepas pantai (Kao et.al., 2021). Pada implementasi ini, Station AIS (*Automatic Identification System*) di pesisir menerima seluruh data dinamis kapal termasuk posisi, kecepatan, dan arah melalui AIS, kemudian menyiarkan pesan AIS 21 ke wilayah pengawasan sehingga seluruh kapal di kawasan tersebut dapat mengenali virtual AtoN secara otomatis (Kao et.al., 2021). Pendekatan ini mengatasi keterbatasan tubrukan kapal yang sering disebabkan oleh kelalaian navigator terhadap fasilitas lepas pantai seperti turbin angin lepas pantai yang makin banyak dibangun di jalur pelayaran padat (Kao et.al., 2021).

Metode *fuzzy logic* yang diterapkan pada VTS (*Vessel Traffic Services*) menghasilkan sistem peringatan dini tubrukan yang mampu meningkatkan kemampuan operator VTS (Kao et.al., 2006). Sistem ini menggabungkan perhitungan *ship domain* dan gaya inersia kapal untuk menghasilkan model *guarding ring*, dan setelah jari-jari *guarding ring* diperoleh dan ditampilkan pada platform MGIS, evaluasi *danger index* dilakukan berbasis perbedaan area yang dihitung secara otomatis (Kao et.al., 2006). Hasilnya, waktu dan posisi tubrukan dapat diprediksi secara akurat sehingga operator VTS memiliki waktu yang memadai untuk merespons ancaman (Kao et al., 2006).

Untuk konteks Indonesia yang memiliki hampir sejuta kapal nelayan tradisional yang rentan terhadap tubrukan dengan kapal dagang besar, kontribusi Kao dan Chang (2017) melalui penelitian *fuzzy GIS for navigation safety of fishing boats* menjadi semakin relevan. Integrasi MGIS dengan *dummy* AIS pada kapal, menghasilkan *safeguarding ring* dinamis yang menyesuaikan dengan kecepatan relatif maksimum, kondisi laut, dan waktu melarikan diri. Hasil uji coba menunjukkan bahwa penerapan FMGIS untuk kapal agar mampu menurunkan risiko tubrukan secara signifikan dan menjadi model yang siap diadaptasi untuk konteks nelayan Indonesia.

Penerapan algoritma genetik untuk rekomendasi jalur penghindaran tubrukan menghasilkan rekomendasi sudut belok aman, waktu pemulihan, dan sudut pemulihan yang memenuhi aturan *International Regulations for Preventing Collisions at Sea* (COLREGS) sehingga operator kapal dan *VTS officer* memiliki panduan manuver yang aman secara ekonomi (Tsou et.al., 2009). Tsou dan Hsueh melengkapi argumen ini dengan menunjukkan bahwa algoritma *Ant Colony* mampu mengkonstruksi model penghindaran tubrukan yang menyeimbangkan tiga aspek kritis, yaitu keselamatan, ekonomi, dan kepatuhan terhadap COLREGS. Integrasi AIS, GIS, dan *e-chart* secara simultan mampu menyajikan analisis kondisi lingkungan pada lokasi kecelakaan kemaritiman sehingga rekomendasi berbasis MGIS menjadi lebih informatif bagi pengambil keputusan (Chou et.al., 2022). Seluruh bukti internasional ini menegaskan bahwa pilar kedua, ketiga, dan keempat dari fungsi SIG dalam MDA bukan konsep idealistik melainkan sudah diterapkan secara operasional di kawasan Asia Timur dan siap diadaptasi untuk konteks Indonesia melalui Selat Sunda dan ALKI II.

Badrudin, et.al. (2026) mendemonstrasikan implementasi konkret dari pilar pertama dan keempat melalui *platform* Antasena berbasis AI yang mengintegrasikan data AIS, citra satelit, dan metrik konservasi ke dalam satu *dashboard*, sehingga para

pengambil keputusan dapat mendeteksi anomali kapal dan merespons ancaman secara lebih akurat. Penggunaan GIS untuk simulasi pendaratan amfibi pada wilayah pesisir masih terbatas di lingkungan TNI AL, sehingga ada potensi besar untuk memperkuat fungsi ketiga melalui analisis spasial ancaman (SARJITO, 2025).

Pada tataran internasional, NAVOCEANO melalui arsitektur SIG berfungsi sebagai *information broker* antara sumber data *Meteorology and Oceanography* (METOC) dan misi militer (Dykes & Hancock, 2004). Integrasi serupa berlaku di kawasan *Eastern Gulf of Mexico* melalui satu aplikasi universal yang menjangkau berbagai lembaga (Harbaugh, 2003). Kemampuan DSS untuk memproses data navigasi dalam jumlah besar akan meningkat signifikan dengan penerapan NoSQL Data Warehouse yang mengintegrasikan *Electronic Chart Display and Information System* (ECDIS) dengan *On-Line Analytical Processing* (Bensalloua & Benameur, 2021). Lingkungan operasional maritim yang kompleks, DSS memerlukan arsitektur berbasis agen yang mengelola sumber daya geografis terdistribusi secara adaptif, dengan karakteristik ancaman yang dinamis (Khalili-Araghi et.al., 2012). Pada tataran pengelolaan perbatasan, DSS memerlukan arsitektur dengan microtask kontekstual dan mekanisme umpan balik yang adaptif, sehingga setiap rekomendasi di lapangan dapat memperkaya analisis berikutnya (Didachos et.al., 2026).

Matriks Peran, Data, dan Interoperabilitas Antar-Lembaga Maritim

Rachmaji menjelaskan bahwa keberhasilan integrasi SIG-DSS-MDA bergantung pada interoperabilitas tiga belas lembaga maritim yang menghasilkan data arsitektur kemaritiman nasional. Setiap lembaga memiliki format, kelas, dan rezim akses yang berbeda, termasuk dimensi arsip maritim yang masih belum terdigitalisasi secara konsisten sehingga menghambat integrasi secara mendasar (Rachmaji, 2023). Hasil pemetaan terhadap ketiga belas lembaga tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Matriks Peran, Data, dan Interoperabilitas Lembaga Maritim Indonesia

No.	Lembaga	Peran Utama	Jenis Data Spasial	Standar	Status Interop.	Tantangan Utama
1	Bakamla	Patroli keamanan dan keselamatan laut	AIS, radar, laporan kejadian	ISO 19115 (parsial)	Sedang dibangun	Kapasitas patroli belum ideal; keterbatasan <i>surveillance</i> udara (Aprilia et.al., 2023; Nurdewi, 2024; Sholihah et.al., 2025)
2	TNI AL	Pertahanan dan keamanan maritim	Radar, ISR, target identification	Standar taktis internal	Terbatas pada internal	Keterbatasan pesawat nirawak; integrasi sipil terbatas (Haryono et.al., 2025; SARJITO, 2025)

3	KKP	Pengelolaan sumber daya perikanan	VMS, statistik tangkapan	Standar internal KKP	Internal	Koordinasi dengan Bakamla dan TNI AL belum optimal (Choiro et.al., 2025; Putri et.al., 2018)
4	Pushidro sal	Hidrografi dan pemetaan laut	Peta laut, BATNAS, ALKI	S-57	Standar sudah baik	Portal IHDC menghadapi hambatan interoperabilitas (Novianto et.al., 2024)
5	BIG	Informasi geospasial dasar	Peta RBI, DEMNAS, ortofoto	ISO 19115; ISO 19139	Cukup baik	Harmonisasi dengan Pushidrosal dan swasta belum seragam (Novianto et.al., 2024; Rizkiyani et.al., 2024)
6	KPLP	Keselamatan pelayaran	VTs, data kecelakaan, sertifikat nahkoda	IMO Resolusi A.572	Sedang berkembang	Fungsi <i>alerting</i> dan <i>respond</i> belum optimal (Priyatna & Gatinaud, 2020; Redita et.al., 2020)
7	BMKG	Cuaca dan oseanografi	Gelombang, arus, angin, SST	Standar WMO	Standar baik	Data <i>real-time</i> belum menjangkau operator kecil
8	KLHK	Konservasi dan lingkungan laut	<i>Marine Protected Areas</i> , data polusi	CBD dan Ramsar	Cukup baik	Tumpang tindih dengan data KKP
9	Polri	Penegakan hukum di laut	Laporan tindak pidana, bukti forensik	Standar internal Polri	Masih rendah	Koordinasi dengan TNI AL belum optimal
10	Bea Cukai	Pengawasan barang lintas batas	Manifes kargo, AIS	Standar WTO	Cukup baik	Pembatasan akses untuk lembaga non-bea cukai
11	Imigrasi	Pengawasan orang asing	Data penumpangan, dokumen pelaut	Standar ICAO dan IMO	Cukup baik	Data belum terhubung dengan parameter keselamatan pelayaran
12	Basarnas	Pencarian dan pertolongan	Posisi musibah,	Standar internal	Terbatas	Koordinasi multi-pihak

			operasi SAR	dan IMO		membutuhkan GIS <i>real-time</i>
13	Kominfo	Infrastruktur telekomunikasi	Jaringan, spektrum, cakupan	Standar ITU	Cukup baik	Daerah <i>blank spot</i> di wilayah 3T

(Sumber : diolah penulis, 2026)

Dari Tabel 2 teridentifikasi tiga pola utama. Pertama, lembaga produtor data fondasional seperti Pushidrosal, BIG, dan BMKG telah cukup baik dalam penerapan standar internasional (S-57, ISO 19115), namun data mereka belum sepenuhnya dibagikan ke seluruh ekosistem keamanan maritim. Kedua, lembaga operasional seperti Bakamla, TNI AL, dan KPLP memiliki data *real-time* yang sangat berharga untuk MDA, tetapi formatnya belum interoperabel dengan BIG atau BMKG. Ketiga, badan kecil seperti Polri, Bea Cukai, dan Imigrasi memiliki data forensik dan administratif yang esensial untuk analisis ancaman, namun belum masuk ke dalam sistem spasial terpadu. Keragaman format, celah sistem referensi, dan variasi kualitas antarinstansi merupakan masalah struktural yang hanya dapat diselesaikan melalui kebijakan interoperabilitas formal (Rachmaji, 2023). Tanpa standardisasi metadata yang konsisten, portal web seperti *Indonesian Hydrographic Data Center* (IHDC) tidak akan mampu menjalankan fungsi konsolidasi data secara optimal (Novianto et.al., 2024). Lemahnya tata kelola data antarinstansi ini merupakan tantangan utama dalam membangun sistem keamanan maritim Indonesia yang utuh (Rizkiyani et.al., 2024).

Bakamla sebagai penjaga laut Indonesia menghadapi tantangan signifikan termasuk keterbatasan jumlah armada, kapasitas personel, dan jangkauan operasional di tengah kompleksitas geografis Indonesia (Nurdewi, 2024). Dalam upaya pencegahan tindak pidana transnasional di daerah perbatasan negara seperti Riau Islands memerlukan kolaborasi multipihak yang efektif (Aprilia et.al., 2023). Optimalisasi MDA oleh TNI AL juga memerlukan integrasi dengan data dari lembaga sipil untuk menghasilkan deteksi dini ancaman yang komprehensif (Haryono et.al., 2025). Industri pertahanan memiliki peran strategis dalam menyediakan kapal patroli, pesawat nirawak, dan sensor pendukung untuk memperkuat kapasitas armada Bakamla (Sholihah et.al., 2025).

Komunikasi antarinstansi yang belum harmonis dengan operator VTS di Selat Sunda saat ini menjadi salah satu hambatan utama keselamatan pelayaran (Redita et.al., 2020). Sistem pelaporan pelanggaran TSS juga masih lemah sehingga mengurangi efektivitas MDA di Selat Sunda (Priadi et al., 2024). Pada kawasan pelabuhan, integrasi AIS, GIS, dan e-chart secara simultan mampu menyajikan analisis lalu lintas dan kecelakaan kemaritiman sehingga rekomendasi berbasis MGIS dapat menghasilkan prioritas patroli yang lebih efisien (Chou et.al., 2022). Seluruh bukti tersebut menunjukkan bahwa kemampuan DSS untuk menghasilkan prioritas patroli dan rekomendasi manuver sudah matang pada tataran teknis dan siap diintegrasikan ke dalam arsitektur tiga lapis untuk konteks Indonesia melalui Selat Sunda.

Analisis SWOT Implementasi SIG-DSS-MDA di Indonesia

Analisis SWOT digunakan untuk memetakan posisi strategis SIG sebagai pilar DSS-MDA dalam konteks Indonesia. Hasil analisis dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Matriks Analisis SWOT Implementasi SIG-DSS MDA di Indonesia

KEKUATAN	KELEMAHAN
S1. Pengalaman panjang LAPAN dan BIG dalam pemetaan sumber daya pesisir dan laut didukung teknologi Penginderaan Jauh dan SIG (Shalihati, 2014)	W1. Keterbatasan infrastruktur teknologi di daerah terpencil; persoalan interoperabilitas data; kesenjangan SDM (Kusmantoro et.al., 2024; Novianto et.al., 2024)
S2. Pengembangan platform Antasena berbasis AI milik TNI AL untuk deteksi anomali kapal dan keputusan keamanan (Badrudin et.al., 2026)	W2. Ketidakharmonisan kebijakan dan standar teknis antarinstansi (Novianto et.al., 2024)
S3. Kapasitas <i>multi-criteria decision making</i> (AHP-TOPSIS, MCDM) untuk prioritas pembangunan Coast Guard dan operasi laut (Adiatmaja et.al., 2025; Cahyadi et.al., 2020, 2021; Wardana et.al., 2025)	W3. Kapasitas sumber daya manusia operator VTS terbatas (Redita et.al., 2020)
S4. Kapabilitas industri pertahanan dalam menyediakan kapal patroli, pesawat nirawak, dan sensor pendukung (Dolonseda, 2022; Sholihah et al., 2025)	W4. Keterbatasan simulasi berbasis GIS untuk operasi khusus seperti pendaratan amfibi (SARJITO, 2025)
PELUANG	ANCAMAN
O1. Visi Poros Maritim Dunia dengan lima pilar strategis (Agastia & Perwita, 2018; Hudaya & Putra, 2018; Setiawibawa et.al., 2025; Yakti & Susanto, 2018)	T1. Aktivitas zona abu-abu di Laut Natuna Utara dan Selat Malaka (Wardana et.al., 2025)
O2. Standar ISO 19115 dan ISO 19139 sebagai referensi teknis interoperabel (Baylon & Santos, 2013; Dykes & Hancock, 2004)	T2. Ancaman siber terhadap infrastruktur komunikasi maritim (Chotimah et.al., 2019)
O3. Pengalaman Pushidrosal dan BIG dalam pemetaan hidrografi dan geospasial (Novianto et.al., 2024; Shalihati, 2014)	T3. Pelanggaran TSS dan implementasi VTS belum optimal (Priadi et.al., 2024; Redita et.al., 2020)
O4. Bukti internasional MGIS di Selat Sunda, Kaohsiung, dan kawasan Asia Timur (Chou et.al., 2022; Harbaugh, 2003; Kao et.al., 2006, 2021; Kao & Chang, 2017; Tsou et.al., 2009; Tsou & Hsueh, 2010)	T4. Kapasitas patroli Bakamla sulit menjangkau seluruh yurisdiksi (Aprilia et.al., 2023; Nurdewi, 2024)

(Sumber : diolah penulis, 2026)

Kombinasi paling prospektif adalah penggabungan kekuatan S1–S4 dengan peluang O1–O4, yaitu pemanfaatan pengalaman panjang LAPAN–BIG dan kapasitas AI Antasena yang akan dimaksimalkan oleh visi Poros Maritim Dunia, standar ISO 19115, dan bukti internasional MGIS untuk tubrukan kapal, VTS, dan manajemen lalu lintas pelabuhan. Sebaliknya, kombinasi W1–W4 dan T1–T4 menjadi tantangan utama karena ketiga belas lembaga belum memiliki interoperabilitas formal sehingga patroli Bakamla dan VTS Selat Sunda tidak dapat merespons ancaman secara efektif.

Tantangan MDA Indonesia yang paling mendesak adalah membuat operasi MDA berkelanjutan dan koordinasi antarinstansi menjadi efektif, sehingga budaya berbagi data dan interoperabilitas formal harus ditumbuhkan secara konsisten (Agastia & Perwita, 2018). Teknologi cerdas seperti SIG dan *artificial intelligence* menjadi katalis yang memungkinkan visi Poros Maritim Dunia diterjemahkan ke dalam realitas operasional (Setiawibawa et al., 2025). Kapasitas *multi-criteria decision making* yang

sudah divalidasi untuk pemilihan prioritas pembangunan *Coast Guard* siap diintegrasikan ke dalam arsitektur tiga lapis (Adiatmaja et al., 2025). Dari sisi industri pertahanan, penyediaan kapal perang berbasis C4ISR merupakan bagian tak terpisahkan dari upaya memperkuat SIG sebagai pilar DSS untuk MDA, terutama dalam komponen *Command and Control* (Dolonseda, 2022). Kao, Chang, dan Hsu menambahkan bahwa bukti internasional MGIS untuk tubrukan kapal di Selat Sunda dengan VTS yang sudah aktif akan menjadi titik masuk ideal untuk implementasi skala penuh arsitektur tiga lapis di Indonesia.

Arsitektur Tiga Lapis Terintegrasi

Berdasarkan analisis pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3, dirancang arsitektur tiga lapis yang memposisikan SIG sebagai penggerak utama. Arsitektur ini mengikuti prinsip-prinsip arsitektur terdistribusi yang dikemukakan oleh Khalili-Araghi, Fisher, Glässer, dan Grüner (2012), serta mengadopsi pendekatan maritime smart VTS yang mampu mengintegrasikan fungsi monitoring, alerting, dan respond dari Priyatna dan Gatinaud (Priyatna & Gatinaud, 2020).



Gambar 1. Arsitektur Tiga Lapis SIG-DSS-MDA

(Sumber : diolah penulis, 2026)

Tabel 4. Komponen, Fungsi, dan Teknologi pada Setiap Arsitektur

Lapisan	Komponen	Fungsi	Teknologi Pendukung	Lembaga Terkait
Data Layer	Maritime GeoPortal nasional berbasis metadata ISO 19115/19139	Mengintegrasikan data spasial dari tiga belas lembaga maritim; menghasilkan metadata terstandar	WMS, WFS, WCS, GeoNode, GeoServer, CKAN	BIG; Pushidrosal; Bakamla; TNI AL; BMKG
Service Layer	Platform fusi informasi dan mesin analisis spasial	Menggabungkan model ontologis tingkat rendah dengan penalaran <i>belief-based</i> tingkat tinggi untuk penilaian ancaman	Data Warehouse NoSQL; <i>Artificial Intelligence</i> ; <i>Machine Learning</i> ; OLAP; Fuzzy Logic Guarding Ring	Bakamla; TNI AL; KKP; KLHK; BIG
Decision Layer	<i>Dashboard</i> multi-pengguna dengan akses berbasis peran; rekomendasi rute	Memetakan rekomendasi ke struktur komando C4ISR; mengintegrasikan hasil AHP-TOPSIS dan algoritma genetika	<i>Multi-Criteria Decision Making</i> ; AHP-TOPSIS; GIS Dashboard; Smart VTS; Ant Colony Route Planning	Kemenko Polkam; Mabes TNI AL; Bakamla

(Sumber : diolah penulis, 2026)

Pada *Service Layer*, pendekatan multi-level *information fusion* yang dikembangkan oleh Gómez-Romero, Serrano, García, Rosado, dan Bustamante menjamin bahwa ancaman dinilai tidak dari satu sumber data tetapi dari integrasi indikator yang lebih kaya (Gómez-Romero et al., 2014). Arsitektur berbasis agen dengan kontrol terdesentralisasi memungkinkan setiap knowledge node tetap beroperasi meskipun terjadi degradasi pada node lainnya (Khalili-Araghi et al., 2012). Pada lingkungan yang membutuhkan koordinasi sipil-militer, pendekatan dengan *microtask* kontekstual mampu menjembatani manajemen *top-down* dengan *operasi bottom-up* (Didachos et al., 2026).

Kemampuan arsitektur DSS untuk memproses data navigasi dalam jumlah besar akan meningkat signifikan dengan penerapan NoSQL *Data Warehouse* yang mengintegrasikan ECDIS dengan *On-Line Analytical Processing* (Bensalloua & Benameur, 2021). Pada tataran operasional TNI AL, GIS dapat menjadi tulang punggung simulasi pendaratan amfibi, sehingga fungsi ketiga dari SIG DSS-MDA dapat diperluas pada tataran taktis (SARJITO, 2025). Integrasi AIS, GIS, dan *e-chart* secara simultan mampu menyajikan analisis kondisi lingkungan pada lokasi kecelakaan kemaritiman sehingga rekomendasi berbasis MGIS menjadi lebih informatif bagi pengambil keputusan (Chou et al., 2022).

Pada lapisan layanan, kontribusi Kao dan tim dari Taiwan sangat relevan untuk konteks Indonesia. Kao, Chang, dan Hsu (2021) menunjukkan bahwa integrasi algoritma *fuzzy logic* dengan platform MGIS mampu menghasilkan sistem peringatan dini tubrukan kapal secara spasial dengan *guarding ring* dan *danger index* yang presisi. Dalam implementasi ini, Station AIS di pesisir menerima seluruh data dinamis kapal termasuk posisi, kecepatan, dan arah, kemudian menyiarkan pesan AIS 21 ke wilayah pengawasan melalui pendekatan *broadcast* sehingga setiap kapal dapat mengenali

virtual AtoN (Kao et al., 2021). Pendekatan ini relevan dengan konteks Selat Sunda yang memiliki VTS aktif, sehingga dapat diintegrasikan ke dalam *Service Layer* untuk menghasilkan peringatan otomatis berbasis MGIS bagi seluruh kapal yang beroperasi.

Penerapan metode *fuzzy logic* dalam VTS menghasilkan sistem peringatan dini tubrukan yang mampu meningkatkan kemampuan pengambilan keputusan operator VTS (Kao et al., 2006). Sistem ini menggabungkan perhitungan *ship domain* dan gaya inersia kapal untuk menghasilkan model *guarding ring*, sehingga prediksi waktu dan posisi tubrukan dapat dihasilkan secara akurat (Kao et al., 2006). Pada implementasi Selat Sunda dengan lebih dari seribu kapal per hari, pendekatan ini akan secara signifikan mengurangi kecelakaan akibat kelalaian operator.

Kao dan Chang (2017) menambahkan bahwa integrasi MGIS dengan *dummy AIS* pada kapal, memungkinkan terciptanya *safeguarding ring* dinamis yang menyesuaikan dengan kecepatan relatif maksimum, kondisi laut, dan waktu melarikan diri. Hasil evaluasi *danger index* berbasis perbedaan area yang dihitung melalui MGIS menunjukkan bahwa penerapan sistem ini secara signifikan mengurangi kecelakaan tubrukan pada uji coba di pelabuhan Taiwan (Kao & Chang, 2017). Model ini sangat relevan dengan konteks Indonesia yang memiliki hampir sejuta kapal nelayan tradisional yang rentan terhadap tubrukan dengan kapal dagang besar.

Tsou dan Kao (2009) menambahkan bahwa penerapan algoritma genetik untuk rekomendasi jalur penghindaran tubrukan menghasilkan rekomendasi sudut belok aman, waktu pemulihan, dan sudut pemulihan yang memenuhi aturan COLREGS. Sementara itu, Tsou dan Hsueh (2010) menunjukkan bahwa algoritma *Ant Colony* dapat mengkonstruksi model penghindaran tubrukan yang menyeimbangkan keselamatan, ekonomi, dan kepatuhan terhadap COLREGS. Kedua pendekatan ini siap diintegrasikan ke dalam *Decision Layer* untuk memberikan rekomendasi manuver yang aman bagi operator kapal dan VTS officer di Selat Sunda.

Arsitektur tiga lapis ini juga mengakomodasi potensi ancaman siber terhadap infrastruktur komunikasi maritim yang disoroti oleh Chotimah, Iswardhana, dan Pratiwi (2019) melalui mekanisme kontrol akses dan segmentasi jaringan pada *Decision Layer*.

Implikasi Kebijakan terhadap Cetak Biru Poros Maritim Dunia

Hasil analisis pada bagian sebelumnya memiliki implikasi langsung terhadap operasionalisasi cetak biru Poros Maritim Dunia, khususnya dalam struktur kelembagaan era pemerintahan Kabinet Prabowo Subianto. Visi Poros Maritim Dunia memerlukan dukungan teknologi cerdas untuk menerjemahkan aspirasinya menjadi realitas operasional (Setiawibawa et al., 2025). Kelima pilar Poros Maritim Dunia (budaya maritim, ekonomi maritim, konektivitas maritim, diplomasi maritim, dan keamanan maritim) hanya dapat tercapai apabila MDA berfungsi secara optimal (Hudaya & Putra, 2018). Agastia dan Perwita (2018) memperkuat argumen ini dengan menunjukkan bahwa MDA adalah elemen esensial yang tidak dapat dipisahkan dari visi Poros Maritim Dunia, sehingga setiap kebijakan di luar pilar keamanan harus tetap memiliki kerangka MDA yang jelas.

Rachmaji (2013) menjelaskan bahwa kerangka regulasi yang sudah ada memberikan fondasi teknis untuk interoperabilitas data tiga belas lembaga maritim sekaligus menjadi prasyarat bagi kedaulatan informasi negara. Implementasi SIG-DSS-MDA dalam struktur kabinet era pemerintahan Presiden Prabowo mendapati distribusi koordinasi keamanan maritim lintas Kemenko Polkam, Kemenko IPK, KKP, Kemenhan, Kemenhub, dan BIG. Empat implikasi kebijakan utama dapat diidentifikasi.

Implikasi Kebijakan yang pertama, Penguatan Pilar Keamanan Maritim. Analisis SWOT menunjukkan bahwa kapasitas kapal patroli Bakamla masih terbatas dan koordinasi antarinstansi lemah, sebagaimana dikonfirmasi oleh Aprilia, Sutanto, Prakoso, dan Nurmandi (Aprilia et.al., 2023). Tantangan Bakamla sebagai penjaga laut Indonesia memerlukan kolaborasi multi-lembaga yang sistematis (Nurdewi, 2024). Arsitektur tiga lapis memungkinkan integrasi data patroli Bakamla, radar TNI AL, sensor Pushidrosal, dan peringatan BMKG ke dalam satu *Common Operational Picture*. Implementasi optimalisasi MDA oleh TNI AL melalui arsitektur ini akan memperkuat deteksi dini ancaman maritim (Haryono et.al., 2025). Implikasi kebijakannya adalah penerbitan regulasi interoperabilitas data spasial maritim oleh Kemenko Polkam yang menjadikan kepatuhan metadata ISO 19115 wajib bagi seluruh lembaga.

Implikasi Kebijakan kedua, Penguatan Pilar Infrastruktur dan Konektivitas. Implementasi VTS Selat Sunda menghadapi hambatan komunikasi dan sumber daya (Redita et.al., 2020). Implementasi *Service Layer* pada arsitektur tiga lapis akan memungkinkan fusi data VTS dengan data kecelakaan KNKT (Kendek et.al., 2024) untuk menghasilkan prioritas patroli yang lebih akurat, sebagaimana telah divalidasi oleh Adiatmaja, Septiani, Dewayana, dan Ismail (2025) untuk pemilihan prioritas pembangunan *Coast Guard*. Priadi, implementasi TSS Selat Sunda juga akan mendapat manfaat langsung dari integrasi MGIS dengan VTS, sehingga fungsi monitoring, alerting, dan respond berjalan simultan (Priadi et al., 2024; Priyatna & Gatinaud, 2020). Kao, Chang, dan Hsu (2021) menunjukkan bahwa bukti internasional MGIS yang diterapkan di Selat Sunda dengan VTS aktif akan menghasilkan sistem peringatan dini tubrukan kapal yang presisi. Peningkatan keselamatan kapal niaga melalui sistem berbasis komputer memerlukan dukungan data spasial yang andal (Murdjito et.al., 2023). Implikasi kebijakannya adalah Kemenko IPK bersama Kemenhub dan Pushidrosal menyusun Kerangka Kerja Penataan Ruang Logistik Maritim berbasis peta dasar hidrografi skala besar.

Implikasi Kebijakan ketiga, Pendirian *Maritime Intelligence Fusion Center*. Untuk mengatur sumber daya geografis terdistribusi dengan karakteristik ancaman dinamis, diperlukan arsitektur berbasis agen dengan kontrol terdesentralisasi (Khalili-Araghi et.al., 2012). Pada tataran koordinasi sipil-milter, pendekatan dengan *microtask* kontekstual dan *feedback loops* memperbaiki kesadaran situasional (Didachos et al., 2026). Kebijakan Poros Maritim Dunia harus dilihat sebagai kesinambungan strategi jangka panjang, sehingga *Maritime Intelligence Fusion Center* harus dirancang untuk menjawab ancaman jangka panjang, bukan jangka pendek (Yakti & Susanto, 2018). Implikasi kebijakannya adalah pendirian *Maritime Intelligence Fusion Center* di bawah Kemenko Polkam yang beroperasi 24/7 dengan model *knowledge node* terdistribusi ala

arsitektur Khalili-Araghi (Khalili-Araghi et.al., 2012), dengan mengintegrasikan algoritma *fuzzy logic* Kao dan tim (Kao et.al., 2006) serta algoritma genetik Tsou dan Kao (Tsou et.al., 2009) dan *Ant Colony* Tsou dan Hsueh (Tsou & Hsueh, 2010) untuk menghasilkan rekomendasi manuver yang aman bagi operator VTS Selat Sunda.

Implikasi Kebijakan keempat, Penguatan Pilar Industri Pertahanan. Industri pertahanan memiliki peran strategis dalam menjawab kebutuhan kapabilitas C4ISR kapal perang untuk mencapai keamanan maritim (Dolonseda, 2022). Kapasitas industri pertahanan dalam menyediakan kapal patroli, pesawat nirawak, dan sensor pendukung harus diintegrasikan ke dalam arsitektur SIG-DSS-MDA (Sholihah et.al., 2025). Metode AHP-TOPSIS mampu menghasilkan prioritas unsur operasi untuk menghadapi ancaman zona abu-abu di Laut Natuna Utara, sehingga metode ini siap dipakai untuk memprioritaskan akuisisi (Wardana et.al., 2025). Implementasi *Multi-Criteria Decision Making* untuk penanganan tindak pidana di ALKI II dapat menjadi referensi bagi akuisisi yang berbasis ancaman (Cahyadi et al., 2021). Cahyadi, Bastari et.al. (2021) juga menunjukkan bahwa analisis pemilihan negara-negara ALKI untuk penanganan tindak pidana pelanggaran mendukung pendekatan berbasis ancaman geospasia). Implikasi kebijakannya adalah Kemenhan bersama KKP dan BIG memformulasikan roadmap akuisisi pertahanan yang diprioritaskan secara geospasial berdasarkan hasil AHP-TOPSIS untuk ancaman zona abu-abu Laut Natuna Utara.

KESIMPULAN, REKOMENDASI DAN KETERBATASAN

Dari analisis terhadap empat puluh tiga sumber terverifikasi periode 2002–2026 dihasilkan empat simpulan utama. Pertama, SIG menjalankan empat fungsi inti dalam arsitektur DSS untuk MDA, yaitu integrasi data multi-sumber, visualisasi Common Operational Picture, analisis spasial ancaman melalui AHP-TOPSIS dan ANP, serta diseminasi informasi bertahap kepada pengambil keputusan. Kedua, model integrasi SIG-DSS-MDA dirancang dalam arsitektur tiga lapis berupa Data Layer, Service Layer, dan Decision Layer dengan memanfaatkan algoritma fuzzy logic, genetik, Ant Colony, dan Bayesian fusion yang telah divalidasi secara internasional. Ketiga, tantangan utama implementasi terdiri atas fragmentasi data antarinstansi, keterbatasan interoperabilitas standar dan teknologi, serta kesenjangan sumber daya manusia, yang dapat diatasi melalui kebijakan interoperabilitas formal, standarisasi metadata, dan pusat pelatihan geospasial maritim. Keempat, MDA sebagai elemen esensial Poros Maritim Dunia memerlukan fondasi data terdigitalisasi secara konsisten untuk mendukung kedaulatan informasi maritim Indonesia dengan bukti internasional MGIS kawasan Asia Timur menjadi referensi implementasi siap pakai.

Tiga rekomendasi kebijakan utama diajukan untuk struktur kabinet era pemerintahan Presiden Prabowo. Pertama, jangka pendek 2026–2027, pengembangan pilot Maritime GeoPortal Selat Sunda yang menyatukan Pushidrosal, Bakamla, KSOP Selat Sunda, dan Polri Perairan di bawah lapisan metadata ISO 19115, dengan memanfaatkan infrastruktur VTS yang sudah dioperasikan Kemenhub, menggunakan model fuzzy logic guarding ring, algoritma genetik, dan algoritma Ant Colony untuk menghasilkan rekomendasi manuver aman. Kedua, jangka menengah 2027–2029,

penyusunan Regulasi Metadata Maritim Nasional melalui Instruksi Presiden yang menjadikan kepatuhan ISO 19115/19139 wajib bagi tiga belas lembaga maritim. Ketiga, jangka panjang 2029–2031, pendirian Indonesian Maritime Intelligence Fusion Center di bawah koordinasi Kemenko Polkam dengan arsitektur berbasis agen.

Keterbatasan utama penelitian ini mencakup tiga hal. Pertama, arsitektur tiga lapis yang dirancang belum diuji secara empiris di lapangan. Kedua, dimensi regulasi berbagi data untuk informasi klasifikasi antarinstansi belum dianalisis secara mendalam, termasuk dimensi arsip maritim yang masih terdistribusi di berbagai lembaga. Ketiga, profil kompetensi sumber daya manusia berbasis geospasial untuk mendukung pilot Selat Sunda belum dipetakan secara komprehensif. Penelitian selanjutnya diharapkan melakukan prototipe di Selat Sunda dengan mengintegrasikan algoritma fuzzy logic, algoritma genetik, dan Ant Colony dalam satu dashboard operasional, mengevaluasi arsitektur melalui indikator operasional lapangan seperti guarding ring accuracy, danger index precision, dan collision alert response time, serta melakukan analisis kebutuhan sumber daya manusia berbasis kompetensi geospasial.

Daftar Pustaka

- Adiatmaja, N. H., Septiani, W., Dewayana, T. S., & Luis, M. (2025). Spatial decision-making model for priority development of Indonesia Coast Guard stations. *SINERGI*, 29(1), 163–174. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2025.1.015>
- Agastia, I. G. B. D., & Perwita, A. A. B. (2017). Building maritime domain awareness as an essential element of the Global Maritime Fulcrum: Challenges and prospects for Indonesia's maritime security. *Jurnal Hubungan Internasional*, 6(1), 113–123. <https://doi.org/10.18196/hi.61109>
- Aprilia, W., Sutanto, R., Prakoso, L. Y., Priyanto, & Adriyanto, A. (2023). The efforts of the Maritime Security Agency in preventing transnational crime at the state frontier are viewed from the strategic position of the Riau Islands. *International Journal of Social Science*, 2(5), 2253–2260. <https://doi.org/10.53625/ijss.v2i5.4962>
- Badrudin, A., Sumantri, S. H., Gultom, R. A. G., Apriyanto, I. N. P., Yuhana, U. L., & Ratnasari, F. D. (2026). Design of Antasena: An AI-powered maritime surveillance and anomaly detection system for security decision support. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 15(1), 269–288. <https://doi.org/10.11591/ijai.v15.i1.pp269-288>
- Baylon, A. M., & Santos, E. M. R. (2013). Introducing GIS to TransNav and its extensive maritime application: An innovative tool for intelligent decision making?

- TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7(4), 557–566. <https://doi.org/10.12716/1001.07.04.11>
- Bensalloua, C. A., & Benameur, A. (2021). Towards NoSQL-based data warehouse solution integrating ECDIS for maritime navigation decision support system. *Informatica*, 45(3), 415–431. <https://doi.org/10.31449/inf.v45i3.3204>
- Bossé, É., & Valin, P. (2010). Decision support systems design for joint multinational multi-agency defence and security environment. In *Human systems integration to enhance maritime domain awareness for port/harbour security* (pp. 93–102). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-621-8-93>
- Cahyadi, P. I., Bastari, A., & Aris, A. A. (2020). Analysis of the selection of the ALKI states for handling criminal actions of violations by the multi-criteria decision-making approach: Case study ALKI II. *STTAL Postgraduate International Conference*, 4(1). <https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/2027827>
- Cahyadi, P. I., Wirjodirdjo, B., Suharyo, O. S., & Bastari, A. (2021). The implementation of multi-criteria decision making in handling criminal actions of marine violation in the ALKI II area. *Journal ASRO*, 12(1), 160–165. <https://doi.org/10.37875/asro.v12i01.393>
- Choiro, U., Lindasari, U. Q., & Al Faruq, U. (2024). Dampak penenggelaman kapal *illegal fishing* di wilayah Indonesia ditinjau dari perspektif hukum internasional. *Begawan Abioso*, 15(2), 51–59. <https://doi.org/10.37893/abioso.v15i2.1000>
- Chotimah, H. C., Iswardhana, M. R., & Pratiwi, T. S. (2019). Penerapan *military confidence-building measures* dalam menjaga ketahanan nasional Indonesia di ruang siber. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 25(3), 331–347. <https://doi.org/10.22146/jkn.50344>
- Chou, C.-C., Wang, C.-N., Hsu, H.-P., Ding, J.-F., Tseng, W.-J., & Yeh, C.-Y. (2022). Integrating AIS, GIS, and E-chart to analyze the shipping traffic and marine accidents at the Kaohsiung Port. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), Article 1543. <https://doi.org/10.3390/jmse10101543>
- Didachos, C., Mourkousis, G., & Protonotarios, M. (2026). Application of context-aware microtasks and feedback loops to enhance decision support during execution of operational procedures in the border management domain. *Open Research Europe*, 6, Article 38. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.21831.1>

- Dolonseda, N. A. (2022). The strategic role of the defense industry in answering the needs of KRI capability C4ISR to achieve maritime security in Indonesian national jurisdictions. *Jurnal Ekonomi, Bisnis & Entrepreneurship*, 16(2), 99–106. <https://doi.org/10.55208/jebe.v16i2.251>
- Dykes, J. D., & Hancock, T. E. (2002). Brokering meteorological and oceanographic information in support of military operations using GIS technology. In *OCEANS '02 MTS/IEEE* (Vol. 2, pp. 1114–1120). IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2002.1192122>
- Gómez-Romero, J., Serrano, M. A., García, J., Molina, J. M., & Rogova, G. (2015). Context-based multi-level information fusion for harbor surveillance. *Information Fusion*, 21, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2014.01.011>
- Harbaugh, S. (2003). Current and future geographic information system projects within the Eastern Gulf of Mexico, and the potential for one universal application. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 2003(1), 201–204. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2003-1-201>
- Haryono, V., Faisol, A., & Achsyah, T. D. (2025). Optimalisasi maritime domain awareness oleh Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut dalam deteksi dini ancaman maritim. *JIIIP—Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, 8(11), 12821–12828. <https://doi.org/10.54371/jiip.v8i11.9916>
- Hudaya, M., & Putra, A. T. (2018). Toward Indonesia as Global Maritime Fulcrum: Correcting doctrine and combating non-traditional maritime threats. *Jurnal Hubungan Internasional*, 10(2), 177–190. <https://doi.org/10.20473/jhi.v10i2.7304>
- Kao, S.-L., & Chang, K.-Y. (2017). Study on fuzzy GIS for navigation safety of fishing boats. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 16(2), 84–93. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1291191>
- Kao, S.-L., Chang, K.-Y., & Hsu, T.-W. (2021). A marine GIS-based alert system to prevent vessel collision with offshore platforms. *Journal of Marine Science and Technology*, 29(5), 597–608. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2462>
- Kao, S.-L., Lee, K.-T., Chang, K.-Y., & Ko, M.-D. (2007). A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service. *Journal of Navigation*, 60(1), 17–31. <https://doi.org/10.1017/S0373463307003980>

- Kendek, M., Rachma, S., Filemon, & Widarbowa, D. (2024). Analisis tindakan preventif terhadap keselamatan pelayaran di Indonesia. *Zona Laut: Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan*, 5(2), 140–145. <https://doi.org/10.62012/zl.v5i2.35828>
- Khalili-Araghi, A., Glässer, U., Shahir, H. Y., Fisher, B. D., & Jackson, P. J. (2012). Intelligent decision support for emergency responses. In *Proceedings of the 9th International ISCRAM Conference*. https://idl.iscram.org/files/khalili-araghi/2012/139_Khalili-Araghi_etal2012.pdf
- Kusmantoro, Y., Trismadi, T., & Harsono, G. (2024). Pemanfaatan teknologi geospatial intelligence untuk peningkatan keamanan dan pengelolaan maritim di Indonesia. *Journal on Education*, 7(1), 8218–8235. <https://doi.org/10.31004/joe.v7i1.7653>
- Murdjito, Sujantoko, Nugroho, S., Djatmiko, E. B., Mustain, M., Wardhana, W., Wahyudi, & Ardi, E. W. (2023). Peningkatan keselamatan kapal niaga dengan sistem pemuatan berbasis komputer. *Sewagati*, 7(3), 339–352. <https://doi.org/10.12962/j26139960.v7i3.495>
- Novianto, A., Purnomo, R., Bangun, E. I., Faisol, A., & Ekawati, P. D. (2024). Indonesian Hydrographic Data Center sebagai interoperability data spasial maritim nasional. *Jurnal Chart Datum*, 10(2), 77–90. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v10i2.349>
- Nurdewi, D. D. A. (2024). Tantangan Bakamla sebagai penjaga laut Indonesia dalam meningkatkan keamanan dan keselamatan di perairan Indonesia. *Sosial Simbiosis: Jurnal Integrasi Ilmu Sosial dan Politik*, 1(2), 161–173. <https://doi.org/10.62383/sosial.v1i2.886>
- Popovich, V. V., Pankin, A. V., Voronin, M. N., & Sokolova, L. A. (2006). Intelligent situation awareness on a GIS basis. In *MILCOM 2006—2006 IEEE Military Communications Conference* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2006.302395>
- Priadi, A. A., Ivan, R., Darsani, & Anindhyta, C. (2024). Evaluation of the implementation of Traffic Separation Scheme (TSS) in the Sunda Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1294(1), Article 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1294/1/012028>

- Priyatna, I. M. A., & Gatinaud, A. (2020). The role of vessel traffic services in traffic separation scheme. *Prosiding Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar*, 1(4), 10–21. <https://doi.org/10.48192/prc.v1i4.317>
- Putri, H. M., Pramoda, R., & Firdaus, M. (2017). Kebijakan penenggelaman kapal pencuri ikan di wilayah perairan Indonesia dalam perspektif hukum. *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, 7(2), 91–102. <https://doi.org/10.15578/jksekp.v7i2.6095>
- Rachmaji, A. S. (2023). Maritime Domain Awareness (MDA) and archives: The role of archives in sovereignty. *Khazanah Al-Hikmah: Jurnal Ilmu Perpustakaan, Informasi, dan Kearsipan*, 11(2). <https://doi.org/10.24252/kah.v11i2a9>
- Redita, W., Prakoso, L. Y., & Hipdizah. (2020). Implementasi kebijakan Vessel Traffic Services Direktorat Jenderal Perhubungan Laut di Selat Sunda dalam keselamatan pelayaran terhadap strategi pertahanan laut. *Strategi Pertahanan Laut*, 6(1), 31–44.
- Rizkiyani, H. M., Supriyadi, A. A., Dao, P. Y., & Novitasari, D. (2024). Pemanfaatan sistem informasi geografis dalam pembangunan sistem keamanan maritim Indonesia. *Majalah Ilmiah Globe*, 26(2), 81–88. <https://doi.org/10.24895/gl.2024.26.2.81-88>
- Sarjito, A. (2025). Analisis strategi pendaratan amfibi berbasis GIS pada wilayah pesisir dalam operasi tempur TNI AL. *Saintek: Jurnal Sains Teknologi dan Profesi Akademi Angkatan Laut*, 18(1), 16–30. <https://doi.org/10.59447/saintek.v18i1.169>
- Setiawibawa, R., Risahdi, M., Prakoso, L. Y., Yusnaldy, Y., & Lestari, A. (2025). Poros Maritim Dunia: Mewujudkan kedaulatan Indonesia melalui teknologi cerdas. *Jurnal Sosial dan Sains*, 5(11), 7614–7621. <https://doi.org/10.59188/jurnalsosains.v5i11.32570>
- Shalihati, S. F. (2014). Pemanfaatan penginderaan jauh dan sistem informasi geografi dalam pembangunan sektor kelautan serta pengembangan sistem pertahanan negara maritim. *Geo Edukasi*, 3(2), 115–126. <https://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/GeoEdukasi/article/view/573>
- Sholihah, T. H., Waluyo, D., Jupriyanto, & Putro, T. G. S. (2025). Peran industri pertahanan dalam meningkatkan kemandirian maritim guna mendorong visi Indonesia sebagai Poros Maritim Dunia. *AURELIA: Jurnal Penelitian dan*

<https://doi.org/10.57235/aurelia.v4i2.5115>

- Tsou, M.-C., & Hsueh, C.-K. (2010). The study of ship collision avoidance route planning by ant colony algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(5), 746–756. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.1929>
- Tsou, M.-C., Kao, S.-L., & Su, C.-M. (2010). Decision support from genetic algorithms for ship collision avoidance route planning and alerts. *Journal of Navigation*, 63(1), 167–182. <https://doi.org/10.1017/S037346330999021X>
- Wardana, V. E. S., Salim, S., & Achnaf, M. (2025). Optimalisasi pemilihan unsur operasi TNI Angkatan Laut dalam menghadapi ancaman zona abu-abu di Laut Natuna Utara menggunakan metode AHP–TOPSIS. *JlIP—Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, 8(12), 14101–14107. <https://doi.org/10.54371/jiip.v8i12.10100>
- Yakti, P. D., & Susanto, J. (2017). Poros Maritim Dunia sebagai pendekatan strategi maritim Indonesia: Antara perubahan atau kesinambungan strategi? *Global & Strategis*, 11(2), 108–125. <https://doi.org/10.20473/jgs.v11i2.5355>