

Framework Integrasi Sistem Informasi Geospasial untuk Perlindungan Infrastruktur Kabel Laut Indonesia sebagai Critical Maritime Infrastructure dalam Mendukung Maritime Domain Awareness

Irfan Bagus Naufal^{1*}, Anak Agung Banyu Perwita², Koko Komarudin³ Nefra
Firdaus⁴, Harri Dolli Hutabarat⁵, Yuniar⁶, Lukman Yudho Prakoso⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kawasan IPSC Sentul, Jl. Anyar, Sukahati,
Kec. Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810

irfan.naufal@km.idu.ac.id¹, aabanyu.perwita@gmail.com², koko.komarudin@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 : 11 Juli, 2026

Revised : 11 Juli, 2026

Accepted : 12 Juli, 2026

Kata Kunci:

Critical Maritime Infrastructure;
GeoAI;
Geographic Information System;
Maritime Domain Awareness;
Spatial Data Infrastructure;
Spatial Decision Support
System.

Abstrak

Kabel laut merupakan *Critical Maritime Infrastructure* yang menopang lebih dari 95% lalu lintas data internet global, namun perlindungannya di Indonesia masih menghadapi fragmentasi data, kelembagaan, dan tata kelola sehingga menghambat terbentuknya *Maritime Domain Awareness* yang efektif. Penelitian ini bertujuan mengembangkan GEOCAP-MDA *Framework*, yaitu kerangka konseptual yang mengintegrasikan Sistem Informasi Geospasial untuk mendukung perlindungan kabel laut Indonesia. Penelitian menggunakan pendekatan *conceptual paper* melalui *purposive narrative review* terhadap literatur ilmiah dan dokumen institusional, kemudian mensintesis sembilan pilar teoretis ke dalam satu arsitektur konseptual. Hasil penelitian menghasilkan GEOCAP-MDA *Framework* yang menghubungkan dua belas komponen dalam satu rantai kausal, mulai dari *Spatial Data Infrastructure* (SDI), integrasi data geospasial, *Spatial Intelligence*, *Spatial Analytics*, GeoAI, *Spatial Decision Support System* (SDSS), dan *Collaborative Maritime Governance* hingga mendukung perlindungan kabel laut, peningkatan MDA, dan *National Maritime Security*. Framework ini juga merumuskan enam proposisi konseptual sebagai dasar pengujian empiris pada penelitian selanjutnya. Penelitian ini berkontribusi menghadirkan model konseptual terpadu yang mengintegrasikan *GIScience*, SDSS, GEOINT, GeoAI, *Critical Infrastructure Protection*, dan *Collaborative Governance*, sekaligus menyediakan landasan strategis bagi pengembangan kebijakan dan sistem perlindungan infrastruktur maritim kritis di Indonesia.

PENDAHULUAN

Kabel laut (*submarine cable*) mengalirkan lebih dari 95% lalu lintas data internet global sehingga menjadi tulang punggung ekonomi digital sekaligus dikategorikan sebagai *Critical Infrastructure* di banyak negara (Clark, 2019; Bueger & Liebetrau, 2023).

Indonesia dengan wilayah laut lebih dari 6,4 juta km², garis pantai lebih dari 108.000 km, dan berada pada jalur strategis yang menghubungkan Asia, Australia, dan Pasifik, serta menjadi lokasi ratusan ribu kilometer jaringan kabel domestik yang menopang konektivitas nasional (Sugianto & Hermansyah, 2025). Meningkatnya insiden kerusakan kabel laut di Laut Baltik sepanjang 2024–2025 telah menggeser isu perlindungan kabel laut dari persoalan teknis menjadi isu keamanan strategis. Respons Komisi Eropa melalui *EU Action Plan on Cable Security* serta pembentukan pusat pengawasan infrastruktur bawah laut oleh NATO menunjukkan bahwa perlindungan kabel laut kini menjadi bagian dari keamanan nasional dan regional (European Commission, 2013). Penelitian terbaru menunjukkan jaringan kabel laut global terkonsentrasi pada *strategic pivot* dan *strategic channel*, termasuk perairan Indonesia, sehingga gangguan pada satu segmen berpotensi menimbulkan *cascading impact* terhadap konektivitas kawasan (Xie & Wang, 2023).

Di Indonesia, tantangan tersebut diperburuk oleh belum terintegrasinya tata kelola perlindungan kabel laut. Regulasi masih terfragmentasi antara tata ruang laut, telekomunikasi, dan keamanan maritim (Iswara & Afriansyah, 2022), sementara praktik *Maritime Domain Awareness* (MDA) melibatkan banyak instansi yang mengelola data dan kewenangan secara terpisah tanpa mekanisme integrasi geospasial yang terpadu (Afriansyah et al., 2024; Pulungan et al., 2025). Kondisi ini mengindikasikan bahwa permasalahan utama bukan semata keterbatasan data, melainkan belum adanya arsitektur geospasial yang mampu mengintegrasikan berbagai sumber data dan otoritas ke dalam satu *Common Operational Picture*. Dari hasil penelusuran literatur menunjukkan bahwa penelitian mengenai GIS, *Marine GIS*, *Maritime Surveillance*, MDA, AIS, *Remote Sensing*, *Undersea Cable Protection*, *Spatial Decision Support System* (SDSS), dan *Critical Infrastructure Protection* telah berkembang pesat, namun masih bersifat parsial. Penelitian GIS umumnya berfokus pada pemetaan dan tata ruang laut; penelitian AIS dan *remote sensing* menitikberatkan pada deteksi anomali kapal; kajian MDA lebih menyoroti persoalan kelembagaan; sedangkan penelitian SDSS dan *Critical Maritime Infrastructure Protection* banyak diterapkan pada kebencanaan, transportasi, dan energi. Sementara itu, belum ditemukan kerangka konseptual yang secara terpadu mengintegrasikan kapabilitas teknis (GIS, GEOINT, dan GeoAI), analitis (SDSS), serta tata kelola kolaboratif untuk perlindungan kabel laut Indonesia sebagai *Critical Maritime Infrastructure*. Adapun penelitian terdahulu dirangkum pada Tabel 1, sebagaimana berikut:

Tabel 1. Penelitian terhadap literatur terdahulu

Peneliti	Fokus	Kelemahan	Kontribusi Penelitian Ini
(Rong et al., 2024)	<i>Framework</i> deteksi dan klasifikasi perilaku <i>abnormal</i> kapal berbasis data AIS (<i>Reliability Engineering & System Safety</i>)	Kontribusi metodologis kuat pada klasifikasi perilaku; secara desain tidak dikaitkan dengan kerentanan aset infrastruktur bawah laut tertentu	Klasifikasi ancaman diusulkan sebagai input konseptual bagi rantai <i>Threat Classification–Risk Prioritization</i> terhadap segmen kabel
(Liang et al., 2024)	Deteksi anomali maritim tanpa label (<i>unsupervised</i>) untuk situational awareness berbasis AIS (<i>Knowledge-Based Systems</i>)	Model generik lintas domain maritim; belum menysasar konteks spasial infrastruktur kritis	Diposisikan sebagai salah satu arah pengembangan GeoAI yang berpotensi ditautkan pada zona penyangga kabel laut

Peneliti	Fokus	Kelemahan	Kontribusi Penelitian Ini
(Wei et al., 2020)	HRSID: dataset citra SAR resolusi tinggi untuk deteksi dan segmentasi kapal (IEEE Access)	Kontribusi dataset dan model deteksi objek yang menjadi rujukan luas; berada di luar cakupan pengambilan keputusan	Diposisikan sebagai salah satu sumber Data Satelit/GEOINT dalam kategori INPUT yang diintegrasikan ke SDI
(Bernabe et al., 2024)	Deteksi <i>intentional</i> AIS shutdown dengan <i>self-supervised deep learning</i> (IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems)	Akurasi deteksi teknis tinggi; implikasi operasional bagi otoritas maritim berada di luar cakupan studi	Diusulkan sebagai arah pengembangan GeoAI untuk deteksi <i>dark vessel</i> yang memicu <i>Early Warning</i>
(Stach et al., 2023)	Tinjauan sistematis metode deteksi anomali maritim untuk <i>vessel traffic services</i> (Journal of Marine Science and Engineering)	Survei metode yang komprehensif; secara desain tidak mengusulkan arsitektur integrasi lintas-instansi	Menjadi basis pemetaan kesenjangan klaster AIS/Remote Sensing pada Research Gap
(Miller et al., 2018)	Identifikasi pola transshipment global menggunakan citra satelit dan AIS (Frontiers in Marine Science)	Berorientasi kuat pada isu perikanan ilegal; bukan pada perlindungan infrastruktur bawah laut	Pola deteksi aktivitas gelap diadaptasi sebagai salah satu tipologi Data Ancaman terhadap kabel laut
(Xie & Wang, 2023)	Pola spasial jaringan kabel laut global dan identifikasi <i>strategic pivot/strategic channel</i> (Journal of Geographical Sciences)	Analisis deskriptif-spasial berskala global yang kuat secara geografis; tidak menyentuh arsitektur SDSS maupun tata kelola nasional	Argumen <i>strategic chokepoint</i> digunakan untuk memperkuat urgensi kasus Indonesia pada Latar Belakang
(Pulungan et al., 2025)	Sinergi kelembagaan Bakamla, KPLP, dan Polairud dalam MDA (International Journal of Education, Vocational and Social Science)	Analisis dokumen kelembagaan yang kredibel; secara desain tidak menyertakan elemen teknis integrasi data geospasial	Diagnosis fragmentasi kelembagaan menjadi salah satu justifikasi kebutuhan <i>Spatial Data Infrastructure</i> bersama
(Afriansyah et al., 2024)	Tantangan dan arah kebijakan Bakamla sebagai <i>Indonesian Coast Guard</i> (Politics and Governance)	Analisis kelembagaan penegakan hukum laut yang mendalam; bukan arsitektur data	Memperkuat argumen bahwa penguatan Bakamla memerlukan fondasi SDI, melengkapi penguatan aset fisik
(Iswara & Afriansyah, 2022)	Pengaturan kabel dan pipa bawah laut dalam <i>marine spatial planning Indonesia</i> (Jambe Law Journal)	Analisis regulasi-hukum yang komprehensif; tidak menyentuh arsitektur teknis integrasi data atau keputusan spasial	Data Kebijakan (RZWP3K, ALKI) dari kajian ini diposisikan sebagai salah satu kategori INPUT <i>framework</i>
(Ali et al., 2023)	Faktor penghambat <i>Spatial Data Infrastructure</i> nasional di negara berkembang	Studi kasus non-maritim (pemerintahan umum); tidak menyentuh domain keamanan maritim	Faktor penghambat SDI diadaptasi menjadi dasar argumen kebutuhan tata kelola data pada <i>Collaborative Maritime Governance</i>
(Alcaraz & Zeadally, 2015)	Kebutuhan dan tantangan perlindungan infrastruktur kritis abad ke-21 (International Journal of Critical Infrastructure Protection)	Kerangka generik lintas sektor yang berpengaruh luas; tidak spesifik pada domain maritim/kabel laut	Prinsip <i>interdependency</i> diadaptasi ke domain <i>Critical Maritime Infrastructure Protection</i>

Peneliti	Fokus	Kelemahan	Kontribusi Penelitian Ini
(Bueger & Liebetrau, 2023)	Kompleksitas politis penetapan dan perlindungan infrastruktur maritim kritis (<i>Marine Policy</i>)	Analisis kebijakan yang tajam dan berpengaruh; tidak menawarkan arsitektur teknis SIG	Argumen bahwa penetapan CMIP adalah pilihan politis diadaptasi untuk memperkuat dimensi Collaborative Governance
(Fuller et al., 2020)	Digital twin: teknologi pemungkin, tantangan, dan arah riset (IEEE <i>Access</i>)	Kerangka <i>digital twin</i> generik untuk manufaktur/aset fisik; belum diterapkan pada infrastruktur bawah laut kelautan	Prinsip <i>digital twin</i> diadaptasi sebagai arah pengembangan konseptual, bukan komponen teruji, pada <i>framework</i> ini

(Sumber: Tabel diolah oleh Penulis, 2026)

Berdasarkan Tabel 1, penelitian ini menawarkan GEOCAP-MDA *Framework*, yaitu kerangka konseptual yang mengintegrasikan sembilan pilar utama yakni GIScience, Spatial Data Infrastructure, Spatial Decision Support System, Geospatial Intelligence, GeoAI, Digital Twin, Maritime Domain Awareness, Critical Maritime Infrastructure Protection, dan Collaborative Governance ke dalam satu kerangka arsitektur yang menghubungkan integrasi data, analisis spasial, pengambilan keputusan, dan tata kelola kolaboratif. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi lintas disiplin, serta penempatan kabel laut sebagai objek utama Critical Maritime Infrastructure. Berdasarkan penelusuran literatur yang dilakukan, belum dirumuskan dalam satu *framework* konseptual untuk konteks Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk: mensintesis sembilan pilar teori ke dalam satu kerangka konseptual terpadu; mengembangkan arsitektur GEOCAP-MDA *Framework* yang menjelaskan hubungan kausal antar komponen; menjelaskan hubungan antara fragmentasi kelembagaan MDA dan ketiadaan Spatial Data Infrastructure; serta menghasilkan *framework* konseptual yang menjadi dasar penelitian empiris dan implementasi kebijakan pada masa mendatang.

METODE

Penelitian ini merupakan *conceptual paper* yang berfokus pada pengembangan kerangka teoretis melalui sintesis dan integrasi literatur, bukan pengujian hipotesis secara empiris (Jaakkola, 2020; Macinnis, 2011). Mengacu pada taksonomi Macinnis (2011), kontribusi penelitian berada pada kategori *integration and synthesis*, dengan menghubungkan konstruk yang sebelumnya berkembang secara terpisah dalam klaster GIScience, Spatial Data Infrastructure (SDI), Spatial Decision Support System (SDSS), Geospatial Intelligence (GEOINT), Maritime Domain Awareness (MDA), Critical Maritime Infrastructure Protection (CMIP), dan Collaborative Governance ke dalam satu model konseptual yang koheren. Pengembangan *framework* diawali dengan pemetaan literatur pada sembilan klaster teoretis melalui basis data Scopus serta sumber institusional resmi, meliputi IMO, IHO, ICPC, ITU, UN-GGIM, OGC, NATO, dan Komisi Eropa. Literatur dipilih secara *purposive narrative review* dengan mengutamakan publikasi periode 2015–2026, khususnya 2022–2026, berdasarkan relevansi terhadap sembilan pilar teoretis dan otoritas sumber. Pendekatan ini bersifat naratif, sehingga tidak mengikuti prosedur *Systematic Literature Review* (SLR).

Framework dikembangkan melalui empat tahapan, yaitu: pemetaan literatur; identifikasi konstruk utama dan hubungan kausal yang telah mapan pada setiap klaster; sintesis lintas disiplin untuk membangun keterkaitan logis antarkonstruksi; dan perumusan GEOCAP-MDA *Framework* beserta proposisi konseptual yang merepresentasikan hasil sintesis. Arsitektur *framework* disusun berdasarkan prinsip rantai kausal, di mana setiap komponen diposisikan sebagai prasyarat fungsional bagi komponen berikutnya sehingga membentuk alur transformasi dari integrasi data hingga pengambilan keputusan dan peningkatan *Maritime Domain Awareness*. Sebagai *conceptual paper*, validitas penelitian tidak diukur melalui signifikansi statistik, melainkan konsistensi logis, koherensi teoretis, kekuatan sintesis lintas disiplin, dan ketajaman argumentasi ilmiah (Macinnis, 2011).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Literatur

Tersebar data spasial kabel laut, batimetri, dan pengawasan maritim pada format, skema, dan otoritas berbeda menegaskan kebutuhan fondasi epistemologis yang jelas mengenai konseptualisasi informasi geografis. *GIScience* memisahkan disiplin yang mempelajari prinsip mendasar informasi geografis dari sekadar perangkat teknis, mencakup lima komponen inti yaitu data, perangkat keras, perangkat lunak, prosedur analitis, dan manusia, sementara itu validitas analisis spasial lanjutan bergantung pada ketepatan model data sejak representasi awal, karena *error propagation* yang diabaikan pada tahap ini terakumulasi menjadi bias pada analisis berikutnya (Goodchild, 1992; Heywood et al., 2011; Manson et al., 1999). Sintesis ini menegaskan bahwa validitas keputusan sistem geospasial bergantung kausal pada kualitas epistemologis representasi data paling awal: kendala *Marine GIS* Indonesia dalam menghasilkan keputusan *actionable* berpotensi bersumber bukan dari kelangkaan data, melainkan lemahnya fondasi epistemologis pada tahap representasi. Dengan demikian, desain *Spatial Data Infrastructure* sebaiknya dimulai dari penyelarasan model data pada level epistemologis. Fragmentasi data keamanan maritim Indonesia seperti batimetri oleh Pushidrosal, cuaca oleh BMKG, AIS oleh Bakamla, zonasi oleh PSDKP-KKP, tanpa mekanisme pertukaran standar, merupakan manifestasi absennya *Spatial Data Infrastructure* (SDI) yang matang. SDI dirumuskan sebagai kerangka kebijakan, standar, jejaring akses, dan sumber daya manusia yang memungkinkan akses data geospasial lintas yurisdiksi, dengan keberhasilannya bergantung pada koordinasi lintas-lembaga, bukan semata investasi teknologi, serta pada kriteria efisiensi, efektivitas, dan keberlanjutan kelembagaan (Masser, 2005; Rajabifard et al., 2006). Standar metadata (ISO 19115) menjadi prasyarat teknis pertukaran data: tanpa standar seragam, data lintas instansi tidak dapat dipertukarkan meski kebijakan berbagi data telah disepakati secara politis (Hjelmager et al., 2008), dan relevansi standar geospasial terbuka bagi perlindungan kabel laut lintas yurisdiksi ini eksplisit berlaku pada konteks kepulauan seperti Indonesia (Information, 2024). Sintesis ini menghasilkan proposisi tulang punggung *framework*: tanpa SDI yang mapan pada dimensi kebijakan, standar, dan jejaring akses, data dari tujuh kategori input tidak dapat diintegrasikan secara teknis maupun kelembagaan, sehingga sejalan dengan

temuan bahwa resistensi organisasi, bukan keterbatasan teknologi, menjadi hambatan utama SDI di negara berkembang (Ali et al., 2023).

Kompleksitas keputusan perlindungan kabel laut yang melibatkan kriteria saling bertentangan dari ekonomi (kelancaran pelayaran), keamanan (deteksi ancaman), dan lingkungan (konservasi), tidak dapat diselesaikan hanya dengan analisis spasial deskriptif. *GIS-based Multicriteria Decision Analysis* (GIS-MCDA) mengintegrasikan analisis spasial dengan pengambilan keputusan multikriteria, terklasifikasi ke pendekatan *compensatory* dan *non-compensatory*, dengan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) lazim dipasangkan untuk pembobotan kriteria berjenjang; SDSS berbeda dari GIS konvensional karena secara eksplisit mendukung pemecahan masalah semi-terstruktur berkomponen spasial dominan (Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2015; Ramanathan Sugumaran, 2011). *Framework* ini mengusulkan WLC atau AHP sebagai titik masuk paling operasional mengingat kesederhanaan interpretasinya bagi pengambil kebijakan nonteknis. Dengan demikian, SDSS berperan sebagai simpul transformasi sentral yang menerima keluaran *Spatial Analytics* dan *GeoAI*, mengubahnya menjadi rekomendasi keputusan yang metodologis. Keterbatasan deteksi berbasis AIS yang dapat dinonaktifkan secara sukarela oleh kapal ilegal menegaskan perlunya sumber intelijen alternatif yang sinoptik dan tidak bergantung pada kooperasi objek yang diawasi. *Geospatial Intelligence* (GEOINT) didefinisikan sebagai eksploitasi dan analisis citra serta informasi geospasial untuk mendeskripsikan, menilai, dan menggambarkan aktivitas fisik di permukaan bumi, proses intelijen menyeluruh yang menggabungkan pengumpulan, pengolahan, analisis, dan diseminasi citra satelit (*Sentinel, Landsat, SAR, Copernicus*), batimetri, dan oseanografi, bukan sekadar *remote sensing*. Ketika kapal mematikan *transponder*, deteksi berbasis SAR dan citra optik tetap berpotensi mengidentifikasi keberadaannya, sebagaimana ditunjukkan penelitian deteksi kapal berbasis SAR (Wei et al., 2020) dan deteksi AIS *shutdown* melalui *self-supervised learning* (Bernabe et al., 2024). GEOINT dengan demikian menjadi mekanisme kausal yang menjembatani kesenjangan antara ketersediaan data permukaan dan kebutuhan cakupan sinoptik, menautkan langsung ke tahap *GeoAI* dan *Spatial Analytics* sebagai sumber data pengayaan yang memperluas *Threat Detection* melampaui keterbatasan struktural AIS konvensional.

Perlu ditegaskan sejak awal bahwa *GeoAI, machine learning, deep learning*, dan *predictive analytics* dalam *framework* ini diposisikan sebagai arah pengembangan konseptual, bukan komponen yang telah diuji secara empiris dalam konteks perlindungan kabel laut Indonesia untuk menghindari kesan *buzzword stacking* tanpa kedalaman metodologis setara pilar teori lain. Ledakan volume data geospasial dari AIS, SAR, radar pantai, dan drone yang beroperasi kontinu berpotensi melampaui kapasitas analisis manual maupun spasial-statistik konvensional. Bukti empiris pada domain maritim secara umum (bukan spesifik kabel laut) menunjukkan arah menjanjikan: model *unsupervised learning* mendeteksi anomali situasional dari data AIS tanpa label historis, *self-supervised deep learning* efektif mendeteksi kapal yang sengaja mematikan AIS, dan deteksi objek berbasis *deep learning* pada citra SAR resolusi tinggi memungkinkan segmentasi kapal presisi tinggi (Bernabe et al., 2024; Liang et al., 2024; Wei et al., 2020). *GeoAI* berpotensi menempati posisi kausal penting sebagai mesin transformasi yang

mengubah volume data melampaui kapasitas manusia menjadi pola ancaman yang dapat diproses SDSS; tanpanya, *volume* data GEOINT dan *Data Surveillance* berisiko menjadi *information overload* yang menurunkan *Situation Awareness*.

Keterbatasan pemantauan kondisi fisik kabel laut secara *real-time* yang selama ini bergantung pada inspeksi periodik atau pelaporan pascainsiden melatari eksplorasi *Digital Twin* sebagai representasi digital dinamis aset fisik yang diperbarui berdasarkan data sensor, mengintegrasikan model simulasi berfidelitas tinggi dengan data sensor *real-time* untuk pemantauan, prediksi, dan optimasi kondisi aset sepanjang siklus hidupnya, termasuk deteksi dini anomali struktural pada infrastruktur linear (pipa, kabel) yang sulit dideteksi inspeksi visual semata (Fuller et al., 2020). Sebagaimana GeoAI, *Digital Twin Undersea Cable* dalam framework ini diposisikan sebagai arah pengembangan konseptual jangka menengah-panjang, bukan komponen siap-implementasi. Konvergensi lanjutan antara SIG, GeoAI, dan *distributed acoustic sensing* yang memanfaatkan serat optik kabel sebagai sensor getaran dan tekanan yang berpotensi memungkinkan deteksi langsung aktivitas mencurigakan di dekat kabel dari sinyal yang merambat pada kabel, melengkapi bukan menggantikan deteksi berbasis sensor eksternal, sehingga ditempatkan pada agenda penelitian lanjutan. Pemahaman MDA di Indonesia direduksi menjadi kapabilitas *surveillance* semata, padahal secara doktrinal MDA merupakan konstruksi berlapis yang lebih luas: pemahaman efektif terhadap segala hal yang berkaitan dengan *domain maritim* yang berdampak pada keamanan, keselamatan, ekonomi, atau lingkungan, bersifat relasional dan multidimensional sebagai *instrumen maritime security* (Boraz, 2009; Bueger, 2015), dengan *Common Operational Picture* sebagai prasyarat operasi gabungan (doktrin NATO) dan infrastruktur bawah laut sebagai domain prioritas MDA pascainsiden Laut Baltik (*EU Maritime Security Strategy*). MDA diargumentasikan sebagai variabel outcome fungsional dari rantai integrasi geospasial bukan titik awal yang dicapai hanya dengan menambah sensor. *Situation Awareness* yang *valid* hanya terbentuk apabila data dari SDI, *Spatial Intelligence*, *Spatial Analytics*, dan GeoAI telah terintegrasi koheren; kendala MDA Indonesia dalam praktik diargumentasikan bukan disebabkan kekurangan data mentah, melainkan absennya rantai transformasi data terhadap kesadaran yang koheren (Afriansyah et al., 2024; Pulungan et al., 2025) persis titik yang diisi GEOCAP-MDA Framework.

Meningkatnya insiden sabotase dan kerusakan kabel laut lintas yurisdiksi menunjukkan pendekatan perlindungan yang murni preventif tidak memadai; diperlukan pula kapasitas menyerap gangguan dan pulih cepat. Tantangan mendasar perlindungan infrastruktur kritis berupa saling ketergantungan antarsistem dan diperkuat kerangka resilience yang membedakan kapasitas *absorptive*, *adaptive*, dan *restorative*, pergeseran penting dari paradigma keamanan yang hanya berfokus pencegahan (Alcaraz & Zeadally, 2015; Linkov, 2019). Penetapan infrastruktur sebagai "kritis" adalah pilihan politis yang memerlukan integrasi lintas kebijakan, dengan urgensi pemetaan risiko dan investasi kapasitas perbaikan telah ditegaskan pada tataran kelembagaan (Bueger & Liebetrau, 2023): ICPC merekomendasikan pendekatan berbasis risiko spasial untuk rute kabel, Komisi Eropa menerbitkan Rekomendasi (EU) 2024/779, dan NATO membentuk pusat koordinasi keamanan infrastruktur bawah laut pasca insiden 2023. *Critical Maritime*

Infrastructure Protection dalam framework ini diargumentasikan mencakup ketiga kapasitas resilience, bergantung pada ketersediaan data spasial real-time mengenai kondisi kabel dan lingkungan sekitarnya, sehingga penetapan *Critical Zone Identification* sebaiknya mempertimbangkan tidak hanya probabilitas ancaman, tetapi juga kapasitas pemulihan sebagai dimensi kedua indeks risiko. Kendala koordinasi antarinstansi maritim Indonesia antara Bakamla RI, KPLP, dan Polairud dengan mandat tumpang tindih tanpa mekanisme kerja sama mengikat (Pulungan et al., 2025) menunjukkan persoalan integrasi data geospasial pada akhirnya adalah persoalan tata kelola kolaboratif, bukan semata teknologi. Model kontingensi *collaborative governance* menghubungkan kondisi awal, desain kelembagaan, dan kepemimpinan fasilitatif dengan proses kolaboratif, menekankan kepercayaan sebagai prasyarat berbagi data sukarela, diperluas melalui *Integrative Framework for Collaborative Governance* yang mengidentifikasi *principled engagement, shared motivation, dan capacity for joint action* sebagai penentu keberhasilan (Ansell & Gash, 2008; Emerson et al., 2012). Keberhasilan GEOCAP-MDA *Framework* diargumentasikan memerlukan proses *collaborative governance* yang paralel membangun ketiga dinamika tersebut, dengan Bakamla RI sebagai koordinator nasional keamanan laut, diposisikan sebagai convener yang memfasilitasi, bukan mendominasi, kolaborasi data lintas dua belas instansi.

Pengembangan GEOCAP-MDA *Framework*

GEOCAP-MDA *Framework* dikembangkan sebagai arsitektur konseptual yang mengintegrasikan Sistem Informasi Geospasial ke dalam proses perlindungan kabel laut Indonesia sebagai *Critical Maritime Infrastructure*. Sebagaimana ditunjukkan pada (Gambar 1), *framework* ini terdiri atas dua belas komponen yang membentuk satu rantai kausal, dimulai dari fondasi data (*GIScience dan Spatial Data Infrastructure*), dilanjutkan dengan integrasi dan analisis geospasial (*Spatial Intelligence, Spatial Analytics, GEOINT, dan GeoAI*), kemudian ditransformasikan menjadi rekomendasi melalui *Spatial Decision Support System (SDSS)* dan *Collaborative Maritime Governance*, hingga menghasilkan keputusan yang mendukung *Critical Maritime Infrastructure Protection (CMIP)*, peningkatan *Maritime Domain Awareness (MDA)*, dan menjamin *Maritime Security*, serta diimplementasikan pada ketahanan *National Maritime Security*.



Gambar 1. GEOCAP-MDA Framework: Konseptual Integrasi Geospasial untuk Perlindungan Kabel Laut dan Peningkatan *Maritime Domain Awareness* Indonesia (Sumber: Hasil analisis Penulis, 2026)

Pada Gambar 1, GEOCAP-MDA Framework memperlihatkan bahwa setiap komponen memiliki fungsi yang berbeda namun saling bergantung. *GIScience* dan *Spatial Data Infrastructure* (SDI) ditempatkan sebagai fondasi integrasi data karena interoperabilitas tidak dapat dicapai tanpa standar, metadata, dan tata kelola yang seragam. Selanjutnya, *Spatial Intelligence*, *Spatial Analytics*, GEOINT dan GeoAI diposisikan sebagai tahapan analitis yang berurutan, di mana pola awal diidentifikasi, divalidasi secara spasial, kemudian diperkaya melalui kecerdasan buatan untuk menghasilkan prediksi risiko yang lebih akurat. Hasil analisis tersebut diproses oleh SDSS menjadi alternatif keputusan yang selanjutnya dikonsolidasikan melalui *Collaborative Maritime Governance*, sehingga keputusan yang dihasilkan tidak hanya didasarkan pada analisis teknis, tetapi juga pada koordinasi lintas instansi agar terwujud *Maritime Security* untuk memperkuat *National Maritime Security*.

Framework ini diolah berdasarkan prinsip bahwa kualitas keputusan bergantung pada kualitas tahapan sebelumnya. Dengan demikian, kelemahan pada representasi data, integrasi informasi, maupun proses analitis akan memengaruhi efektivitas perlindungan kabel laut dan kualitas *Maritime Domain Awareness*. Untuk menjaga adaptabilitas sistem, framework juga dilengkapi mekanisme *feedback loop* yang memungkinkan pembaruan data, penyempurnaan model analitis, evaluasi tata kelola, dan perbaikan standar secara berkelanjutan. Oleh karena itu, GEOCAP-MDA Framework tidak hanya menggambarkan alur kerja perlindungan kabel laut, tetapi juga menawarkan model konseptual yang

adaptif, terintegrasi, dan dapat dijadikan dasar bagi pengujian empiris maupun pengembangan sistem pendukung keputusan pada penelitian selanjutnya.

Komponen Framework

Input

Tahap Input merupakan fondasi utama dalam GEOCAP-MDA *Framework* karena menentukan kualitas seluruh proses analisis dan pengambilan keputusan. *Framework* ini mengelompokkan data ke dalam tujuh kategori utama yang saling melengkapi untuk merepresentasikan kondisi fisik, operasional, lingkungan, ancaman, dan tata kelola perlindungan kabel laut. Pengelompokan ini tidak hanya bertujuan menghimpun berbagai sumber data, tetapi juga memastikan bahwa setiap kategori memberikan fungsi yang berbeda dalam mendukung identifikasi risiko, analisis spasial, dan pengambilan keputusan. Rincian kategori data, sumber, dan fungsinya disajikan pada Tabel 2, sebagaimana berikut:

Tabel 2. Kategori Data Input dan Fungsinya

Kategori Data	Contoh Sumber Data	Fungsi dalam Framework
Data Infrastruktur	Jalur kabel laut nasional; jalur kabel internasional; landing station; data operator kabel	Menetapkan objek yang dilindungi (<i>asset baseline</i>)
Data Geospasial	Batimetri; peta laut (<i>nautical chart</i>); GIS pesisir; topografi pesisir; alur pelayaran	Menetapkan konteks fisik dan spasial aset
Data <i>Surveillance</i>	AIS; LRIT; radar pantai; VMS; drone; CCTV pelabuhan	Menyediakan data pergerakan entitas permukaan secara <i>near-real-time</i>
Data Satelit / GEOINT	Sentinel; Landsat; SAR; Copernicus; PlanetScope (opsional)	Menyediakan cakupan sinoptik dan deteksi <i>dark vessel</i>
Data Lingkungan	BMKG; gelombang; arus; pasang surut; cuaca; gempa; tsunami	Menilai risiko kerusakan akibat faktor alam
Data Ancaman	<i>Anchor dragging</i> ; <i>illegal fishing</i> ; <i>illegal anchoring</i> ; <i>dredging</i> ; sabotase; kapal mati AIS; <i>dark vessel</i> ; aktivitas bawah laut	Menjadi basis klasifikasi dan prioritasasi risiko
Data Kebijakan	RZWP3K; ALKI; kawasan konservasi; kawasan strategis nasional	Menyelaraskan perlindungan kabel dengan tata ruang laut yang sah

(Sumber: Hasil Analisa Penulis, 2026)

Sebagaimana ditunjukkan pada (Tabel 2), ketujuh kategori data membentuk satu ekosistem informasi yang saling melengkapi. Data Infrastruktur menetapkan objek yang dilindungi, sedangkan Data Geospasial menyediakan konteks spasial sebagai dasar analisis. Data *Surveillance* dan Data Satelit/GEOINT berfungsi menghasilkan informasi situasional secara *near-real-time* untuk mendeteksi aktivitas maupun potensi ancaman di sekitar jalur kabel laut. Selanjutnya, Data Lingkungan dan Data Ancaman digunakan untuk mengevaluasi tingkat risiko berdasarkan faktor alam maupun aktivitas manusia, sementara Data Kebijakan memastikan bahwa seluruh proses analisis dan pengambilan keputusan tetap selaras dengan kerangka regulasi dan tata ruang laut nasional.

Integrasi ketujuh kategori data tersebut menjadi prasyarat bagi pembentukan *Spatial Data Infrastructure* (SDI) yang andal. Tanpa kelengkapan dan interoperabilitas data pada tahap input, proses integrasi geospasial, analisis spasial, hingga penyusunan rekomendasi melalui *Spatial Decision Support System* (SDSS) tidak akan menghasilkan informasi yang akurat maupun dapat dipertanggungjawabkan. Oleh karena itu, tahap *Input* tidak hanya

berfungsi sebagai sumber data, tetapi juga menjadi fondasi epistemologis yang menentukan kualitas keseluruhan GEOCAP-MDA *Framework*.

Spatial Data Infrastructure

Setelah data dari tujuh kategori Input dikumpulkan, langkah berikutnya adalah memastikan seluruh data tersebut dapat dipertukarkan dan digunakan secara konsisten oleh berbagai instansi. Fungsi ini dijalankan oleh *Spatial Data Infrastructure* (SDI) sebagai fondasi integrasi data geospasial dalam GEOCAP-MDA *Framework*. Sebagaimana ditunjukkan pada (Gambar 1), SDI menghubungkan tahap Input dengan *Geospatial Data Integration* melalui tiga komponen utama, yaitu kebijakan berbagi data lintas instansi, standar teknis seperti ISO 19115 untuk metadata dan *Open Geospatial Consortium* (OGC) untuk interoperabilitas, serta infrastruktur berbasis WebGIS atau *Cloud GIS* yang memungkinkan akses data secara bersama.

Keberadaan SDI memastikan bahwa data dari berbagai sumber tidak lagi tersimpan dalam sistem yang terpisah, tetapi dapat diintegrasikan ke dalam satu *geodatabase* yang memiliki format, standar, dan kualitas yang seragam. Tanpa fondasi ini, proses *Geospatial Data Integration* tidak dapat berjalan secara optimal karena perbedaan format data, keterbatasan akses, maupun hambatan kelembagaan akan mengurangi kualitas analisis pada tahap berikutnya. Dengan demikian, SDI berperan sebagai penghubung yang mentransformasikan kumpulan data menjadi sumber informasi geospasial yang siap dianalisis dalam keseluruhan GEOCAP-MDA *Framework*.

Geospatial Data Integration

Geospatial Data Integration, yaitu proses menggabungkan berbagai sumber data ke dalam satu *geodatabase* yang konsisten dan siap dianalisis. Pada tahap ini, data infrastruktur, geospasial, pengawasan, satelit, lingkungan, ancaman, dan kebijakan diintegrasikan melalui proses *Extract-Transform-Load* (ETL), dilengkapi dengan penyusunan metadata sesuai ISO 19115 serta penyelarasan sistem referensi koordinat agar seluruh data memiliki format, kualitas, dan acuan spasial yang seragam.

Tahap ini menjembatani antara pengelolaan data dan proses analisis. Data yang telah terintegrasi memungkinkan informasi dari berbagai sumber digunakan secara bersamaan untuk mengidentifikasi hubungan spasial, pola aktivitas, maupun potensi ancaman terhadap kabel laut. Sebaliknya, kegagalan pada proses integrasi akan menghasilkan ketidakkonsistenan data yang dapat terakumulasi menjadi kesalahan pada seluruh tahapan analisis berikutnya (*error propagation*) (Heywood et al., 2011). Oleh karena itu, *Geospatial Data Integration* menjadi prasyarat utama sebelum data diproses melalui *Spatial Intelligence*, *Spatial Analytics*, dan GeoAI dalam GEOCAP-MDA *Framework*.

Spatial Intelligence

Spatial Intelligence, yaitu proses identifikasi awal untuk mengenali pola, anomali, atau indikasi potensi ancaman terhadap kabel laut. Pada tahap ini, sistem belum melakukan pengujian statistik, tetapi menyaring informasi yang paling relevan secara operasional, misalnya mengidentifikasi klaster lintasan kapal yang berulang di sekitar jalur kabel atau pola aktivitas yang menyimpang dari kondisi normal.

Hasil penyaringan tersebut menjadi dasar bagi *Spatial Analytics* untuk melakukan analisis yang lebih mendalam. Jika *Spatial Intelligence* menjawab pertanyaan "pola apa

yang muncul?", maka *Spatial Analytics* menguji "apakah pola tersebut benar-benar signifikan dan dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan?". Pemisahan kedua tahapan ini memastikan hanya pola yang relevan diteruskan ke proses analisis lanjutan, sehingga meningkatkan efisiensi komputasi sekaligus memperkuat akurasi model GeoAI pada tahap berikutnya.

Spatial Analytics

Tahap *Spatial Analytics*, yaitu proses validasi dan kuantifikasi pola tersebut menggunakan berbagai metode analisis spasial. Tujuannya bukan hanya menampilkan lokasi yang berpotensi berisiko, tetapi memastikan bahwa pola yang teridentifikasi memiliki dasar ilmiah dan dapat dipertanggungjawabkan sebagai dasar pengambilan keputusan. Sebagaimana ditunjukkan pada (Gambar 1), tahap ini mengintegrasikan berbagai teknik analisis yang saling melengkapi. *Spatial Overlay*, *Buffer Analysis*, dan *Network Analysis* digunakan untuk memahami hubungan spasial antara jalur kabel, aktivitas manusia, dan karakteristik lingkungan. Selanjutnya, *Kernel Density Estimation*, *Hotspot Analysis* (Getis-Ord G_i^*), dan *Moran's I* mengevaluasi distribusi serta signifikansi statistik pola ancaman, sehingga dapat dibedakan antara konsentrasi aktivitas yang benar-benar berisiko dan pola yang muncul secara acak. Hasil analisis tersebut kemudian dipadukan melalui *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) dan *Spatial Risk Analysis* untuk menghasilkan *Maritime Risk Index* serta mengidentifikasi *Critical Protection Zones* yang menjadi prioritas perlindungan.

Dengan demikian, *Spatial Analytics* tidak hanya menjawab di mana ancaman berada, tetapi juga seberapa besar tingkat risikonya dan seberapa penting ancaman tersebut untuk ditindaklanjuti. Informasi yang telah tervalidasi inilah yang selanjutnya menjadi masukan bagi GeoAI untuk meningkatkan kemampuan prediksi ancaman serta mendukung *Spatial Decision Support System* (SDSS) dalam menghasilkan rekomendasi keputusan yang lebih akurat dan berbasis bukti.

GeoAI

Pada tahap GeoAI, yaitu pemanfaatan kecerdasan buatan untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam mendeteksi, mengklasifikasikan, dan memprediksi ancaman secara otomatis. Berbeda dengan *Spatial Analytics* yang berfokus pada analisis pola berdasarkan data *historis* dan statistik, GeoAI memanfaatkan *machine learning* dan *deep learning* untuk mengenali pola yang lebih kompleks, mengidentifikasi anomali, serta memprediksi potensi ancaman sebelum terjadi. Dengan demikian, GeoAI tidak menggantikan analisis spasial, tetapi memperluas kemampuannya melalui proses pembelajaran dari data yang terus diperbarui.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, komponen ini secara konseptual mengintegrasikan berbagai pendekatan, seperti *unsupervised anomaly detection*, *self-supervised learning* untuk mendeteksi kapal yang mematikan AIS, serta analisis citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR) guna mengidentifikasi aktivitas yang tidak terpantau oleh sistem pengawasan konvensional (Bernabe et al., 2024; Liang et al., 2024; Wei et al., 2020). Pada tahap pengembangan selanjutnya, GeoAI juga dapat diperkuat melalui

konsep *Digital Twin Undersea Cable*, yang memanfaatkan data sensor secara *real-time* untuk memantau kondisi kabel laut dan prediksi gangguan secara berkelanjutan.

Keberadaan GeoAI menjadi penting karena volume dan kompleksitas data yang dihasilkan pada tahap sebelumnya semakin sulit diproses secara manual. Melalui proses otomatisasi dan prediksi, GeoAI menghasilkan *early warning* yang lebih cepat dan akurat sehingga menjadi masukan utama bagi *Spatial Decision Support System* (SDSS) dalam menyusun rekomendasi keputusan yang responsif dan berbasis bukti.

Spatial Decision Support System (SDSS)

Tahap ini berfungsi mengubah hasil analisis menjadi alternatif keputusan yang dapat digunakan oleh pengambil kebijakan dalam melindungi kabel laut. Dengan demikian, SDSS menjadi penghubung antara proses analisis geospasial dan tindakan operasional sehingga keputusan yang dihasilkan tidak hanya didasarkan pada intuisi, tetapi pada bukti spasial yang telah tervalidasi.

Sebagaimana ditunjukkan pada (Gambar 1), SDSS mengintegrasikan hasil analisis melalui tahapan yang dimulai dari deteksi dan klasifikasi ancaman, dilanjutkan dengan prioritasasi risiko, penyusunan peringatan dini (*early warning*), rekomendasi keputusan, perencanaan operasi, hingga rekomendasi patroli, *respons* insiden, dan perlindungan infrastruktur. Seluruh proses tersebut memanfaatkan pendekatan GIS-*Multi Criteria Decision Analysis* (GIS-MCDA) untuk mengevaluasi berbagai alternatif berdasarkan tingkat risiko, karakteristik spasial, dan prioritas perlindungan.

Efektivitas SDSS sangat bergantung pada kualitas informasi yang dihasilkan oleh *Spatial Analytics* dan GeoAI. Apabila data atau hasil analisis pada tahap sebelumnya kurang akurat, maka rekomendasi keputusan yang dihasilkan juga berpotensi kurang tepat. Oleh karena itu, SDSS diposisikan sebagai mekanisme yang mentransformasikan informasi geospasial menjadi keputusan operasional yang terstruktur, transparan, dan dapat dipertanggungjawabkan sebelum memasuki tahap *Collaborative Maritime Governance*.

Collaborative Maritime Governance

Pada tahap *Collaborative Maritime Governance*, yaitu proses mengubah rekomendasi tersebut menjadi keputusan yang dapat diimplementasikan secara lintas sektor. Dalam GEOCAP-MDA *Framework*, keputusan perlindungan kabel laut tidak dapat dilaksanakan oleh satu institusi saja karena melibatkan kewenangan di bidang keamanan, hidrografi, telekomunikasi, kelautan, meteorologi, dan keamanan siber. Oleh karena itu, pendekatan *Collaborative Governance* diterapkan untuk memastikan setiap keputusan dibangun melalui koordinasi, pertukaran data, dan pembagian peran yang jelas antarinstansi. Mengacu pada kerangka Ansell & Gash, (2008), serta Emerson et al., (2012) bahwa kolaborasi tersebut didukung oleh tiga mekanisme utama, yaitu *principled engagement*, *shared motivation*, dan *capacity for joint action*, sehingga rekomendasi yang dihasilkan SDSS dapat diterjemahkan menjadi tindakan operasional yang terkoordinasi. Pembagian peran setiap aktor dalam *framework* disajikan pada Tabel 3, berikut ini:

Tabel 3. Peran Fungsional Aktor dalam *Collaborative Maritime Governance*

Aktor / Instansi	Peran Fungsional dalam Framework
Bakamla RI	Koordinator nasional (<i>convener</i>); <i>integrator Common Operational Picture</i> ; pemilik proses SDSS dan <i>Collaborative Governance</i> tingkat nasional
TNI Angkatan Laut	Penyedia <i>data surveillance</i> (radar, patroli laut) dan eksekutor <i>Incident Response</i> serta <i>Infrastructure Protection</i> pada zona kritis
Pushidrosal	Otoritas data hidrografi dan batimetri; penyedia Data Geospasial dasar sesuai standar IHO
Badan Informasi Geospasial (BIG)	Pengelola <i>Spatial Data Infrastructure</i> nasional; penjamin standar metadata ISO 19115 dan <i>interoperabilitas</i> OGC
BMKG	Penyedia Data Lingkungan untuk <i>Spatial Analytics</i> dan <i>Spatial Risk Analysis</i>
Kementerian Komunikasi dan Digital (Komdigi)	Regulator dan penghubung dengan operator kabel laut; pengelola Data Infrastruktur telekomunikasi
Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP)	Pemilik data RZWP3K, kawasan konservasi, dan Data Ancaman <i>illegal fishing</i>
KPLP (Kesatuan Penjagaan Laut dan Pantai)	Pelaksana keselamatan pelayaran dan penegakan di alur pelayaran
BSSN	Penjamin keamanan siber pada <i>Geodatabase</i> , WebGIS, Cloud GIS, dan model GeoAI/ <i>Digital Twin</i>
Operator Kabel Laut	Penyedia Data Infrastruktur primer dan data sensor <i>Digital Twin</i> ; mitra pelaporan insiden
Polairud	Penegakan hukum di perairan dekat pantai; pelaksana <i>Patrol Recommendation lokal</i>
Bea Cukai	Pengawasan lalu lintas kapal di pelabuhan relevan dengan <i>Data Surveillance CCTV</i> pelabuhan

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2026)

Sebagaimana pada Tabel 3, setiap instansi memiliki fungsi yang saling melengkapi dalam mendukung perlindungan kabel laut. Bakamla RI diposisikan sebagai *convener* dan integrator *Common Operational Picture* yang mengoordinasikan pertukaran data dan pengambilan keputusan lintas instansi. Sementara itu, instansi teknis seperti Pushidrosal, BIG, BMKG, Komdigi, dan KKP menyediakan data sektoral yang menjadi dasar analisis, sedangkan TNI Angkatan Laut, KPLP, Polairud, Bea Cukai, BSSN, dan operator kabel laut mendukung pengawasan, *respons* insiden, keamanan siber, serta penyediaan data operasional. Pembagian peran tersebut menunjukkan bahwa efektivitas *Collaborative Maritime Governance* tidak hanya ditentukan oleh kemampuan masing-masing institusi, tetapi juga oleh integrasi data, koordinasi, dan mekanisme pengambilan keputusan yang berjalan secara terpadu.

Kolaborasi instansi tersebut diargumentasikan hanya efektif jika seluruhnya terhubung pada satu SDI yang sama, sejalan dengan temuan bahwa resistensi organisasi merupakan hambatan utama SDI di negara berkembang (Ali et al., 2023): integrasi teknis (SDI) menjadi prasyarat struktural bagi integrasi kelembagaan (*governance*), sejalan dengan kerangka Ansell & Gash, (2008) mengenai pentingnya kondisi awal sebelum proses kolaboratif berjalan efektif. Dengan demikian, *Collaborative Maritime Governance* berfungsi sebagai penghubung antara rekomendasi teknis yang dihasilkan SDSS dan implementasi kebijakan di lapangan. Tahap ini memastikan bahwa hasil analisis geospasial dapat diterjemahkan menjadi tindakan yang terkoordinasi untuk mendukung

Critical Maritime Infrastructure Protection, sehingga meningkatkan *Maritime Domain Awareness* dan pada akhirnya memperkuat *National Maritime Security*.

Decision Making

Setelah rekomendasi disusun oleh *Spatial Decision Support System* (SDSS) dan disepakati melalui *Collaborative Maritime Governance*, tahap berikutnya adalah *Decision Making*, yaitu proses penetapan keputusan operasional yang akan dilaksanakan oleh instansi terkait. Pada tahap ini, hasil analisis geospasial tidak lagi berupa alternatif tindakan, tetapi telah ditetapkan menjadi keputusan resmi yang menjadi dasar pelaksanaan patroli, respons insiden, maupun perlindungan kabel laut.

Dalam *GEOCAP-MDA Framework*, kualitas keputusan ditentukan oleh dua faktor yang saling melengkapi, yaitu keandalan analisis dan legitimasi kelembagaan. SDSS memastikan bahwa keputusan didasarkan pada bukti spasial dan analisis risiko yang objektif, sedangkan *Collaborative Maritime Governance* memastikan keputusan tersebut memperoleh dukungan, koordinasi, dan komitmen dari seluruh instansi yang terlibat. Dengan demikian, keputusan yang dihasilkan tidak hanya tepat secara teknis, tetapi juga realistis untuk diimplementasikan dalam operasi lintas sektor.

Tahap *Decision Making* menjadi penghubung antara proses perencanaan dan pelaksanaan. Keputusan yang telah ditetapkan selanjutnya diterjemahkan menjadi tindakan nyata pada tahap *Critical Maritime Infrastructure Protection* (CMIP), sehingga rekomendasi yang dihasilkan *framework* dapat diwujudkan menjadi upaya perlindungan kabel laut yang terkoordinasi dan efektif.

Critical Maritime Infrastructure Protection

Setelah keputusan operasional ditetapkan, tahap berikutnya adalah *Critical Maritime Infrastructure Protection* (CMIP), yaitu implementasi seluruh rekomendasi ke dalam tindakan nyata untuk melindungi kabel laut sebagai *Critical Maritime Infrastructure*. Pada tahap ini, keputusan yang dihasilkan tidak lagi bersifat konseptual, tetapi diterapkan melalui berbagai kegiatan operasional, seperti patroli pada zona prioritas, pengawasan aktivitas yang berpotensi mengancam kabel laut, penegakan hukum terhadap pelanggaran, serta koordinasi penanganan dan pemulihan apabila terjadi gangguan.

Sebagaimana pada Gambar 1, CMIP merupakan titik transisi dari proses perencanaan menuju pelaksanaan di lapangan. Oleh karena itu, efektivitas perlindungan tidak hanya ditentukan oleh ketepatan keputusan, tetapi juga oleh kemampuan seluruh instansi dalam melaksanakan tindakan secara terkoordinasi dan tepat waktu. Dalam penelitian ini, perlindungan infrastruktur tidak dipandang hanya sebagai upaya pencegahan, tetapi juga sebagai proses membangun ketahanan (*resilience*) yang mencakup kemampuan mengantisipasi dampak (*absorptive*), beradaptasi terhadap perubahan kondisi (*adaptive*), dan memulihkan fungsi infrastruktur setelah terjadi gangguan (*restorative*) sebagaimana dikemukakan oleh (Linkov, 2019).

Hasil implementasi pada tahap ini menjadi dasar untuk mengevaluasi efektivitas perlindungan kabel laut sekaligus menyediakan informasi operasional yang akan memperkuat *Maritime Domain Awareness* (MDA) pada tahap berikutnya. Dengan

demikian, CMIP menjadi penghubung antara keputusan yang telah ditetapkan dan peningkatan kesadaran situasional maritim secara berkelanjutan.

Maritime Domain Awareness

Setelah langkah-langkah perlindungan diimplementasikan, tahap berikutnya adalah *Maritime Domain Awareness* (MDA), yaitu kondisi ketika seluruh informasi yang berasal dari proses pengumpulan data, integrasi geospasial, analisis, kecerdasan buatan, dan implementasi perlindungan telah membentuk pemahaman yang utuh mengenai situasi maritim. Dalam *GEOCAP-MDA Framework*, MDA diposisikan sebagai hasil (*outcome*) dari keseluruhan proses, bukan sekadar kemampuan mengumpulkan data. Dengan demikian, kualitas MDA sangat bergantung pada keberhasilan setiap tahapan sebelumnya dalam menghasilkan informasi yang akurat, terintegrasi, dan dapat dipercaya.

Sebagaimana pada (Gambar 1), MDA dibangun melalui integrasi *Situation Awareness*, *Threat Identification*, dan *Common Operational Picture*. *Situation Awareness* memberikan pemahaman terhadap kondisi maritim secara *real-time*, *Threat Identification* memanfaatkan hasil analisis GeoAI dan GEOINT untuk mengenali potensi ancaman, sedangkan *Common Operational Picture* memastikan seluruh instansi memiliki informasi yang sama sebagai dasar koordinasi dan respons. Integrasi ketiga komponen tersebut memungkinkan pengambil keputusan memperoleh gambaran situasi maritim yang lebih menyeluruh, akurat, dan responsif terhadap perubahan kondisi di lapangan.

Dengan demikian, *Maritime Domain Awareness* tidak hanya meningkatkan kemampuan mendeteksi dan merespons ancaman terhadap kabel laut, tetapi juga menyediakan informasi strategis yang menjadi dasar penguatan *National Maritime Security* pada tahap berikutnya. Semakin baik kualitas integrasi data, analisis, dan koordinasi lintas instansi, semakin tinggi pula tingkat MDA yang dapat dicapai.

National Maritime Security

Tahap terakhir dalam *GEOCAP-MDA Framework* adalah *National Maritime Security*, yang merepresentasikan tujuan akhir dari seluruh proses integrasi data, analisis, pengambilan keputusan, dan perlindungan kabel laut. Dalam *framework* ini, keamanan maritim nasional dipandang bukan sebagai hasil dari peningkatan kemampuan pengawasan semata, tetapi sebagai konsekuensi dari sistem yang mampu mengelola data secara terintegrasi, menghasilkan informasi yang akurat, mendukung keputusan yang tepat, serta mengoordinasikan tindakan perlindungan secara efektif.

Sebagaimana pada (Gambar 1), peningkatan *National Maritime Security* merupakan hasil kumulatif dari seluruh tahapan sebelumnya, mulai dari GIScience, *Spatial Data Infrastructure* (SDI), integrasi data geospasial, analisis spasial, GEOINT, GeoAI, *Spatial Decision Support System* (SDSS), hingga *Collaborative Maritime Governance*, *Critical Maritime Infrastructure Protection*, *Collaborative Maritime Governance*, *Maritime Domain Awareness*, dan *Maritime Security*. Dengan demikian, penelitian ini mengargumentasikan bahwa penguatan keamanan maritim nasional tidak hanya memerlukan investasi pada aset pengawasan dan operasi di laut, tetapi juga pada pembangunan fondasi data

geospasial, interoperabilitas sistem, dan tata kelola kolaboratif yang menjadi prasyarat bagi pengambilan keputusan yang efektif.

Proposisi Konseptual

Sebagai *conceptual paper*, penelitian ini tidak menguji hubungan antarvariabel secara empiris, tetapi merumuskan hubungan kausal tersebut ke dalam enam proposisi konseptual yang diturunkan dari sintesis teori dan GEOCAP-MDA *Framework* (Gambar 1). Keenam proposisi tersebut merepresentasikan hubungan logis antar komponen *framework*, mulai dari fondasi data, proses analisis, pengambilan keputusan, hingga dampaknya terhadap *Maritime Domain Awareness* dan *National Maritime Security*. Dengan demikian, proposisi tidak dimaksudkan sebagai hasil pengujian statistik, tetapi sebagai hipotesis konseptual yang menjadi dasar penelitian empiris pada tahap selanjutnya.

Tabel 4. Conceptual Propositions

ID	Proposisi Konseptual
P1	Kematangan <i>Spatial Data Infrastructure</i> (kebijakan, standar, jejaring akses) berpengaruh positif terhadap kualitas <i>Geospatial Data Integration</i> lintas instansi maritim
P2	Kualitas <i>Geospatial Data Integration</i> berpengaruh positif terhadap efektivitas <i>Spatial Intelligence</i> dalam mengidentifikasi pola awal ancaman terhadap kabel laut
P3	Efektivitas <i>Spatial Intelligence</i> berpengaruh positif terhadap validitas statistik <i>Spatial Analytics</i> (termasuk Getis-Ord G_i^* , Moran's I, dan GIS-MCDA) dalam menetapkan zona kritis kabel laut.
P4	Validitas <i>Spatial Analytics</i> , bersama kapabilitas GeoAI, berpengaruh positif terhadap kualitas rekomendasi <i>Spatial Decision Support System</i> .
P5	Kualitas rekomendasi <i>Spatial Decision Support System</i> , bersama efektivitas <i>Collaborative Maritime Governance</i> , berpengaruh positif terhadap ketepatan <i>Decision Making</i> dan efektivitas <i>Critical Maritime Infrastructure Protection</i>
P6	Efektivitas <i>Collaborative Maritime Governance</i> dan <i>Critical Maritime Infrastructure Protection</i> secara bersama-sama memperkuat <i>Maritime Domain Awareness</i> dan, pada akhirnya, <i>National Maritime Security</i> .

(Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2026)

Sebagaimana pada Tabel 4, keenam proposisi membentuk satu rantai kausal yang saling berurutan. P1 dan P2 menjelaskan bahwa kualitas *Spatial Data Infrastructure* (SDI) dan integrasi data geospasial menjadi prasyarat terbentuknya informasi spasial yang andal. P3 dan P4 menunjukkan bahwa *Spatial Intelligence*, *Spatial Analytics*, dan *GeoAI* meningkatkan kualitas analisis sehingga mampu menghasilkan rekomendasi keputusan yang lebih akurat melalui *Spatial Decision Support System* (SDSS). Selanjutnya, P5 dan P6 menegaskan bahwa efektivitas keputusan sangat bergantung pada *Collaborative Maritime Governance*, yang pada akhirnya menentukan keberhasilan *perlindungan Critical Maritime Infrastructure*, peningkatan *Maritime Domain Awareness*, dan penguatan *National Maritime Security*.

Agar keenam proposisi tersebut dapat diuji pada penelitian berikutnya, setiap konstruk diterjemahkan ke dalam variabel operasional yang memiliki definisi, dimensi, indikator, dan referensi pengukuran. Operasionalisasi tersebut disajikan pada (Tabel 5) sebagai dasar penyusunan instrumen penelitian empiris.

Tabel 5. Operasionalisasi Variabel Penelitian

Variabel	Definisi Operasional	Dimensi	Indikator	Referensi
Kematangan <i>Spatial Data Infrastructure</i>	Tingkat kelengkapan kebijakan, standar, dan jejaring akses data spasial lintas instansi	Kebijakan berbagi data; Standar (ISO 19115/OGC); Jejaring akses	Keberadaan regulasi berbagi data; persentase kepatuhan metadata; waktu akses data lintas sistem	(Rajabifard et al., 2006)
Kapabilitas <i>Spatial Analytics</i>	Kemampuan sistem menghasilkan informasi risiko tervalidasi statistik dari data terintegrasi	<i>Overlay & Buffer; Hotspot</i> (Getis-Ord Gi*, Moran's I); GIS-MCDA (AHP/WLC/TOPSIS/ELECTRE)	Akurasi zona konflik; signifikansi statistik hotspot; konsistensi bobot kriteria MCDA	(Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2015; Ord & Getis, 1992)
Kapabilitas GeoAI	Potensi model <i>machine learning/deep learning</i> mendeteksi dan memprediksi ancaman secara proaktif	Deteksi anomali; Prediksi lintasan; <i>Digital Twin monitoring</i> (agenda lanjutan)	Tingkat akurasi deteksi <i>dark vessel</i> pada pengujian purwarupa; waktu prediksi dini; frekuensi anomali struktural terdeteksi	(Bernabe et al., 2024; Fuller et al., 2020; Liang et al., 2024)
Kapabilitas <i>Spatial Decision Support</i>	Kemampuan sistem mentransformasikan analisis menjadi rekomendasi keputusan yang dapat ditindaklanjuti	<i>Threat Classification; Risk Prioritization; Decision Recommendation</i>	Waktu deteksi ke rekomendasi; akurasi klasifikasi ancaman; tingkat keterpakaian rekomendasi	(Malczewski & Rinner, 2015; Ramanathan Sugumaran, 2011)
Efektivitas <i>Collaborative Maritime Governance</i>	Tingkat koordinasi fungsional antarinstansi dalam rantai <i>framework</i>	<i>Principled engagement; Shared motivation; Capacity for joint action</i>	Frekuensi forum koordinasi; jumlah nota kesepahaman aktif; keberadaan SOP bersama	(Ansell & Gash, 2008; Emerson et al., 2012)
<i>Maritime Domain Awareness</i>	Tingkat pemahaman situasional efektif terhadap aktivitas domain maritim terkait kabel laut	<i>Situation Awareness; Threat Identification; Common Operational Picture</i>	Kelengkapan COP; kecepatan identifikasi ancaman; frekuensi berbagi informasi	(Boraz, 2009; Bueger, 2015)
Ketahanan Infrastruktur	Kapasitas jaringan kabel laut	<i>Absorptive; Adaptive; Restorative capacity</i>	Jumlah insiden tercegah;	(Alcaraz & Zeadally,

Kritis Maritim	mencegah, menyerap, dan pulih dari gangguan		waktu pemulihan; tingkat redundansi jalur	2015; Bueger & Liebetrau, 2023; Linkov, 2019)
----------------	---	--	---	---

(Sumber: Diolah oleh Penulis, 2026)

Pada Tabel 5 menunjukkan bahwa setiap konstruk dalam GEOCAP-MDA *Framework* telah dioperasionalkan ke dalam indikator yang dapat diukur berdasarkan literatur yang relevan. Operasionalisasi ini memberikan landasan metodologis bagi penelitian selanjutnya untuk menguji hubungan antarproposisi menggunakan pendekatan kuantitatif, seperti *Structural Equation Modeling* (SEM) atau metode empiris lainnya. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan *framework* konseptual, tetapi juga menyediakan dasar yang sistematis untuk proses validasi empiris pada pengembangan model berikutnya.

KESIMPULAN, REKOMENDASI DAN KETERBATASAN

Penelitian ini menghasilkan GEOCAP-MDA *Framework*, yaitu kerangka konseptual yang mengintegrasikan Sistem Informasi Geospasial untuk mendukung perlindungan kabel laut Indonesia sebagai *Critical Maritime Infrastructure*. *Framework* ini menunjukkan bahwa efektivitas *Maritime Domain Awareness* (MDA) tidak hanya bergantung pada ketersediaan data, tetapi juga pada integrasi *Spatial Data Infrastructure* (SDI), data geospasial, *Spatial Analytics*, GeoAI, *Spatial Decision Support System* (SDSS), dan *Collaborative Maritime Governance* dalam satu ekosistem yang terpadu. Penelitian ini berhasil mensintesis sembilan pilar teoretis ke dalam satu arsitektur konseptual yang memperluas penerapan *GIScience*, SDSS, GEOINT, GeoAI, dan *Critical Infrastructure Protection* pada ranah keamanan maritim strategis, sekaligus menyediakan landasan konseptual bagi pengembangan penelitian empiris serta penguatan kebijakan perlindungan infrastruktur maritim kritis di Indonesia.

Implementasi *framework* ini memerlukan penguatan tata kelola lintas sektor melalui pembangunan *Spatial Data Infrastructure* nasional yang terintegrasi. Oleh karena itu, Bakamla RI perlu berperan sebagai *integrator Common Operational Picture*, didukung oleh BIG dalam standardisasi data geospasial, Pushidrosal dalam penyediaan data batimetri, KKP dalam integrasi data kelautan, Komdigi dalam pengelolaan data infrastruktur kabel laut, BMKG dalam standardisasi data lingkungan, TNI Angkatan Laut dalam integrasi data pengawasan maritim, BSSN dalam pengamanan siber, serta operator kabel laut dalam penyediaan data infrastruktur dan pelaporan insiden. Untuk menjamin keberlanjutan implementasi *framework*, pemerintah juga perlu memperkuat regulasi yang mewajibkan integrasi data geospasial lintas instansi serta memperluas cakupan Kebijakan Satu Peta (*One Map Policy*) agar mencakup perlindungan *Critical Maritime Infrastructure* dan keamanan maritim nasional.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Sebagai *conceptual paper*, seluruh hubungan kausal dalam GEOCAP-MDA *Framework* masih berupa proposisi konseptual yang belum divalidasi melalui studi empiris, simulasi GIS, maupun penilaian pakar. Selain itu, *framework* ini disusun berdasarkan konteks

kelembagaan Indonesia sehingga penerapannya pada negara lain memerlukan penyesuaian terhadap karakteristik regulasi dan tata kelola masing-masing. Pendekatan *purposive narrative review* yang digunakan juga berpotensi belum mencakup seluruh literatur yang relevan, sementara komponen GeoAI dan *Digital Twin* masih berada pada tahap konseptual dan memerlukan validasi empiris sebelum dapat diimplementasikan secara operasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriansyah, A., Imanuel, C., & Darmawan, A. R. (2024). Nurturing Hero or Villain: BAKAMLA as the Indonesian Coast Guard. *Politics and Governance*, 12(February 2020), 1–14. <https://doi.org/10.17645/pag.7806>
- Alcaraz, C., & Zeadally, S. (2015). Critical infrastructure protection: Requirements and challenges for the 21st century. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 8, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2014.12.002>
- Ali, A., Imran, M., Jabeen, M., Ali, Z., & Mahmood, S. A. (2023). Factors influencing integrated information management: Spatial data infrastructure in Pakistan. *Information Development*, 39(2), 213–234. <https://doi.org/10.1177/02666669211048483>
- Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 18(4), 543–571. <https://doi.org/10.1093/jopart/mum032>
- Bernabe, P., Gotlieb, A., Legeard, B., Marijan, D., Sem-Jacobsen, F. O., & Spieker, H. (2024). Detecting Intentional AIS Shutdown in Open Sea Maritime Surveillance Using Self-Supervised Deep Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(2), 1166–1177. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3322690>
- Boraz, S. C. (2009). Maritime Domain Awareness. *Distributed Sensor Networks: Second Edition: Sensor Networking and Applications*, 62(3), 849–874. <https://doi.org/10.1201/b12988-44>
- Bueger, C. (2015). *What is maritime security?* - ,DanaInfo=ac.els-cdn.com+1-s2.0-S0308597X14003327-main.pdf. (Murphy 2010), 1–11.
- Bueger, C., & Liebetrau, T. (2023). Critical maritime infrastructure protection: What's the trouble? *Marine Policy*, 155(May). <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105772>
- Clark, K. (2019). Submarine Cables. In *International Communications*. <https://doi.org/10.7312/clar91608-007>
- Emerson, K., Nabatchi, T., & Balogh, S. (2012). An integrative framework for collaborative governance. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 22(1), 1–29. <https://doi.org/10.1093/jopart/mur011>
- European Commission. (2013). *EU action plan on Cable Security*. 2013(April 12). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-6444-2025-INIT/en/pdf>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Goodchild, M. F. (1992). Geographical information science3. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(1), 31–45. <https://doi.org/10.1080/02693799208901893>
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2011). *preview-9780273722632_A25085348*.
- Hjelmager, J., Moellering, H., Cooper, A., Delgado, T., Rajabifard, A., Rapant, P., Danko, D., Huet, M., Laurent, D., Aalders, H., Iwaniak, A., Abad, P., Düren, U., & Martynenko, A.

- (2008). An initial formal model for spatial data infrastructures. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(11-12), 1295-1309. <https://doi.org/10.1080/13658810801909623>
- Information, U.-G. W. G. on M. G. (2024). *Submarine Cable Networks ; the Geospatial Context What is the ICPC – An Overview*. (March), 1-19.
- Iswara, R., & Afriansyah, A. (2022). Arrangement of Submarine Cables and Pipelines as Part of Marine Spatial Planning in Indonesia. *Jambe Law Journal*, 5(1), 1-38. <https://doi.org/10.22437/jlj.5.1.1-38>
- Jaakkola, E. (2020). Designing conceptual articles: four approaches. *AMS Review*, 10(1-2), 18-26. <https://doi.org/10.1007/s13162-020-00161-0>
- Liang, M., Weng, L., Gao, R., Li, Y., & Du, L. (2024). Unsupervised maritime anomaly detection for intelligent situational awareness using AIS data. *Knowledge-Based Systems*, 284(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.111313>
- Linkov, I. (2019). The Science and Practice of Resilience. In *Science* (Vol. 48, Number 1232). <https://doi.org/10.1126/science.48.1232.140-a>
- Macinnis, D. J. (2011). <Macinnis2011.Pdf>. 75(July), 136-154.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). Introduction in GIS-MCDA. In *Advances in Geographic Information Science Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. <http://www.springer.com/series/7712>
- Manson, S. M., Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1999). Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics. *Economic Geography*, 75(4), 422. <https://doi.org/10.2307/144481>
- Masser, I. (2005). *GIS worlds: creating spatial data infrastructures*. 51-53.
- Miller, N. A., Roan, A., Hochberg, T., Amos, J., & Kroodsma, D. A. (2018). Identifying global patterns of transshipment behavior. *Frontiers in Marine Science*, 5(JUL), 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00240>
- Ord, J. K., & Getis, A. (1992). The Analysis of Spatial Association. *Geographical Analysis*, 24(3), 189-206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Pulungan, A. A. S., Yusnaldi, & Said, B. D. (2025). Institutional Synergy and Maritime Domain Awareness in Indonesia: A Document-Based Analysis of Bakamla, KPLP, and Polairud in Preventing Natural Resource Exploitation at Karimun Besar Waters. *International Journal of Education, Vocational and Social Science*, 04(04), 585-590.
- Rajabifard, A., Binns, A., Masser, I., & Williamson, I. (2006). The role of sub-national government and the private sector in future spatial data infrastructures. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 727-741. <https://doi.org/10.1080/13658810500432224>
- Ramanathan Sugumaran, J. D. G. (2011). *Spatial Decision Support Systems*.
- Rong, H., Teixeira, A. P., & Guedes Soares, C. (2024). A framework for ship abnormal behaviour detection and classification using AIS data. *Reliability Engineering and System Safety*, 247(March), 110105. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110105>
- Stach, T., Kinkel, Y., Constapel, M., & Burmeister, H. C. (2023). Maritime Anomaly Detection for Vessel Traffic Services: A Survey. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/jmse11061174>
- Sugianto, W., & Hermansyah, Y. (2025). *Paradigma Ekonomi Biru untuk Pembangunan Pesisir Indonesia*. 5(2024), 37439-37452.

- Wei, S., Zeng, X., Qu, Q., Wang, M., Su, H., & Shi, J. (2020). HRSID: A High-Resolution SAR Images Dataset for Ship Detection and Instance Segmentation. *IEEE Access*, 8, 120234–120254. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005861>
- Xie, Y., & Wang, C. (2023). Spatial pattern of global submarine cable network and identification of strategic pivot and strategic channel. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, 78(2), 386–402. <https://doi.org/10.11821/dlxb202302008>