NBGR
NUSANTARA BORDER GOVERNANCE REVIEW

e-ISSN: XXXX-XXXX
p-ISSN: XXXX-XXXX
Volume 1, Nomor 1
Juni 2026

ARTIKEL RISET ASLI

AKSES TERBUKA

Batas Statis, Laut Dinamis: Kesiapan Data Oseanografi untuk Tata Kelola Perbatasan Maritim

Static Boundaries, Dynamic Seas: Readiness of Oceanographic Data for Maritime Boundary Governance

Derita Yulianto *

Politeknik Kepulauan Simeulue, Indonesia

*Surel Korespondensi: dejuli12@gmail.com

ABSTRAK

Tata kelola perbatasan maritim di negara kepulauan umumnya dibahas melalui perspektif hukum, keamanan, kelembagaan, dan sosial-ekonomi, sementara kondisi laut tempat kebijakan dijalankan berubah secara dinamis. Penelitian kuantitatif-deskriptif ini menilai kesiapan data oseanografi sebagai lapisan bukti lingkungan bagi tata kelola perbatasan maritim melalui perbandingan sektor Sinabang dan Alafan, Simeulue, pada 1 Mei-31 Agustus 2026. Data model dan satelit Copernicus Marine mencakup suhu permukaan laut, gelombang, arus permukaan, tinggi muka laut, dan klorofil-a. Pemeriksaan mutu internal meliputi integritas cap waktu, sel valid, duplikasi waktu, konsistensi unit, dan keterlacakan sumber; penelitian ini tidak melakukan validasi akurasi fisik terhadap pengamatan in-situ independen. Hasil empiris menunjukkan rata-rata tinggi gelombang signifikan 1,64 m di Alafan dan 1,09 m di Sinabang; Alafan lebih tinggi pada seluruh 970 pasangan subharian. Suhu permukaan laut Sinabang sekitar 0,12°C lebih hangat, sedangkan magnitudo arus rata-rata hampir sama. Audit menunjukkan kesiapan informasi berbeda antarvariabel; klorofil-a dan angin memerlukan kehati-hatian lebih besar. Penelitian mengusulkan konsep Kesiapan Informasi Laut dan kerangka Observasi-Pemeriksaan Mutu-Analisis-Interpretasi-Integrasi-Keputusan-Pembelajaran. Empat tahap pertama diterapkan dalam penelitian ini, sedangkan integrasi, keputusan, dan pembelajaran masih berupa usulan yang belum diuji dalam keputusan operasional.

Kata Kunci: *Tata Kelola Perbatasan Maritim; Dinamika Laut; Pulau-Pulau Kecil Terluar; Kesiapan Informasi Laut; Simeulue.*

ABSTRACT

Maritime border governance in archipelagic states is commonly discussed through legal, security, institutional, and socioeconomic perspectives, while the marine environment in which policy is implemented changes dynamically. This quantitative-descriptive study assesses the readiness of oceanographic data as an environmental evidence layer for maritime border governance by comparing the Sinabang and Alafan sectors around Simeulue, Indonesia, from 1 May to 31 August 2026. Copernicus Marine model and satellite data include sea-surface temperature, waves, surface currents, sea-surface height, and chlorophyll-a. Internal quality checks covered timestamp integrity, valid cells, duplicate valid times, unit consistency, and source traceability; the study did not perform

DOI: 10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx

Diterima: 10 April 2026
Direvisi: 20 Mei 2026
Disetujui: 29 Mei 2026
Diterbitkan: 11 Juni 2026
Diterbitkan Daring: 11 Juni 2026

Hak Cipta © 2026 Penulis.

Diterbitkan oleh Badan Nasional Pengelola Perbatasan Republik Indonesia (BNPP RI).

Artikel ini dilisensikan di bawah lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

independent physical-accuracy validation against in-situ observations. Mean significant wave height was 1.64 m in Alafan and 1.09 m in Sinabang, with Alafan higher in all 970 matched sub-daily records. Mean sea-surface temperature in Sinabang was about 0.12°C warmer, whereas average current magnitude was nearly identical. The audit showed unequal information readiness among variables, with chlorophyll-a and wind requiring greater caution. The study proposes Ocean Information Readiness and an Observe-Quality Check-Analyse-Interpret-Integrate-Decide-Learn framework. The first four stages were implemented in this study, while integration, decision, and learning remain proposed stages that have not yet been tested in operational decisions.

Keywords: *Maritime Border Governance; Ocean Dynamics; Outermost Small Islands; Ocean Information Readiness; Simeulue.*

10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan yang tata kelola wilayah lautnya bertumpu pada ruang yurisdiksi, hukum, kelembagaan, keamanan, pembangunan, dan aktivitas masyarakat. Dalam konteks pulau-pulau kecil terluar, kajian mutakhir masih kuat berorientasi pada rezim hukum, batas maritim, keamanan, penegakan hukum, serta koordinasi kelembagaan. Nugraha dan Chen (2023) menunjukkan bahwa pengelolaan pulau-pulau kecil terluar Indonesia masih menghadapi persoalan batas laut yang belum tuntas, ancaman keamanan, tumpang tindih kewenangan, dan kelemahan kerangka kelembagaan. Keputusan Presiden Nomor 6 Tahun 2017 menetapkan 111 Pulau-Pulau Kecil Terluar (PPKT), termasuk Pulau Simeulue Cut dan Pulau Salaut Besar di Aceh. Keberadaan dua PPKT tersebut memberi konteks bagi kebutuhan informasi lingkungan yang dapat mendukung, antara lain, pemantauan perairan, perencanaan konektivitas, dan kesiapan operasi maritim. Penelitian ini tidak mengevaluasi keberhasilan operasi tersebut, melainkan menguji kesiapan informasi oseanografi yang berpotensi menjadi salah satu lapisan buktinya.

Laut yang berada di dalam atau mengelilingi ruang yurisdiksi tidak bersifat statis. Arus berubah arah dan intensitas, gelombang berubah dalam skala jam hingga hari, suhu permukaan laut merespons proses atmosfer dan oseanografi, dan produktivitas biologis berubah secara spasial-temporal. Kajian perubahan lingkungan dan hukum laut telah menunjukkan bahwa dinamika iklim dapat berimplikasi pada geografi maritim Indonesia (Vinata dkk., 2023). Literatur perencanaan ruang laut juga menekankan pentingnya mutu data, resolusi, skala temporal, ketidakpastian, dan reproduksibilitas sebelum informasi digunakan dalam keputusan (Shucksmith & Kelly, 2014; Zuercher, Ban, dkk., 2022). Frazão Santos dkk. (2020, 2024) menegaskan kebutuhan perencanaan laut yang adaptif terhadap kondisi laut yang berubah.

Persoalan kemudian bergeser dari sekadar "apakah data tersedia" menjadi "apakah data tersebut layak digunakan untuk tujuan tertentu". Literatur mutu data dan perencanaan ruang laut telah membahas *fitness for purpose*, skala spasial-temporal, ketidakpastian, reproduksibilitas, dan keterlacakan (Shucksmith & Kelly, 2014; Zuercher, Ban, dkk., 2022). Boucquey dkk. (2019) menunjukkan bahwa infrastruktur data ikut membentuk cara laut dipahami dalam tata kelola, sedangkan Karcher dkk. (2024) menekankan perlunya penerjemahan bukti pada antarmuka sains-kebijakan. Dalam konteks yang lebih luas, tata kelola adaptif menempatkan pembelajaran dan kemampuan merespons perubahan sebagai unsur penting (Folke dkk., 2005). Penelitian di negara kepulauan dan Asia-Pasifik juga masih menemukan keterbatasan data, kapasitas teknis, integrasi kelembagaan, dan mekanisme pembelajaran (Satumanatpan dkk., 2025; Singh, 2026; Singh dkk., 2025).

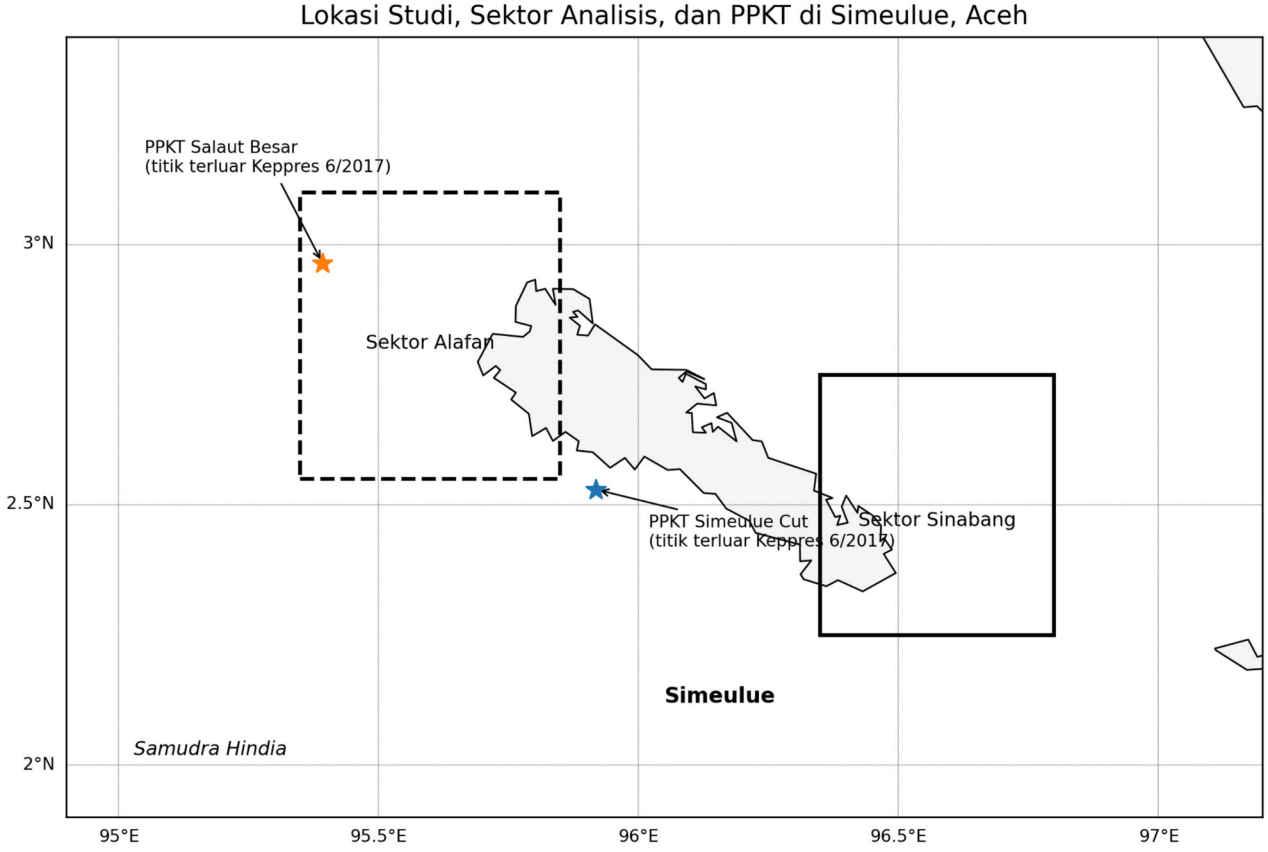
Berdasarkan literatur tersebut, terdapat kesenjangan pada irisan antara tata kelola perbatasan maritim dan penggunaan observasi laut dinamis. Studi perbatasan umumnya menjelaskan siapa yang mengelola dan berdasarkan kewenangan apa, sedangkan studi kelautan menjelaskan apa yang terjadi di laut dan bagaimana kondisinya berubah. Kebaruan yang diusulkan bukan konsep mutu data yang sepenuhnya baru, melainkan sintesis lima dimensi—ketersediaan, relevansi spasial, integritas temporal, mutu dan kesadaran ketidakpastian, serta keterlacakan—sebagai gerbang pemeriksaan sebelum data oseanografi ditafsirkan untuk konteks perbatasan maritim. Sintesis ini disebut Kesiapan Informasi Laut (*Ocean Information Readiness*) dan diposisikan sebagai penghubung antara audit data dan kebutuhan keputusan, bukan pengganti kerangka *fitness for purpose* atau antarmuka sains-kebijakan yang telah ada.

Penelitian ini didasarkan pada proposisi bahwa suatu batas maritim dapat stabil secara hukum, sementara kondisi lingkungan tempat tata kelola dijalankan tetap dinamis secara fisik. Penelitian tidak menyatakan bahwa gelombang, arus, suhu, atau variabel oseanografi menentukan kedaulatan atau batas hukum. Observasi laut diposisikan sebagai satu lapisan bukti yang melengkapi dimensi hukum, kelembagaan, keamanan, sosial-ekonomi, dan spasial.

Pertanyaan penelitian adalah: (1) perbedaan oseanografi spasial dan temporal apa yang dapat diidentifikasi antara sektor Sinabang dan Alafan selama 1 Mei-31 Agustus 2026; (2) variabel lingkungan mana yang memiliki kesiapan informasi cukup untuk ditafsirkan secara deskriptif; dan (3) bagaimana data oseanografi yang telah melalui pemeriksaan mutu internal dapat disusun sebagai lapisan bukti lingkungan dalam tata kelola perbatasan maritim? Tujuan penelitian adalah membandingkan kondisi laut antar-sektor, menilai kesiapan informasi setiap variabel, dan menyusun kerangka konseptual yang menghubungkan data laut dengan interpretasi tata kelola.

2. Metode

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan studi empiris di perairan sekitar Simeulue, Aceh. Dua kotak analisis dipilih untuk membandingkan kondisi geografis yang berbeda: sektor Sinabang (2,25-2,75° LU; 96,35-96,80° BT) di sisi timur-tenggara, dan sektor Alafan (2,55-3,10° LU; 95,35-95,85° BT) di sisi barat-barat laut yang lebih terbuka ke Samudra Hindia. Titik



Gambar 1. Lokasi Sektor Analisis dan Titik Terluar PPKT Pulau Simeulue Cut dan Pulau Salaut Besar di Sekitar Simeulue, Aceh

Sumber: Olahan penulis; titik terluar PPKT mengacu pada Keputusan Presiden Nomor 6 Tahun 2017.

10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx

terluar PPKT Pulau Salaut Besar berada di dalam kotak Alafan, sedangkan titik terluar Pulau Simeulue Cut berada di antara kedua kotak; keduanya ditampilkan untuk memberi konteks PPKT, bukan untuk menyamakan kotak analisis dengan wilayah pulau atau batas yurisdiksi. Berdasarkan Keputusan Presiden Nomor 6 Tahun 2017, titik terluar Pulau Simeulue Cut berada pada 02°31′47″ LU, 95°55′05″ BT dan Pulau Salaut Besar pada 02°57′51″ LU, 95°23′34″ BT. Gambar 1 menunjukkan lokasi sektor dan kedua titik PPKT tersebut.

Data berasal dari produk model numerik dan satelit yang didistribusikan melalui Copernicus Marine dan penyedia terkait. Fisika laut menggunakan Global Ocean Physics Analysis and Forecast (GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024; 0,083°; DOI 10.48670/moi-00016) dari Mercator Ocean International/MOI GLO12. Variabel thetao, uo, dan vo pada *subset* memiliki satu level kedalaman permukaan, sedangkan zos merupakan medan muka laut. Gelombang menggunakan model GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027 (0,083°; DOI 10.48670/moi-00017) dari Météo-France dengan VHM0, VMDR, dan VTPK; arsip harian memuat hingga delapan waktu valid. Klorofil-a menggunakan observasi satelit multi-sensor OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L3_NRT_009_101, *dataset* cmems_obs-oc_glo_bgc-plankton_nrt_l3-multi-4km_P1D (sekitar 4 km; DOI 10.48670/moi-00278). Angin berasal dari MetOp-C ASCAT sekitar 25 km harian pada 10 m dan digunakan terutama untuk audit jejak sumber. Atribut *subset* NetCDF tidak menyimpan *string* versi/*release* produk maupun cap waktu unduhan lokal secara lengkap; karena itu penelitian melaporkan Product ID, DOI, metadata sumber, dan periode waktu valid tanpa merekonstruksi versi yang tidak tercatat. Ringkasan *dataset* disajikan pada Tabel 1.

Produk memiliki *grid* asli yang berbeda. Medan fisika laut dan gelombang mencakup sekitar 35 sel *grid* di Sinabang dan 42 sel di Alafan; klorofil-a sekitar 132 dan 156 sel; sedangkan angin sekitar empat sel per sektor. Rata-rata sektor dihitung sebagai rata-rata aritmetika tak berbobot dari sel numerik valid pada *grid* asli. Sel darat atau sel hilang yang tersimpan sebagai nilai tidak valid tidak masuk perhitungan; sel pesisir yang masih memiliki nilai valid tetap dipertahankan. Tidak dilakukan interpolasi, imputasi, atau penyamaan *grid*. Jumlah sel valid dicatat untuk setiap rekaman agar perubahan cakupan dapat diaudit.

Audit awal memuat 8.735 rekaman yang merepresentasikan kombinasi produk, variabel, tanggal *file*, cap waktu internal, sektor, jumlah sel, sel valid, rata-rata, minimum, dan maksimum. Pemeriksaan mutu internal dibedakan secara tegas dari validasi akurasi fisik: penelitian ini tidak membandingkan produk dengan *buoy*, CTD, atau pengamatan in-situ independen. Rekaman

Tabel 1. *Dataset* Lingkungan dan Variabel Utama Penelitian

Komponen	Produk/Sumber	Jenis & Posisi	Resolusi/Waktu	Variabel
Fisika laut	GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024	Model MOI GLO12; thetao/u/v: 1 level permukaan; zos: muka laut	0,083°; harian	thetao, uo, vo, zos
Gelombang	GLOBAL_ANALYSISFORECAST_WAV_001_027	Model MFWAM; permukaan	0,083°; hingga 8 waktu valid/hari	VHM0, VMDR, VTPK
Klorofil-a	OCEANCOLOUR_GLO_BGC_L3_NRT_009_101	Satelit multi-sensor; permukaan	~4 km; harian	CHL
Angin	MetOp-C ASCAT daily descending V2	Satelit scatterometer; 10 m	~25 km; harian	eastward_wind, northward_wind

Sumber: Metadata NetCDF dan katalog produk Copernicus Marine (2026).

dipertahankan jika cap waktu internal dapat dibaca, berada dalam jendela 1 Mei 00.00 sampai 31 Agustus 2026 23.59, mempunyai rata-rata numerik, dan memiliki sedikitnya satu sel valid. Tidak diterapkan ambang minimum fraksi cakupan karena audit awal tidak dirancang untuk menaksir *ocean coverage* murni; konsekuensinya, variabel dengan cakupan sangat jarang, terutama angin, tidak digunakan sebagai hasil utama. Jika beberapa *file* memuat variabel, sektor, dan waktu valid yang sama, dipilih rekaman dengan tanggal *file* paling dekat terhadap waktu valid; jika masih seri, dipilih tanggal *file* yang paling baru. Aturan ini menghindari penghitungan ganda dari run analisis/prakiraan yang tumpang tindih.

Statistik deskriptif meliputi jumlah observasi, rata-rata, simpangan baku, median, minimum, dan maksimum. Perbandingan antar-sektor menggunakan cap waktu yang sama. Koefisien r yang dilaporkan adalah korelasi Pearson antar-sektor pada waktu yang berpasangan: VHM0 menggunakan data subharian dan SST menggunakan data harian. Magnitudo arus dihitung sebagai magnitudo dari komponen vektor rata-rata sektor, $U = \mathrm{sqrt}(u^2+v^2)$; nilai ini bukan rata-rata magnitudo setiap sel. Analisis dilakukan dengan Python 3 menggunakan xarray untuk pembacaan metadata/NetCDF, pandas dan NumPy untuk harmonisasi serta statistik, dan Matplotlib untuk visualisasi. Nomor versi pustaka dari lingkungan analisis awal tidak diarsipkan, sehingga tidak direkonstruksi. *Dataset* audit, data olahan, dan skrip reproduksi disiapkan untuk penelaahan *reviewer*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Data dan Kontras Antar-Sektor

Setelah jendela waktu dibatasi berdasarkan cap waktu internal pada 1 Mei-31 Agustus 2026 dan rekaman tumpang tindih diseleksi dengan aturan pada bagian Metode, SST memiliki 122 pasangan observasi, VHM0 970, VTPK 911, tinggi muka laut 123, dan magnitudo arus 119. Klorofil-a memiliki 85 rekaman valid pada masing-masing sektor, tetapi hanya 76 cap waktu yang sama tersedia pada

Tabel 2. Statistik Deskriptif Variabel Utama Setelah Harmonisasi Temporal

Variabel	Sektor	n	Rata-rata	SD	Median	Min-Maks
SST (°C)	Sinabang	122	30,685	0,226	30,710	29,952-31,290
SST (°C)	Alafan	122	30,560	0,280	30,502	29,992-31,187
VHM0 (m)	Sinabang	970	1,090	0,212	1,059	0,547-1,717
VHM0 (m)	Alafan	970	1,641	0,333	1,594	0,899-2,841
VTPK (s)	Sinabang	911	13,548	1,679	13,426	10,072-18,081
VTPK (s)	Alafan	911	14,817	2,241	14,679	8,688-20,562
SSH (m)	Sinabang	123	0,548	0,067	0,529	0,429-0,720
SSH (m)	Alafan	123	0,545	0,064	0,531	0,422-0,707
Arus (m s-1)	Sinabang	119	0,184	0,127	0,142	0,015-0,567
Arus (m s-1)	Alafan	119	0,182	0,108	0,165	0,030-0,488
CHL-a (mg m-3)	Sinabang	85	0,177	0,137	0,156	0,105-1,374
CHL-a (mg m-3)	Alafan	85	0,147	0,028	0,145	0,093-0,245

Sumber: Olahan penulis dari audit data oseanografi 1 Mei-31 Agustus 2026. Untuk CHL-a, perbandingan berpasangan menggunakan 76 cap waktu yang sama.

10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx

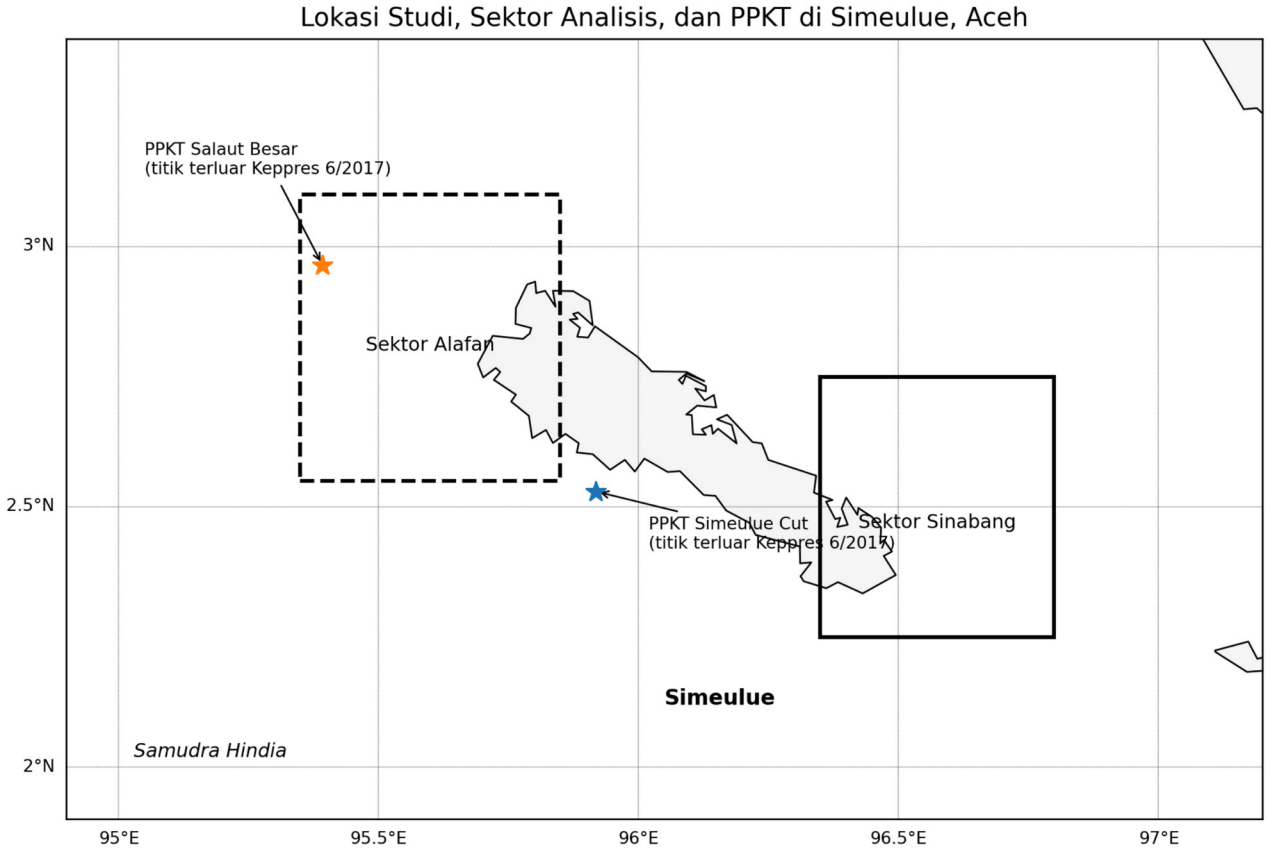
kedua sektor. Perbedaan jumlah ini mencerminkan ketersediaan temporal, bukan kesalahan data. Statistik utama disajikan pada Tabel 2.

3.2. Gelombang sebagai Kontras Lingkungan Terkuat

Kontras paling jelas terdapat pada tinggi gelombang signifikan spektral (VHM0/Hm0). Rata-rata VHM0 mencapai 1,641 m di Alafan dan 1,090 m di Sinabang, atau sekitar 0,551 m lebih tinggi di Alafan. Korelasi Pearson antar-sektor pada 970 cap waktu subharian yang sama adalah r = 0,94, dan Alafan lebih tinggi pada seluruh 970 pasangan. Temuan 970/970 tersebut dibaca secara deskriptif, bukan sebagai 970 percobaan independen, karena observasi berurutan saling berkorelasi secara temporal. Gambar 2 memperlihatkan pola temporal yang hampir sejajar dengan tingkat eksposur yang berbeda.

Perbedaan meningkat pada kondisi laut yang relatif energik. Pada 3 Agustus 2026 pukul 12.00, rata-rata sektor Alafan mencapai sekitar 2,84 m dan Sinabang sekitar 1,61 m. Rata-rata harian 4 Agustus sekitar 2,54 m di Alafan dan 1,51 m di Sinabang. Posisi Alafan yang lebih terbuka ke Samudra Hindia memberikan penjelasan geografis yang masuk akal, tetapi penelitian ini tidak mengklaim telah mengisolasi mekanisme penyebab. Analisis kausal masih memerlukan spektrum arah gelombang, batimetri, orientasi garis pantai, sumber *swell*, dan *forcing atmosfer*.

Dari sisi tata kelola, hasil ini memperlihatkan bahwa kesatuan wilayah administrasi tidak identik dengan keseragaman kondisi operasional laut. Informasi gelombang dapat digunakan sebagai



Gambar 2. Tinggi Gelombang Signifikan (VHM0/Hm0) di Sektor Sinabang dan Alafan

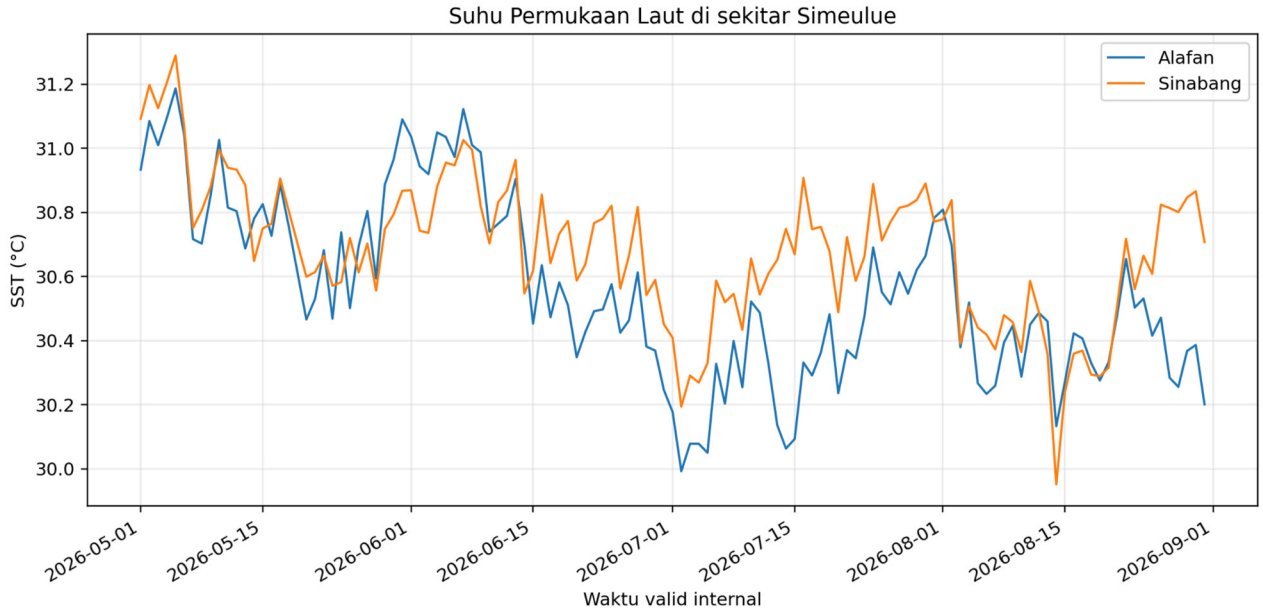
Sumber: Olahan penulis berdasarkan data Copernicus Marine (2026).

masukan awal untuk menentukan kapan perencana operasi perlu memeriksa prakiraan lintasan yang lebih rinci, karakter kapal, atau batas operasional sebelum pelayaran atau patroli dilakukan. Penelitian ini tidak menetapkan ambang aman/tidak aman dan tidak mengukur kecelakaan, pembatalan pelayaran, penutupan pelabuhan, atau kerugian ekonomi. Karena itu, hasil ditafsirkan sebagai bukti lingkungan yang relevan untuk penyaringan awal, bukan bukti sebab-akibat terhadap *outcome* kebijakan (Ehler, 2021; Zuercher, Motzer, dkk., 2022).

3.3. Suhu Permukaan Laut dan Dinamika Arus

Suhu permukaan laut menunjukkan koherensi antar-sektor dengan korelasi Pearson r = 0,75 pada 122 tanggal harian yang sama. Rata-rata SST Sinabang adalah 30,685°C dan Alafan 30,560°C; selisih sekitar +0,125°C. Karena penelitian tidak melakukan validasi independen maupun kuantifikasi ketidakpastian produk pada lokasi studi, selisih kecil ini tidak ditafsirkan sebagai perbedaan fisik yang pasti melampaui ketidakpastian data; nilainya dipertahankan sebagai kontras deskriptif. Gambar 3 menunjukkan pola SST kedua sektor selama periode pengamatan.

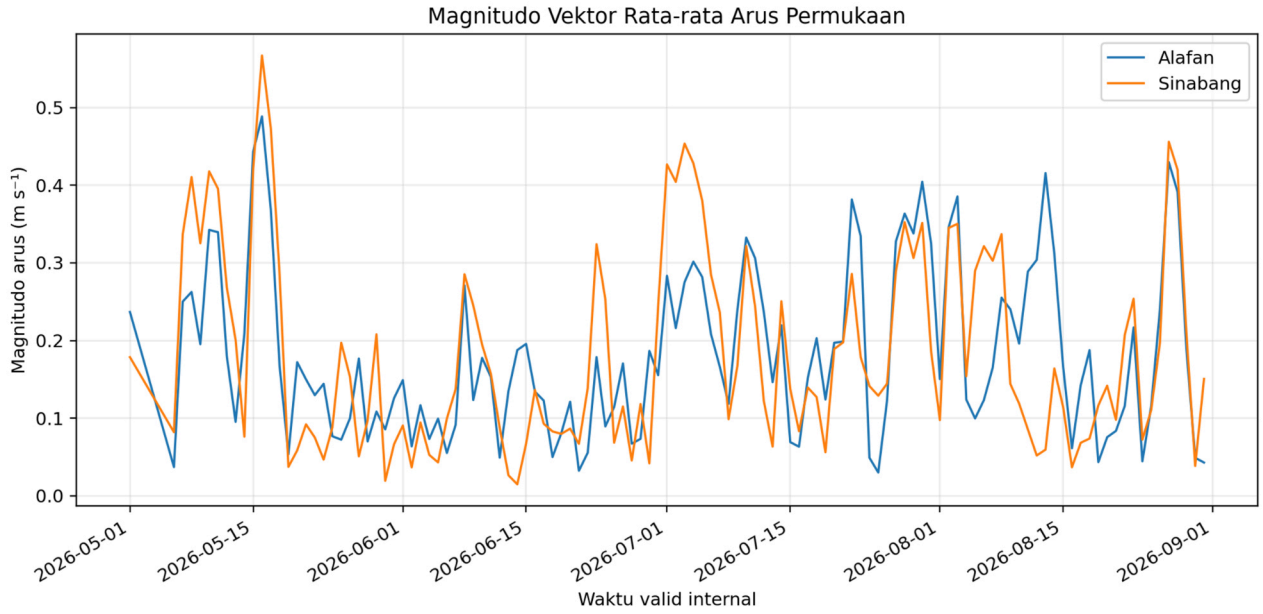
Magnitudo dari komponen vektor rata-rata sektor hampir sama, yakni 0,184 m s-1 di Sinabang dan 0,182 m s-1 di Alafan pada 119 cap waktu yang sama. Sinabang lebih tinggi pada 59 observasi dan Alafan pada 60 observasi, sehingga tidak terdapat dominasi konsisten pada magnitudo. Namun komponen vektornya berbeda: rata-rata u dan v di Sinabang sekitar +0,034 dan -0,070 m s-1, sedangkan di Alafan sekitar +0,006 dan -0,006 m s-1. Karena itu, arah dan struktur temporal arus lebih relevan daripada kecepatan rata-rata jika kelak diterapkan pada hanyutan atau pencarian dan pertolongan; penelitian ini sendiri belum menguji aplikasi operasional tersebut. Gambar 4 memperlihatkan variasi magnitudo arus.



Gambar 3. Suhu permukaan laut (SST) di sektor Sinabang dan Alafan

Sumber: Olahan penulis berdasarkan data Copernicus Marine (2026).

10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx

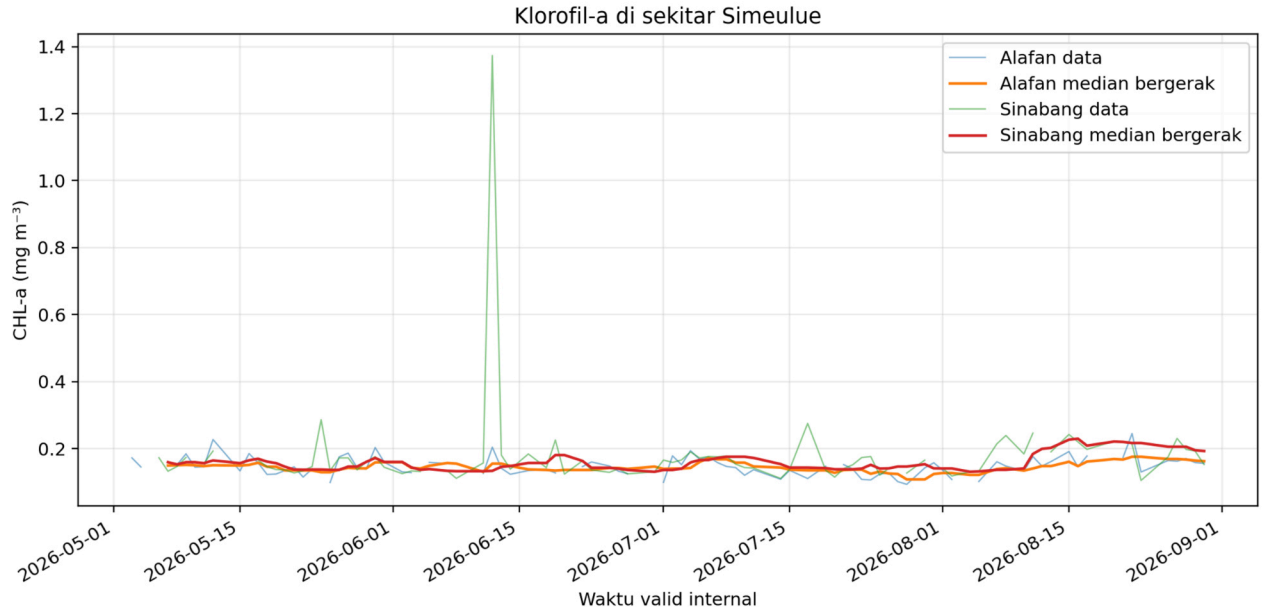


Gambar 4. Magnitudo arus permukaan rata-rata sektor Sinabang dan Alafan

Sumber: Olahan penulis berdasarkan data Copernicus Marine (2026).

3.4. Tinggi Muka Laut, Klorofil-a, dan Kesiapan Informasi

Rata-rata tinggi muka laut kedua sektor hampir identik: 0,548 m di Sinabang dan 0,545 m di Alafan pada 123 tanggal harian dalam jendela 1 Mei-31 Agustus. Pada versi sebelumnya terdapat 124 pasangan karena cap waktu 1 September dari *file* sumber akhir Agustus ikut terbawa; revisi ini menerapkan filter waktu internal secara ketat sehingga jumlahnya menjadi 123. Selisih rata-rata sekitar 0,0023 m tidak ditafsirkan sebagai perbedaan operasional.



Gambar 5. Klorofil-a di Sektor Sinabang dan Alafan serta Median Bergerak

Sumber: Olahan penulis berdasarkan data Copernicus Marine (2026).

Tabel 3. Matriks Kualitatif Kesiapan Informasi Laut per Variabel

Variabel	Ketersediaan	Relevansi Spasial	Integritas Temporal	Mutu/ Ketidakpastian	Keterlacakan	Penggunaan dalam Studi
SST	Memadai	Memadai	Memadai	Bersyarat	Memadai	Deskriptif sektoral
Gelombang	Memadai	Memadai	Memadai	Bersyarat	Memadai	Temuan utama deskriptif
Arus	Bersyarat	Memadai	Memadai	Bersyarat	Memadai	Deskriptif; arah penting
SSH	Memadai	Memadai	Memadai	Bersyarat	Memadai	Deskriptif, bukan operasional
CHL-a	Bersyarat	Bersyarat	Memadai setelah koreksi waktu	Terbatas	Memadai	Interpretasi konservatif
Angin	Terbatas	Terbatas	Memadai	Bersyarat	Memadai	Tidak menjadi hasil utama

Sumber: Olahan penulis dari audit data oseanografi 1 Mei-31 Agustus 2026. Untuk CHL-a, perbandingan berpasangan menggunakan 76 cap waktu yang sama.

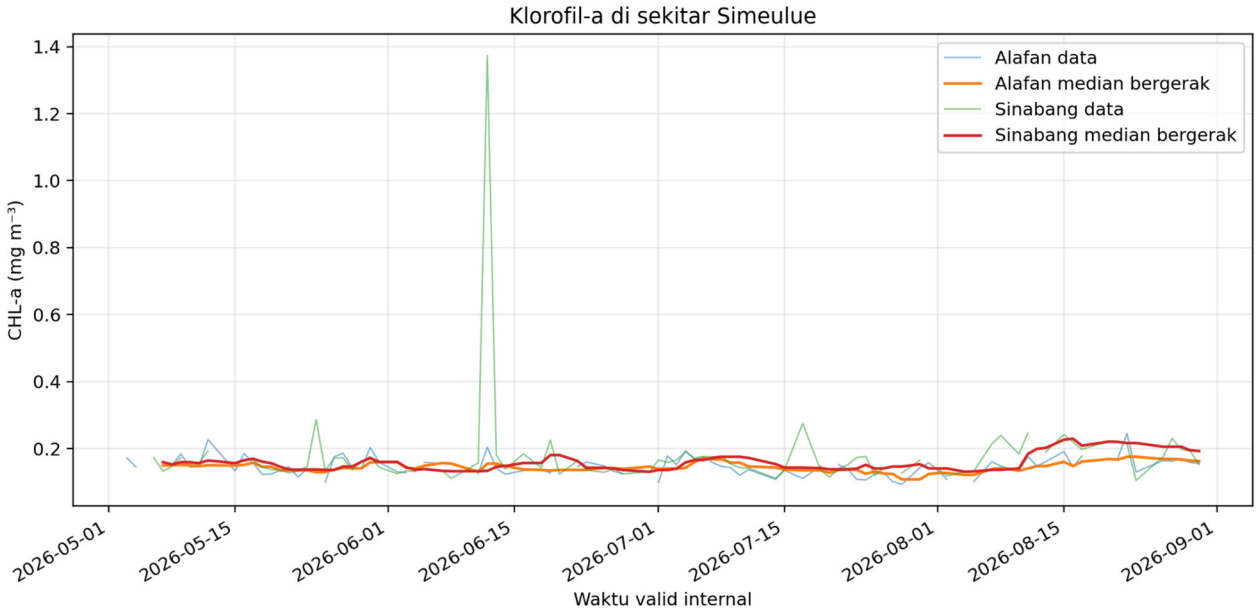
Klorofil-a memiliki 85 rekaman valid per sektor, tetapi hanya 76 tanggal yang berpasangan. Median CHL-a adalah 0,156 mg m-3 di Sinabang dan 0,145 mg m-3 di Alafan. Lonjakan tertinggi Sinabang terjadi pada 12 Juni dengan rata-rata sektor sekitar 1,374 mg m-3; pada saat itu 117 dari 132 sel berisi nilai valid dan nilai maksimum sel mencapai sekitar 22,15 mg m-3. Dengan demikian, lonjakan tersebut tidak dapat dijelaskan hanya oleh sedikitnya sel valid, tetapi penyebabnya juga belum dapat dipastikan tanpa pemeriksaan optik/pesisir dan data independen. Nilai tetap dipertahankan dalam audit, tidak digunakan untuk menyimpulkan produktivitas perikanan, dan median digunakan sebagai ukuran kecenderungan yang lebih *robust*. Gambar 5 menampilkan data dan median bergerak.

Audit memperlihatkan bahwa ketersediaan data tidak sama dengan kesiapan informasi. Penilaian kualitatif pada Tabel 3 menggunakan lima dimensi Kesiapan Informasi Laut: ketersediaan, relevansi spasial, integritas temporal, mutu/kesadaran ketidakpastian, dan keterlacakan. Kategori "memadai", "bersyarat", dan "terbatas" tidak merupakan skor validasi akurasi fisik; kategori hanya menyatakan kecukupan relatif untuk tujuan perbandingan sektoral deskriptif dalam penelitian ini. Konsep tersebut merupakan sintesis praktis dari literatur mutu data, *fitness for purpose*, perencanaan ruang laut, dan antarmuka sains-kebijakan (Boucquey dkk., 2019; Karcher dkk., 2024; Zuercher, Ban, dkk., 2022).

3.5. Kerangka Tata Kelola Perbatasan Maritim Berbasis Informasi Laut

Berdasarkan hasil audit, penelitian mengusulkan kerangka tujuh tahap: Observasi, Pemeriksaan Mutu, Analisis, Interpretasi, Integrasi, Keputusan, dan Pembelajaran. Empat tahap pertama benar-benar dilakukan dalam penelitian ini. Tiga tahap terakhir masih merupakan usulan konseptual dan belum diuji melalui keputusan nyata. Istilah "pemeriksaan mutu" dipilih untuk membedakannya dari validasi akurasi fisik terhadap data in-situ. Kerangka lengkap ditunjukkan pada Gambar 6.

10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx



Gambar 6. Kerangka Konseptual Tata Kelola Perbatasan Maritim Berbasis Informasi Laut; Garis Putus-Putus Menunjukkan Tahap yang Masih Berupa Usulan

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan hasil audit dan literatur tata kelola/data laut.

Integrasi tidak berarti menggabungkan seluruh variabel ke dalam satu indeks komposit. Sebagai contoh alur yang relevan bagi operasi maritim: VHMo diperoleh dari produk gelombang → cap waktu, cakupan sel, dan duplikasi diperiksa → kontras Alafan-Sinabang dianalisis → hasil ditafsirkan sebagai perbedaan eksposur sektoral. Sampai tahap ini proses telah dilakukan. Agar informasi tersebut digunakan untuk keputusan patroli atau pelayaran, tahap berikutnya harus mengintegrasikannya dengan lintasan spesifik, prakiraan lokal, karakter kapal, ambang operasi, dan kondisi pelabuhan; tahap integrasi dan keputusan tersebut belum diuji dalam penelitian ini. Prinsip yang sama berlaku pada pertanyaan ekosistem atau ketahanan pesisir (Ansong dkk., 2021; Frazão Santos dkk., 2024).

Dalam konteks perbatasan, kerangka ini tidak mengubah status hukum ruang laut. Rumusannya adalah: yurisdiksi yang stabil + lingkungan yang berubah memerlukan pengelolaan yang adaptif. Observasi laut menjadi pelengkap terhadap bukti hukum, kelembagaan, keamanan, sosial-ekonomi, dan pengetahuan masyarakat, bukan penggantinya.

3.6. Implikasi Kebijakan dan Keterbatasan

Implikasi penelitian dibatasi pada dua sektor dan periode 1 Mei-31 Agustus 2026. Dalam ruang dan waktu tersebut, penggunaan satu kondisi laut representatif untuk seluruh kawasan dapat menyembunyikan perbedaan sektoral, terutama pada gelombang. Temuan ini mendukung kebutuhan pemeriksaan mutu dan diferensiasi spasial sebelum data digunakan sebagai masukan awal. Namun rata-rata sektor belum menggambarkan kondisi pelabuhan, lintasan kapal, atau titik patroli tertentu. Manfaat operasional baru dapat dinilai setelah informasi sektor dipadukan dengan data lokasi spesifik, karakter kapal, ambang operasi, dan bukti *outcome*. Dengan demikian,

penelitian ini mendukung tahap penyediaan bukti, bukan membuktikan efektivitas kebijakan adaptif.

Penelitian memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, periode empat bulan tidak mewakili klimatologi tahunan atau semua musim Simeulue. Kedua, pemeriksaan mutu bersifat internal dan tidak mencakup validasi akurasi fisik terhadap observasi in-situ independen. Ketiga, Sinabang dan Alafan adalah kotak analisis, bukan unit hukum, administrasi, pelabuhan, atau lintasan kapal. Keempat, data angin terlalu jarang untuk perbandingan sektor utama dan CHL-a masih memerlukan pemeriksaan mutu lanjutan. Kelima, *string* versi/*release* produk dan cap waktu unduhan lokal tidak tersimpan lengkap pada arsip *subset*. Keenam, korelasi tidak membuktikan sebab-akibat. Ketujuh, penelitian belum mengukur *outcome* tata kelola melalui data pelayaran, kecelakaan, operasi patroli, aktivitas perikanan, atau wawancara pemangku kepentingan. Karena itu, kontribusi dibatasi pada perbandingan kondisi laut, audit kesiapan informasi, dan usulan kerangka konseptual.

4. Kesimpulan

Tujuan pertama dijawab melalui perbandingan empiris dua sektor pada 1 Mei-31 Agustus 2026. Gelombang menunjukkan kontras paling konsisten: Alafan memiliki VHM0 rata-rata sekitar 1,64 m dan lebih tinggi daripada Sinabang pada seluruh 970 pasangan subharian. SST menunjukkan selisih kecil yang hanya ditafsirkan secara deskriptif, sedangkan magnitudo arus rata-rata hampir sama dan arah vektornya lebih informatif. Temuan ini berlaku untuk sektor dan periode kajian, bukan untuk seluruh musim atau seluruh wilayah perbatasan Indonesia.

Tujuan kedua dijawab melalui audit kesiapan informasi. Tidak semua variabel yang tersedia layak digunakan dengan tingkat keyakinan yang sama: gelombang, SST, arus, dan SSH cukup untuk perbandingan sektoral deskriptif dengan keterbatasan model; CHL-a memerlukan interpretasi konservatif; dan angin tidak digunakan sebagai hasil utama. Kesiapan Informasi Laut dirumuskan sebagai sintesis ketersediaan, relevansi spasial, integritas temporal, mutu/kesadaran ketidakpastian, dan keterlacakan.

Tujuan ketiga dijawab dengan mengusulkan kerangka Observasi-Pemeriksaan Mutu-Analisis-Interpretasi-Integrasi-Keputusan-Pembelajaran. Penelitian ini baru menerapkan empat tahap pertama; efektivitas integrasi, keputusan, dan pembelajaran belum diuji. Riset lanjutan perlu memperpanjang periode observasi, menambahkan validasi in-situ, batimetri dan arah gelombang, data kapal/lintasan serta ambang operasional, dan bukti dari pemangku kepentingan untuk menguji apakah informasi laut benar-benar memperbaiki keputusan tata kelola.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Copernicus Marine Service dan lembaga penyedia data terkait atas akses terhadap produk oseanografi yang digunakan dalam penelitian ini.

DEKLARASI

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Buatan

Penulis menggunakan teknologi Generative AI (ChatGPT) sebagai alat bantu penyuntingan bahasa, penataan struktur naskah, bantuan penyusunan kode analisis, dan penyajian hasil. Seluruh pemilihan data, metode, verifikasi angka, sumber rujukan, interpretasi ilmiah, dan klaim akhir telah ditinjau dan menjadi tanggung jawab penuh penulis. AI tidak diperlakukan sebagai penulis atau sumber ilmiah.

10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx

Kontribusi Penulis
Derita Yulianto: konseptualisasi, metodologi, investigasi, kurasi data, analisis formal, visualisasi, penulisan draf awal, serta penelaahan dan penyuntingan naskah.

Pendanaan
Penelitian ini dilakukan secara mandiri tanpa menerima pendanaan khusus dari lembaga komersial maupun nirlaba.

Konflik Kepentingan
Penulis tercantum sebagai Mitra Bestari (*Peer Reviewer*) Nusantara Border Governance Review dalam Tim Penerbitan NBGR Tahun 2026. Untuk manuskrip ini, penulis tidak terlibat dalam penunjukan editor, pemilihan mitra bestari, proses penelaahan, maupun keputusan penerbitan. Penanganan manuskrip diharapkan dilakukan melalui proses editorial yang independen.

REFERENSI

Ansong, J. O., McElduff, L., & Ritchie, H. (2021). Institutional Integration in Transboundary Marine Spatial Planning: A Theory-Based Evaluative Framework for Practice. *Ocean & Coastal Management, 202*(2), 105430. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105430

Boucquey, N., Martin, K. St., Fairbanks, L., Campbell, L. M., & Wise, S. (2019). Ocean Data Portals: Performing a New Infrastructure for Ocean Governance. *Environment and Planning D: Society and Space, 37*(3), 484–503. https://doi.org/10.1177/0263775818822829

Ehler, C. N. (2021). Two Decades of Progress in Marine Spatial Planning. *Marine Policy, 132*(5787), 104134. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104134

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive Governance of Social-Ecological Systems. *Annual Review of Environment and Resources, 30*(1), 441–473. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511

Frazão Santos, C., Agardy, T., Andrade, F., Calado, H., Crowder, L. B., Ehler, C. N., García-Morales, S., Gissi, E., Halpern, B. S., Orbach, M. K., Pörtner, H.-O., & Rosa, R. (2020). Integrating Climate Change in Ocean Planning. *Nature Sustainability, 3*(7), 505–516. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0513-x

Frazão Santos, C., Agardy, T., Crowder, L. B., Day, J. C., Pinsky, M. L., Himes-Cornell, A., Reimer, J. M., García-Morales, S., Bennett, N. J., Lombard, A. T., Calado, H., Scherer, M., Flannery, W., Wedding, L. M., & Gissi, E. (2024). Key Components of Sustainable Climate-Smart Ocean Planning. *npj Ocean Sustainability, 3*(1), 10. https://doi.org/10.1038/s44183-024-00045-x

Karcher, D. B., Tuohy, P., Cooke, S. J., & Cvitanovic, C. (2024). Knowledge Exchange at the Interface of Marine Science and Policy: A Review of Progress and Research Needs. *Ocean & Coastal Management, 253*, 107137. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107137

Nugraha, A., & Chen, R. L. (2023). The Current Legal Regime of the Indonesian Outer Small Islands. *Griffith Law Review, 32*(4), 455–480. https://doi.org/10.1080/10383441.2024.2362499

Satumanatpan, S., Chuenwongarun, K., Piyawongnarat, T., Plathong, S., & Zhang, Z. (2025). Pathways in Marine Spatial Planning: A Systematic Review of Drivers and Enabling Conditions in the Asia-Pacific. *Frontiers in Marine Science, 12*, 1659088. https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1659088

Shucksmith, R. J., & Kelly, C. (2014). Data Collection and Mapping – Principles, Processes and Application in Marine Spatial Planning. *Marine Policy, 50*(PA), 27–33. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.05.006

Singh, P. (2026). Marine Spatial Planning in the Pacific Islands – A Transformative Approach to Ocean Governance? *Frontiers in Marine Science, 13*, 1842952. https://doi.org/10.3389/fmars.2026.1842952

Singh, P., Linnér, B.-O., & Singh, A. A. (2025). Marine Spatial Planning and Ocean Governance in Small Island Developing States. *Regional Environmental Change, 25*(3), 91. https://doi.org/10.1007/s10113-025-02412-x

Vinata, R. T., Kumala, M. T., & Yustisia Serfiyani, C. (2023). Climate Change and Reconstruction of Indonesia's Geographic Basepoints: Reconfiguration of Baselines and Indonesian Archipelagic Sea Lanes. *Marine Policy, 148*(1), 105443. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105443

Zuercher, R., Ban, N. C., Flannery, W., Guerry, A. D., Halpern, B. S., Magris, R. A., Mahajan, S. L., Motzer, N., Spalding, A. K., Stelzenmüller, V., & Kramer, J. G. (2022). Enabling Conditions for Effective Marine Spatial Planning. *Marine Policy, 143*, 105141. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105141

Zuercher, R., Motzer, N., Magris, R. A., & Flannery, W. (2022). Narrowing the Gap Between Marine Spatial Planning Aspirations and Realities. *ICES Journal of Marine Science, 79*(3), 600–608. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac009

10.xxxx/nbgr.vXxX.xxxx