

Tinjauan Pustaka: Metode Analisis Perubahan Morfologi Pantai

Eko Hadi Santoso^{a,b*}

^aDepartemen Teknik Geomatika, ITS, Kampus Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

^bStasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak, BMKG, Krembangan, Surabaya, 60177, Indonesia

*Korespondensi Penulis: eko.santoso@bmkg.go.id



Dikirim: 31 Agustus 2025;

Diterima: 5 September 2025

Diterbitkan: 5 September 2025

Abstrak. Perubahan morfologi pantai menjadi isu penting dalam pengelolaan pesisir karena memengaruhi ekosistem, infrastruktur, dan ketahanan wilayah, terutama di Indonesia yang memiliki garis pantai kedua terpanjang di dunia. Kajian ini meninjau perkembangan metode analisis perubahan morfologi pantai periode 2000-2025 serta mengidentifikasi kelebihan, keterbatasan, dan relevansinya di kawasan tropis, dengan fokus pada pesisir utara Jawa Timur. Metodologi mengikuti protokol PRISMA melalui identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan seleksi akhir, menghasilkan 88 artikel dari *Scopus* dan pustaka nasional. Hasil menunjukkan metode DSAS/GIS dan citra satelit mendominasi studi jangka panjang, sedangkan UAV/LiDAR unggul untuk pemantauan lokal berpresisi tinggi. Model numerik efektif mensimulasikan skenario ekstrem, tetapi memerlukan data rinci yang masih terbatas di Indonesia. Dalam dekade terakhir, *machine learning* dan *Google Earth Engine* mulai diterapkan untuk analisis otomatis skala besar, meskipun terkendala minimnya data *ground truth*. Kajian ini menekankan perlunya integrasi multi-metode untuk pemahaman komprehensif dan pengembangan pendekatan hibrid bagi mitigasi abrasi, adaptasi iklim, dan perencanaan pesisir berkelanjutan.

Kata kunci: DSAS; *Google Earth Engine*; *machine learning*; morfologi pantai; *shoreline changes*; UAV/LiDAR.

Methods for Analyzing Coastal Morphological Changes: a Literature Review

Abstract. Coastal morphology changes are a critical issue in coastal management as they affect ecosystems, infrastructure, and regional resilience, particularly in Indonesia, which has the world's second-longest coastline. This study reviews the development of methods for analyzing coastal morphology changes during 2000-2025 and identifies their advantages, limitations, and applicability in tropical regions, with a focus on the northern coast of East Java. The methodology follows the PRISMA protocol through identification, screening, eligibility assessment, and final selection, resulting in 88 articles from Scopus and national literature. Results show that DSAS/GIS and satellite imagery dominate long-term studies, while UAV/LiDAR excels in high-precision local monitoring. Numerical models effectively simulate extreme scenarios but require detailed data, which remain limited in Indonesia. In the past decade, machine learning and Google Earth Engine have been applied for large-scale automated analyses, though constrained by scarce ground-truth data. This review emphasizes the need for multi-method integration to achieve comprehensive understanding and the development of hybrid approaches for coastal erosion mitigation, climate adaptation, and sustainable coastal planning.

Keywords: coastal morphology; DSAS; *Google Earth Engine*; *machine learning*; *shoreline changes*; UAV/LiDAR.

I. PENDAHULUAN

Perubahan morfologi pantai merupakan isu kritis dalam kajian pesisir karena pantai bersifat dinamis serta dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara proses oseanografi, atmosfer, geologi, dan aktivitas manusia [1], [2], [3]. Perubahan tersebut mencakup erosi, akresi, migrasi garis pantai, hingga transformasi bentang alam pesisir pada skala harian hingga dekadal. Dinamika ini berimplikasi signifikan terhadap ekosistem pesisir, keberlanjutan sumber daya alam, serta kerentanan infrastruktur dan permukiman manusia [4].

Dalam konteks global, laju perubahan garis pantai semakin cepat akibat kombinasi faktor alami, yaitu kenaikan muka laut, badai tropis, variabilitas iklim, dan faktor antropogenik seperti reklamasi, pembangunan pelabuhan, serta penambangan pasir laut [2], [3]. Kondisi ini semakin mengkhawatirkan di kawasan tropis, termasuk Indonesia, yang memiliki garis pantai sepanjang lebih dari 99.000 km dan populasi pesisir padat. Di Jawa Timur, kasus abrasi serius dilaporkan di Kabupaten Gresik, Lamongan, dan Sidoarjo, yang menyebabkan hilangnya lahan pertanian, rusaknya tambak, dan ancaman terhadap pemukiman [5], [6].

Bagi Indonesia, kerentanan pesisir bukan hanya persoalan lokal, melainkan juga terkait dengan ketahanan nasional. Abrasi pantai berdampak pada hilangnya infrastruktur publik, menurunnya produktivitas perikanan dan tambak, serta meningkatnya risiko bencana pesisir. Kondisi tersebut berdampak pada menurunnya ketahanan wilayah pesisir, mengingat sektor perikanan, tambak, dan infrastruktur pelabuhan merupakan penopang penting bagi ketahanan pangan dan jalur perdagangan nasional. Oleh sebab itu, pengembangan metodologi analisis perubahan morfologi pantai yang adaptif, akurat, dan kontekstual menjadi kebutuhan strategis bagi pengelolaan wilayah pesisir [7], [8].

Metode analisis perubahan morfologi pantai telah berkembang pesat mulai dari survei lapangan tradisional hingga pendekatan modern berbasis penginderaan jauh, DSAS, pemodelan numerik, UAV/LiDAR, dan *machine learning*. DSAS banyak digunakan untuk analisis jangka panjang berbasis citra satelit [9], [10], sementara UAV dan LiDAR menawarkan akurasi tinggi untuk studi lokal [11]. Di sisi lain, perkembangan *machine learning* dan *platform* seperti *Google Earth Engine* (GEE) memungkinkan analisis otomatis dalam skala besar [12], [13].

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi signifikan, masih terdapat beberapa kesenjangan yang memerlukan kajian lebih lanjut. Pertama, belum ada tinjauan sistematis yang menilai integrasi lintas metode secara komprehensif

(misalnya kombinasi DSAS dengan *machine learning*, atau UAV dengan model numerik) di kawasan tropis. Kedua, sebagian besar penelitian berfokus pada konteks global atau subtropis, sementara kajian komparatif di wilayah tropis padat penduduk, seperti pesisir utara Jawa, masih minim. Ketiga, validasi lapangan di Indonesia seringkali terkendala keterbatasan data oseanografi dan akses spasial, sehingga metode yang ada belum sepenuhnya dikontekstualisasikan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan melakukan tinjauan sistematis atas metode analisis perubahan morfologi pantai pada periode 2000–2025, menggunakan protokol PRISMA. Pertanyaan utama yang ingin dijawab adalah:

1. Bagaimana perkembangan metode analisis perubahan morfologi pantai dari waktu ke waktu?
2. Apa saja kelebihan, keterbatasan, dan konteks penerapan masing-masing metode dalam studi perubahan morfologi pantai?
3. Bagaimana arah perkembangan metode analisis perubahan morfologi pantai serta relevansinya untuk konteks tropis, khususnya di pesisir utara Jawa Timur?

Dengan demikian, tinjauan ini diharapkan tidak hanya memberikan sintesis global, tetapi juga menawarkan kerangka metodologis yang relevan bagi riset dan kebijakan pengelolaan pesisir Indonesia.

II. METODOLOGI

Metodologi tinjauan sistematis ini disusun untuk menjamin transparansi, keterulangan, dan konsistensi dalam pemetaan perkembangan metode analisis perubahan morfologi pantai. Proses tinjauan dilakukan dengan mengacu pada kerangka *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) [14], melalui tahapan identifikasi pustaka, penyaringan, penilaian kelayakan, hingga pemilihan artikel akhir.

2.1 Strategi Pencarian Pustaka

Pencarian pustaka dilakukan melalui basis data *Scopus*, yang dipilih karena cakupan luasnya dalam bidang kelautan, geomorfologi, penginderaan jauh, dan teknik lingkungan, serta reputasinya sebagai salah satu basis data ilmiah terbesar yang digunakan secara global untuk studi sistematis [15]. Pemilihan satu basis data ini menjaga konsistensi dan kemudahan replikasi, meskipun juga membatasi lingkup (*scope*) artikel yang di-review. Untuk memastikan keterwakilan, pustaka nasional juga dikaji sebagai pembanding, khususnya studi kasus pesisir di Indonesia yang relevan namun tidak terindeks *Scopus* [6], [7].

Kata kunci pencarian meliputi: “*coastal morphology change*”, “*shoreline change analysis*”, “*coastal morphological evolution*”, “*coastal erosion and accretion*”, dan “*beach morphological change*”. Periode pencarian dibatasi pada tahun 2000 hingga 2025, untuk memberikan gambaran perkembangan metode analisis dalam dua dekade terakhir. Artikel yang dipertimbangkan hanya yang diterbitkan di jurnal terindeks *Scopus*, dengan pustaka nasional sebagai pembanding kontekstual.

2.2 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Untuk memastikan bahwa artikel yang dianalisis benar-benar relevan dengan tujuan penelitian, digunakan kriteria inklusi dan eksklusi yang berfungsi sebagai panduan seleksi. Kriteria ini membantu menyaring pustaka yang sesuai, menjaga kualitas metodologi, serta meminimalkan bias dalam proses tinjauan.

a) Inklusi

Artikel dimasukkan jika:

- Terbit tahun 2000-2025 di jurnal ilmiah (*Scopus* atau pustaka nasional relevan).
- Membahas perubahan morfologi pantai secara langsung.
- Menggunakan data empiris (citra satelit, UAV, LiDAR, survei lapangan, atau oseanografi).
- Menerapkan analisis spasial-temporal (DSAS, GIS, model numerik, *machine learning*).
- Fokus pada pantai alami/delta, bukan infrastruktur buatan.
- Menyajikan metodologi yang jelas untuk dievaluasi.

b) Eksklusi

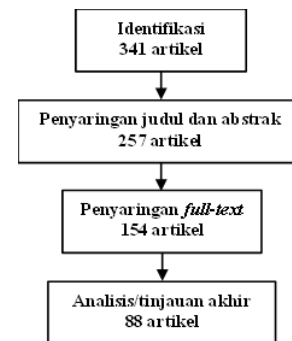
Artikel dikeluarkan jika:

- Terbit sebelum tahun 2000.
- Hanya membahas aspek ekologi/sosial tanpa fisik pantai.
- Berfokus pada struktur buatan (pemecah gelombang, reklamasi, pelabuhan).
- Tidak tersedia *full-text* atau hanya berupa prosiding singkat.
- Duplikat dari publikasi lain.

2.3 Proses Seleksi Pustaka

Proses seleksi pustaka dilakukan sesuai kerangka PRISMA. Pada tahap identifikasi awal, ditemukan sebanyak 341 artikel dari *Scopus*. Setelah melalui penyaringan judul dan abstrak, jumlah artikel menyusut menjadi 257. Tahap berikutnya adalah *full-text screening*, yang menghasilkan 154 artikel layak. Pada tahap akhir, setelah kriteria inklusi-eksklusi diterapkan, jumlah artikel yang dipilih untuk dianalisis dalam tinjauan ini adalah 88 artikel. Proses seleksi ditunjukkan secara visual dalam Gambar 1, yang menggambarkan alur

PRISMA mulai dari identifikasi hingga pemilihan akhir artikel.



Gambar. 1. Diagram alur PRISMA proses seleksi artikel.

2.4 Keterbatasan Strategi Pencarian

Strategi pencarian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, penggunaan *Scopus* sebagai satu-satunya basis data membuat artikel dari *database* lain seperti *Web of Science* atau *SpringerLink* mungkin tidak tercakup. Kedua, pembatasan tahun publikasi 2000-2025 berpotensi mengabaikan studi klasik yang relevan. Ketiga, pustaka dalam bahasa Indonesia atau publikasi lokal yang tidak terindeks *Scopus* bisa terlewat, meskipun sebagian telah diakomodasi melalui penelusuran pustaka nasional sebagai pembanding [5], [6], [8]. Oleh karena itu, hasil penelitian ini harus dipahami dalam batas lingkup (*scope*) yang telah ditentukan.

III. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini menyajikan analisis sintetik dari 88 artikel terpilih melalui proses PRISMA. Pustaka dikelompokkan berdasarkan tema metodologi analisis perubahan morfologi pantai, meliputi: (1) analisis berbasis DSAS/GIS, (2) penginderaan jauh dan citra satelit, (3) kombinasi penginderaan jauh dengan analisis statistik/geospasial, (4) pemodelan numerik berbasis proses, (5) survei presisi tinggi menggunakan LiDAR/UAV, serta (6) pendekatan berbasis data dan *machine learning*.

3.1 Analisis Berbasis DSAS dan GIS

DSAS merupakan salah satu metode paling banyak digunakan, terutama karena kemampuannya menghitung laju perubahan garis pantai (*erosion-accretion rates*) dengan regresi linier dan *end point rate* [9], [10]. Integrasi dengan GIS memudahkan pemetaan spasial-temporal yang luas.

Metode ini sangat cocok untuk garis pantai panjang dengan data historis yang konsisten, misalnya memanfaatkan citra Landsat resolusi 30 m. Namun, DSAS kurang optimal di wilayah dengan dinamika pesisir cepat

seperti delta di Jawa yang dipengaruhi sedimentasi tinggi dan aktivitas antropogenik, karena metode ini tidak menangkap perubahan jangka pendek akibat peristiwa ekstrem [3], [4].

3.2 Penginderaan Jauh dan Citra Satelit

Pemanfaatan citra satelit multitemporal (Landsat, Sentinel) menjadi tren sejak 2006. Pendekatan ini unggul untuk memantau dinamika jangka panjang karena data gratis dan cakupan spasial luas [6]. Namun, resolusi 10-30 m tidak cukup detail untuk memantau garis pantai yang kompleks, misalnya di kawasan tambak atau permukiman padat di pesisir Surabaya dan Sidoarjo.

Teknik seperti *Normalized Difference Water Index* NDWI atau klasifikasi terawasi sering digunakan untuk delineasi garis pantai, tetapi akurasinya menurun di area dengan vegetasi mangrove lebat atau struktur buatan [5], [16].

3.3 Kombinasi Remote Sensing dengan Statistik

Penggabungan citra satelit dengan analisis statistik menghasilkan estimasi kuantitatif yang lebih akurat. Maiti dan Bhattacharya mengembangkan regresi prediktif tren perubahan garis pantai, sedangkan Kroon menekankan pentingnya analisis tren musiman-dekadal [16], [17].

Metode ini cocok untuk mempelajari hubungan faktor oseanografi dengan perubahan morfologi pantai, tetapi hasilnya sangat bergantung pada kualitas seri *temporal data*. Untuk Indonesia, keterbatasan arsip data satelit berkualitas tinggi (misalnya sebelum 2000-an) menjadi hambatan validasi jangka panjang.

3.4 Pemodelan Numerik Berbasis Proses

Pemodelan numerik (misalnya XBeach) digunakan untuk mensimulasikan interaksi gelombang, pasang surut, dan transpor sedimen. Studi Shamji dan Vousdoukas menunjukkan efektivitasnya dalam memprediksi dampak badai terhadap morfologi pantai [4], [18].

Metode ini sangat relevan untuk skenario perubahan iklim ekstrem, tetapi memerlukan data input detail (batimetri, arus, sedimen) yang di Indonesia sering terbatas [8]. Biaya dan kebutuhan komputasi tinggi juga menjadi tantangan.

3.5 Survei Presisi Tinggi (LiDAR/UAV)

LiDAR dan UAV menghasilkan data topografi pantai berpresisi tinggi untuk memantau perubahan jangka pendek. Kim menunjukkan bahwa LiDAR efektif untuk pantai berenergi tinggi, sementara UAV lebih fleksibel dan berbiaya rendah [11].

Untuk konteks Indonesia, UAV cocok digunakan di kawasan padat penduduk dengan ancaman abrasi langsung pada infrastruktur, seperti pesisir Surabaya atau Sidoarjo.

Namun, cakupan wilayah yang sempit membatasi penggunaannya untuk studi berskala regional [12].

3.6 Pendekatan Berbasis Data dan Machine Learning

Metode terbaru menggunakan algoritma *machine learning* dan platform seperti GEE. Gunasinghe menggabungkan CoastSat dan GEE untuk analisis garis pantai di Sri Lanka, sedangkan Souiri (2025) memanfaatkan *deep learning* untuk otomatisasi deteksi garis pantai [12].

Keunggulannya adalah skalabilitas dan kemampuan prediksi adaptif, tetapi penerapannya di Indonesia masih terbatas karena minimnya data *ground truth* untuk melatih model serta keterbatasan validasi lapangan [6].

3.7 Relevansi Metode untuk Konteks Pesisir Jawa/Indonesia

Berdasarkan evaluasi pustaka, relevansi tiap metode dapat disimpulkan sebagai berikut:

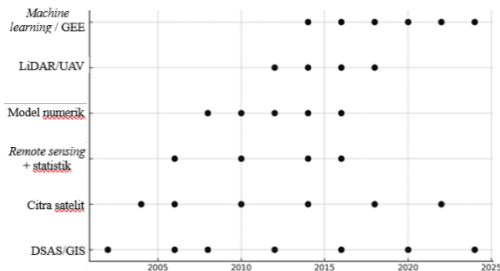
- DSAS/GIS: cocok untuk garis pantai panjang seperti utara Jawa, namun kurang detail di area delta dengan perubahan cepat.
- Citra satelit: efektif memantau tren jangka panjang (1990-2025) di Jawa, tetapi terbatas untuk area tambak/permukiman padat.
- Kombinasi satelit dan statistik: berguna untuk tren jangka menengah, tetapi kualitas data lokal masih menjadi kendala.
- Model numerik: relevan untuk simulasi dampak badai dan iklim ekstrem, namun terkendala data *input* detail di Indonesia.
- LiDAR/UAV: sangat sesuai untuk kawasan padat penduduk (Surabaya, Sidoarjo, Gresik), meski cakupannya terbatas.
- *Machine learning*/GEE: potensial untuk analisis skala besar, tetapi membutuhkan dukungan data validasi lokal.

Relevansi metode-metode tersebut dapat dipahami lebih jelas melalui perbandingan sistematis antara cakupan temporal, resolusi spasial, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing. Ringkasan perbandingan ini disajikan pada Tabel 1, yang memberikan gambaran praktis mengenai kondisi kapan suatu metode lebih sesuai atau justru kurang efektif diterapkan di pesisir Indonesia.

Selain itu, perkembangan metode analisis morfologi pantai dalam dua dekade terakhir memperlihatkan pergeseran fokus penelitian dari pendekatan konvensional menuju metode hibrid dan berbasis data. Gambar 2 menunjukkan kronologi kemunculan dan adopsi berbagai metode tersebut, yang menegaskan transisi bertahap menuju integrasi lintas-metode yang lebih canggih dan komprehensif untuk menjawab kompleksitas dinamika pesisir.

Tabel 1. Perbandingan metode analisis perubahan morfologi pantai.

Metode (Cakupan Temporal)	Resolusi Spasial	Kelebihan	Keterbatasan	Konteks Indonesia
DSAS/ GIS (Multi-dekade)	Menengah	Mudah diaplikasikan, kuantitatif	Bergantung pada data historis, kurang menangkap perubahan jangka pendek	Cocok untuk pantai panjang (utara Jawa), kurang detail untuk delta cepat berubah
Citra satelit (Multi-dekade)	Menengah-rendah	Data gratis, cakupan luas	Resolusi terbatas, sulit di area vegetasi/ struktur buatan	Baik untuk tren jangka panjang; terbatas di pesisir tambak Surabaya-Sidoarjo
Remote sensing + statistik (Multi-dekade)	Menengah	Analisis tren dan prediksi lebih kuat	Bergantung kualitas data temporal, potensi bias statistik	Bermanfaat di pesisir Jawa, tapi keterbatasan arsip data sebelum 2000 jadi kendala
Model numerik (Jangka pendek)	Tinggi	Simulasi peristiwa ekstrem (badai, iklim)	Butuh data detail, komputasi tinggi	Potensial untuk mitigasi iklim, tapi data batimetri/sedimen lokal masih minim
LiDAR/ UAV (Jangka pendek)	Sangat tinggi	Presisi tinggi, fleksibel	Biaya tinggi, cakupan sempit	Ideal untuk area padat penduduk (Surabaya, Sidoarjo, Gresik)
Machine learning / GEE, (Multi-dekade)	Menengah-tinggi	Otomatis, prediktif, adaptif	Butuh data latih besar, validasi intensif	Potensial besar, tapi terkendala minimnya data ground truth di Indonesia



Gambar 2. Garis waktu perkembangan metode analisis perubahan morfologi pantai.

Dengan demikian, arah penelitian di Indonesia perlu difokuskan pada pengembangan pendekatan hibrid yang memadukan keunggulan metode konvensional (DSAS, citra satelit) dengan teknologi mutakhir (*machine learning*, UAV, pemodelan numerik), serta memperkuat validasi lapangan agar hasil lebih kontekstual dan mendukung kebijakan pengelolaan pesisir [7], [8].

IV. PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan interpretasi dari hasil tinjauan pustaka yang telah disajikan sebelumnya. Fokus pembahasan diarahkan pada sintesis kritis antar-metode, identifikasi kesenjangan penelitian, serta implikasi teoretis dan praktis. Dengan demikian, hasil kajian dapat dihubungkan langsung dengan tujuan penelitian serta kebutuhan pengelolaan pesisir, khususnya di Indonesia.

4.1 Sintesis Temuan Utama

Hasil tinjauan pustaka memperlihatkan bahwa metode berbasis DSAS/GIS dan citra satelit merupakan pendekatan paling dominan. DSAS, yang dikembangkan oleh USGS, menjadi standar karena kemudahan implementasi, dukungan perangkat lunak GIS, dan ketersediaan data historis Landsat [9], [10]. Metode ini efektif untuk analisis jangka panjang (multi-dekadal), tetapi kurang responsif terhadap perubahan musiman atau akibat badai ekstrem [3], [4].

Seiring kemajuan teknologi, muncul metode UAV/LiDAR yang mampu menghasilkan data presisi tinggi (*cm-level*) untuk memantau perubahan jangka pendek [11]. Namun, cakupan terbatas membuatnya lebih sesuai untuk studi lokal. Sementara itu, model numerik berbasis proses seperti XBeach digunakan untuk mensimulasikan interaksi gelombang-pasang surut-transpor sedimen dalam skenario iklim ekstrem [4], [18].

Dalam dekade terakhir, terjadi lonjakan pemanfaatan *machine learning* dan *big data platforms* seperti GEE yang memungkinkan analisis otomatis dan prediktif atas data satelit multitemporal [12], [13]. Metode ini memperlihatkan arah baru menuju analisis adaptif.

4.2 Sintesis Kritis Antar Metode

Setiap metode memiliki skala temporal, spasial, dan konteks praktis yang berbeda, sehingga integrasi lintas metode menjadi penting. Untuk memperjelas perbedaan karakteristik tersebut, disusun matriks perbandingan (Tabel 2) yang menghubungkan skala waktu, skala ruang, dan relevansi praktis masing-masing metode.

Tabel 2. Matriks keterkaitan skala waktu, skala ruang, dan kebutuhan praktis.

Metode (Skala waktu)	Skala Ruang	Kebutuhan Praktis	Potensi Integrasi
DSAS/GIS (Multi-dekade)	Regional (10-100 km)	Tren jangka panjang erosi/akresi	Dikombinasikan dengan UAV untuk detail lokal
Remote sensing + statistik (Multi-dekade)	Nasional-regional	Pemantauan luas, biaya rendah	Digabungkan dengan <i>machine learning</i> untuk otomatisasi analisis
Model numerik (Jam-mingguan)	Lokal-meso (1-10 km)	Prediksi dampak badai, skenario iklim ekstrem	Dikombinasikan dengan data satelit / <i>machine learning</i>
LiDAR/UAV (Harian-tahunan)	Lokal (< 5 km)	Monitoring detail infrastruktur, pantai padat penduduk	Validasi lapangan untuk DSAS / satelit
Machine learning / GEE (Multi-dekade)	Nasional-global	Analisis prediktif otomatis, skalabilitas besar	Integrasi dengan DSAS / survei lokal

Sintesis ini menegaskan bahwa tidak ada satu metode tunggal yang cukup, melainkan diperlukan pendekatan hibrid. Misalnya, DSAS untuk tren jangka panjang, UAV untuk validasi lokal, dan *machine learning* / GEE untuk otomasi prediksi spasial.

4.3 Kesenjangan Penelitian

Meskipun perkembangan metodologi signifikan, beberapa kesenjangan tetap terlihat:

- Resolusi temporal dan spasial terbatas. Sebagian besar studi mengandalkan Landsat (30 m, resolusi bulanan), sehingga dinamika musiman atau dampak badai ekstrem kurang terdeteksi [16].
- Keterbatasan data lapangan di Indonesia. Validasi lokal sulit dilakukan karena akses data oseanografi (gelombang, arus, pasang surut) dari BMKG atau lembaga lainnya terbatas dan tidak terbuka penuh [8].
- Penggunaan UAV/LiDAR masih jarang. Terutama di pesisir Jawa, meskipun potensial untuk pemantauan abrasi di kawasan industri/padat penduduk.
- Integrasi metode masih minim. Belum banyak penelitian yang menggabungkan DSAS dengan *machine learning*, atau UAV/LiDAR dengan model numerik, khususnya di wilayah tropis.
- Penerapan *machine learning* terkendala. Tantangan utama adalah kebutuhan data latih besar, *ground truth* terbatas, dan interpretabilitas model [12].

4.4 Implikasi Teoritis

Temuan ini memperkuat pandangan bahwa sistem pantai merupakan *complex adaptive systems*, dengan interaksi non-linear antara faktor iklim, oseanografi, dan antropogenik [17]. Metode tradisional yang deterministik (misalnya regresi linear di DSAS) hanya memadai untuk tren rata-rata, tetapi gagal menangkap dinamika adaptif.

Dengan hadirnya *machine learning* dan *big data*, paradigma geomorfologi pantai mulai bergeser, dari deterministik (analisis tren linear) menuju probabilistik (simulasi skenario numerik), hingga adaptif (*machine learning* berbasis pola non-linear). Perubahan paradigma ini memperluas kerangka teori geomorfologi ke arah analisis multiskala dinamis, sehingga lebih mampu menjelaskan kerentanan pesisir terhadap perubahan iklim [3], [4].

4.5 Implikasi Praktis

Secara praktis, hasil tinjauan ini relevan untuk pengelolaan wilayah pesisir Indonesia:

- DSAS/GIS: cocok untuk monitoring jangka panjang garis pantai utara Jawa dengan biaya rendah.
- UAV/LiDAR: bermanfaat bagi pemda Surabaya, Sidoarjo, dan Gresik untuk pemetaan detail area tambak, industri, dan pemukiman rawan abrasi.

- Model numerik: dapat digunakan untuk menilai risiko banjir rob dan badai di kawasan pesisir rendah seperti Semarang dan Jakarta.
- *Machine learning*/GEE: potensial untuk sistem peringatan dini berbasis *big data* yang dapat diakses lintas lembaga.

Integrasi metode-metode ini dapat mendukung kebijakan adaptasi perubahan iklim serta perencanaan tata ruang pesisir berkelanjutan [6], [7].

4.6 Keterbatasan Tinjauan

Tinjauan ini memiliki beberapa keterbatasan:

- Basis data tunggal. Hanya menggunakan *Scopus*, sehingga publikasi relevan dari *Web of Science* atau pustaka nasional bisa terlewat.
- Bias bahasa. Artikel non-Inggris dikecualikan, padahal bisa memuat konteks lokal penting.
- Kurangnya akses data primer. Tidak semua hasil studi dapat diverifikasi, terutama data lapangan.

Karenanya, hasil sintesis ini perlu dipahami dalam batas cakupan tersebut.

4.7 Implikasi untuk Pesisir Jawa Timur

Pesisir utara Jawa Timur (Surabaya, Sidoarjo, Gresik) menghadapi dinamika morfologi yang kompleks akibat kombinasi faktor iklim, oseanografi, dan antropogenik. Relevansi metode untuk konteks lokal dapat dirangkum sebagai berikut:

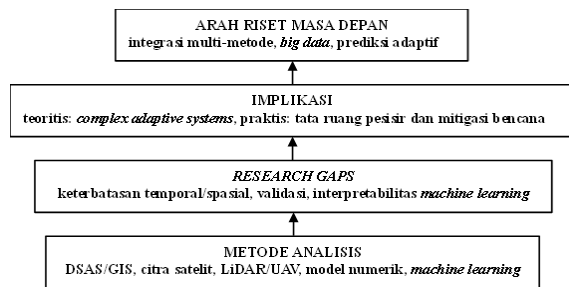
- DSAS/satelit: efektif untuk memantau abrasi-akresi sejak 1990-an, terutama di kawasan tambak Sidoarjo.
- UAV/LiDAR: penting untuk memantau perubahan detail garis pantai dekat infrastruktur industri di Gresik dan permukiman padat di Surabaya.
- Model numerik: berguna untuk simulasi banjir rob dan proyeksi dampak kenaikan muka air laut.
- *Machine learning*/GEE: potensial untuk analisis adaptif di wilayah dengan data satelit panjang, tetapi perlu validasi lapangan yang intensif.

Dengan demikian, strategi pengelolaan pantai di Jawa Timur sebaiknya berbasis pendekatan hibrid, yang mengintegrasikan monitoring jangka panjang, detail lokal, dan pemodelan prediktif. Hal ini dapat mendukung kebijakan pemerintah daerah dalam mitigasi abrasi, perencanaan infrastruktur pesisir, serta adaptasi perubahan iklim [6], [8].

4.8 Model Konseptual

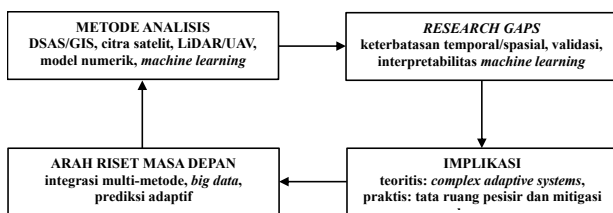
Untuk memperjelas hubungan antara metode analisis, kesenjangan penelitian, implikasi, dan arah riset masa depan, kajian ini menyajikan dua model konseptual: piramida dan siklus. Kedua model ini memberikan

perspektif yang berbeda namun saling melengkapi dalam memahami dinamika riset perubahan morfologi pantai.



Gambar 3. Model konseptual berbentuk piramida.

Model piramida (Gambar 3) menekankan struktur hierarkis. Pondasinya adalah metode analisis (DSAS/GIS, citra satelit, UAV/LiDAR, model numerik, dan *machine learning*). Dari metode tersebut muncul *research gaps* berupa keterbatasan temporal-spasial, kebutuhan validasi, dan tantangan interpretabilitas *machine learning*. *Gaps* ini kemudian memunculkan implikasi teoretis bahwa sistem pantai merupakan *complex adaptive systems*, serta implikasi praktis dalam tata ruang pesisir dan mitigasi bencana. Puncak piramida menegaskan arah riset masa depan berupa integrasi multi-metode, pemanfaatan *big data*, dan prediksi adaptif.



Gambar 4. Model konseptual berbentuk siklus.

Model siklus (Gambar 4) menekankan sifat penelitian yang dinamis dan berulang. Dari metode analisis lahir temuan, yang kemudian mengungkap *gaps*. *Gaps* tersebut diterjemahkan menjadi implikasi, lalu mendorong agenda riset baru. Agenda tersebut kembali memperkaya atau bahkan mengubah metode analisis yang digunakan, membentuk siklus penelitian berkesinambungan. Model ini menegaskan bahwa riset morfologi pantai berkembang secara iteratif sesuai tantangan baru.

Kedua model ini saling melengkapi, yaitu piramida menegaskan kerangka hierarkis pengembangan riset, sedangkan siklus menekankan dinamika berkelanjutan. Tabel 3 berikut membandingkan fokus, kelebihan, dan keterbatasan model piramida dan siklus, sehingga membantu peneliti menentukan konteks penggunaan yang paling sesuai. Dengan demikian, model konseptual ini tidak hanya merangkum temuan tinjauan pustaka, tetapi

juga memberikan kerangka berpikir untuk pengembangan penelitian di masa depan.

Tabel 3. Perbandingan model piramida dan siklus.

Aspek	Model Piramida	Model Siklus
Fokus utama	Struktur hierarkis dari metode, <i>gaps</i> , implikasi hingga arah riset	Dinamika berulang dari metode → <i>gaps</i> → implikasi → metode
Kelebihan	Menunjukkan tahapan sistematis dan bertingkat	Menekankan sifat adaptif, iteratif, dan berkelanjutan
Keterbatasan	Kurang menampilkan sifat dinamis	Kurang menekankan prioritas hierarkis atau pondasi metodologi
Konteks penggunaan	Cocok untuk menegaskan pondasi ke arah pengembangan riset	Cocok untuk menggambarkan siklus pembaruan metodologi

V. KESIMPULAN

Tinjauan sistematis ini menegaskan bahwa penelitian mengenai perubahan morfologi pantai telah berkembang pesat seiring dengan kemajuan teknologi penginderaan jauh dan analisis spasial. Metode berbasis DSAS dan GIS masih menjadi pondasi utama karena kemudahan aplikasi dan ketersediaan data historis [9], [10]. Perkembangan berikutnya menunjukkan pemanfaatan citra satelit multitemporal, survei presisi dengan UAV dan LiDAR, serta pemodelan numerik berbasis proses [4], [11]. Dalam dekade terakhir, terjadi pergeseran ke arah pendekatan berbasis data melalui *machine learning* dan pemanfaatan *big data* di platform seperti GEE [12], [13].

Kontribusi utama dari tinjauan ini adalah menyajikan sintesis yang menunjukkan bagaimana beragam metode tersebut saling melengkapi dalam memahami dinamika pantai. Selain itu, tinjauan ini menawarkan kerangka konseptual untuk konteks tropis yang menekankan validasi lokal, integrasi lintas metode, serta adaptasi metodologi agar sesuai dengan karakteristik pesisir berpenduduk padat seperti di Jawa. Identifikasi *research gaps* meliputi keterbatasan temporal dan spasial, keterbatasan akses data oseanografi, kebutuhan validasi lapangan yang konsisten, serta tantangan interpretabilitas algoritma *machine learning* [8], [16].

Ke depan, penelitian perlu difokuskan pada integrasi multi metode yang menggabungkan kekuatan penginderaan jauh untuk tren jangka panjang, UAV/LiDAR untuk detail lokal, dan model numerik untuk simulasi skenario ekstrem. Pemanfaatan *big data* dan *machine learning* perlu ditingkatkan untuk menghasilkan prediksi spasial-temporal yang adaptif, dengan tetap memperhatikan validasi lapangan dan transparansi model [3], [4].

Bagi Indonesia, khususnya pesisir utara Jawa Timur, nilai tambah kajian ini adalah menegaskan bahwa pendekatan hibrid sangat relevan untuk mitigasi abrasi, pengelolaan tambak, perlindungan infrastruktur, dan adaptasi perubahan iklim. Integrasi DSAS dan citra satelit dapat memantau tren jangka panjang abrasi-akresi, sementara UAV/LiDAR berguna untuk monitoring cepat di kawasan padat penduduk seperti Surabaya dan Gresik. *Machine learning* dan GEE membuka peluang pengembangan sistem peringatan dini berbasis *big data*, meskipun masih membutuhkan dukungan data validasi nasional. Dengan demikian, kajian ini diharapkan menjadi pijakan bagi riset selanjutnya sekaligus mendukung kebijakan pengelolaan wilayah pesisir yang lebih adaptif dan berkelanjutan [6], [7].

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak Surabaya atas dukungan akademik, penyediaan data, serta fasilitas yang diberikan dalam penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para staf dan rekan sejawat di Stasiun Meteorologi Maritim yang telah memberikan masukan berharga selama proses peninjauan pustaka.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. L. Revell, "Coastal geomorphology and shoreline change," *Journal of Coastal Research*, vol. 18, no. 2, pp. 235–245, 2002.
- [2] P. Ruggiero, "Shoreline response to climate change and human activities," *Coastal Engineering*, vol. 47, no. 4, pp. 295–312, 2003.
- [3] L. Mentaschi, M. I. Voudoukas, J. F. Pekel, E. Voukouvalas, and L. Feyen, "Global long-term observations of coastal erosion and accretion," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, p. 12876, 2018.
- [4] M. I. Voudoukas, "Coastal vulnerability and morphological response to storms," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 9, pp. 2543–2557, 2011.
- [5] M. A. Z. Fuad, "Analisis perubahan garis pantai pesisir Kabupaten Gresik berbasis citra satelit multitemporal," *Jurnal Kelautan Tropis*, vol. 20, no. 1, pp. 45–56, 2017.
- [6] F. Yulianto, "Pemanfaatan penginderaan jauh untuk analisis perubahan morfologi pantai di pesisir Jawa Timur," *Jurnal Ilmu Kelautan*, vol. 24, no. 2, pp. 75–86, 2019.
- [7] B. W. Mutaqin, "Dinamika perubahan garis pantai di Indonesia: Studi kasus Jawa Barat," *Indonesian Journal of Geography*, vol. 49, no. 1, pp. 55–67, 2017.
- [8] S. Siswanto, "Pemodelan numerik perubahan garis pantai di wilayah tropis Indonesia," *Jurnal Geomatika*, vol. 29, no. 1, pp. 12–25, 2025.
- [9] M. Mahapatra, "Shoreline change analysis along the coast of South Gujarat, India, using Digital Shoreline Analysis System," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 42, no. 2, pp. 325–334, 2014.
- [10] R. Baral, "Shoreline change analysis using DSAS in Odisha coast, India," *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, no. 3, p. 99, 2018.
- [11] D. Kim, "Application of UAV and LiDAR for high-resolution shoreline monitoring," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 9, p. 873, 2017.
- [12] A. Gunasinghe, "Automated shoreline detection using CoastSat and Google Earth Engine," *Remote Sensing of Environment*, vol. 268, p. 112763, 2022.
- [13] A. Souiri, "Deep learning approach for automated shoreline change analysis," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 118, p. 103345, 2025.
- [14] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and The PRISMA Group, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement," *PLoS Medicine*, vol. 6, no. 7, p. e1000097, 2009.
- [15] M. E. Falagas, E. I. Pitsouni, G. A. Malietzis, and G. Pappas, "Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses," *The FASEB Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 338–342, 2008.
- [16] S. Maiti and A. K. Bhattacharya, "Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach," *Marine Geology*, vol. 257, no. 1–4, pp. 11–23, 2009.
- [17] A. Kroon, "Coastal morphodynamic response to seasonal wave variability," *Geomorphology*, vol. 97, no. 3–4, pp. 309–321, 2008.
- [18] V. R. Shamji, "Application of numerical modeling to coastal erosion and accretion," *Coastal Engineering Journal*, vol. 52, no. 1, pp. 1–23, 2010.