

## ANALISIS SPASIO-TEMPORAL TERHADAP INVASI VEGETASI OPORTUNISTIK DI HUTAN MANGROVE TERDEGRADASI

**Syaiful Eddy**

Program Studi Sains Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI  
Palembang, Jalan Jend. A. Yani Lorong Gotong Royong, Palembang,  
Sumatera Selatan 30116, Indonesia

Email: [syaifulreddy@univpgri-palembang.ac.id](mailto:syaifulreddy@univpgri-palembang.ac.id)

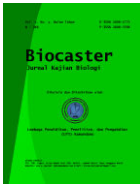
Submit: 19-05-2026; Revised: 08-06-2026; Accepted: 25-06-2026; Published: 06-07-2026

**ABSTRAK:** Aktivitas antropogenik seperti alih fungsi lahan dan pembalakan liar memicu degradasi masif kanopi mangrove, menurunkan stok karbon biru, serta memicu suksesi sekunder berupa invasi vegetasi oportunistik-invasif seperti *Nypa fruticans*. Pemantauan konvensional berbasis survei lapangan menghadapi kendala geografis dan biaya yang besar. Penelitian ini bertujuan mensintesis perkembangan metodologi data satelit spasio-temporal, mengidentifikasi celah riset sensor penginderaan jauh, serta merumuskan kerangka kerja pemantauan mangrove terdegradasi melalui beberapa basis data. Penelitian tinjauan literatur naratif (*narrative literature review*) periode 2016–2026 ini dilakukan melalui penapisan berbasis kriteria inklusi dan eksklusi pada basis data *Google Scholar*, *ScienceDirect*, dan *SpringerLink*, dengan sebanyak 45 artikel ilmiah terpilih yang dianalisis menggunakan teknik sintesis kualitatif-tematis. Hasil sintesis menunjukkan bahwa integrasi data temporal jangka panjang (*Landsat* dan *Sentinel-2*) pada platform *Google Earth Engine* (GEE) dengan algoritma *machine learning* (seperti *random forest*) sangat andal melacak trajektori kerusakan kanopi. Rekonstruksi spasial berhasil memetakan kronologi ekspansi *Nypa fruticans* melewati tiga fase utama, yaitu inisiasi pasca-gangguan hulu, kolonisasi agresif pada celah kanopi terbuka (*canopy gaps*), dan dominasi formasi monokultur homogen. Simpulannya, pemanfaatan citra satelit *time-series* berbasis komputasi awan efektif memantau dinamika degradasi dan ekspansi vegetasi oportunistik secara kronologis. Sebagai rekomendasi, riset masa depan perlu diarahkan pada arsitektur integrasi data multi-sensor (sinergi optik dan radar *Sentinel-1*) serta validasi *drone* resolusi tinggi untuk membangun sistem peringatan dini restorasi pesisir dan neraca karbon yang terverifikasi demi mendukung pencapaianan SDG 13 dan 15.

**Kata Kunci:** *Blue Carbon*, *Google Earth Engine*, Mangrove Terdegradasi, *Nypa fruticans*, Penginderaan Jauh *Time-Series*.

**ABSTRACT:** Anthropogenic activities such as land conversion and illegal logging have triggered massive degradation of mangrove canopies, reduced blue carbon stocks, and triggered secondary succession in the form of opportunistic-invasive vegetation invasions such as *Nypa fruticans*. Conventional field survey-based monitoring faces significant geographical and cost constraints. This study aims to synthesize the development of spatio-temporal satellite data methodologies, identify research gaps in remote sensing sensors, and formulate a monitoring framework for degraded mangroves through several databases. This narrative literature review for the period 2016–2026 was conducted through inclusion and exclusion criteria-based screening of *Google Scholar*, *ScienceDirect*, and *SpringerLink* databases, with 45 selected scientific articles analyzed using qualitative-thematic synthesis techniques. The synthesis results indicate that the integration of long-term temporal data (*Landsat* and *Sentinel-2*) on the *Google Earth Engine* (GEE) platform with machine learning algorithms (such as *random forest*) is very reliable in tracking canopy damage trajectories. Spatial reconstruction successfully mapped the chronology of *Nypa fruticans* expansion through three main phases: initiation after upstream disturbance, aggressive colonization of open canopy gaps, and dominance of homogeneous monoculture formations. In conclusion, the use of cloud computing-based time-series satellite imagery is effective in monitoring the dynamics of degradation and opportunistic vegetation expansion chronologically. Future research should focus on multi-sensor data integration architecture (*Sentinel-1* optical and radar synergy) and the validation of high-resolution drones to develop a verified early warning system for coastal restoration and carbon balance to support the achievement of SDGs 13 and 15.

Uniform Resource Locator: <https://e-journal.lp3kamandanu.com/index.php/biocaster>



**Keywords:** Blue Carbon, Google Earth Engine, Degraded Mangroves, *Nypa fruticans*, Time-Series Remote Sensing.

**How to Cite:** Eddy, S. (2026). Analisis Spasio-Temporal terhadap Invasi Vegetasi Oportunistik di Hutan Mangrove Terdegradasi. *Biocaster : Jurnal Kajian Biologi*, 6(3), 1287-1307. <https://doi.org/10.36312/biocaster.v6i3.1413>



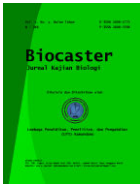
*Biocaster : Jurnal Kajian Biologi* is Licensed Under a CC BY-SA [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

## PENDAHULUAN

Ekosistem hutan mangrove memegang peran krusial dalam menjaga stabilitas kawasan pesisir, mengompensasi dampak krisis iklim global melalui penyerapan karbon biru (*blue carbon*), serta melindungi aktivitas ekonomi masyarakat tepi pantai dari ancaman bencana alam seperti badai siklon (Alongi, 2022; Cooley *et al.*, 2022; Hochard *et al.*, 2019). Secara global, degradasi keanekaragaman hayati di lahan basah telah mencapai tingkat yang mengkhawatirkan akibat masifnya konversi lahan (Almond *et al.*, 2020). Fenomena penurunan luasan mangrove ini sebagian besar dipicu oleh intensifikasi aktivitas antropogenik, seperti pembukaan tambak liar dan penebangan vegetasi berkayu secara ilegal (Eddy *et al.*, 2021b). Kerusakan pada struktur kanopi hutan tidak hanya memicu pelepasan emisi karbon dalam jumlah besar ke atmosfer (Eddy *et al.*, 2023a), tetapi juga mengganggu komunitas fauna asosiasi serta menurunkan stabilitas layanan ekosistem secara makro (Basyuni *et al.*, 2018).

Dampak sekunder yang signifikan dari kerusakan struktur hutan mangrove adalah terbukanya ruang ekologis yang memicu terjadinya suksesi sekunder yang tidak seimbang, salah satunya berupa invasi vegetasi oportunistik (Eddy *et al.*, 2019). Spesies seperti *Nypa fruticans* (nipah) dan semak merambat lainnya sering kali memperluas wilayah distribusinya secara agresif pada zona-zona mangrove yang telah mengalami gangguan parah (Eddy & Basyuni, 2020; Liu *et al.*, 2024). Meskipun di satu sisi *Nypa fruticans* memiliki potensi pemanfaatan yang tinggi oleh masyarakat lokal sebagai sumber bioenergi, minyak nabati, maupun jasa ekosistem tradisional (Eddy *et al.*, 2023b; Eddy *et al.*, 2025; Rahman *et al.*, 2024), ekspansinya yang tidak terkendali di kawasan terdegradasi bertindak sebagai spesies invasif yang mengancam keberadaan mangrove sejati (Barenblitt *et al.*, 2024; Numbere, 2019a). Dominasi vegetasi invasif ini menciptakan hambatan biologis serius yang menekan regenerasi alami semai mangrove asli, sehingga mempersulit keberhasilan agenda restorasi lanskap hutan pesisir (Budiharta & Holl, 2025; Numbere & Moudingo, 2023).

Untuk mengoptimalkan program rehabilitasi dan mencapai target Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), diperlukan pemantauan spasial yang adaptif dan komprehensif guna memetakan dinamika penyebaran vegetasi invasif tersebut (Sasmito *et al.*, 2023). Pemantauan berbasis survei terestrial konvensional di lingkungan mangrove sering kali terkendala oleh kondisi geografis yang sulit dijangkau dan membutuhkan biaya yang besar. Dalam konteks ini, penerapan teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) menawarkan solusi strategis



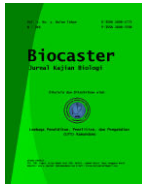
melalui penyediaan data spasial multispektral berskala luas (Ghorbanian *et al.*, 2021). Penggunaan data satelit dengan resolusi spasial tinggi hingga menengah, seperti *Sentinel-2*, telah terbukti efektif dalam memetakan estimasi biomassa serta membedakan batas komoditas vegetasi pesisir secara akurat (AM *et al.*, 2021; Castillo *et al.*, 2017a).

Akan tetapi, untuk memahami pola invasi vegetasi secara utuh pada ekosistem yang dinamis, penggunaan citra satelit tunggal (*single-date image*) tidak lagi mencukupi. Analisis berbasis deret waktu (*time-series data*) mutlak diperlukan guna mengidentifikasi tren konversi lahan, mendeteksi fluktuasi tutupan kanopi secara historis, dan memodelkan arah ekspansi spesies invasif dari waktu ke waktu (Farzanmanesh *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025). Akselerasi adopsi platform komputasi awan seperti *Google Earth Engine* (GEE) saat ini telah merevolusi metode pemrosesan data *time-series* geospasial pada skala planet (Gorelick *et al.*, 2017; Islam *et al.*, 2025). Integrasi data spasio-temporal jangka panjang dalam lingkungan GEE mempermudah rekonstruksi dinamika suksesi vegetasi pasca-gangguan dengan efisiensi komputasi yang tinggi (Hu *et al.*, 2020; Vu *et al.*, 2022).

Meskipun demikian, sebagian besar studi *time-series* terdahulu memiliki kekurangan mendasar, karena terlalu bergantung pada sensor optik tunggal seperti *Landsat* atau *Sentinel-2*. Penggunaan sensor optik ini menyisakan perdebatan metodologis yang belum terselesaikan terkait efektivitasnya di wilayah pesisir tropis. Karakteristik spektral sensor optik murni kerap gagal membedakan pantulan kanopi antara spesies oportunistik seperti *Nypa fruticans* dengan spesies mangrove sejati (seperti *Rhizophora* spp.) pada fase awal invasi. Masalah ini diperparah oleh efek pencampuran piksel pada resolusi 10–30 meter dan persistensi tutupan awan tropis yang tinggi, sehingga sering kali melewatkan deteksi dini bercak koloni skala mikro.

Hingga saat ini, aspek rekonstruksi kronologis mengenai bagaimana gangguan fisik hulu (seperti bukaan kanopi/parit tambak) berinteraksi dengan dinamika struktur vertikal vegetasi invasif masih sangat jarang dikaji. Kerangka kerja monitoring yang ada umumnya hanya berfokus pada perubahan luasan horizontal dua dimensi (2D) tanpa mempertimbangkan perubahan biomassa dan profil tiga dimensi (3D) kanopi. Celah metodologis inilah yang mendasari pentingnya kajian pustaka ini, guna mensintesis potensi fusi data multi-sensor (sinergi optik dan radar SAR *Sentinel-1*) serta validasi *drone* untuk menghasilkan kerangka kerja pemantauan yang lebih presisi.

Kajian sintesis literatur yang secara khusus mengulas penggunaan data *time-series* untuk mendeteksi perilaku invasi vegetasi pada ekosistem mangrove yang mengalami degradasi masih terbatas. Oleh karena itu, kajian pustaka ini penting untuk mensintesis perkembangan metodologi pemanfaatan data satelit *time-series*, mengidentifikasi celah riset terkait efektivitas sensor penginderaan jauh, serta merumuskan kerangka kerja monitoring yang efektif demi mendukung pengelolaan ekosistem mangrove terdegradasi. Kajian ini dapat memberikan landasan konseptual dalam menentukan pendekatan analisis yang paling sesuai untuk berbagai tingkat degradasi dan karakteristik lingkungan mangrove dan menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya.



## **METODE**

### **Desain Penelitian**

Penelitian ini merupakan penelitian kepustakaan dengan menggunakan pendekatan studi literatur (*narrative literature review*). Pendekatan ini dipilih untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan-temuan ilmiah serta perkembangan metodologi dari berbagai studi empiris terdahulu mengenai penginderaan jauh *time-series* untuk deteksi vegetasi invasif di ekosistem mangrove tanpa melakukan analisis statistik kuantitatif baru. Desain *review* naratif ini memungkinkan eksplorasi mendalam terhadap pola suksesi vegetasi pesisir, evolusi teknologi sensor satelit, serta efisiensi platform komputasi awan dalam monitoring perubahan ekosistem pesisir secara kontekstual dan komprehensif.

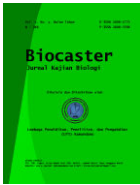
### **Penelusuran, Pemilihan dan Seleksi Literatur**

Penelusuran artikel ilmiah dilakukan secara sistematis melalui tiga basis data utama bereputasi nasional dan internasional, yaitu *Google Scholar*, *ScienceDirect*, dan *SpringerLink*. Basis data tersebut dipilih karena memiliki cakupan luas terhadap publikasi ilmiah di bidang ilmu lingkungan, ekologi pesisir, dan teknologi penginderaan jauh. Penelusuran dibatasi pada artikel ilmiah yang diterbitkan dalam rentang waktu sepuluh tahun terakhir (2016–2026) guna menjaga keterkinian informasi teknologi yang diulas (Husain *et al.*, 2020).

Untuk menjamin validitas dan kualitas sumber rujukan, artikel yang terjajaki disaring menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat demi menjaga relevansi dan validitas sumber yang dianalisis melalui proses berikut: 1) kriteria inklusi, yaitu artikel dari jurnal ilmiah nasional atau internasional yang telah melalui proses *peer-review*; fokus kajian membahas pemanfaatan data satelit *time-series* untuk analisis degradasi lahan atau ekspansi vegetasi pesisir (Barenblitt *et al.*, 2024; Nwobi *et al.*, 2020); dan studi kasus berkaitan dengan pemetaan dinamika luasan mangrove atau perilaku tumbuhan invasif seperti *Nypa fruticans* (Barenblitt *et al.*, 2024; Eddy *et al.*, 2024); dan 2) kriteria eksklusi, yaitu artikel yang tidak tersedia dalam bentuk teks lengkap (*full-text*) atau publikasi non-ilmiah yang tidak melalui proses mitra bestari; artikel yang menggunakan penginderaan jauh citra tunggal (*single-date*) tanpa adanya analisis dinamika perubahan temporal. Prosedur penyaringan artikel mengadopsi prinsip diagram alir dalam bentuk yang disederhanakan. Tahapan seleksi meliputi identifikasi artikel melalui basis data (113 artikel), penyaringan awal dengan menghapus artikel duplikat (18 artikel dihapus), penilaian relevansi berdasarkan judul dan abstrak (77 artikel), serta evaluasi kelayakan melalui penelaahan teks lengkap (45 artikel).

### **Teknik Pengumpulan dan Analisis Data**

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh secara terstruktur dari artikel ilmiah terpilih. Informasi yang diekstraksi meliputi laju konversi lahan pesisir, dinamika spasial vegetasi, resolusi data satelit, serta efektivitas platform komputasi awan. Data dicatat secara sistematis dan dirangkum dalam bentuk sintesis untuk memudahkan perbandingan antarstudi serta mengidentifikasi pola umum dan perbedaan temuan. Hasil ekstraksi ini menjadi dasar dalam penyusunan analisis dan pembahasan penelitian.



Analisis data dilakukan secara gabungan antara deskriptif-kuantitatif dan deskriptif-kualitatif melalui metode sintesis naratif yang tersruktur. Pendekatan deskriptif-kuantitatif diterapkan untuk mengevaluasi parameter numerik hasil studi terdahulu, seperti tingkat akurasi klasifikasi (*Overall Accuracy* dan *Kappa Coefficient*), rentang waktu runtun waktu (*time-series*), serta kuantifikasi perubahan luasan spasial hutan. Sementara itu, pendekatan deskriptif-kualitatif digunakan untuk memetakan dokumen kebijakan, faktor antropogenik, dan mekanisme suksesi ekologis.

Secara spesifik, teknik sintesis naratif dalam kajian ini dijalankan dengan mengategorikan, membandingkan, dan mengintegrasikan temuan literatur secara lintas disiplin berdasarkan empat pilar utama, yaitu: 1) jenis sensor *remote sensing*, yaitu sintesis dilakukan dengan mengelompokkan literatur berdasarkan kapabilitas sensor yang digunakan (sensor optik murni seperti *Landsat-8/9* dan *Sentinel-2*, sensor radar seperti *Sentinel-1 SAR*, serta fusi multi-sensor). Langkah ini bertujuan mengkomparasikan performa masing-masing sensor dalam mengatasi kendala tumpang tindih spektral dan hambatan tutupan awan; 2) pendekatan *time-series*, yaitu ekstraksi difokuskan pada pengelompokkan studi berdasarkan rancangan temporalnya, baik runtun waktu jangka panjang maupun analisis musiman/tahunan yang rapat. Hal ini dilakukan untuk melacak konsistensi trajektori degradasi kanopi dan mendeteksi titik balik suksesi vegetasi secara historis; 3) platform komputasi awan, yaitu artikel diklasifikasikan berdasarkan ekosistem pemrosesan datanya, dengan fokus utama pada pemanfaatan *Google Earth Engine (GEE)* dibandingkan dengan metode komputasi lokal (*desktop-based GIS*). Sintesis ini menelaah efisiensi arsitektur algoritma *machine learning* (seperti *random forest* dan *support vector machine*) yang diintegrasikan pada platform awan tersebut; dan 4) tipe vegetasi invasif dan oportunistik, yaitu analisis diarahkan pada karakteristik biologis dan pola spasial morfologi dari spesies tumbuhan target. Studi disintesis untuk memetakan bagaimana karakteristik kanopi monokultur merespons celah hutan terbuka dibandingkan dengan dinamika spesies invasif pesisir lainnya (Eddy *et al.*, 2021a; Husain *et al.*, 2020).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Literatur dan Tren Metodologi *Time-Series* (2016–2026)

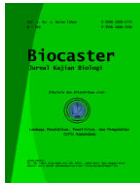
Sintesis literatur periode 2016–2026 menunjukkan pergeseran paradigma dari analisis citra tunggal (*single-date*) menuju pemrosesan data deret waktu *time-series*. Pendekatan ini krusial untuk menangkap dinamika kerusakan kanopi mangrove dan suksesi sekunder vegetasi oportunistik. Volume publikasi tema ini memuncak pada rentang 2020–2025, didorong oleh urgensi kajian karbon biru dalam mitigasi iklim global (Alongi, 2022; Cooley *et al.*, 2022).

Secara geografis, episentrum riset geospasial mangrove didominasi kawasan tropis dan subtropis yang mengalami konflik tata guna lahan ekstrem. Di Asia Tenggara, studi terkonsentrasi di Indonesia, Filipina, dan Vietnam akibat masifnya pembukaan tambak historis maupun pembalakan liar (Basyuni *et al.*, 2022; Castillo *et al.*, 2017a; Vu *et al.*, 2022). Fokus serupa ditemukan di Afrika Barat, khususnya Delta Niger terkait konversi mangrove asli menjadi monokultur tumbuhan invasif (Barenblitt *et al.*, 2024; Nwobi *et al.*, 2020). Dalam memetakan

dinamika vegetasi tersebut, sensor *Landsat* dan *Sentinel-2* menjadi pilar utama dengan keunggulan komparatif yang saling melengkapi (Tabel 1).

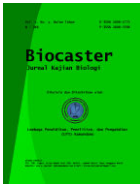
**Tabel 1. Matriks Sintesis Metodologi Penginderaan Jauh pada Ekosistem Mangrove.**

Peneliti/ Tahun	Lokasi Studi	Jenis Sensor Satelit	Rentang Waktu/ Resolusi	Algoritma Klasifikasi	Hasil Utama
Castillo <i>et al.</i> (2017a)	Honda Bay, Filipina	Sentinel-1 (SAR - <i>Synthetic Aperture Radar</i> ) Sentinel-2 Optik/ Multispektral)	Data Tunggal/ Resolusi 10–20 meter	Regresi Linear dan <i>Machine Learning (Support Vector Regression (SVR), Random Forest (RF))</i>	Variabel biofisik <i>Leaf Area Index (LAI)</i> dari Sentinel-2 terbukti paling akurat dalam memprediksi stok biomassa atas permukaan (AGB) mangrove dan lahan konversinya.
Nwobi <i>et al.</i> (2020)	Delta Niger, Nigeria	Fusi Multi-Sensor: ALOS PALSAR/ALOS-2 PALSAR-2 (L-band SAR), Landsat 7 ETM+ (Optik), dan SRTM DEM	Tahun 2007 dan 2017/ Resolusi Spasial 30 meter	Perbandingan Metode Terawasi ( <i>Supervised</i> ): <i>Support Vector Machine (SVM)</i> dan <i>Maximum Likelihood (ML)</i>	SVM memberikan akurasi terbaik (OA = 93%). Terjadi penurunan mangrove asli 12% dan lonjakan invasi <i>Nypa fruticans</i> hingga 694%. Namun, sensor 30m gagal mendeteksi formasi <i>Nypa</i> tepi sungai yang tipis (akurasi spesifik kelas rendah).
Ghorbanian <i>et al.</i> (2021)	Kawasan Lindung Hara, Pulau Qeshm, Iran Selatan	Integrasi Multi-sensor: Sentinel-1 (C-band SAR) dan Sentinel-2 (Optik/Multispektral)	Sepanjang Tahun 2019/ Resolusi Spasial 10 meter	<i>Random Forest (RF)</i> pada <i>platform Google Earth Engine (GEE)</i>	Menghasilkan OA 93,23% (Kappa 0,92). Fusi data temporal SAR dan optik sangat tangguh memisahkan batas spektral mangrove serta berhasil memitigasi gangguan pasang-surut air laut secara otomatis.
Eddy <i>et al.</i> (2021a)	Pesisir Timur Sumatera Selatan, Indonesia	Landsat 5 TM (data tahun 2000) dan Sentinel-2 (data tahun 2020), dengan adaptasi koreksi menggunakan Landsat 8	Tahun 2000 dan 2020/Resolusi Spasial Multi-resolusi (10 meter dan 30 meter)	<i>Supervised Classification</i> berbasis piksel yang diintegrasikan dengan pemodelan <i>Stock Difference</i> menggunakan platform LUMENS	Mencatat degradasi masif di mana area terbuka melonjak hingga menutupi 50,03% kawasan pada 2020. Dampak ekologisnya memicu emisi total sebesar 1.981.392,08 ton CO <sub>2</sub> -eq, jauh melampaui kemampuan sekuestrasinya.
Vu <i>et al.</i> (2022)	Pesisir Utara, Vietnam	Landsat (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, dan Landsat 8	Tahun 1988–2020/Resolusi Spasial	RF terintegrasi dengan algoritma pembuatan	Menghasilkan rata-rata OA sangat tinggi (94,4%). Berhasil mendeteksi penurunan luas mangrove akibat



Peneliti/ Tahun	Lokasi Studi	Jenis Sensor Satelit	Rentang Waktu/ Resolusi	Algoritma Klasifikasi	Hasil Utama
		OLI)	30 meter	mosaik citra bebas awan tahunan pada platform GEE	ekspansi akuakultur hingga tahun 2015, serta merekam tren pemulihan ( <i>recovery</i> ) pasca-2015 berkat rehabilitasi pesisir.
Barenblitt <i>et al.</i> (2024)	Delta Niger, Nigeria	Sentinel-1 (SAR) dan Sentinel-2 (Optik), diintegrasikan dengan data GEDI LiDAR dan TanDEM- X untuk analisis struktur kanopi	Tahun 2015– 2020/Res olusi Spasial 10 meter	RF terautomasi pada platform GEE	Menghasilkan OA 94,6%. Kombinasi optik dan radar sangat efektif memisahkan batas spektral antara <i>Nypa</i> dan mangrove asli. Data GEDI LiDAR mengungkap bahwa tegakan invasif <i>Nypa</i> memiliki profil kanopi yang pendek dan padat.
Wang <i>et al.</i> (2025)	Teluk Bohai, Tiongkok	Fusi Multi- sensor: Sentinel-1 (C- band SAR) dan Sentinel-2 (Multispektral)	Tahun 2016– 2023/ Resolusi Spasial 10 meter	SVM untuk pemetaan historis dan <i>Maximum Entropy</i> (MaxEnt) untuk pemodelan prediktif	OA klasifikasi tahunan mencapai 91,80%– 95,20% dan prediksi MaxEnt sangat andal (AUC = 0,951). Luas invasi <i>Spartina alterniflora</i> melonjak drastis sebesar 251,77%. Garis pantai buatan, elevasi rendah, dan jarak dari laut menjadi pendorong utama.
Eddy <i>et al.</i> (2026)	Pesisir Timur Sumatera Selatan, Indonesia	Landsat multi- generasi (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI)	Tahun 2000– 2024/Res olusi Spasial 10 meter	RF terintegrasi dengan metode pembuatan mosaik citra bebas awan berbasis median tahunan pada platform GEE	Menghasilkan OA berkisar antara 88,5%– 92,3% (Kappa: 0,85– 0,90). Berhasil merekonstruksi kronologi perluasan agresif <i>Nypa fruticans</i> selama seperempat abad, yang bergerak dari fase inisiasi tepi sungai hingga mendominasi relung mangrove sejati yang rusak

Landsat terbukti paling efektif untuk rekonstruksi historis jangka panjang (multi-dekadal), karena konsistensi radiometrik lintas generasinya (TM, ETM+, OLI-2). Sensor ini andal melacak rona awal ekosistem sebelum degradasi, dengan parameter akurasi keseluruhan (*Overall Accuracy/OA*) konsisten di atas 75% selama hampir seperempat abad (2000–2024). Kendati demikian, resolusi spasial



30 meter milik *Landsat* menghadapi tantangan *pixel mixing* (pencampuran piksel) dalam mengidentifikasi fase awal perluasan semai tumbuhan oportunistik pada zona transisi yang sempit.

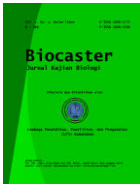
Sebaliknya, *Sentinel-2* (resolusi hingga 10 meter) memberikan lompatan besar untuk analisis kontemporer yang mendetail. Keberadaan saluran khusus *Red-Edge* pada *Sentinel-2* sangat sensitif terhadap kandungan klorofil dan struktur seluler daun. Sensor ini mampu memisahkan batas spektral (*spectral signature*) antara asosiasi mangrove sejati dengan tegakan monokultur tumbuhan invasif (seperti *Nypa fruticans* atau *Acrostichum aureum*) secara jauh lebih tajam dibandingkan *Landsat*.

Revolusi metodologis terpenting dalam satu dekade terakhir adalah transisi dari perangkat lunak GIS *desktop* konvensional menuju platform komputasi awan (*cloud computing*) seperti GEE (Gorelick *et al.*, 2017). Platform ini mengefisienkan analisis data satelit berskala besar dengan meniadakan kebutuhan kapasitas penyimpanan lokal yang masif serta memangkas waktu unduh citra. GEE mengintegrasikan seluruh katalog global *Landsat* dan *Sentinel* ke dalam *server* awan yang dapat diakses instan (Islam *et al.*, 2025). Kehadiran platform ini mempermudah implementasi teknik reduksi gangguan atmosfer melalui mosaik temporal, yaitu sebuah langkah krusial untuk wilayah pesisir tropis dengan tingkat keawanan tinggi (Hu *et al.*, 2020; Yancho *et al.*, 2020).

Lebih jauh lagi, GEE memfasilitasi eksekusi cepat algoritma *Machine Learning* seperti *Random Forest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), dan *Classification and Regression Trees* (CART) langsung pada *server* komputasi *Google* (Farzanmanesh *et al.*, 2024; Feng *et al.*, 2022). Integrasi ini mempercepat pemetaan runtun waktu otomatis dari tahun ke tahun untuk memodelkan arah ekspansi spesies oportunistik pasca-degradasi, menjadikannya instrumen penting bagi sistem peringatan dini pemulihan ekosistem pesisir.

Dalam konteks pemantauan pesisir tropis (seperti di Indonesia, Filipina, dan Nigeria), efektivitas sensor penginderaan jauh sangat diuji oleh tantangan atmosferik dan morfologi vegetasi. Untuk area ekuator yang dicirikan oleh persistensi tutupan awan tebal sepanjang tahun, sensor *Synthetic Aperture Radar* (SAR) seperti *Sentinel-1* (*C-band*) atau ALOS PALSAR (*L-band*) menunjukkan tingkat efektivitas yang jauh lebih tinggi, karena kemampuannya menembus awan (*cloud-penetrating capability*). Lebih lanjut, hasil komparasi membuktikan bahwa Fusi Multi-Sensor (Sinergi Optik dan Radar) merupakan pendekatan paling efektif dan tangguh untuk wilayah pesisir tropis (Ghorbanian *et al.*, 2021; Barenblitt *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025). Integrasi saluran spektral *Sentinel-2* dengan polarisasi *Sentinel-1* terbukti mampu memisahkan batas spektral antara spesies oportunistik (*Nypa fruticans*) dengan mangrove sejati, sekaligus memitigasi gangguan akibat fluktuasi pasang-surut air laut secara otomatis tanpa koreksi manual (Ghorbanian *et al.*, 2021).

Pada skala pemrosesan data deret waktu yang masif (*big geospatial data*), algoritma *Random Forest* (RF) yang diintegrasikan pada platform *Google Earth Engine* (GEE) mencatatkan konsistensi akurasi tertinggi lintas regional. Algoritma RF pada GEE berhasil mencapai rata-rata OA sebesar 94,4% di Vietnam (Vu *et al.*, 2022), 94,6% di Delta Niger (Barenblitt *et al.*, 2024), dan berada pada rentang



88,5%–92,3% untuk pemantauan multi-dekadal di Sumatra (Eddy *et al.*, 2026). RF terbukti sangat superior dalam menangani variabel prediktor yang kompleks dan memproses mosaik citra bebas awan tahunan dengan efisiensi tinggi.

Penggunaan *Landsat* tunggal atau fusi ALOS PALSAR dengan *Landsat* (resolusi 30 meter) menghadapi kendala *pixel mixing effect*. Seperti dilaporkan oleh Nwobi *et al.* (2020), akurasi spesifik untuk kelas vegetasi *Nypa fruticans* bernilai sangat rendah (30%–32%). Hal ini terjadi karena piksel 30 meter tidak mampu merekam formasi vegetasi riparian yang tumbuh dalam bentuk pita tipis, sehingga bercak awal invasi skala mikro kerap terabaikan. Sedangkan, pendekatan klasifikasi horizontal dua dimensi murni (Eddy *et al.*, 2021a; Vu *et al.*, 2022) tidak mampu menyajikan informasi mengenai struktur internal vegetasi. Kelemahan ini berhasil diidentifikasi melalui studi Barenblitt *et al.* (2024) yang mengintegrasikan data GEDI LiDAR dan TanDEM-X. Tanpa sensor penilai struktur vertikal (3D), peneliti tidak dapat membedakan profil tinggi kanopi antara tegakan vegetasi yang pendek-padat dengan kanopi mangrove sejati yang tinggi-klimaks.

Sintesis ini menegaskan adanya pergeseran tren metodologi global dalam satu dekade terakhir (2016–2026). Tren pemantauan mangrove dunia telah bergeser dari penggunaan citra tunggal (*single-date image*) lokal menuju analisis runtun waktu jangka panjang (*long-term time-series*) berbasis awan. Platform seperti GEE telah menjadi standar baru (Ghorbanian *et al.*, 2021; Barenblitt *et al.*, 2024; Eddy *et al.*, 2026; Vu *et al.*, 2022;), karena memungkinkan otomatisasi pembuatan mosaik bebas awan berbasis median tahunan. Selain itu, tren global saat ini dicirikan oleh pemanfaatan metode fusi multi-sensor fungsional yang menggabungkan data optik, radar (SAR), dan sensor elevasi/struktur kanopi (LiDAR) yang dipadukan dengan algoritma prediktif hibrida, seperti penggabungan SVM untuk pemetaan historis dan *Maximum Entropy* (MaxEnt) untuk pemodelan proyeksi spasial masa depan (Wang *et al.*, 2025).

### **Dinamika Degradasi Mangrove dan Faktor-faktor Pemicu**

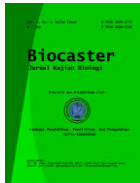
Pemahaman mengenai dinamika kerusakan hutan pesisir merupakan landasan krusial sebagai kondisi hulu sebelum mengulas proses suksesi sekunder. Status penurunan kualitas dan kuantitas hutan mangrove merefleksikan krisis keanekaragaman hayati yang masif di zona transisi darat-laut (Almond *et al.*, 2020). Proses degradasi ini terekam melalui data penginderaan jauh *time-series* berupa fragmentasi spasial parah dan penurunan kepadatan kanopi. Reduksi indeks vegetasi (NDVI/EVI) menandakan hilangnya stratifikasi vertikal hutan bakau asli yang didominasi pohon tegakan tinggi dari famili Rhizophoraceae (Eddy *et al.*, 2019; Friess *et al.*, 2019).

Secara struktural, kerusakan awal dimulai dari hilangnya pohon-pohon induk pembentuk struktur klimaks akibat pembalakan yang menyisakan celah kanopi terbuka (Eddy *et al.*, 2022). Perubahan ini merusak iklim mikro lokal, meningkatkan intensitas cahaya matahari di lantai hutan, serta mengganggu hidrodinamika pasang-surut yang mendestabilisasi substrat. Transformasi lanskap menjadi lahan terbuka menciptakan celah ekologis baru yang tidak lagi ideal bagi semai mangrove sejati, tetapi menguntungkan bagi kolonisasi oportunistik pembentuk tegakan monokultur (Barenblitt *et al.*, 2024; Eddy & Basyuni, 2020).

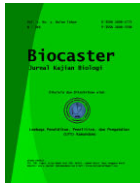
Sintesis literatur lintas regional menegaskan desakan antropogenik yang tidak terkendali sebagai pemicu utama (*primary drivers*) hilangnya luasan mangrove (Eddy *et al.*, 2021b). Di Asia Tenggara khususnya Indonesia, konversi hutan menjadi lahan budidaya perikanan (tambak) menempati urutan tertinggi (Basyuni *et al.*, 2022; Sasmito *et al.*, 2023). Pembukaan tambak melibatkan pembersihan vegetasi secara total serta pengubahan jalur hidrologi alami melalui pembangunan pematang (Basyuni *et al.*, 2021). Pola spasial pembukaan tambak ini mengikuti jaringan anak sungai yang memutus kontinuitas ekologis ekosistem asli (Eddy *et al.*, 2017). Dinamika kerusakan lingkungan pesisir, misalnya di Hutan Lindung Air Telang (HLAT), Kabupaten Banyuasin, Sumatera Selatan, bergerak melalui pola spasial yang sistematis (Tabel 2).

**Tabel 2. Tren Dinamika Spasial Tutupan Lahan di Hutan Lindung Air Telang.**

Tahun Pengamatan	Tren Dinamika Spasial Tutupan Lahan	Intervensi Tekanan Antropogenik Utama	Estimasi Konsekuensi Ekologis (Karbon & Vegetasi)	Sumber Rujukan
1989	Sebagai tahun <i>baseline</i> awal studi. Hutan mangrove berada pada kondisi luasan maksimum di dalam sejarah pencitraan kawasan, yaitu mencapai 73%. Semak belukar masih sangat kecil hanya sekitar 2.5% dan belum ada indikasi keberadaan lahan tambak (0 ha).	Tekanan antropogenik masih sangat minim dan bersifat lokal; belum terjadi konversi lahan berskala masif untuk kegiatan ekonomi komersial	Struktur komunitas hutan mangrove sangat sehat, utuh, dan belum terfragmentasi, ditandai dengan dominasi tegakan pohon tinggi dari famili Rhizophoraceae yang mencerminkan kondisi ekosistem pesisir alami yang stabil.	Eddy <i>et al.</i> (2017)
2000	Hutan asli telah mengalami fragmentasi koridor. Luas hutan mangrove primer hanya tersisa sekitar 42%. Komunitas <i>Nypa fruticans</i> masih berada pada fase inisiasi awal yang sangat minim ( <i>low density</i> )	Pembukaan jaringan parit/kanal buatan secara ekstensif dan inisiasi pembalakan liar ( <i>illegal logging</i> ) pohon berkayu klimaks berdiameter besar untuk kebutuhan material kayu komersial lokal	Struktur kanopi atas mulai kehilangan pohon induk. Stok karbon biru kawasan berada pada kondisi batas tertinggi sepanjang sejarah pengamatan, sebelum mengalami pelepasan emisi masif pada dekade berikutnya.	Eddy <i>et al.</i> (2021a); Eddy <i>et al.</i> (2021b)
2013	Reduksi luasan hutan mangrove sejati secara masif hingga hanya tersisa sekitar	Intensifikasi alih fungsi lahan berskala besar untuk komoditas perkebunan	Pembukaan celah kanopi secara masif ( <i>canopy gaps</i> ), hilangnya struktur vegetasi	Eddy <i>et al.</i> (2017)



Tahun Pengamatan	Tren Dinamika Spasial Tutupan Lahan	Intervensi Tekanan Antropogenik Utama	Estimasi Konsekuensi Ekologis (Karbon & Vegetasi)	Sumber Rujukan
2020	<p>separuh dari total keseluruhan luas. <i>Lanskap</i> hutan mengalami fragmentasi parah menjadi kantong-kantong kecil (<i>fragmented patches</i>).</p> <p>Penurunan luasan hutan asli mencapai titik paling kritis. Hutan mangrove primer rusak total tersisa hanya 23%, digantikan oleh dominasi area terbuka seluas sekitar 50%.</p>	<p>kelapa (mencapai 18%) dan pembukaan tambak akuakultur sekitar 3%</p> <p>Kumulasi tekanan akibat perluasan kebun kelapa komersial (mencapai 15%) serta penelantaran tambak budidaya (<i>abandoned aquaculture ponds</i>) yang dibiarkan terbuka pasca-penurunan produktivitas tanah</p>	<p>hutan klimaks asli, serta munculnya suksesi sekunder berupa perluasan area semak belukar (<i>shrubs</i>)</p> <p>Penurunan drastis stok karbon kawasan ke level terendah. Kejadian ini memicu pelepasan emisi bersih (<i>net emissions</i>) kumulatif sebesar hampir 2 juta ton CO<sub>2</sub>-eq pada periode 2000-2020, dengan rata-rata laju emisi tahunan hampir mencapai 100 ribu ton CO<sub>2</sub>-eq/tahun akibat oksidasi sedimen tanah dan hilangnya biomassa atas permukaan.</p>	<p>Eddy <i>et al.</i> (2021a); Eddy <i>et al.</i> (2021b)</p>
2021	<p>Degradasi <i>lanskap</i> mencapai titik masif. Hutan mangrove primer hanya tersisa sekitar 14%. Kawasan didominasi oleh area terbuka yang mencapai separuh HLAT dan mangrove sekunder tersisa hanya sekitar 19%</p>	<p>Alih fungsi lahan untuk perkebunan kelapa komersial hampir mencapai 15% kawasan dan aktivitas budidaya perikanan/tambak sekitar 1.5%</p>	<p>Penurunan drastis keanekaragaman hayati dengan Indeks Keanekaragaman <i>Shannon-Wiener</i> kategori Rendah. Struktur tegakan tingkat pohon mengalami simplifikasi ekstrem dan didominasi mutlak oleh spesies oportunistik <i>Nypa fruticans</i>.</p>	<p>Eddy <i>et al.</i> (2022)</p>
2024	<p>Fase akselerasi invasi radikal. Mosaik citra GEE mendeteksi</p>	<p>Pengabaian lahan terbuka pasca-degradasi tanpa restorasi aktif,</p>	<p>Terbukanya relung ekologis (<i>ecological opportunities</i>)</p>	<p>Eddy <i>et al.</i> (2026)</p>

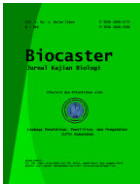


Tahun Pengamatan	Tren Dinamika Spasial Tutupan Lahan	Intervensi Tekanan Antropogenik Utama	Estimasi Konsekuensi Ekologis (Karbon & Vegetasi)	Sumber Rujukan
	lonjakan area monokultur <i>Nypa</i> hingga mencapai 1.844 ha atau sekitar 15% (meningkat hampir 5 kali lipat dari tahun 2000). <i>Lanskap</i> didominasi kritis oleh Area Terbuka (3.935 ha atau sekitar 31%) dan sisa mangrove sekunder yang terus terdesak	perluasan area perkebunan kelapa/komoditas lain hingga mencapai luasan tertinggi sepanjang sejarah pengamatan (3.039 ha atau sekitar 24%), serta intensifikasi pembersihan lahan	secara penuh akibat hilangnya persaingan ruang dan cahaya dari mangrove asli. Hal ini menyebabkan ekosistem melampaui batas kritis ( <i>critical threshold</i> ), simplifikasi struktur vegetasi secara radikal, serta penurunan drastis kapasitas sekuestrasi karbon kawasan	

Selain tambak, perluasan permukiman, infrastruktur pesisir, dan pembalakan kayu liar untuk arang atau bahan bangunan turut mempercepat fragmentasi. Di Delta Niger, Afrika Barat, pola pemicu ini berjalan beriringan dengan polusi minyak bumi yang melenyapkan tutupan kanopi *Rhizophora* secara cepat (Nwobi *et al.*, 2020). Ketika aktivitas tambak atau pembalakan ini telantar (*abandoned sites*), wilayah tersebut tidak pulih alami melainkan menjadi lahan basah kritis yang mengalami penurunan fungsi ekologis berat akibat perubahan topografi, salinitas, dan sedimentasi (Numbere, 2019b).

Ekosistem mangrove memiliki kapasitas penyimpanan karbon biru per hektar yang jauh melampaui hutan tropis daratan (Chowdhury *et al.*, 2023). Ketika struktur kanopi rusak, dampak global yang paling signifikan adalah pelepasan emisi gas rumah kaca ke atmosfer (Cooley *et al.*, 2022). Penurunan stok karbon terjadi melalui dua mekanisme: 1) kehilangan biomassa atas permukaan (*Aboveground Biomass/AGB*), yaitu penebangan vegetasi berkayu berdiameter besar secara langsung melenyapkan depot karbon utama pada batang, cabang, dan daun (Castillo *et al.*, 2017a); dan 2) oksidasi karbon sedimen (*belowground/soil carbon*), yaitu pembukaan lahan dan pengeringan rawa memapar sedimen organik yang kaya karbon terhadap udara luar, mempercepat dekomposisi mikroba, dan melepaskan karbon purba tanah (Castillo *et al.*, 2017b). Alih fungsi lahan ini memicu penurunan drastis total estimasi stok karbon hingga menimbulkan kerugian ekologis yang masif (Eddy *et al.*, 2023a).

Runtuhnya zonasi mangrove sejati juga merusak jasa ekosistem (*ecosystem services*) lainnya. Kawasan yang rusak kehilangan kemampuan sebagai benteng alami dari abrasi, intrusi air laut, dan badai siklon tropis (Hochard *et al.*, 2019; Ouyang *et al.*, 2018). Dari aspek keanekaragaman hayati, degradasi ini menghancurkan habitat kritis makrozoobentos (Basyuni *et al.*, 2018) dan menurunkan diversitas jenis burung pesisir akibat hilangnya area bersarang (Eddy *et al.*, 2021c).



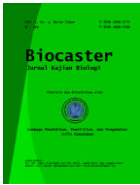
## **Pola Spasial dan Kronologi Invasi Vegetasi Oportunistik**

Rangkaian analisis spasial *time-series* berbasis GEE berhasil menyingkap kronologi peralihan dominasi vegetasi, seperti kasus di HLAT. Kerusakan struktural rona awal akibat aktivitas antropogenik terbukti tidak memicu pemulihan alami (*self-recovery*), melainkan mengakselerasi ekspansi radikal dari vegetasi oportunistik, seperti *Nypa fruticans*. Suksesi sekunder di HLAT merupakan konsekuensi langsung dari keruntuhan ketahanan ekosistem pasca-deforestasi masif. Pada ekosistem lestari, tegakan klimaks famili Rhizophoraceae (seperti *Rhizophora apiculata* dan *Bruguiera* spp.) membentuk naungan rapat (*canopy closure*) >80% yang membatasi penetrasi cahaya matahari ke lantai hutan, sehingga mengontrol perkecambahan biji dan menjaga stabilitas relung asli (Eddy *et al.*, 2019).

Aktivitas pembalakan liar dan pembukaan parit komersial merusak iklim mikro secara radikal pada mangrove yang terdegradasi. Terbentuknya celah kanopi berskala luas memicu lonjakan suhu permukaan tanah pesisir, meningkatkan penguapan, dan mengubah fluktuasi salinitas intertidal. Ketika tambak budidaya perikanan mulai telantar, kualitas substrat tanah menurun drastis disertai oksidasi sedimen organik secara masif (Basyuni *et al.*, 2021).

Kondisi sisa lahan basah kritis yang kaya nutrien terganggu, bebas naungan, dan berfluktuasi salinitas tinggi ini menciptakan relung ekologis kosong yang ideal bagi perkecambahan cepat semai flora invasif seperti *Nypa fruticans*. Sebagai spesies oportunistik asli dengan toleransi ekofisiologis luas terhadap fluktuasi lingkungan, *Nypa fruticans* mampu melakukan kolonisasi agresif mendahului semai mangrove sejati yang membutuhkan kondisi hidrologi spesifik dan terlindung (Numbere & Moudingo, 2023).

Melalui pemanfaatan algoritma klasifikasi *time-series* data *Landsat* multi-generasi dan *Sentinel* pada platform GEE berdasarkan data Tabel 2, rekonstruksi spasial invasi *Nypa fruticans* di HLAT dipetakan ke dalam tiga fase kronologis utama: 1) fase inisiasi dan lokalisasi (Periode 1989–2000): Pada rona awal, sebaran *Nypa fruticans* di HLAT sangat terbatas dan terlokalisasi hanya di sepanjang sempadan sungai alami (*riverine mangrove*) serta zona estuari hulu yang dipengaruhi pasokan air tawar dominan. Komunitas ini hidup berdampingan secara seimbang dalam struktur zonasi alami bersama spesies mangrove sejati tanpa gejala ekspansi radikal; 2) fase fragmentasi lahan dan pembentukan koloni (Periode 2000–2013): Seiring maraknya pembukaan kanal komersial untuk logistik kayu dan alih fungsi tambak, fragmentasi *lanskap* mulai meluas. Citra satelit merekam kemunculan klaster-klaster kecil (*fragmented patches*) *Nypa fruticans* di bagian dalam hutan lindung. Jalur parit buatan manusia berfungsi sebagai koridor dispersi utama yang menghanyutkan buah *Nypa fruticans* jauh ke dalam daratan ekosistem yang terganggu; dan 3) fase akselerasi dan dominasi monokultur (Periode 2013–2024): Fase ini merupakan puncak perubahan bentang alam yang ditangkap secara presisi oleh sensor satelit kontemporer. Pasca-penelantaran tambak secara masif sekitar tahun 2020, laju perluasan area *Nypa fruticans* mengalami akselerasi eksponensial. *Nypa fruticans* secara agresif mengokupasi sisa tanggul tambak dan lantai hutan kritis yang terbuka untuk membentuk formasi monokultur rapat yang homogen.



## **Tantangan Metodologis Penginderaan Jauh dan Peluang Riset ke Depan**

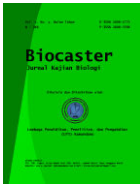
Sintesis *time-series* seperti di HLAT membuktikan keandalan platform GEE. Namun, ekstraksi informasi runtun waktu dari ekosistem mangrove tropis yang sedang mengalami suksesi oportunistik menghadapi beberapa batasan teknis fundamental. Tantangan teknis utama sensor optik (*Landsat* dan *Sentinel-2*) di wilayah estuari tropis adalah tingginya persistensi tutupan awan sepanjang tahun yang membatasi ketersediaan citra bebas awan (*cloud-free imagery*) (Eddy *et al.*, 2017). Meskipun algoritma pemfilteran awan pada platform GEE dapat mengeliminasi gangguan atmosferik, proses reduksi temporal ini sering kali meninggalkan kekosongan data (*data gaps*) pada bulan-bulan tertentu. Akibatnya, pemantauan fenologi vegetasi terhambat dan rekonstruksi kronologi invasi *Nypa fruticans* berisiko kehilangan resolusi temporal yang presisi pada fase kritis suksesi.

Selain itu, keterbatasan resolusi spasial memicu fenomena pencampuran nilai piksel (*pixel mixing/mixels*). Pada area HLAT terdegradasi, bentang alam pasca-tambak berupa mosaik kompleks yang terdiri dari tanah terbuka, air payau, semak belukar, sisa *Rhizophora*, dan koloni awal *Nypa fruticans* (Eddy *et al.*, 2021a). Efek *pixel mixing* pada resolusi satelit mendistorsi nilai indeks vegetasi (NDVI/EVI), sehingga menyulitkan algoritma klasifikasi piksel murni (*pixel-based*) mendeteksi batas tegas sebaran kluster *Nypa fruticans* berukuran kecil pada fase awal invasi (AM *et al.*, 2021).

Pemisahan objek vegetasi yang tumbuh berdampingan merupakan komplikasi penginderaan jauh optik yang rumit. Secara individual, *Nypa fruticans* dan famili Rhizophoraceae memiliki profil spektral yang sangat mirip pada saluran tampak (*visible bands*), karena kesamaan pigmen klorofil daun (Vu *et al.*, 2022). Tantangan ini diperparah oleh dinamika pasang-surut. Saat pasang menggenangi rawa, saluran Inframerah Gelombang Pendek (SWIR) mengalami penyerapan energi yang kuat oleh air, baik di bawah tegakan mangrove sejati maupun di zona *Nypa fruticans* (Castillo *et al.*, 2017a). Sebaliknya saat surut, pantulan SWIR meningkat akibat kontribusi substrat lumpur kering atau sedimen organik. Perubahan tanda spektral (*spectral signature*) yang tidak konsisten akibat fluktuasi lingkungan harian ini menciptakan tumpang tindih spektral (*spectral overlap*) yang tinggi antar-spesies.

Untuk mengatasi keterbatasan sensor optik tunggal, riset ke depan harus diarahkan pada integrasi data multi-sensor (*multi-sensor data fusion*). Kombinasi data optik dengan data *Synthetic Aperture Radar* (SAR) aktif seperti *Sentinel-1* menawarkan solusi menjanjikan (Ghorbanian *et al.*, 2021). Sensor radar memancarkan gelombang mikro yang mampu menembus awan dan sensitif terhadap struktur geometris serta biomassa vegetasi. Morfologi *Nypa fruticans* yang berpelepeh vertikal tanpa batang kayu sejati menghasilkan pola hamburan balik (*radar backscattering*) yang sangat kontras dibandingkan arsitektur pohon mangrove sejati yang memiliki percabangan rapat dan akar tunjang.

Di samping integrasi satelit, pemanfaatan wahana tanpa awak (*drone/UAV*) berskala ortofoto sentimeter memegang peran krusial sebagai jembatan validasi spasial (*multi-scale remote sensing*) yang bebas dari interferensi awan dan efek *pixel mixing*. Riset masa depan dapat mengintegrasikan teknologi



*drone* multispektoral atau LiDAR untuk memetakan arsitektur kanopi tiga dimensi secara mikro (Eddy *et al.*, 2026). Data resolusi sangat tinggi ini dapat ditransformasikan sebagai *training data* untuk melatih algoritma pembelajaran mesin tingkat lanjut (*random forest*, SVM, atau *deep learning*) pada platform GEE. Pendekatan multi-skala ini andal untuk mendeteksi secara dini dinamika suksesi sekunder dan arah pergerakan invasi vegetasi oportunistik pada lahan basah kritis.

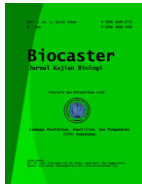
### **Implikasi Hasil Monitoring Spasial terhadap Restorasi dan Kebijakan Pesisir**

Transformasi data geospasial *time-series* menjadi kebijakan aplikatif sangat krusial untuk menjembatani riset akademis dan manajemen konservasi lapangan. Bukti empiris trajektori degradasi dan akselerasi invasi *Nypa fruticans* dapat digunakan untuk mereformulasi tata ruang pesisir, merancang restorasi tepat sasaran, serta memperkuat posisi tawar kawasan dalam mitigasi iklim global. Monitoring berkala berbasis GEE mengubah paradigma konservasi dari reaktif menjadi preventif melalui pembentukan Sistem Peringatan Dini (*Early Warning System/EWS*) (Eddy *et al.*, 2017; Eddy *et al.*, 2026).

Algoritma deteksi perubahan piksel dirancang untuk memberikan sinyal peringatan otomatis saat sensor satelit menangkap dua indikator hulu utama, yaitu: 1) terbentuknya celah kanopi akibat pembalakan liar berskala kecil yang menurunkan indeks kerapatan vegetasi (Eddy *et al.*, 2022); dan 2) munculnya tanda spektral (*spectral signature*) klaster mikro (di bawah 1 hektar) dari vegetasi non-kayu di sepanjang koridor kanal atau parit tambak telantar (Eddy *et al.*, 2021a). Peta prediktif runtun waktu ini mempermudah otoritas terkait memetakan "Zona Kerentanan Invasi Tinggi" agar tim patroli lapangan dapat langsung diterjunkan ke titik koordinat anomali. Pendekatan preventif ini menekan biaya operasional secara signifikan dibandingkan penanganan area yang telah tertutup total oleh monokultur *Nypa fruticans*.

Pada sub-zona yang telah mendominasi *lanskap* pasca-tambak, strategi diubah menjadi intervensi fisik aktif (Eddy *et al.*, 2023a). Pemulihan ekosistem memerlukan kombinasi tiga aspek yang terintegrasi, yaitu: 1) pengendalian mekanis terpola, yaitu pembersihan atau penjarangan pelepah dan akar *Nypa fruticans* secara selektif pada koridor kritis restorasi untuk membuka penetrasi cahaya matahari bagi semai lokal; 2) restorasi hidrologi pesisir, yaitu pembentukan sekat kanal (*canal blocking*) pada parit buatan bekas logistik kayu. Pengondisian ini bertujuan mengembalikan rezim pasang-surut alami untuk mencuci sedimen masam, memulihkan fluktuasi salinitas, dan memfasilitasi transportasi alami buah (*propagules*) mangrove asli dari zona inti; dan 3) pengayaan vegetasi berbasis zonasi spasial, yaitu penanaman aktif spesies asli dari famili Rhizophoraceae (seperti *Rhizophora apiculata*) pada area terbuka. Penanaman dipandu oleh peta kesesuaian lahan untuk memastikan semai tumbuh pada substrat dan frekuensi penggenangan yang tepat, sehingga mempercepat penutupan kanopi atas guna menekan bibit *Nypa fruticans* yang heliofit.

Monitoring spasial berkala menyediakan basis data yang objektif dan *verifiable* untuk mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*), khususnya SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim) dan SDG 15 (Ekosistem Daratan/Lautan). Kerusakan mangrove sejati memicu pelepasan



emisi karbon biru yang masif dari biomassa atas permukaan maupun sedimen bawah permukaan (Eddy *et al.*, 2021b). Integrasi data satelit penginderaan jauh dan lapangan memungkinkan penghitungan neraca emisi karbon wilayah secara presisi.

Peta runtun waktu yang menunjukkan pemulihan mangrove sejati serta penyusutan area vegetasi oportunistik menjadi bukti akuntabilitas program restorasi. Sinkronisasi data ini mendukung Pemerintah Daerah dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) untuk mengintegrasikan restorasi hutan mangrove ke dalam skema pendanaan iklim berbasis kinerja, seperti REDD+ atau *Nationally Determined Contributions* (NDC) Indonesia. Landasan data geospasial yang akurat mentransformasikan perlindungan mangrove menjadi model restorasi lahan basah berkelanjutan yang terukur dan diakui secara internasional.

## SIMPULAN

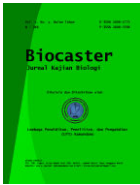
Berdasarkan studi literatur terhadap rangkaian penelitian global spasio-temporal, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan data satelit *time-series* multi-generasi (seperti *Landsat* dan *Sentinel-2*) yang diintegrasikan dengan platform komputasi awan GEE terbukti sangat andal dan efektif dalam memetakan trajektori spasial serta kronologi invasi vegetasi oportunistik pada ekosistem mangrove yang terdegradasi. Meskipun pemantauan temporal menggunakan sensor optik tunggal menghadapi tantangan metodologis berupa persistensi tutupan awan tropis, tumpang tindih spektral (*spectral overlap*), dan efek pencampuran nilai piksel (*pixel mixing*), peluang riset ke depan dapat diatasi melalui arsitektur integrasi data multi-sensor (sinergi optik dan radar *Sentinel-1*) serta validasi *drone* resolusi tinggi.

Pada akhirnya, peta runtun waktu prediktif ini membawa implikasi kebijakan yang strategis sebagai sistem peringatan dini untuk memandu intervensi restorasi fisik secara aktif (pengendalian mekanis, restorasi hidrologi, dan pengayaan vegetasi berbasis zonasi), sekaligus menyediakan basis data neraca karbon yang dapat diverifikasi dalam mendukung skema pendanaan iklim global serta pencapaian target pembangunan berkelanjutan (SDG 13 dan 15).

## SARAN

Berdasarkan hasil sintesis tinjauan literatur ini, keberhasilan pemantauan spasiotemporal ekspansi vegetasi oportunistik di hutan mangrove terdegradasi masih menghadapi hambatan teknis. Masalah utama terletak pada tingginya persistensi tutupan awan di wilayah pesisir tropis serta adanya tumpang tindih spektral (*spectral overlap*) dan efek *pixel mixing* pada citra beresolusi menengah, yang berpotensi menyamarkan deteksi dini koloni tumbuhan invasif pada fase inisiasi awal. Hambatan logistik dan aksesibilitas lapangan pada ekosistem lahan basah juga membatasi pengumpulan data validasi terestrial secara masif.

Oleh karena itu, gagasan dan arah penelitian selanjutnya harus difokuskan pada pengembangan arsitektur fusi data multi-sensor (*multi-sensor data fusion*) yang mengintegrasikan data optik temporal rapat (*Sentinel-2* atau *Landsat 9*) dengan data radar (*Sentinel-1* SAR) untuk memisahkan batas vegetasi berdasarkan



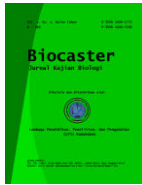
karakteristik struktural makro. Peneliti masa depan juga disarankan untuk mengeksplorasi pemanfaatan data struktur vertikal 3D dari GEDI LiDAR serta menerapkan algoritma berbasis *deep learning* (seperti CNN) pada platform *Google Earth Engine* (GEE) guna meningkatkan akurasi klasifikasi berbasis tekstur *landscape*. Akhirnya, integrasi validasi spasial beresolusi ultra-tinggi menggunakan teknologi *drone* (UAV) sangat direkomendasikan untuk memetakan dinamika tepi sungai skala mikro demi menyediakan kerangka kerja *early warning system* restorasi mangrove yang lebih presisi dan terukur.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih dan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada Program Studi Sains Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas PGRI Palembang, atas fasilitasi, iklim akademik yang kondusif, serta dukungan moral yang luar biasa sepanjang pelaksanaan penelitian ini. Penghargaan khusus juga kami dedikasikan kepada rekan sejawat, dan seluruh pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu yang telah memberikan bantuan teknis, sumbangsih pemikiran, serta asistensi berharga, baik selama proses pengumpulan data maupun analisis data spasial. Dukungan kolektif ini telah menjadi pilar penting dalam penyempurnaan dan keberhasilan penyusunan manuskrip ini.

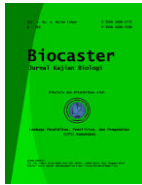
#### DAFTAR RUJUKAN

- Almond, R. E. A., Grooten, M., & Peterson, T. (2020). *Living Planet Report 2020 - Bending the Curve of Biodiversity Loss*. Gland: World Wildlife Fund.
- Alongi, D. M. (2022). Impacts of Climate Change on Blue Carbon Stocks and Fluxes in Mangrove Forests. *Forests*, 13(2), 1-15. <https://doi.org/10.3390/f13020149>
- AM, M. Z., Ambo-Rappe, R., & Selamat, M. B. (2021). Estimation of *Nypa fruticans* Biomass Using Sentinel 2A Satellite Data. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 860(1), 1-11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/860/1/012086>
- Barenblitt, A., Fatoyinbo, L., Thomas, N., Stovall, A., de Sousa, C., Nwobi, C., & Duncanson, L. (2024). Invasion in the Niger Delta: Remote Sensing of Mangrove Conversion to Invasive *Nypa fruticans* from 2015 to 2020. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 10(1), 5-23. <https://doi.org/10.1002/rse2.353>
- Basyuni, M., Gultom, K., Fitri, A., Susetya, I. E., Wati, R., Slamet, B., Sulistiyono, N., Yusriani, E., Balke, T., & Bunting, P. (2018). Diversity and Habitat Characteristics of Macrozoobenthos in the Mangrove Forest of Lubuk Kertang Village, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 19(1), 311-317. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190142>
- Basyuni, M., Sasmito, S. D., Analuddin, K., Ulqodry, T. Z., Saragi-Sasmito, M. F., Eddy, S., & Milantara, N. (2022). Mangrove Biodiversity, Conservation and Roles for Livelihoods in Indonesia. In Das, S.C., Pullaiah, & Ashton, E. C. (Eds.) *Mangroves: Biodiversity, Livelihoods and Conservation* (pp. 415-439). East Singapore, Singapore: Springer.

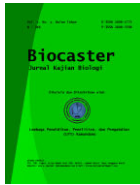


[https://doi.org/10.1007/978-981-19-0519-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0519-3_16)

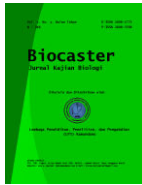
- Basyuni, M., Simanjuntak, E. O., Eddy, S., & Amelia, R. (2021). Carbon Stock and Vegetation Estimation the Abandoned Pond, Pulau Sembilan, North Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 912(1), 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/912/1/012006>
- Budiharta, S., & Holl, K. D. (2025). Harnessing Opportunities to Upscale Forest Landscape Restoration in Indonesia. *Trees, Forests and People*, 21(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100917>
- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G. (2017a). Estimation and Mapping of Above-Ground Biomass of Mangrove Forests and Their Replacement Land Uses in the Philippines Using Sentinel Imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134(1), 70-85. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.016>
- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo, S. G. (2017b). Soil C Quantities of Mangrove Forests, Their Competing Land Uses, and Their Spatial Distribution on the Coast of Honda Bay, Philippines. *Geoderma*, 293(1), 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.025>
- Chowdhury, A., Naz, A., & Maiti, S. K. (2023). Variations in Soil Blue Carbon Sequestration Between Natural Mangrove Metapopulations and a Mixed Mangrove Plantation: A Case Study from the World's Largest Contiguous Mangrove Forest. *Life*, 13(2), 1-11. <https://doi.org/10.3390/life13020271>
- Cooley, S. R., Schoeman, D. S., Bopp, L., Boyd, P., Donner, S., Ghebrehiwet, D. Y., Ito, S.-I., Kiessling, W., Martinetto, P., Ojea, E., Racault, M.-F., Rost, B., & Skern-Mauritzen, M. (2022). Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. In Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Lösschke, S., Möller, V., Okem, A., & Rama, B. (Eds.) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 379–550). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Eddy, S., & Basyuni, M. (2020). Short Communication: The Phenomenon of Nipah (*Nypa fruticans*) Invasion in the Air Telang Protected Forest, Banyuasin District, South Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(11), 5114-5118. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211116>
- Eddy, S., Dahlianah, I., Mashito, C., Oktavia, M., & Utomo, B. (2022). Anthropogenic Implications for Land Cover Changes and Vegetation Structure in Coastal Protected Forest. *Biodiversitas*, 23(9), 4473-4481. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230913>
- Eddy, S., Iskandar, I., Ridho, M. R., & Mulyana, A. (2017). Land Cover Changes in the Air Telang Protected Forest, South Sumatra, Indonesia (1989-2013). *Biodiversitas*, 18(4), 1538-1545. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180432>
- Eddy, S., Milantara, N., & Basyuni, M. (2021a). Carbon Emissions as Impact of Mangrove Degradation: A Case Study on the Air Telang Protected Forest, South Sumatra, Indonesia (2000-2020). *Biodiversitas*, 22(4), 2142-2149. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220464>
- Eddy, S., Milantara, N., Sasmito, S. D., Kajita, T., & Basyuni, M. (2021b). Anthropogenic Drivers of Mangrove Loss and Associated Carbon



- Emissions in South Sumatra, Indonesia. *Forests*, 12(2), 1-20. <https://doi.org/10.3390/f12020187>
- Eddy, S., Milantara, N., Setiawan, S. A. A., Taufik, M., Rosanti, D., Putri, S. A. D., & Rahmawati. (2024). Association and Distribution Patterns of Nipah (*Nypa fruticans*) in a Degraded Protected Mangrove Forest. *Biodiversitas*, 25(11), 4525-4534. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d251151>
- Eddy, S., Mutiara, D., Mediswati, R. Y. T., Rahman, R. G., Milantara, N., & Basyuni, M. (2021c). Short Communication: Diversity of Bird Species in Air Telang Protected Forest, South Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 22(12), 5274-5279. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d221206>
- Eddy, S., Ridho, M. R., Iskandar, I., & Mulyana, A. (2019). Species Composition and Structure of Degraded Mangrove Vegetation in the Air Telang Protected Forest, South Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 20(8), 2119-2127. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200804>
- Eddy, S., Setiawan, A. A., Milantara, N., Rahmawati, Billardi, A., & Sundoko, A. (2026). Accelerated Invasion of *Nypa fruticans* During 2000-2024 in Degraded Mangrove Ecosystem in Sumatra Analysed Using Google Earth Engine. *Biodiversitas*, 27(1), 1-11. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d270110>
- Eddy, S., Setiawan, A. A., Taufik, M., Oktavia, M., Utomo, B., & Milantara, N. (2023a). Loss of Carbon Stock as an Impact of Anthropogenic Activities in a Protected Mangrove Forest. *Biodiversitas*, 24(12), 6493-6401. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d241211>
- Eddy, S., Setiawan, A. A., Zaharaini, Utomo, B., & Oktavia, M. (2023b). Nipah (*Nypa fruticans*): Can It Be a Renewable Alternative Energy Source? *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 1180(1), 1-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1180/1/012042>
- Eddy, S., Sutikno, E., Mutiara, D., Setiawan, A. A., Taufik, M., & Milantara, N. (2025). Potential of Nipah (*Nypa fruticans*) in Producing Vegetable Oil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1477(1), 1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1477/1/012039>
- Farzanmanesh, R., Khoshelham, K., Volkova, L., Thomas, S., Ravelonjatovo, J., & Weston, C. J. (2024). Temporal Analysis of Mangrove Forest Extent in Restoration Initiatives: A Remote Sensing Approach Using Sentinel-2 Imagery. *Forests*, 15(3), 1-21. <https://doi.org/10.3390/f15030399>
- Feng, S., Li W., Xu, J., Liang, T., Ma, X., Wang, W., & Yu, H. (2022). Land Use/Land Cover Mapping Based on GEE for the Monitoring of Changes in Ecosystem Types in the Upper Yellow River Basin Over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 14(21), 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs14215361>
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A., & Shi, S. (2019). The State of the World's Mangrove Forests: Past, Present, and Future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(1), 89-115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>
- Ghorbanian, A., Zaghian, S., Asiyabi, M. R., Amani, M., Mohammadzadeh, A., & Jamali, S. (2021). Mangrove Ecosystem Mapping Using Sentinel-1 and



- Sentinel-2 Satellite Images and a Random Forest Algorithm in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(13), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs13132565>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202(1), 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hochard, J. P., Hamilton, S., & Barbier, E. B. (2019). Mangroves Shelter Coastal Economic Activity from Cyclones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(25), 12232-12237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820067116>
- Hu, L., Xu, N., Liang, J., Li, Z., Chen, L., & Zhao, F. (2020). Advancing the Mapping of Mangrove Forests at National-Scale Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Time-Series Data with Google Earth Engine: A Case Study in China. *Remote Sensing*, 12(19), 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs12193120>
- Husain, P., Al Idrus, A., & Ihsan, M. S. (2020). The Ecosystem Services of Mangroves for Sustainable Coastal Area and Marine Fauna in Lombok, Indonesia: A Review. *Jurnal Inovasi Pendidikan dan Sains*, 1(1), 1-7. <https://doi.org/10.51673/jips.v1i1.223>
- Islam, K. M. A., Murillo-Sandoval, P., Bullock, E., & Kennedy, R. (2025). Accelerated Adoption of Google Earth Engine for Mangrove Monitoring: A Global Review. *Remote Sensing*, 17(13), 1-37. <https://doi.org/10.3390/rs17132290>
- Liu, W., Li, L., Xue, Y., Liang, Q., Tao, Y., Wu, H., & Jiang, W. (2024). Phenomenon and Mechanisms of *Sonneratia apetala* Introduction and Spread, Promoting Excessive Growth of *Derris trifoliata*. *Forests*, 15(3), 1-14. <https://doi.org/10.3390/fl15030525>
- Numbere, A. O. (2019a). Impact of Invasive Nypa Palm (*Nypa fruticans*) on Mangroves in Coastal Areas of the Niger Delta Region, Nigeria. In Makowski, C., & Finkl, C. W. (Eds.) *Impacts of Invasive Species on Coastal Environments* (pp. 419-446). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Numbere, A. O. (2019b). Effect of Soil Types on Growth, Survival, and Abundance of Mangrove (*Rhizophora racemosa*) and Nypa Palm (*Nypa fruticans*) Seedlings in the Niger Delta, Nigeria. *American Journal of Environmental Sciences*, 15(2), 55-63. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2019.55.63>
- Numbere, A. O., & Moudingo, J. H. E. (2023). Scenarios of *Nypa fruticans* Invasion: Impacts and Management Strategies in West and Central Africa. *Journal of Coastal Research*, 39(1), 114-128. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-22A-00012.1>
- Nwobi, C., Williams, M., & Mitchard, E. T. A. (2020). Rapid Mangrove Forest Loss and Nipah Palm (*Nypa fruticans*) Expansion in the Niger Delta, 2007-2017. *Remote Sensing*, 12(14), 1-45. <https://doi.org/10.3390/rs12142344>
- Ouyang, X., Lee, S. Y., Connolly, R. M., & Kainz, M. J. (2018). Spatially-Uniform Resource Locator: <https://e-journal.lp3kamandanu.com/index.php/biocaster>



- Explicit Valuation of Coastal Wetlands for Cyclone Mitigation in Australia and China. *Scientific Reports*, 8(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21217-z>
- Rahman, K. S., Rahman, M. M., Dana, N. H., Adib, A., Al-Masud, A., Hossain, M. T., Rakkibu, M. G., Adhikary, N., Debrot, A. O., & Islam, M. N. (2024). Nypa-Based Land Uses and Ecosystem Services in the Tropics: A Review. *Ecological Indicators*, 159(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111613>
- Sasmito, S. D., Basyuni, M., Kridalaksana, A., Saragi-Sasmito, M. F., Lovelock, C. E., & Murdiyarso, D. (2023). Challenges and Opportunities for Achieving Sustainable Development Goals through Restoration of Indonesia's Mangroves. *Nature Ecology & Evolution*, 7(1), 62-70. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01926-5>
- Vu, T. T. P., Pham, TD., Saintilan, N., Skidmore, A., Luu, H. V., Vu, Q. H., Le, N. N., Nguyen, H. Q., & Matsushita, B. (2022). Mapping Multi-Decadal Mangrove Extent in the Northern Coast of Vietnam Using Landsat Time-Series Data on the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing*, 14(18), 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs14184664>
- Wang, Q., Cui, G., Liu, H., Huang, X., Xiao, X., Wang, M., Jia, M., Mao, D., Li, X., Xiao, Y., & Li, H. (2025). Spatiotemporal Dynamics and Potential Distribution Prediction of *Spartina alterniflora* Invasion in Bohai Bay Based on Sentinel Time-Series Data and MaxEnt Modeling. *Remote Sensing*, 17(6), 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs17060975>
- Yancho, J. M. M., Jones, T. G., Gandhi, S. R., Ferster, C., Lin, A., & Glass, L. (2020). The Google Earth Engine Mangrove Mapping Methodology (GEEMMM). *Remote Sensing*, 12(22), 1-35. <https://doi.org/10.3390/rs12223758>