DINAMIKA TUTUPAN MANGROVE DAN STOK KARBON DI PANTAI DUTA BERDASARKAN KLASIFIKASI RANDOM FOREST DAN GROUND-CHECK

ARTIFICAL INTELLIGENCE-BASED MONITORING OF WATER QUALITY IN THE SESAYAP RIVER ESTUARY, NORTH KALIMANTAN, INDONESIA

Anatasya Naswa Aprilia[1], Muhammad Yusuf[1], dan Viky Vidayanti[1]

[1]Departemen Biologi, Fakultas Sains, Teknologi, dan Matematika, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia
*e-mail: viky.vidayanti@ub.ac.id

ABSTRAK

Ekosistem mangrove berperan penting dalam dalam penyimpanan karbon, sehingga perlu dipantau untuk mencegah degradasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan tutupan kanopi, stok karbon atas tanah, serta hubungan keduanya pada mangrove Pantai Duta tahun 2021 dan 2025, sekaligus membandingkan estimasi satelit menggunakan InVEST dengan data lapangan. Nilai NDVI dan klasifikasi mangrove diperoleh dari citra Sentinel-2A melalui Google Earth Engine, sedangkan tutupan kanopi lapangan diukur menggunakan *hemispherical photography* dan dianalisis dengan ImageJ. Biomassa dihitung menggunakan persamaan alometrik dan dikonversi menjadi stok karbon. Evaluasi estimasi dilakukan dengan mengukur tingkat *overestimation* antara nilai InVEST dan median stok karbon *ground-check* yang telah disesuaikan dengan luas mangrove hasil klasifikasi GEE. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan tutupan kanopi dan stok karbon antar tahun, hubungan yang lemah antara NDVI, kanopi, dan stok karbon, serta nilai estimasi InVEST yang jauh lebih tinggi dibandingkan hasil lapangan. Hal ini menegaskan pentingnya integrasi penginderaan jauh dan pengamatan vegetasi untuk memperoleh estimasi karbon mangrove yang lebih akurat.

Kata kunci: Mangrove; NDVI; *Random Forest*; stok karbon

ABSTRACT

Mangroves are coastal ecosystems that play an important role in coastal protection and carbon storage, so monitoring of vegetation conditions and carbon stocks needs to be carried out periodically. This study aims to identify temporal changes in the mangroves at Duta Beach, canopy conditions based on NDVI, and carbon stocks through the integration of Sentinel-2 imagery and ground-checks. Sentinel-2 imagery from 2021 and 2025 was classified using the Random Forest algorithm, while NDVI was extracted specifically for mangrove pixels. Carbon stocks were calculated using InVEST and verified with a DBH-based allometric equation. The results showed a 5.04% increase in mangrove area over four years and a dominant shift towards the dense canopy category, accompanied by an increase in average NDVI, indicating improved vegetation conditions. Ground checks confirmed the dominance of *Rhizophora mucronata* and its largest carbon contribution to the tree stratum. Although canopy cover increased, InVEST-based carbon stock estimates showed a decline and resulted in overestimation compared to direct measurements. The correlation between carbon stocks, canopy cover, and NDVI was weak, so that these two canopy parameters cannot yet be used as indicators of carbon storage in the vegetation recovery phase. This indicates that visual improvement in canopy cover during the rehabilitation period do not always correlate with biomass accumulation, and carbon assessment still requires the integration of satellite imagery and field verification.

Keywords: carbon stock; Mangrove; NDVI; *Random Forest*

© Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peranan ekologis dan ekonomis sangat penting. Mangrove berfungsi melindungi garis pantai dari abrasi, meredam gelombang badai, dan menyediakan habitat berbagai biota perairan seperti ikan, udang, dan organisme pesisir lainnya (Rahmadi et al., 2023). Selain menyediakan berbagai jasa lingkungan, mangrove juga berperan signifikan sebagai penyerap dan penyimpan karbon biru *(blue carbon)*, sehingga menjadi komponen penting dalam mitigasi perubahan iklim (Fauzi et al., 2023). Menurut Alviana et al., (2023) ekosistem mangrove di Indonesia mampu menyerap sekitar 52,85 ton CO_2 per hektar per tahun, di mana angka tersebut hampir dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan rata-rata global yaitu 26,42 ton CO_2 per hektar per tahun. Besarnya potensi tersebut menegaskan pentingnya pemantauan kondisi ekosistem mangrove secara berkala, khususnya di kawasan pesisir Jawa yang memiliki fungsi ekologis strategis (Retnaningdyah et al., 2022).

Pantai Duta, yang terletak di Kabupaten Probolinggo, merupakan salah satu kawasan pesisir dengan ekosistem mangrove cukup luas dan produktif. Pada tahun 2021, dilakukan kegiatan rehabilitasi melalui penanaman sekitar 85.000 bibit mangrove di area ± 25 hektare sebagai upaya pemulihan kondisi pesisir. Meskipun kondisi vegetasinya relatif terjaga, kawasan ini tetap menghadapi ancaman abrasi serta tekanan pemanfaatan lahan sehingga pemantauan kondisi vegetasi dan struktur komunitas mangrove perlu dilakukan secara berkelanjutan (Syamsuddin et al., 2019).

Perkembangan teknologi penginderaan jauh menyediakan metode efisien untuk memetakan kondisi vegetasi dalam skala luas. Indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) yang berasal dari citra satelit dapat memberikan gambaran kerapatan tajuk dan kesehatan vegetasi, sehingga dapat mendukung analisis struktur komunitas mangrove secara cepat dan akurat (Vincentius et al., 2024). Apabila dikombinasikan dengan data *ground check*, pemetaan berbasis citra satelit dapat meningkatkan ketelitian estimasi parameter ekologi seperti kerapatan, komposisi jenis, dan cadangan/stok karbon (Andiani et al., 2021).

Analisis citra satelit, termasuk Sentinel-2, untuk pemetaan dan evaluasi kondisi mangrove telah banyak dilakukan dalam berbagai penelitian. Namun demikian, studi yang mengintegrasikan hasil analisis citra tersebut dengan data lapangan secara spesifik untuk memetakan struktur komunitas mangrove di Pantai Duta masih terbatas, padahal validasi lapangan penting untuk memastikan bahwa peta yang dihasilkan benar-benar merepresentasikan kondisi mangrove aktual di lapangan. Keterbatasan tersebut menunjukkan adanya celah penelitian sekaligus menjadi dasar kebaruan ilmiah dalam kajian ini. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan temporal mangrove Pantai Duta serta stok karbon berdasarkan citra satelit dan *ground-check*, dan hubungan stok karbon dengan kanopi.

METODOLOGI

Lokasi dan Data Citra

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus hingga Desember 2025. Pengamatan ekosistem mangrove dilakukan di kawasan mangrove Pantai Duta, Kabupaten Probolinggo. Ekosistem ini dikelola oleh Pokmaswas Pantai Duta dan sering melaksanakan program penanaman mangrove. Citra satelit yang digunakan merupakan hasil tangkapan Sentinel-2 Level-2A tahun 2021 dan 2025, yang diunduh dan diolah melalui platform *Google Earth Engine* (GEE).

Analisis Citra Satelit

Pengolahan citra Sentinel-2 Level-2A diawali dengan tahap pra-pengolahan mencakup pemotongan citra sesuai batas

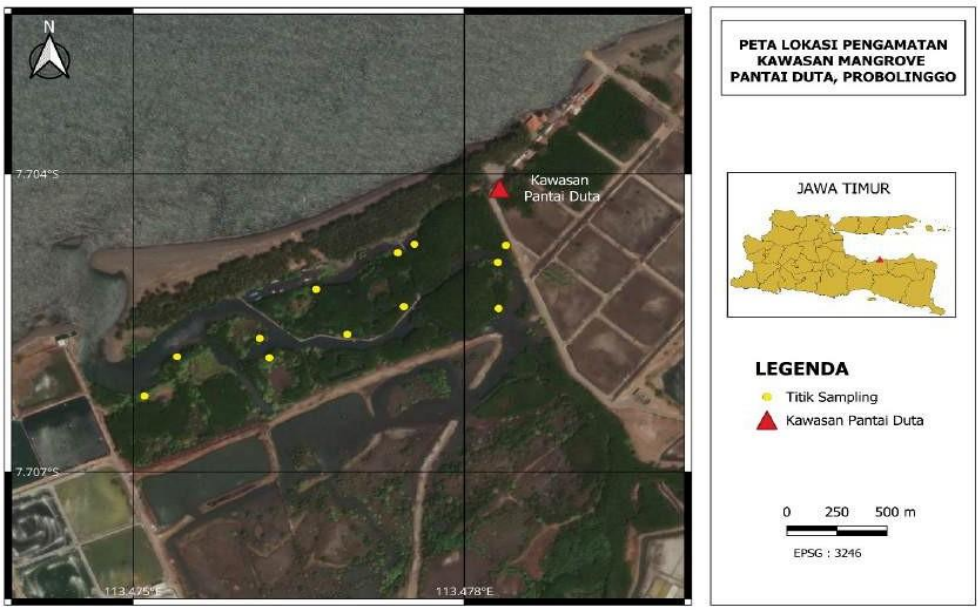
 © Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

lokasi penelitian, penyaringan awan dengan kriteria <10% yang mengacu Sudmanns et al. (2020) dan Putra et al. (2021), serta *cloud–cirrus masking* menggunakan band QA60. Citra yang telah bebas gangguan atmosfer selanjutnya disusun menjadi komposit median, dan enam band utama (B2, B3, B4, B8, B11, B12) digunakan sebagai variabel *predictor* karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap vegetasi pesisir dan variasi kelembapan lahan.

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest* dengan tiga kelas, yaitu mangrove, non-mangrove, dan perairan. *Random Forest* digunakan untuk menentukan luasan dan keberadaan mangrove, sedangkan NDVI digunakan untuk menggambarkan tingkat kerapatan kanopi pada area mangrove yang sama. Data pelatihan diperoleh melalui digitasi area dan dilatih menggunakan 200 *trees* dengan keenam band sebagai *predictor*. Kemudian diaplikasikan pada citra untuk memperoleh peta tutupan lahan resolusi 10 m. Luasan mangrove didapatkan langsung dari keluaran klasifikasi, sedangkan akurasi model dinilai melalui *confusion matrix*, *overall accuracy*, dan nilai *Kappa*. Selanjutnya, indeks NDVI dihitung menggunakan kanal merah dan inframerah dekat, namun diekstraksi hanya pada piksel yang telah terklasifikasi sebagai mangrove. Nilai NDVI kemudian dikelompokkan menjadi tiga kelas untuk menggambarkan tingkat kerapatan kanopi (rendah, sedang, dan tinggi) berdasarkan Pamungkas et al. (2021), dengan rentang nilai 0-0,33 menunjukkan kanopi jarang, 0,34-0,42 menunjukkan kanopi sedang, dan >0,43 menunjukkan kanopi rapat.

Ground check

Selain data citra, data lapangan (*ground check*) juga dikumpulkan untuk memvalidasi hasil interpretasi citra satelit. Survei lapangan dilakukan pada 12 titik menggunakan plot 10 × 10 m untuk tingkat pohon (diameter ≥ 5 cm) dan 5 × 5 m untuk tingkat pancang (diameter < 5 cm) (Gambar 1). Parameter yang diukur meliputi diameter batang (DBH) serta dokumentasi kanopi menggunakan foto hemisferis sebanyak tiga pengulangan per titik. Data ini digunakan untuk memverifikasi konsistensi kelas mangrove hasil klasifikasi serta mendukung interpretasi kerapatan tajuk (Dharmawan, 2020).



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel untuk *ground check* vegetasi mangrove Duta pada 2025

Penentuan Stok Karbon Atas Tanah: InVEST dan Ground-Check

Estimasi karbon berbasis citra dilakukan dengan memanfaatkan peta tutupan mangrove hasil klasifikasi. Luasan mangrove yang teridentifikasi pada masing-masing tahun dimasukkan ke dalam perangkat lunak InVEST *Carbon Storage* untuk menghitung simpanan karbon atas permukaan berdasarkan nilai simpanan karbon mangrove. Mengacu pada Fauzi et al. (2023) perhitungan difokuskan pada *Above-Ground Biomass* (AGB) dengan menggunakan acuan estimasi dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Tabel 2). Pendekatan ini menghasilkan estimasi stok karbon spasial tahun 2021 dan 2025, sehingga perubahan simpanan karbon dapat dikaji secara temporal.

Verifikasi karbon lapangan dilakukan melalui *ground check* melalui pengukuran DBH. Setiap individu mangrove dihitung biomassanya menggunakan persamaan alometrik spesifik mangrove (Tabel 3). Nilai biomassa kemudian dikonversi menjadi karbon menggunakan faktor 0,47 atau 47% sesuai SNI 7724:2011 (Hakim et al., 2021).

Tabel 2. Persamaan alometrik beberapa spesies mangrove yang teridentifikasi di Pantai Duta

Spesies	Biomassa	Sumber
Avicennia marina	$0{,}1848\ D^{2.23524}$	Dharmawan & Siregar (2008)
*Avicennia officinalis**	$0{,}251\rho D^{2{,}46}$	Komiyama et al. (2005)
*Sonneratia alba***	$0{,}3841\rho D^{2.101}$	Kauffman & Cole (2010)
Rhizopora mucronata	$0{,}1466\ D2{,}2136$	Dharmawan (2013)
Rhizopora stylosa	$0.1579D^{2{,}593}$	Komiyama et al. (2005)

Keterangan: * ρ *Avicennia officinalis* = 0,59** ρ *Soneratia alba* = 0,475

Analisis Hubungan Tutupan Kanopi dan Stok Karbon

Perubahan tutupan kanopi mangrove dan stok karbon di atas permukaan dievaluasi dengan membandingkan data tutupan kanopi hasil klasifikasi NDVI dari citra Sentinel-2 tahun 2021 dan 2025 dengan data stok karbon pengukuran langsung serta data estimasi stok karbon yang diperoleh dari model InVEST. Hubungan antara kedua variabel diuji menggunakan korelasi untuk mengetahui tingkat keeratan hubungan. Kemudian dilanjutkan dengan uji regresi guna mengidentifikasi pengaruh tutupan kanopi terhadap variasi stok karbon, baik berdasarkan data pengukuran langsung maupun hasil estimasi model InVEST. Seluruh analisis statistik tersebut kemudian dilakukan uji lanjutan tersebut menggunakan *Add-ins* pada aplikasi *Microsoft Excel*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

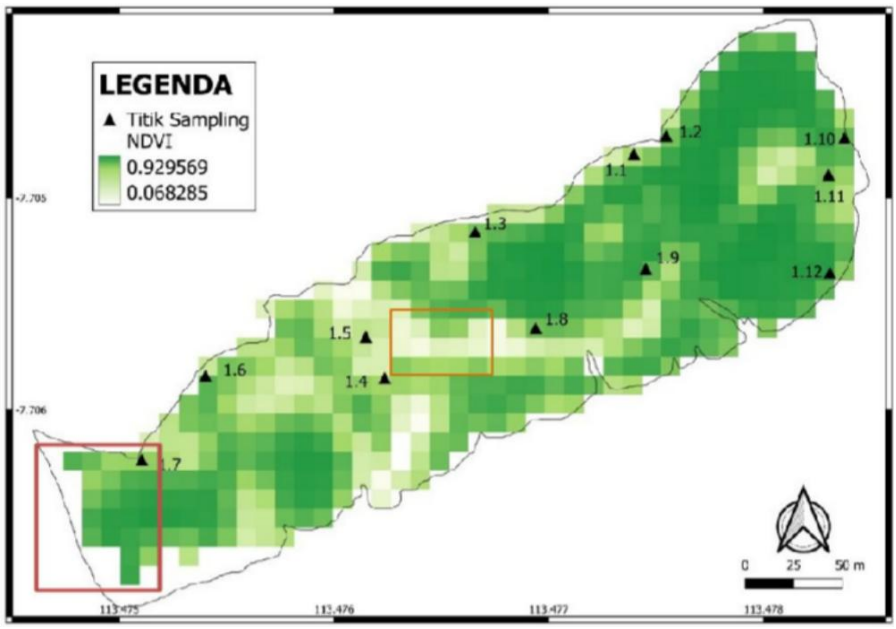
Perubahan Tutupan Kanopi Mangrove Pantai Duta Berdasarkan Citra Satelit

Analisis citra satelit Sentinel-2 menggunakan algoritma *Random Forest* menunjukkan bahwa luasan mangrove Pantai Duta meningkat sebesar 5,04% dengan tingkat akurasi 98,79% dan nilai koefisien Kappa mencapai 0.96. Luasan mangrove yang awalnya 4,01 ha pada tahun 2021 bertambah menjadi 4,21 ha pada tahun 2025 dari total area sampling 7,70 ha.

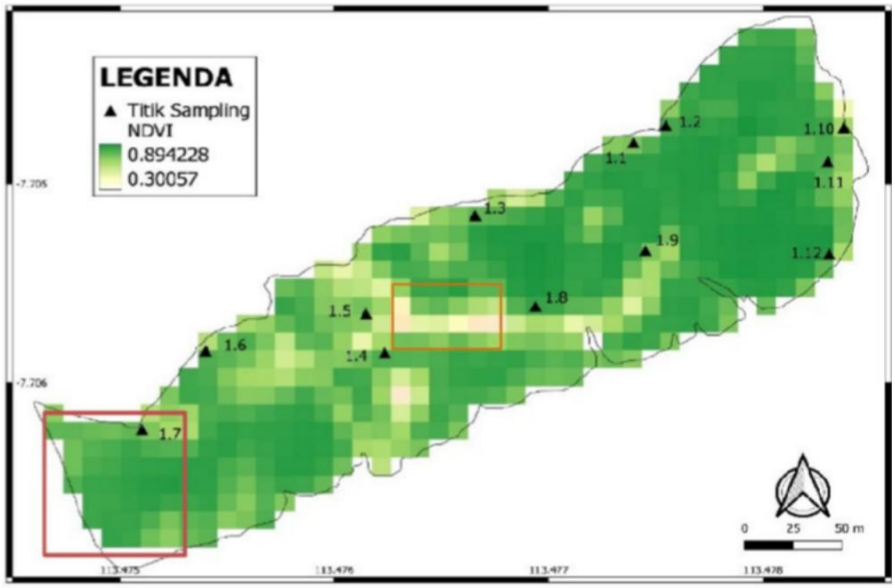
Nilai NDVI rata-rata meningkat dari 0,78 pada tahun 2021 menjadi 0,80 pada tahun 2025, yang mengindikasikan peningkatan kesehatan vegetasi secara umum. Peningkatan ini diperkuat oleh kenaikan nilai NDVI minimum dari 0,068 menjadi 0,300 (Gambar 2). Selain itu, tingkat kerapatan mangrove kategori tinggi meningkat sebesar 6,88%, sementara kategori sedang dan jarang menurun masing-masing sebesar 67,69% dan 97,04% dibandingkan tahun 2021 (Tabel 4).

 © Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

Peningkatan kerapatan yang lebih merata mencerminkan keberhasilan rehabilitasi mangrove dalam mendorong regenerasi alami, memperkuat tutupan kanopi, dan mengurangi area bervegetasi rendah yang sebelumnya mendominasi zona pesisir. Selain itu, peningkatan kerapatan mangrove dalam penelitian ini didasarkan pada hasil analisis NDVI, yang sangat dipengaruhi oleh kondisi dan kualitas citra satelit, seperti tingkat kecerahan, tutupan awan dan respon spektral vegetasi.



(a)



(b)

Gambar 2. Peta sebaran NDVI mangrove Pantai Duta pada tahun 2021 (a) dan 2025 (b). Peningkatan gradasi hijau menunjukkan meningkatnya kerapatan tajuk vegetasi, terutama pada zona tengah dan timur kawasan, yang konsisten dengan hasil klasifikasi kerapatan mangrove serta observasi titik sampling lapangan. Titik peningkatan kerapatan ditunjukkan oleh kotak merah dan badan perairan ditunjukkan oleh kotak orange

© Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

Tabel 4. Luasan tutupan mangrove pada tahun 2021dan 2025 berdasarkan NDVI di kawasan Pantai Duta

Kategori kerapatan mangrove	2021 (ha)	2025 (ha)	Perubahan
Jarang	0,0506	0,0015	Berkurang 97,04%
Sedang	0,0356	0,0115	Berkurang 67,70%
Rapat	3,9245	4,1999	Bertambah 7,02%
Total	4,0107	4,2129	

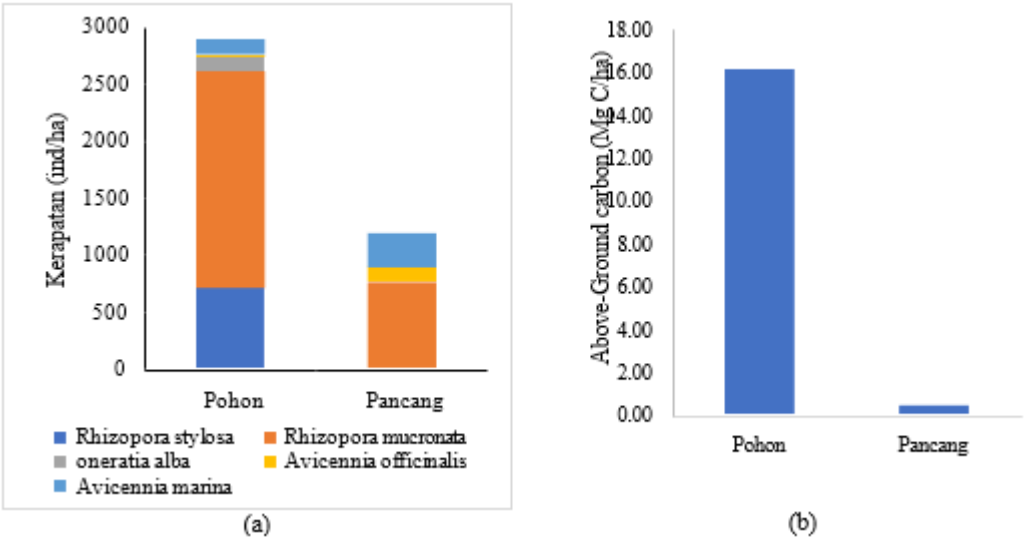
Peningkatan luasan ekosistem mangrove pada studi ini tidak hanya merepresentasikan bertambahnya area vegetasi, namun juga merupakan indikasi kestabilan struktur tegakan, berkurangnya *patch*, dan meningkatnya konektivits habitat. Peningkatan ini dapat dipengaruhi oleh regenerasi alami maupun kegiatan rehabilitasi yang bertujuan memulihkan fungsi ekosistem. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penanaman mangrove sering menjadi faktor utama yang berkontribusi terhadap peningkatan tutupan mangrove (Kusumadewi et al., 2024). Peningkatan nilai NDVI dari tahun 2021 menunjukkan vegetasi mangrove yang lebih sehat dan produktif, dengan tutupan kanopi yang lebih rapat (Lasaiba & Tetelepta, 2023; Prasetio et al., 2025; Irtanti et al. 2025). Oleh karena itu, peningkatan luasan mangrove yang terpantau melalui citra satelit di Pantai Duta mencerminkan kemajuan dalam proses pemulihan struktur vegetasi dan ekosistem mangrove di wilayah tersebut.

Penggunaan algoritma *Random Forest* dalam studi ini memberikan keterandalan dasar spasial untuk menilai dinamika luasan mangrove. Kondisi ini tercermin dari tingginya nilai akurasi dan nilai Kappa yang tinggi sehingga model yang digunakan secara konsisten memisahkan antara kelas mangrove, perairan, dan non-mangrove. Temuan ini konsisten dengan laporan Anshari et al. (2024) yang menemukan bahwa *Random Forest* unggul dalam pemetaan mangrove dengan nilai Kappa mendekati 1, karena pendekatan ensemble mampu meminimalkan kesalahan pada area spektral bercampur. Sementara itu, (Xue & Su, 2017; ; Winarso et al., 2020) lebih merekomendasikan penggunaan NDVI untuk menilai kondisi fisiologis tajuk. Hal ini disebabkan karena indeks ini memiliki keterbatasan pada kanopi yang sangat rapat dan sensitif terhadap kondisi air. Oleh karena itu interpretasinya sebaiknya didukung dengan pengamatan lapangan atau data tambahan seperti NDWI untuk memperoleh estimasi tutupan kanopi yang lebih akurat (Pramudya et al., 2025).

Estimasi Stok Above-Ground Carbon

Ground-check terhadap 12 titik menunjukkan bahwa vegetasi mangrove Pantai Duta terdiri atas pohon, pancang, dan semai. Jumlah pohon dan pancang mencapai 2900 dan 1200 ind.ha^{-1} (Gambar 3a). Tegakan pohon yang ditemukan terdiri atas *Rhizophora mucronata*, *R. stylosa*, *Avicennia marina*, *A. officinalis*, dan *Sonneratia alba*, sedangkan pada level pancang ditemukan tambahan taksa lain meliputi *R. stylosa* dan *S. alba*. *R. mucronata* diketahui memiliki kelimpahan tertinggi baik pada tegakan pohon (1908 ind.ha^{-1}) dan pancang (766 ind.ha^{-1}). Hasil estimasi terhadap stok karbon pada pengamatan lapang menunjukkan bahwa bagian atas tanah mangrove Pantai Duta menyimpan karbon sebesar 16,67 Mg C/ha dengan kontribusi dari tegakan pohon dan perdu sebesar 97% dan 3% (Gambar 3b). Selain itu, *R. mucronata* pada level pohon memiliki penyimpanan karbon atas tanah paling tinggi (9,89 Mg C/ha) dibandingkan tegakan pohon dan perdu dari taksa lainnya.

 © Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026



Gambar 3. (a) Kerapatan pohon dan pancang beberapa taksa vegetasi, serta (b) estimasi karbon *above-ground* mangrove di Pantai Duta

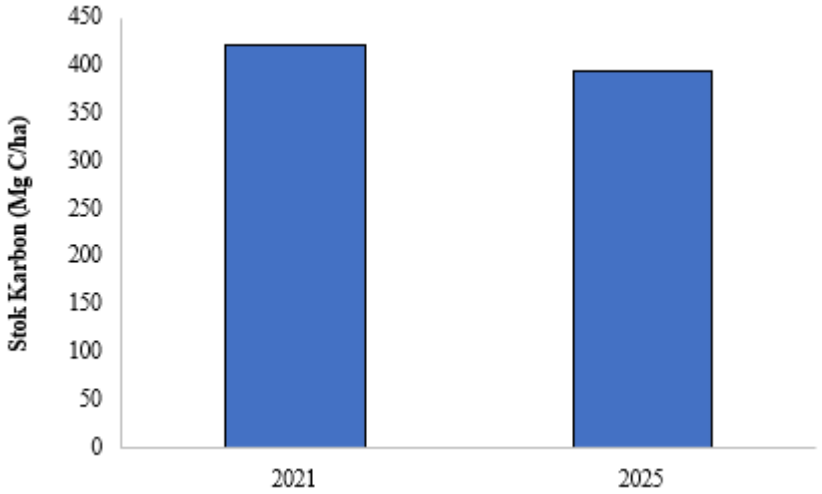
Pada studi ini juga dilakukan estimasi karbon *above-ground* berdasarkan citra satelit yang membandingkan level karbon antara 2021 dan 2025 dengan menggunakan aplikasi InVEST. Stok karbon *above-ground* di Pantai Duta mengalami penurunan sebesar 6,79% dari 423,97 Mg C/ha pada 2021 menjadi 395,16 Mg C/ ha pada 2025 meskipun kerapatan mangrove meningkat (Gambar 4). Kondisi ini didukung dengan berkurangnya atau turunnya nilai NDVI maksimum pada tahun 2025, yang dapat menjadi indikasi penurunan jumlah stok karbon. Selain itu, perbandingan estimasi stok karbon *above-ground* dari InVEST dan pengukuran langsung pada 2025 menunjukkan estimasi berlebihan (*over-estimation*) sebesar 3799.92%.

Hasil *ground-check* menunjukkan bahwa stok karbon atas tanah di Pantai Duta sangat dipengaruhi oleh komposisi taksa dan struktur tegakan. Dominasi *R. mucronata* baik pada level pohon maupun pancang berkontribusi signifikan terhadap akumulasi biomassa dibandingkan genus lain seperti *Avicennia* atau *Sonneratia*. Hal serupa dilaporkan oleh Fauzi et al. (2023), bahwa hutan mangrove yang didominasi *Rhizophora* cenderung memiliki biomassa dan stok karbon yang lebih tinggi dibandingkan komunitas yang didominasi *Avicennia*. Hal ini disebabkan oleh karakter morfologi *Rhizopora* yang memiliki batang berdiameter besar, kerapatan tinggi, dan sistem akar tunjang yang masif sehingga mampu menyimpan biomassa atas tanah lebih besar. Rasio kontribusi karbon yang lebih besar pada tegakan pohon menunjukkan bahwa meskipun regenerasi pada pancang tergolong baik, kontribusi biomassa akan signifikan setelah memasuki fase pohon (Uthbah et al., 2017; Karmila et al., 2020; Aprilita et al., 2024). Fenomena ini lazim pada ekosistem mangrove karena alometrik biomassa meningkat eksponensial seiring bertambahnya diameter batang. Oleh karena itu, tingginya kepadatan pancang di lokasi penelitian berpotensi meningkatkan stok karbon pada masa mendatang. (Khadafi et al., 2024). Faktor lain yang mendukung dominasi spesies ini adalah ketersediaan benih *Rhizopora* yang melimpah, serta kemampuannya untuk tumbuh dengan cepat dan menyebar secara luas di kawasan pesisir (Aprilita et al., 2024).

Walaupun *ground-check* menunjukkan kondisi tegakan dan regenerasi yang baik, estimasi berbasis citra Sentinel-2 melalui InVEST menunjukkan bahwa stok karbon *above-ground* di Pantai Duta mengalami penurunan. Perbandingan antara stok karbon berbasis InVEST dan

© Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

pengukuran langsung di lapang pada tahun 2025 menunjukkan adanya *over-estimation* sangat besar. Kondisi serupa juga ditunjukkan oleh studi yang dilakukan Fazilatunnisa et al. (2025). Selisih ini dapat muncul karena nilai karbon rata-rata berbasis ekosistem, model tidak bisa membedakan tegakan muda dan tua, serta terjadinya *mixed pixels* pada zona transisi. Apabila nilai masukan tidak mencerminkan tingkat perkembangan, ukuran, maupun jenis vegetasi yang ada di lokasi penelitian, maka estimasi yang dihasilkan berpotensi tidak akurat (Dashtbozorgi et al., 2023; Zhang & Fan, 2025).



Gambar 4. Perbandingan jumlah stok karbon *above-ground* mangrove Pantai Duta berdasarkan perhitungan aplikasi *InVEST* yang mengalami penurunan pada 2025

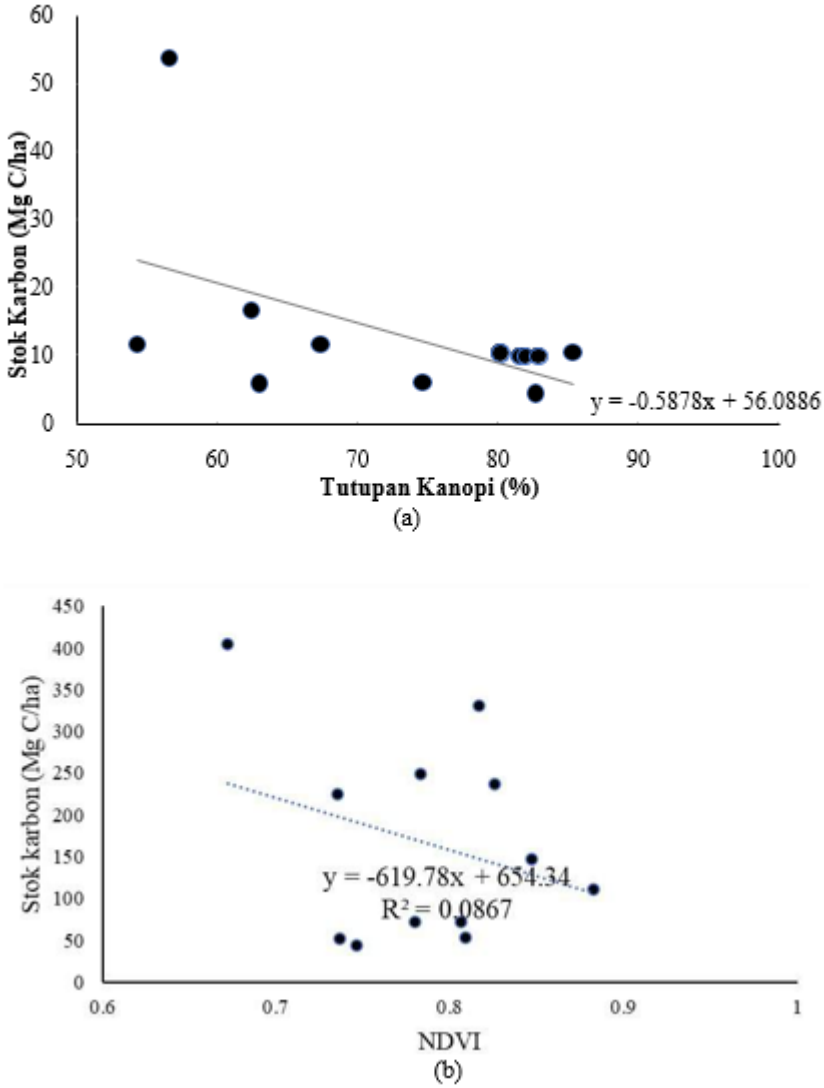
Hubungan Tutupan Kanopi dengan Stok Karbon *Above-Ground* Tahun 2025

Analisis korelasi dan regresi dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antara tutupan kanopi, NDVI, dan stok karbon mangrove berdasarkan data *ground check* dan citra satelit. Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan antara tutupan kanopi dan stok karbon bersifat positif (Gambar 4a) namun tidak signifikan ($p > 0.05$), dengan nilai R^2 rendah, yang menunjukkan bahwa kemampuan tutupan kanopi dalam menjelaskan variasi stok karbon masih terbatas. Meskipun peningkatan tutupan kanopi cenderung diikuti oleh peningkatan stok karbon, variabel ini bukan satu-satunya faktor penentu biomassa. Marzuki et al. (2023) menyatakan bahwa kesuburan tanah dan kerapatan vegetasi berperan penting dalam pembentukan biomassa mangrove, sementara Chiraz (2013) menegaskan bahwa karakteristik struktur tegakan seperti tinggi pohon, diameter batang, cakupan akar, dan struktur tegakan seperti tinggi pohon, diameter batang, cakupan akar, dan ukuran kanopi saling berkaitan dalam menentukan kemampuan pohon menyerap dan menyimpan karbon. Rahmawati & Chairul (2022) juga menekankan bahwa diameter batang merupakan komponen utama dalam menentukan kapasitas penyimpanan karbon karena biomassa meningkat seiring bertambahnya ukuran batang.

Hasil analisis korelasi dan regresi antara NDVI dan stok karbon bersifat negatif dan tidak signifikan ($p > 0.05$), dengan nilai R^2 rendah, yang mengartikan bahwa variasi NDVI hanya mampu menjelaskan sebagian kecil variasi stok karbon. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai NDVI tidak selalu diikuti oleh peningkatan stok karbon, khususnya pada mangrove berstruktur muda atau hasil rehabilitasi dengan ukuran batang kecil dan

 © Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

tajuk yang belum berkembang optimal. Berbeda dengan mangrove dewasa yang berkerapatan tinggi sebagaimana dijelaskan dalam penelitian Karmila et al. (2020), kondisi mangrove di lokasi penelitian masih didominasi tegakan muda, sehingga NDVI belum mampu merepresentasikan stok karbon secara optimal.



Gambar 5. Hubungan tutupan kanopi (a) dan NDVI (b) terhadap stok karbon *above-ground*. Kedua parameter menunjukkan korelasi rendah terhadap simpanan karbon.

Hubungan yang lemah antara tutupan kanopi, NDVI, dan stok karbon menunjukkan bahwa penutupan tajuk mangrove di Pantai Duta masih mencerminkan fase pertumbuhan awal, di mana peningkatan kerapatan tidak berbanding lurus dengan biomassa. Hal ini selaras dengan Uthbah et al. (2017); dan Karmila et al. (2020) yang menyatakan bahwa tegakan yang didominasi individu berdiameter kecil cenderung menghasilkan kerapatan tajuk yang tinggi namun karbon rendah. Dalam fase ini, tajuk berkembang lebih cepat dibandingkan volume batang, sehingga peningkatan penutupan tidak dapat dijadikan indikator langsung pertambahan simpanan karbon (Chiraz, 2013; Rahmawati & Chairul, 2022; Marzuki et al., 2023). Hal ini juga didukung oleh Lasaiba & Tetelepta (2023) yang menyatakan bahwa NDVI lebih menggambarkan aktivitas fotosintetik dan

© Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

kondisi fisiologis daun, bukan biomassa. Keterbatasan NDVI dapat pula berkaitan dengan pengaruh eksternal seperti salinitas, genangan, substrat, serta perbedaan tipe tajuk antar spesies mangrove (Pietersz et al., 2024), sehingga peningkatan nilai kerapatan daun tidak serta merta mencerminkan peningkatan stok karbon. Oleh karena itu, variabel kanopi pada Pantai Duta lebih memungkinkan sebagai penanda regenerasi vegetasi daripada stok karbon.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa luasan mangrove Pantai Duta mengalami peningkatan dari tahun 2021 ke 2025 berdasarkan klasifikasi *Random Forest*. NDVI yang digunakan sebagai indikator kerapatan dan kondisi kanopi mencerminkan peningkatan kesehatan vegetasi dan peningkatan area dengan kanopi kerapatan tinggi selama periode pengamatan. Hasil ground-check mengidentifikasi bahwa struktur tegakan didominasi oleh *R. mucronata* dengan kontribusi utama terhadap stok karbon atas tanah. Estimasi stok karbon melalui InVEST menunjukkan penurunan nilai karbon dalam selang waktu yang sama. Jika dibandingkan dengan pengukuran langsung, jumlah karbon hasil estimasi InVEST mengalami overestimation sebesar 3799.92%. Uji korelasi dan regresi menunjukkan bahwa hubungan stok karbon dengan tutupan kanopi dan NDVI bersifat lemah, sehingga kedua parameter tajuk tersebut belum dapat dijadikan indikator langsung dalam penentuan besaran simpanan karbon pada kondisi vegetasi saat ini.

Saran

Penelitian ini menunjukkan bahwa estimasi stok karbon menggunakan InVEST masih jauh berbeda dari hasil pengukuran lapangan sehingga diperlukan penyesuaian nilai input yang lebih sesuai dengan karakteristik mangrove di Pantai Duta, khususnya terkait ukuran pohon, kerapatan, dan kondisi tegakan. Pengumpulan data *ground check* perlu dilakukan secara lebih luas agar parameter struktur vegetasi dapat menggambarkan kondisi aktual dengan lebih akurat. Selain itu, metode penginderaan jauh dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan indeks vegetasi atau data resolusi lebih tinggi agar pemetaan kanopi dan sebaran mangrove menjadi lebih detail dan mendukung evaluasi ekosistem secara berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) Universitas Brawijaya atas pendanaan penelitian melalui skema Dana Internal Fakultas MIPA (Skema B) Nomor: 06455.25/UN10.F0901/B/PT/2025, serta kepada pengelola kawasan Mangrove Pantai Duta atas izin dan dukungan selama kegiatan lapangan, termasuk bantuan dari Sandrina Jahja, Tiara Fazilatunnisa, dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

Alviana, D., Anggraini, R., Hidayati, J. R., Karlina, I., Lestari, F., Apdillah, D., Syakti, A. D., & Sihite, D. (2023). Estimasi Cadangan Karbon Pada Ekosistem Mangrove Di Desa Pengudang Kecamatan Teluk Sebong Kabupaten Bintan. *Jurnal Kelautan Tropis*, *26*(3), 464–472. https://doi.org/10.14710/jkt.v26i3.18326

Andiani, A. A. E., Karang, I. W. G. A., Putra, I. N. G., & Dharmawan, I. W. E. (2021). Hubungan Antar Parameter Struktur Tegakan Mangrove Dalam Estimasi Simpanan Karbon Aboveground Pada Skala Komunitas. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, *13*(3), 485–496. https://doi.org/10.29244/jitkt.v13i3.36363

 © Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

Anshari, R., Jauhari, A., & Mufidah. (2024). Menganalisis tutupan lahan dan *Urban Heat Index* (UHI) yang ada di Kota Pangkalan Bun. *Jurnal Hutan Tropis, 12*(3), 327–335.

Aprilita, D., Supratman, O., & Farhaby, A. M. (2024). Estimasi Stok Karbon Ekosistem Mangrove Sebagai Upaya Pengelolaan Blue Carbon di Desa Riding Panjang Kabupaten Bangka. *Jurnal Laut Khatulistiwa*, *7*(3), 173–189. https://doi.org/10.26418/lkuntan.v7i3.81929

Bajaj, M., Sasaki, N., Tsusaka, T. W., Venkatappa, M., Abe, I., & Shrestha, R. P. (2024). Assessing changes in mangrove forest cover and carbon stocks in the Lower Mekong Region using Google Earth Engine. *Innovation and Green Development*, *3*(3), 100140. https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100140

Chiraz, M. C. (2013). Growth of Young Olive Trees: Water Requirements in Relation to Canopy and Root Development. *American Journal of Plant Sciences*, *4*(7), 1316–1344. https://doi.org/10.4236/ajps.2013.47163

Dashtbozorgi, F., Hedayatiaghmashhadi, A., Dashtbozorgi, A., Ruiz–Agudelo, C. A., Fürst, C., Cirella, G. T., & Naderi, M. (2023). Ecosystem services valuation using InVEST modeling: Case from southern Iranian mangrove forests. *Regional Studies in Marine Science*, *60*. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102813

Fauzi, I., Alamsyah, R., Uspar, & Liswahyuni, A. (2023). Tarjih : Fisheries and Aquatic Studies. *Fisheris and Aquatic Studies*, *3*(2), 062–073.

Hakim, R., Suyanto, & Asyari, M. (2021). Estimasi cadangan karbon atas permukaan tanah di kawasan hutan lindung Liang Anggang Kota Banjarbaru Kalimantan Selatan. *Jurnal Sylva Scienteae*, *4*(5), 793–802.

Irtanti, A. E., Mukhtar, E., & Solfiyeni, S. (2025). Analysis of Mangrove Canopy Cover with MonMang Application in Gemuruh River, West Sumatra, Indonesia. *Jurnal Biologi Tropis*, *25*(3), 3135–3140. https://doi.org/10.29303/jbt.v25i3.9593

Karmila, D., Jauhari, A., & Kanti, R. (2020). Estimasi Nilai Cadangan Karbon Menggunakan Analisis Ndvi (Normalized Difference Vegetation Index) Di Khdtk Universitas Lambung Mangkurat. *Jurnal Sylva Scienteae*, *3*(3), 451-459. https://doi.org/10.20527/jss.v3i3.2178

Khadafi, M. F., Herison, A., Romdania, Y., & Khotimah, S. N. (2024). Daya Lenting Akar Mangrove Rhizophora sp. sebagai Peredam Gelombang (Studi Kasus Pantai Dewi Mandapa, Pesawaran). *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, *12*(1), 77–88. https://doi.org/10.23960/jrsdd.v12i1.4488

Kusumadewi, S. D., Nadhira, S., & Purnomo, H. (2024). *Pembelajaran Restorasi dan Pengelolaan Mangrove Berbasis Masyarakat. In Pembelajaran Restorasi dan Pengelolaan Mangrove Berbasis Masyarakat*. CIFOR-ICRAF. https://doi.org/10.17528/cifor-icraf/009341

Lasaiba, M. A., & Tetelepta, E. G. (2023). Analisis Spasial Kerapatan Vegetasi Kota Ambon Berbasis Normalized Difference Vegetation Index (Ndvi). *Jurnal Pengembangan Kota*, *11*(2), 124–139. https://doi.org/10.14710/jpk.11.2.124-139

Marzuki, M., Nurdin, N., Yasir, I., Mashoreng, S., & Selamat, M. B. (2023). Estimasi Stok Karbon Biomassa pada Ekosistem Mangrove

Menggunakan Data Satelit di Pulau Nunukan Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara. *Majalah Ilmiah Globe*, *25*(1), 63–76.

Pamungkas, B., Kurnia, R., Riani, E., & Taryono. (2021). Klasifikasi Luasan Ekosistem Mangrove di Desa Pantai Bahagia, Muara Gembong dengan Metode Normalized Difference Vegetation Index. *Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, *12*(3), 821–831.

Pietersz, J. H., Pribadi, R., Pentury, R., & Ario, R. (2024). Estimasi Tutupan Kanopi Berdasarkan NDVI dan Kondisi Tutupan Tajuk Pada Ekosistem Mangrove Negeri Passo, Teluk Ambon Dalam. *Jurnal Kelautan Tropis*, *27*(2), 197–208. https://doi.org/10.14710/jkt.v27i2.22090

Pramudya, F. A., Wibisana, H., & Aryaseta, B. (2025). Analisis Spasial Kerapatan Vegetasi Hutan Mangrove Di Kawasan Pesisir Bedul Kabupaten Banyuwangi. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, *9*(5), 8422–8429. https://doi.org/10.36040/jati.v9i5.15081

Prasetio, W., Manihuruk, A., & Al-abrar, G. (2025). Pengukuran kesehatan dan luasan mangrove di Kecamatan Muaragembong: Pendekatan analisis kerapatan tajuk. *Jurnal Geologi Kelautan*, 23(1), 30–45. http://dx.doi.org/10.32693/jgk.23.1.2025.919

Putra, I. K. A. S., Bashit, N., & Wahyuddin, Y. (2021). Analisis Pengaruh Limpasan Sedimen Tersuspensi Terhadap Perubahan Kerapatan dan Luas Hutan Mangrove Menggunakan Citra Sentinel-2A Multitemporal. *Jurnal Geodesi Undi*p, *10*(2), 58–68.

Rahmadi, M. T., Yuniastuti, E., Suciani, A., Harefa, M. S., Persada, A. Y., & Tuhono, E. (2023). Threats to Mangrove Ecosystems and Their Impact on Coastal Biodiversity: A Study on Mangrove Management in Langsa City. *Indonesian Journal of Earth Sciences*, *3*(2), A627. https://doi.org/10.52562/injoes.2023.627

Rahmawati, L., & Chairul, C. (2022). Estimasi Cadangan Karbon di Atas Permukaan Tanah di Hutan Kawasan Wisata Ngalau Indah Kota Payakumbuh. *Jurnal Biologi Universitas Andalas*, *10*(2), 78–84. https://doi.org/10.25077/jbioua.10.2.78-84.2022

Retnaningdyah, C., Febriansyah, S. C., & Hakim, L. (2022). Evaluation of the quality of mangrove ecosystems using macrozoobenthos as bioindicators in the Southern Coast of East Java, Indonesia. *Biodiversitas*, *23*(12), 6480–6491. https://doi.org/10.13057/biodiv/d231247

Sudmanns, M., Tiede, D., Augustin, H., & Lang, S. (2020). Assessing global Sentinel-2 coverage dynamics and data availability for operational Earth observation (EO) applications using the EO- Compass. *International Journal of Digital Earth*, *13*(7), 768–784. https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1572799

Syamsuddin, N., Santoso, N., & Diatin, I. (2019). Inventarisasi Ekosistem Mangrove di Pesisir Randutatah, Kecamatan Paiton, Jawa Timur. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, *9*(4), 893–903. https://doi.org/10.29244/jpsl.9.4.893-903

Uthbah, Z., Sudiana, E., & Yani, E. (2017). Analisis biomasa dan cadangan karbon pada berbagai umur tegakan damar (*Agathis dammara* (Lamb.) Rich.) di KPH Banyumas Timur. *Scripta Biologica*, *4*(2), 119-124. https://doi.org/10.20884/1.sb.2017.4.2.404

 © Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026

Vincentius, A., Parera, G. R. J., & Woda, M. R. R. (2024). Estimasi Stok Biomassa Karbon Mangrove Menggunakan Citra Satelit Sentinel-2A di Teluk Maumere Bagian Barat. *ACROPORA: Jurnal Ilmu Kelautan Dan Perikanan Papua*, *7*(2), 30–41. https://doi.org/10.31957/acr.v7i2.4282

Dharmawan, I. W. E. (2020). *Hemispherical Photography: Analisis Persentase Tutupan Kanopi Komunitas Mangrove*. Nas Media Pustaka.

Winarso, G., Kamal, M., Rosid, M. S., Asriningrum, W., & Supriatna, J. (2020). Kajian Pustaka Asesmen Status Kondisi Ekosistem Mangrove. *Sriwijaya Bioscientia*, *1*(2), 14–22.

Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, *2017*. https://doi.org/10.1155/2017/1353691

Zhang, R., & Fan, J. (2025). Classification and Carbon-Stock Estimation of Mangroves in Dongzhaigang Based on Multi-Source Remote Sensing Data Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, *17*(6), 1–25. https://doi.org/10.3390/rs17060964

© Hak Cipta oleh Jurnal Harpodon Borneo Tahun 2026