

Distribusi Spasial Kesehatan Mangrove Pada Citra Satelit Multitemporal Sebagai Upaya Mitigasi Perubahan Iklim

Anggun Tridawati¹⁾, Armijon²⁾, Atika Sari³⁾, Soni Darmawan⁴⁾

^{1), 2)} Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

³⁾ Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional Bandung

Email : anggun.tridawati@eng.unila.ac.id¹⁾, armijon@eng.unila.ac.id²⁾, atika.sari@eng.unila.ac.id³⁾, soni_darmawan@itenas.ac.id⁴⁾

ABSTRACT

Mangrove forests are coastal ecosystems that play a strategic role in climate change mitigation through shoreline protection, blue carbon storage, and the provision of ecosystem services. Periodic monitoring of mangrove health is essential to support sustainable management and ecosystem restoration. This study aims to map the spatial distribution and analyze the dynamics of mangrove health in Labuhan Maringgai District, East Lampung Regency, Lampung Province, using Sentinel-2A imagery from 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, and 2023. Mangrove health was assessed using the Mangrove Health Index (MHI), developed from four vegetation indices: Normalized Burn Ratio (NBR), Green Chlorophyll Index (GCI), Structure Insensitive Pigment Index (SIPI), and Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI). Validation of annual mangrove spatial distribution using a confusion matrix resulted in an overall accuracy (OA) ranging from 90% to 94%. The results show a significant increase in the area of mangroves in the good health category from 1.73 ha (2015) to 540.04 ha (2023), accompanied by a decrease in the poor health category from 138.64 ha to 21.34 ha. Fluctuations in the moderate health category reflect natural growth dynamics and the influence of anthropogenic activities. These findings highlight the role of adaptive, multi-temporal spatial data-based management in maintaining mangrove health and prioritizing restoration in areas classified as poor.

Keywords : mangrove health index, mangrove, vegetation index

ABSTRAK

Hutan mangrove merupakan ekosistem pesisir yang memiliki peran strategis dalam mitigasi perubahan iklim melalui perlindungan garis pantai, penyimpanan karbon biru, dan penyediaan jasa ekosistem. Pemantauan kesehatan mangrove secara periodik sangat penting untuk mendukung pengelolaan berkelanjutan dan restorasi ekosistem. Penelitian ini bertujuan memetakan distribusi spasial dan menganalisis dinamika kesehatan mangrove di Kecamatan Labuhan Maringgai, Lampung Timur, Provinsi Lampung, menggunakan citra Sentinel-2A tahun 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, dan 2023. Kesehatan mangrove dihitung menggunakan Mangrove Health Index (MHI) yang dibangun dari empat indeks vegetasi, yaitu Normalized Burn Ratio (NBR), Green Chlorophyll Index (GCI), Structure Insensitive Pigment Index (SIPI), dan Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI). Validasi distribusi spasial mangrove setiap tahun menggunakan confusion matrix menghasilkan tingkat akurasi keseluruhan (OA) antara 90–94%. Hasil penelitian menunjukkan tren peningkatan signifikan luas mangrove kategori kesehatan baik dari 1,73 ha (2015) menjadi 540,04 ha (2023), diikuti penurunan luas kategori buruk dari 138,64 ha menjadi 21,34 ha. Fluktuasi pada kategori sedang menunjukkan dinamika pertumbuhan alami dan pengaruh aktivitas antropogenik. Temuan ini menegaskan peran pengelolaan adaptif berbasis data spasial multi-temporal untuk mempertahankan kesehatan mangrove serta memprioritaskan restorasi pada area berkategori buruk.

Kata Kunci : mangrove health index, mangrove, indeks vegetasi

1. Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan fenomena yang terjadi di seluruh dunia yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer bumi. Perubahan iklim memengaruhi keanekaragaman hayati, spesies, dan produktivitas ekosistem (Jones dkk., 2020, Thompson, 2019). Saat ini, perubahan iklim adalah ancaman nyata bagi bumi dan seisinya. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memperkirakan bahwa perubahan iklim akan menyebabkan sekitar 250.000 kematian hingga tahun 2050 (Watts dkk., 2015) sehingga mitigasi perlu dilakukan terkait dampak perubahan iklim (Assembly, 2015).

Hutan mangrove berperan penting dalam perlindungan pesisir, penyimpanan karbon, pemeliharaan keanekaragaman hayati, menyediakan penghidupan bagi masyarakat lokal, dan berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim (Alongi, 2012, Donato dkk., 2011, Duke dkk., 2007). Untuk cadangan karbon global, hutan mangrove dapat menyimpan lima kali lebih banyak dibandingkan hutan beriklim sedang dan tropis (Watts dkk., 2015, Kauffman dkk., 2011). Meskipun jumlah mangrove di dunia hanya sekitar 0,7% dari semua hutan tropis, mereka dapat menyimpan karbon sebanyak 2,5 kali lebih banyak daripada semua emisi karbon dioksida di seluruh dunia. Selain itu, mangrove memainkan peran yang signifikan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca (Watts dkk., 2015). Oleh karenanya, perlindungan mangrove adalah pendekatan terbaik untuk mengatasi perubahan iklim (Alongi, 2012, Donato dkk., 2011, Kauffman dkk., 2011). Hal tersebut tentunya didukung oleh Pemerintah Indonesia yang memprakarsai konservasi dan restorasi mangrove sebagai program prioritas nasional yang tertuang dalam SDG's (Arifanti dkk., 2022).

Hutan mangrove dunia seluas 147.000 km² tumbuh dan tersebar di 118 negara (Ochiai dkk., 2022) dimana sekitar 75% populasi mangrove hidup di 15 negara (Du dkk., 2023) dan 6,9% hidup di kawasan hutan lindung (Ximenes dkk., 2023). Sebagian populasi mangrove hidup di Asia Tenggara terutama di Myanmar, Indonesia, dan Malaysia (Zhang dkk., 2023). Indonesia memiliki ekosistem mangrove terbesar di dunia, mencakup sekitar 26–29% ekosistem mangrove dunia. Namun permasalahannya adalah hutan mangrove memiliki laju deforestasi yang tinggi yaitu sekitar 0,26–0,66% per tahun (Hamilton and Casey, 2016). Lebih dari sepertiga (35%) total populasi mangrove telah hilang selama 50 tahun terakhir (Gouvêa dkk., 2022). Asia telah berkontribusi terhadap 36% hilangnya mangrove sejauh ini (Arifanti dkk., 2022). Menurunnya ekosistem mangrove di Indonesia terutama disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan untuk pemukiman, pariwisata, industri, pertambangan, pertanian, penebangan kayu, budidaya perikanan, dan penggunaan lainnya (Cahyaningsih dkk., 2022, Rudianto dkk., 2020). Hilangnya ekosistem mangrove telah berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca (Murdiyarso dkk., 2015).

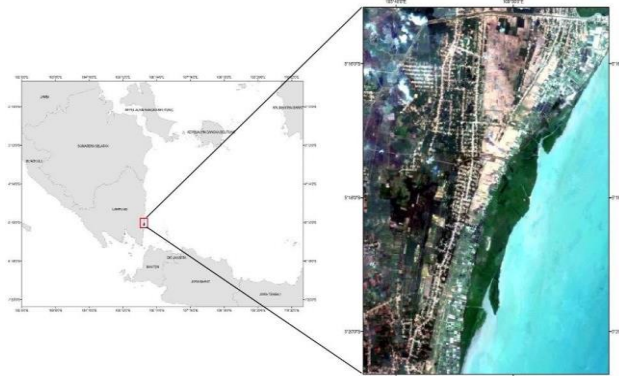
Monitoring dan pemetaan ekosistem mangrove termasuk mengestimasi kesehatan hutan mangrove merupakan program strategi nasional dalam pengelolaan ekosistem mangrove di Indonesia (Murdiyarso dkk., 2015). Strategi ini diperlukan untuk memastikan bahwa perubahan tidak membahayakan fungsi ekologi dan sosial ekonomi. Ini dapat merugikan generasi saat ini dan masa depan (Darmawan dkk., 2022b). Oleh karena itu data dan informasi keberadaan dan kesehatan ekosistem mangrove mutlak diperlukan dalam pengelolaan mangrove. Kenyataannya pengelolaan hutan mangrove berkelanjutan sering menghadapi masalah berkaitan dengan kurangnya data, informasi, dan ilmu pengetahuan terkait ekosistem mangrove (Darmawan dkk., 2022a, Lee dkk., 2014, Primavera dkk., 2012). Umumnya, penginderaan jauh digunakan untuk studi dengan biaya yang murah (Chellamani dkk., 2014, Zhang dkk., 2021).

Di dalam penginderaan jauh, umumnya mengintegrasikan citra satelit untuk interpretasi (pengenalan kondisi aktual) (Koswara dkk., 2017) dan indeks vegetasi untuk mengidentifikasi kepadatan kanopi, distribusi spesies, dan kesehatan tanaman (Razali dkk., 2019). Untuk melihat kesehatan tanaman, dapat dianalisis berdasarkan *normalized difference vegetation index* (NDVI) (Hidayah and Rachman, 2023). Indeks kesehatan mangrove (MHI) merupakan pendekatan baru yang dikembangkan untuk mengusulkan metrik tunggal dan mengestimasi kesehatan mangrove berdasarkan tiga parameter utama diantaranya: diameter, tutupan kanopi dan kepadatan yang dipilih dari berbagai variabel menggunakan algoritma PCA (Koswara dkk., 2017). Beberapa peneliti menghitung MHI dengan menggunakan citra satelit berdasarkan nilai NDVI, diantaranya adalah (Diyah dkk., 2019, Akbar dkk., 2020, Sukojo and Arindi, 2019). Berdasarkan hasil terbaru, menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara parameter tersebut dengan indeks vegetasi, yang dapat diidentifikasi melalui citra. Oleh karena itu, nilai MHI dihitung dari beberapa indeks yaitu NBR, GCI, SIPI, dan ARVI (Nurdiansah and Dharmawan, 2021).

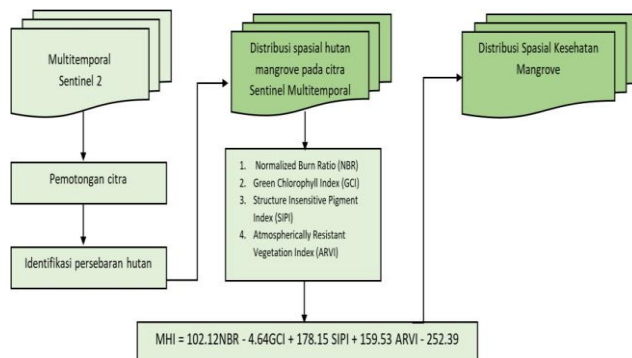
Meskipun beberapa penelitian telah memanfaatkan penginderaan jauh untuk memetakan distribusi dan luasan mangrove, studi yang secara khusus memetakan kesehatan ekosistem mangrove masih relatif terbatas, terutama yang menggunakan pendekatan MHI. MHI mengintegrasikan parameter biofisik, struktural, dan ekologi mangrove sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif terkait kondisi ekosistem. Namun, penerapan MHI di Indonesia masih jarang dilakukan dan umumnya dengan cakupan wilayah terbatas. Selain itu, ketersediaan data multi-temporal yang konsisten untuk memantau dinamika kesehatan mangrove juga menjadi tantangan tersendiri. Kesenjangan penelitian ini menunjukkan perlunya pengembangan metode pemetaan kesehatan mangrove berbasis MHI secara multi-temporal, sehingga dapat mendukung pengambilan kebijakan konservasi dan restorasi yang berbasis data ilmiah.

2. Pembahasan

Penelitian dilakukan di hutan mangrove di Kecamatan Labuhan Maringgai, Lampung Timur, Provinsi Lampung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan metodologi penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Lokasi Penelitian



Gambar 2. Metode penelitian

Pengumpulan data

Penelitian ini menggunakan citra satelit Sentinel 2 tahun 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, dan 2023 yang diperoleh dari <https://scihub.copernicus.eu/>. Citra Sentinel-2 adalah citra resolusi menengah generasi terbaru yang diluncurkan pada tahun 2015 dan dikelola oleh Badan Antariksa Eropa dan terdiri dari dua konstelasi satelit yang mengorbit kutub pada orbit sinkron matahari yang sama, mencakup wilayah dari lintang 56°-84° (Drusch dkk., 2012, Hagolle dkk., 2015). Dinamika spasial ekosistem pesisir, terutama mangrove, sering dipantau oleh Citra Sentinel 2 (Kawamuna dkk., 2017, Wang dkk., 2019) karena memberikan akurasi yang cukup baik (Ghorbanian dkk., 2021).

Identifikasi distribusi spasial hutan mangrove

Identifikasi distribusi spasial hutan mangrove dilakukan dengan cara digitasi *on-screen* pada citra Sentinel 2A tahun 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, dan 2023. Digitasi *on-screen* adalah proses mengonversi informasi dari citra digital (Sentinel-2A) ke dalam bentuk digital yang dapat diproses oleh perangkat lunak SIG dengan cara manual. Teknik ini merupakan alternatif untuk memasukkan data vektor tanpa menggunakan alat digitasi otomatis. Hasil interpretasi kemudian

diklasifikasikan berdasarkan kelompok mangrove, air, dan non mangrove (Darmawan dkk., 2020). Dalam penelitian ini, komposit warna NIR, SWIR, dan biru digunakan untuk mempertajam tampilan hutan mangrove.

Identifikasi distribusi spasial kesehatan hutan mangrove

Identifikasi distribusi spasial kesehatan mangrove dilakukan melalui perhitungan MHI. MHI adalah sebuah indeks yang digunakan untuk mengukur dan memantau kesehatan ekosistem mangrove dan dibangun melalui 4 indeks vegetasi diantaranya, NBR, GCI, SIPI, dan ARVI. Perhitungan MHI mengikuti formulasi empiris yang dikembangkan oleh (Nurdiansah and Dharmawan, 2021), dimana bobot setiap indeks vegetasi diperoleh dari hasil analisis regresi berganda antara nilai indeks vegetasi dan parameter ekologi mangrove di lapangan dengan nilai korelasi yang signifikan ($r = 0,831$). Formulasi menghitung MHI:

$$\text{MHI} = 102,12 \text{ NBR} - 4,64 \text{ GCI} + 178,15 \text{ SIPI} + 159,53 \text{ ARVI} - 252,39$$

Dimana,

$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

$$\text{GCI} = \frac{\text{NIR}}{\text{GREEN}} - 1$$

$$\text{SIPI} = \frac{\text{NIR} - \text{BLUE}}{\text{NIR} - \text{RED}}$$

$$\text{ARVI} = \frac{\text{NIR} - 2\text{RED} + \text{BLUE}}{\text{NIR} + 2\text{RED} + \text{BLUE}}$$

Keterangan:

NIR : band inframerah dekat

SWIR : band inframerah gelombang pendek

GREEN : band hijau

BLUE : band biru

RED : band merah

Formula MHI menunjukkan koefisien setiap indeks (102,12; -4,64; 178,15; 159,53) merepresentasikan bobot kontribusi relatif masing-masing indeks terhadap skor MHI, sedangkan konstanta -252,39 berfungsi sebagai penggeser nilai (*offset*). Dalam penelitian ini, indeks NBR memiliki kontribusi positif terbesar kedua setelah SIPI dan ARVI, sementara GCI berkontribusi negatif kecil terhadap MHI.

Nilai MHI kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga kategori dasar: Buruk (0–33%), Sedang (33–66%), dan Baik (66–100%). Klasifikasi dilakukan berdasarkan distribusi nilai MHI terstandarisasi untuk tiap tahun pengamatan.

Validasi

Validasi menggunakan *confusion matrix* antara hasil digitasi mangrove dan citra *Google Earth* dilakukan untuk mengukur tingkat akurasi distribusi hutan mangrove yang telah dibuat. Proses ini melibatkan perbandingan antara data hasil digitasi dengan citra *Google Earth* (sebagai data referensi yang diasumsikan lebih mendekati kondisi sebenarnya di lapangan). *Confusion matrix* menyajikan jumlah piksel atau titik sampel yang terklasifikasi benar maupun salah sehingga memungkinkan perhitungan parameter akurasi seperti *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Coefficient*. Dengan metode ini, dapat diketahui sejauh mana hasil digitasi mangrove merepresentasikan kondisi aktual di lapangan, sekaligus mengidentifikasi potensi kesalahan klasifikasi yang perlu diperbaiki.

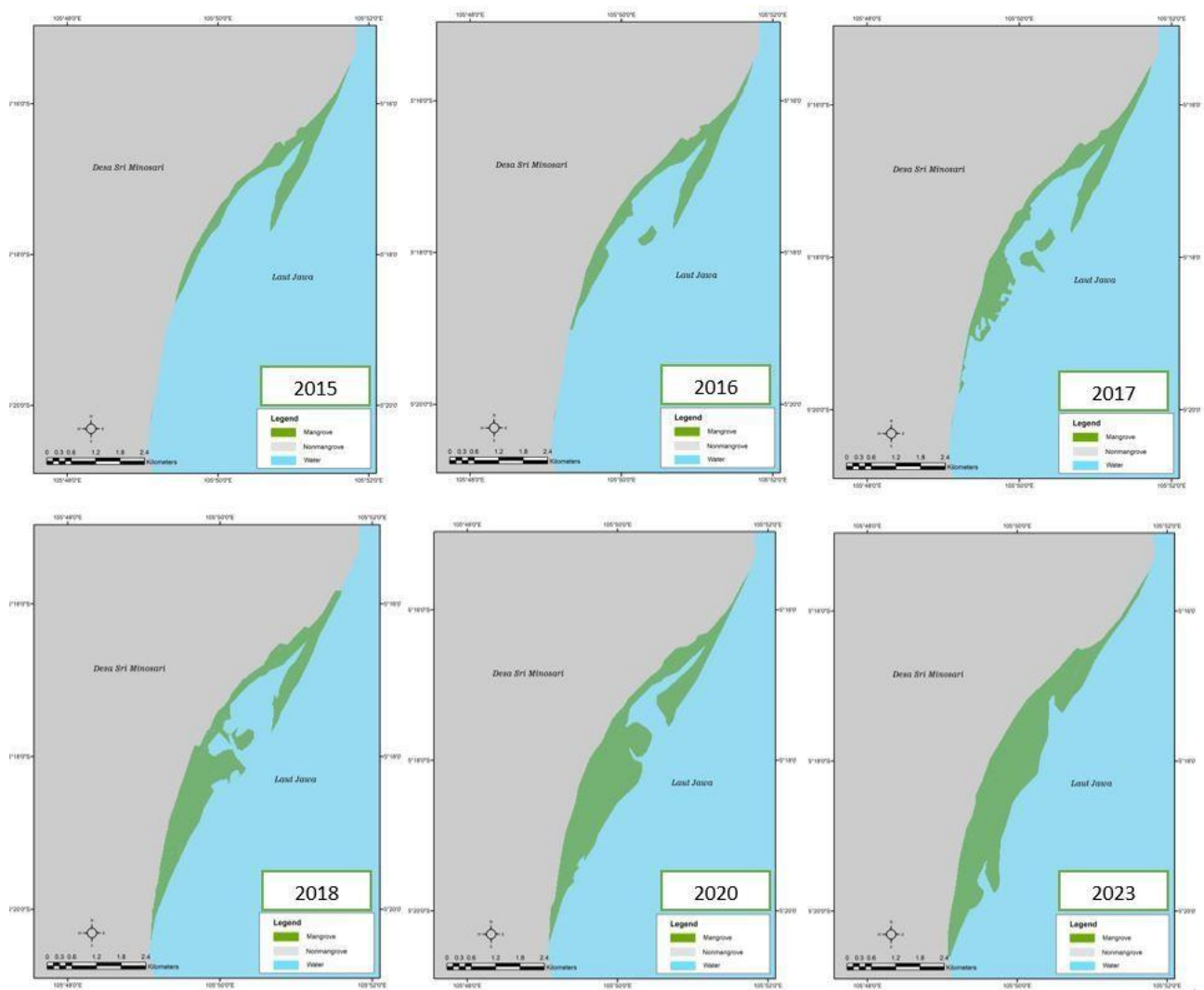
Hasil Penelitian

Identifikasi distribusi spasial kesehatan mangrove dilakukan di Kecamatan Labuhan Maringgai, Lampung Timur, Provinsi Lampung melalui citra satelit Sentinel 2A yang diakuisisi pada tahun 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, dan 2023.

Identifikasi kesehatan mangrove dilakukan melalui perhitungan MHI yang dibangun melalui 4 indeks diantaranya, NBR, GCI, SIPI, dan ARVI (Nurdiansah and Dharmawan, 2021).

Distribusi spasial hutan mangrove

Distribusi spasial hutan mangrove diperoleh dari digitasi *on-screen* menggunakan citra satelit sentinel 2A pada tahun 2015, 2016, 2017, 2018, 2020, dan 2023. Penggunaan lahan hasil digitasi tersebut dikategorikan dalam 3 kelas yaitu mangrove, non mangrove dan perairan. Luasan mangrove mengacu pada total area yang ditempati oleh hutan mangrove di seluruh dunia, yang mencakup ekosistem pantai dengan vegetasi khas yang tumbuh di daerah pasang surut tropis dan subtropis (Giri, 2021, Spalding, 2010). Selanjutnya, distribusi spasial hutan mangrove hasil digitasi dilakukan uji akurasi menggunakan tabel *confusion matrix* (Tabel 1). Distribusi spasial hutan mangrove beserta luasnya dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Peta distribusi hutan mangrove di Kecamatan Labuan Maringgai

Tabel 1. *Tabel Confusion Matrix Hasil Validasi Hutan Mangrove terhadap Citra Google Earth*

Tahun	Referensi / Prediksi	Mangrove	Non-Mangrove	Total	<i>Producer's Accuracy (%)</i>
2015	Mangrove	23	2	25	92
	Non-Mangrove	1	24	25	96
	Total	24	26	50	OA = 94.00%

Tahun	Referensi / Prediksi	Mangrove	Non-Mangrove	Total	<i>Producer's Accuracy (%)</i>
2016	Mangrove	22	3	25	88
	Non-Mangrove	2	23	25	92
	Total	24	26	50	OA = 90.00%

Tahun	Referensi / Prediksi	Mangrove	Non-Mangrove	Total	<i>Producer's Accuracy (%)</i>
2017	Mangrove	24	1	25	96
	Non-Mangrove	2	23	25	92
	Total	26	24	50	OA = 94.00%

Tahun	Referensi / Prediksi	Mangrove	Non-Mangrove	Total	<i>Producer's Accuracy (%)</i>
2018	Mangrove	23	2	25	92
	Non-Mangrove	1	24	25	96
	Total	24	26	50	OA = 94.00%

Tahun	Referensi / Prediksi	Mangrove	Non-Mangrove	Total	<i>Producer's Accuracy (%)</i>
2020	Mangrove	22	3	25	88
	Non-Mangrove	1	24	25	9
	Total	23	27	50	OA = 92.00%

Tahun	Referensi / Prediksi	Mangrove	Non-Mangrove	Total	<i>Producer's Accuracy (%)</i>
2023	Mangrove	23	2	25	92
	Non-Mangrove	2	23	25	92
	Total	25	25	50	OA = 92.00%

Berdasarkan hasil *confusion matrix* untuk periode 2015–2023 (Tabel 1), tingkat akurasi keseluruhan (*Overall Accuracy*) berkisar antara 90% hingga 94%, yang menunjukkan bahwa hasil digitasi mangrove memiliki kesesuaian yang sangat tinggi dengan data referensi citra *Google Earth*. Nilai *Producer's Accuracy* untuk kelas mangrove berada pada rentang 88–96%, yang berarti sebagian besar area mangrove pada data referensi berhasil teridentifikasi dengan benar, meskipun masih terdapat kesalahan omisi (mangrove yang tidak terklasifikasi sebagai mangrove). Nilai *Producer's Accuracy* kelas non-mangrove juga relatif tinggi (92–96%), menandakan kesalahan komisi tergolong rendah. Tingginya nilai akurasi ini sejalan dengan pendapat Congalton dan Green (2019) bahwa OA di atas 85% umumnya dikategorikan sebagai klasifikasi dengan tingkat kepercayaan tinggi. Namun, fluktuasi kecil pada PA, khususnya pada tahun 2016 dan 2020, mengindikasikan adanya variasi kualitas data atau perbedaan interpretasi visual yang dapat dipengaruhi oleh kondisi citra (misalnya tutupan awan, resolusi, atau

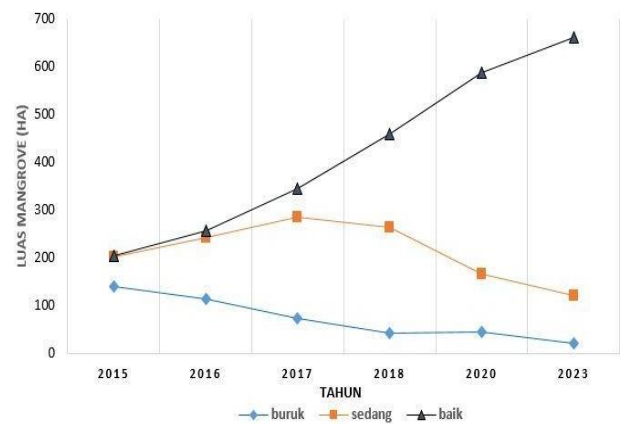
perubahan musiman vegetasi) sebagaimana dijelaskan oleh Foody (2002) dalam kajian tentang ketidakpastian klasifikasi berbasis penginderaan jauh.

Perubahan luas area mangrove

**Gambar 4.** *Grafik perubahan luas mangrove*

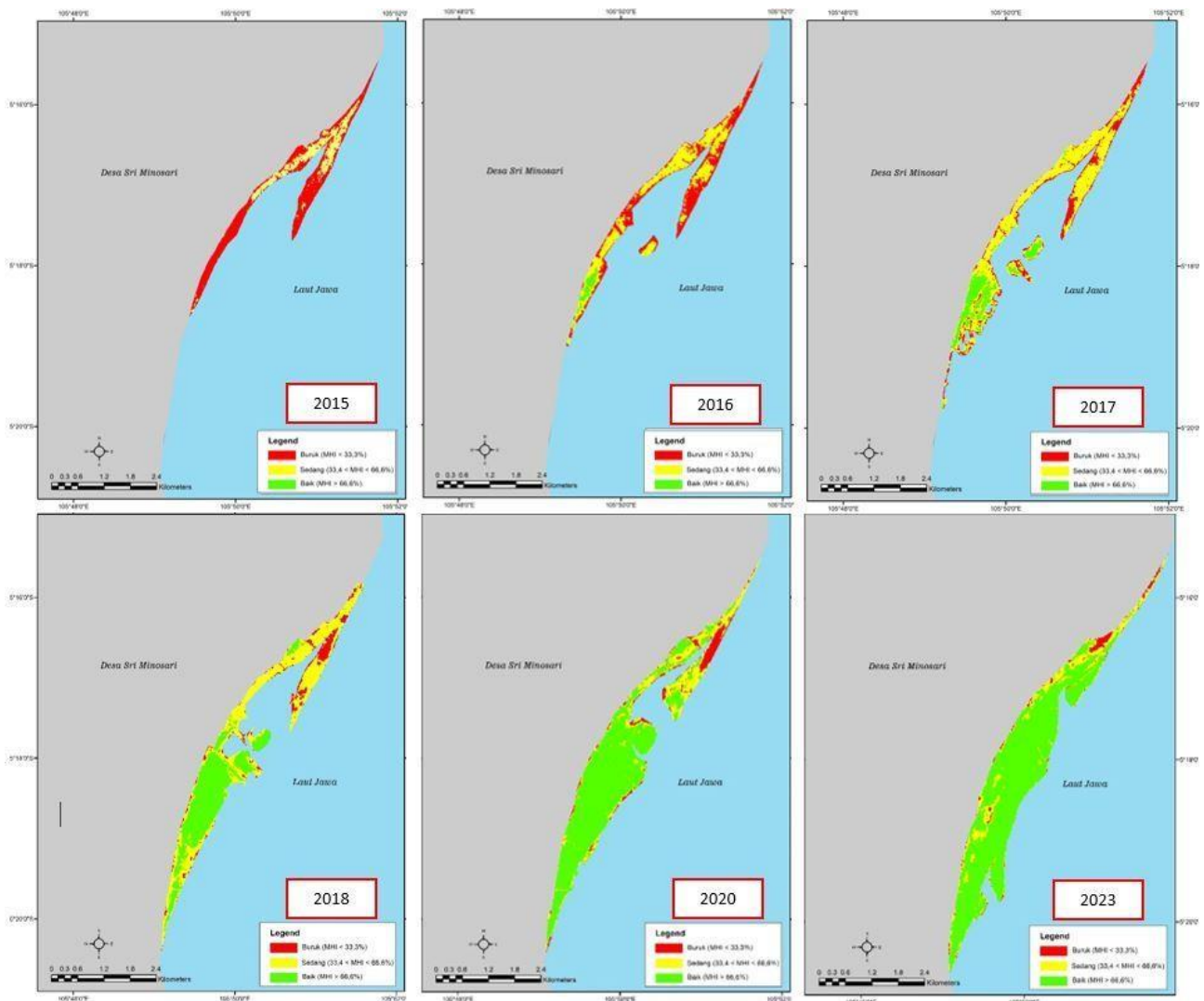
Berdasarkan hasil yang diperoleh (Gambar 4), terlihat bahwa perubahan luasan mangrove di Kecamatan Labuan Maringgai mengalami kecenderungan positif yaitu terjadinya peningkatan luasan mangrove dari tahun ke tahun. Pada tahun 2015, luasan hutan mangrove sebesar 203,99 ha, kemudian pada tahun 2016 dan 2017 luasan hutan mangrove meningkat menjadi 256,01 Ha dan 344,06 Ha. Selanjutnya, pada tahun 2018, menunjukkan adanya peningkatan yang paling tinggi dalam rentang waktu satu tahun yaitu 114,87 Ha sehingga luas hutan mangrove menjadi 458,93 Ha. Terdapat beberapa faktor yang menyebabkan mangrove semakin luas; salah satunya adalah ombak besar di pesisir barat, sedangkan ombak tenang di pesisir timur dan selatan. Pada tahun 2020, luas hutan mangrove mengalami peningkatan menjadi 586,58 Ha, sedangkan pada tahun 2023 luas hutan mangrove mengalami peningkatan menjadi 550,68 Ha. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa mangrove mampu tumbuh dan hidup di pesisir timur dan selatan (Damsir dkk., 2023).

LUAS KESEHATAN MANGROVE



Gambar 5. Perubahan Luas Kesehatan Mangrove

Distribusi spasial kesehatan mangrove



Gambar 6. Peta distribusi kesehatan hutan mangrove di Kecamatan Labuan Maringgai

Distribusi spasial kesehatan mangrove diperoleh dari perhitungan MHI. Hasil perhitungan MHI selanjutnya dikategorikan ke dalam tiga kelas yaitu buruk, sedang dan baik (Nurdiansah and Dharmawan, 2021) (Gambar 6).

Dalam menilai distribusi spasial kesehatan mangrove, indeks kesehatan mangrove digunakan. Indeks kesehatan mangrove dibuat dengan mengubah citra menggunakan kombinasi *band*. Infra-merah-dekat dan infra-merah gelombang pendek dan *band* biru, hijau, merah, dan indeks vegetasi lainnya digunakan untuk membuat indeks kesehatan mangrove. *Band-band* ini sensitif terhadap zat hijau pada tanaman. Selanjutnya, kondisi hutan mangrove dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori: buruk, sedang, dan baik (Gambar 6) (Nurdiansah and Dharmawan, 2021).

Distribusi spasial kesehatan mangrove sangat bervariasi dan bergantung pada sumber ancaman, serta intensitasnya (Sugiana dkk., 2022). Berdasarkan hasil perhitungan MHI, secara visual menunjukkan adanya dinamika luas dan kesehatan mangrove yang ada di kecamatan Labuan Maringgai. Hasil analisis menunjukkan kecenderungan positif dimana pertambahan luas diikuti dengan pertambahan kesehatan hutan mangrove (Gambar 5). Secara keseluruhan, Gambar 5 menunjukkan bahwa dari tahun 2015-2023, hutan mangrove dengan kondisi kesehatan baik mengalami kecenderungan positif yaitu terus mengalami peningkatan luasan. Hal tersebut berbanding terbalik dengan hutan mangrove dengan kondisi kesehatan yang buruk. Dari tahun 2015-2023, kondisi mangrove dengan kategori buruk, terus mengalami penurunan.

Hutan mangrove di Kecamatan Labuan Maringgai pada tahun 2015 sebagian besar terdiri dari mangrove dengan kondisi kesehatan yang buruk. Sekitar 138,64 ha dari hutan mangrove tersebut berada dalam kondisi kesehatan buruk, kurang lebih 63,62 ha berada dalam kondisi kesehatan sedang, dan 1,73 ha berada dalam kondisi kesehatan baik. Beberapa faktor Yang menyebabkan kondisi kesehatan mangrove buruk adalah adanya tekanan akibat pengelolaan yang kurang memperhatikan aspek kelestarian (Susilawati dkk., 2018), serangan hama, penyakit dan makhluk hidup lain (A'an dkk., 2018), dan ketidaksesuaian antara lingkungan dengan tanaman (Safei dkk., 2019). Selanjutnya, pada tahun 2016, hutan mangrove di Labuan Maringgai dengan kondisi kesehatan buruk berkurang sekitar 25,74 Ha menjadi 112,90 Ha. kategori kesehatan sedang mengalami peningkatan luas menjadi 129,39 Ha, dan kategori kesehatan baik meningkat menjadi 13,72 ha. Pada tahun 2017, hutan mangrove dengan kategori kesehatan baik meningkat menjadi 60,54 Ha, kondisi kesehatan sedang meningkat menjadi 210,61 Ha, dan mangrove dengan kondisi kesehatan buruk menurun menjadi 72,91 Ha.

Berdasarkan hasil analisis citra yang dilakukan pada tahun 2018, kondisi kesehatan mangrove kembali meningkat secara signifikan. Hal ini terjadi secara alami dikarenakan mangrove tumbuh dan hidup di lokasi kajian. Pada tahun 2018, hutan mangrove dengan kategori kesehatan baik meningkat menjadi 196,76 Ha, kondisi kesehatan sedang meningkat menjadi 219,11 Ha, dan

mangrove dengan kondisi kesehatan buruk menurun menjadi 43,06 Ha. Selanjutnya pada tahun 2020, luas hutan mangrove dengan kondisi baik meningkat menjadi 419,75 Ha, kondisi kesehatan sedang menurun menjadi 122,78 Ha, dan kondisi kesehatan buruk sedikit meningkat menjadi 44,05 Ha. Hal ini didukung oleh peneliti Rahmat Safei 2019 (Safei dkk., 2019), yang mengatakan bahwa manajemen hutan mangrove masih belum baik dalam mengatasi kerusakan tanaman. Meskipun demikian, kondisi kesehatan mangrove terus membaik setiap tahunnya, hingga pada tahun 2023, hutan mangrove dengan kondisi baik meningkat menjadi 540,04 Ha, kondisi kesehatan sedang menurun menjadi 99,21 Ha, dan kondisi kesehatan buruk menurun menjadi 21,34 Ha.

Peningkatan luas kesehatan mangrove kategori baik pada periode 2015–2023 berpotensi dipengaruhi oleh keberhasilan program rehabilitasi lokal, dinamika deposisi sedimen yang mendukung pertumbuhan mangrove, serta berkurangnya tekanan lahan seperti penebangan atau konversi menjadi tambak. Penelitian ini sejalan dengan Apriliyani dkk., hutan mangrove Desa Margasari dikelola oleh masyarakat yang tinggal di sekitarnya (Apriliyani dkk., 2020). Akibatnya, interaksi masyarakat dengan hutan mangrove memengaruhi kelestarian hutan, sehingga pengelolaan dan manajemen yang baik diperlukan untuk berdampak pada kesehatan hutan mangrove.

Sebaliknya, penurunan luas kesehatan mangrove kategori buruk konsisten dengan pemulihan alami di area yang sebelumnya terdegradasi atau akibat berkurangnya gangguan antropogenik. Mekanisme pengukuran kesehatan mangrove yang digunakan dalam studi ini memanfaatkan kombinasi empat indeks vegetasi dengan sensitivitas berbeda: NBR yang peka terhadap kondisi kelembapan dan kerusakan tajuk, GCI yang mengukur kandungan klorofil, SIPI yang mengindikasikan rasio pigmen karotenoid terhadap klorofil, dan ARVI yang relatif tahan terhadap gangguan atmosfer. Sinergi keempat indeks ini menghasilkan metrik komposit (MHI) yang mampu memberikan gambaran menyeluruh kondisi tajuk mangrove.

Implikasinya, mangrove dengan kondisi kesehatan buruk sebaiknya menjadi prioritas restorasi untuk memulihkan fungsi ekosistem dan kapasitas penyerapan karbon, sementara mangrove dengan kondisi kesehatan baik layak dipertahankan sebagai zona konservasi ketat untuk menjaga stok karbon biru yang signifikan. Hasil tren ini juga dapat digunakan sebagai dasar penjadwalan monitoring berkala, misalnya tahunan pasca-musim hujan, guna menangkap dinamika pertumbuhan vegetasi dan respon terhadap intervensi pengelolaan. Temuan ini sejalan dengan studi di beberapa wilayah Indonesia dan Asia Tenggara, seperti laporan Alongi (2018) dan Primavera et al. (2012), yang menunjukkan peningkatan kesehatan mangrove pasca program rehabilitasi dan penurunan degradasi di kawasan dengan pengelolaan ketat, sementara tekanan akuakultur dan alih fungsi lahan terbukti memperlambat pemulihan di kawasan tanpa intervensi yang memadai.

3. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi distribusi spasial dan tren kesehatan hutan mangrove di Kecamatan Labuhan Maringgai selama periode 2015–2023 dengan memanfaatkan citra Sentinel-2A dan perhitungan MHI berbasis NBR, GCI, SIPI, dan ARVI. Validasi distribusi spasial mangrove setiap tahun menggunakan *confusion matrix* menghasilkan tingkat akurasi keseluruhan (OA) antara 90–94% yang mengindikasikan keandalan metode untuk pemantauan multi-temporal. Hasil analisis mengungkap peningkatan signifikan pada luas mangrove dengan kondisi kesehatan baik, dari 1,73 ha pada 2015 menjadi 540,04 ha pada 2023, sekaligus penurunan luas kategori buruk dari 138,64 ha menjadi 21,34 ha. Peningkatan kesehatan ekosistem ini diduga dipengaruhi oleh kombinasi faktor rehabilitasi lokal, deposisi sedimen yang mendukung pertumbuhan, serta berkurangnya tekanan antropogenik. Namun, keberadaan area dengan kesehatan buruk mengindikasikan perlunya intervensi restorasi yang terarah. Temuan ini menegaskan pentingnya pengelolaan berbasis data spasial multi-temporal untuk menjaga keberlanjutan fungsi ekologis mangrove dan mendukung mitigasi perubahan iklim.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian dan publikasi terkait pemetaan mangrove di Kecamatan Labuan Maringgai merupakan bagian dari program hibah DIPA BLU UNILA skema penelitian dasar tahun 2024, No kontrak 564/UN26.21/PN/2024 a.n Anggun Tridawati, berjudul “Model Distribusi Kesehatan Mangrove untuk pemetaan dan manajemen berkelanjutan Sebagai Upaya Mitigasi Perubahan Iklim”. Kepada LP2M UNILA dan semua pihak yang telah membantu proses penelitian disampaikan terima kasih.

Daftar Pustaka

- A'AN, J. W., PRAYUDHA, B., DHARMAWAN, I. W. E., IRAWAN, A., ABIMANYU, H., MEIRINAWATI, H., SURINATI, D., SYUKRI, A. F., YULIANA, C. I. & YUNIATI, P. I. Carbon sequestration index as a determinant for climate change mitigation: Case study of Bintan Island. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. IOP Publishing, 012050.
- AKBAR, M., ARISANTO, P., SUKIRNO, B., MERDEKA, P., PRIADHI, M. & ZALLES, S. Mangrove vegetation health index analysis by implementing NDVI classification method on sentinel-2 image data case study: Segara Anakan, Kabupaten Cilacap. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. 1-7.
- ALONGI, D. M. 2012. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon management*, 3, 313-322.
- ALONGI, D. M. (2018). Impact of global change on mangrove forests. *Current Climate Change Reports*, 4(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0082-1>
- APRILIYANI, Y., SAFEI, R., KASKOYO, H., WULANDARI, C. & FEBRYANO, I. G. 2020. Analisis penilaian kesehatan hutan mangrove di Kabupaten Lampung Timur. *Jurnal Hutan Tropis Volume*, 8.
- ARIFANTI, V. B., SIDIK, F., MULYANTO, B., SUSILOWATI, A., WAHYUNI, T., YUNIARTI, N., AMINAH, A., SUITA, E., KARLINA, E. & SUHARTI, S. 2022. Challenges and strategies for sustainable mangrove management in Indonesia: a review. *Forests*, 13, 695.
- ASSEMBLY, G. 2015. Sustainable development goals. *SDGs transform our world*, 2030.
- CAHYANINGSIH, A. P., DEANOVA, A. K., PRISTIAWATI, C. M., ULUMUDDIN, Y. I., KUSUMANINGRUM, L. & SETYAWAN, A. D. 2022. Causes and impacts of anthropogenic activities on mangrove deforestation and degradation in Indonesia. *International Journal of Bonorowo Wetlands*, 12.
- CELLAMANI, P., SINGH, C. P. & PANIGRAHY, S. 2014. Assessment of the health status of Indian mangrove ecosystems using multi temporal remote sensing data. *Trop. Ecol*, 55, 245-253.
- DAMSIR, D., ANSYORI, A., YANTO, Y., ERWANDA, S. & PURWANTO, B. 2023. Pemetaan areal mangrove di Provinsi Lampung menggunakan citra Sentinel 2-a dan citra satelit Google Earth. *Jurnal Pengabdian Kolaborasi dan Inovasi IPTEKS*, 1, 207-216.
- DARMAWAN, S., CLAUDIA, A. & TRIDAWATI, A. 2022a. Prediksi Perubahan Kawasan Hutan Mangrove Menggunakan Model Cellular Automata Markov pada Citra Penginderaan Jauh Landsat (Studi Kasus: Kawasan Resort Bama, Taman Nasional Baluran, Kabupaten Situbondo, Jawa Timur). *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 6, 57-72.
- DARMAWAN, S., NASING, E. N. & TRIDAWATI, A. 2022b. Prediksi perubahan kawasan hutan mangrove menggunakan model land change modeler berbasis citra satelit penginderaan jauh. *Jurnal Tekno Insentif*, 16, 54-68.
- DARMAWAN, S., SARI, D. K., WIKANTIKA, K., TRIDAWATI, A., HERNAWATI, R. & SEDU, M. K. 2020. Identification before-after forest fire and prediction of mangrove forest based on Markov-cellular automata in part of Sembilang national park, Banyuasin, South Sumatra, Indonesia. *Remote Sensing*, 12, 3700.
- DIYAH, R. M., CAHYONO, B. E. & NUGROHO, A. T. 2019. Analisis Kesehatan Mangrove di Probolinggo Menggunakan Data Sentinel-2A. *Natural B, Journal of Health and Environmental Sciences*, 5, 041-048.
- DONATO, D. C., KAUFFMAN, J. B., MURDIYARSO, D., KURNIANTO, S., STIDHAM, M. & KANNINEN, M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature geoscience*, 4, 293-297.

- DRUSCH, M., DEL BELLO, U., CARLIER, S., COLIN, O., FERNANDEZ, V., GASCON, F., HOERSCH, B., ISOLA, C., LABERINTI, P. & MARTIMORT, P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36.
- DU, C., KHAN, S., KE, Y. & ZHOU, D. 2023. Assessment of spatiotemporal dynamics of mangrove in five typical mangrove reserve wetlands in Asia, Africa and Oceania. *Diversity*, 15, 148.
- DUKE, N. C., MEYNECKE, J.-O., DITTMANN, S., ELLISON, A. M., ANGER, K., BERGER, U., CANNICCI, S., DIELE, K., EWEL, K. C. & FIELD, C. D. 2007. A world without mangroves? *Science*, 317, 41-42.
- FOODY, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- GHORBANIAN, A., ZAGHIAN, S., ASIYABI, R. M., AMANI, M., MOHAMMADZADEH, A. & JAMALI, S. 2021. Mangrove ecosystem mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images and random forest algorithm in Google Earth Engine. *Remote sensing*, 13, 2565.
- GIRI, C. 2021. Recent advancement in mangrove forests mapping and monitoring of the world using earth observation satellite data. MDPI.
- GOUVÊA, L. P., SERRÃO, E. A., CAVANAUGH, K., GURGEL, C. F., HORTA, P. A. & ASSIS, J. 2022. Global impacts of projected climate changes on the extent and aboveground biomass of mangrove forests. *Diversity and Distributions*, 28, 2349-2360.
- HAGOLLE, O., HUC, M., PASCUAL, D. V. & DEDIEU, G. 2015. A multi-temporal and multi-spectral method to estimate aerosol optical thickness over land, for the atmospheric correction of FormoSat-2, LandSat, VENµS and Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, 7, 2668-2691.
- HAMILTON, S. E. & CASEY, D. 2016. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). *Global Ecology and Biogeography*, 25, 729-738.
- HIDAYAH, Z. & RACHMAN, H. A. 2023. Pemetaan kondisi hutan mangrove di kawasan pesisir Selat Madura dengan pendekatan Mangrove Health Index memanfaatkan citra satelit Sentinel-2. *Majalah Geografi Indonesia*, 37, 84-91.
- JONES, M. W., SMITH, A. J., BETTS, R., CANADELL, J. G., PRENTICE, I. C. & LE QUÉRÉ, C. 2020. Climate Change Increases the Risk of Wildfires: January 2020. *ScienceBrief*.
- KAUFFMAN, J. B., HEIDER, C., COLE, T. G., DWIRE, K. A. & DONATO, D. C. 2011. Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests. *Wetlands*, 31, 343-352.
- KAWAMUNA, A., SUPRAYOGI, A. & WIJAYA, A. 2017. Analysis Of Mangrove Forest Health Based On Ndvi Classification Method On Sentinel-2 Images (Case Study: Teluk Pangpang, Banyuwangi Regency). *J. Geod. Undip*, 6, 277-284.
- KOSWARA, S. D., ARDLI, E. R. & YANI, E. 2017. The monitoring of mangrove vegetation community structure in Segara Anakan Cilacap for the Period of 2009 and 2015. *Scripta Biologica*, 4, 113-118.
- LEE, S. Y., PRIMAVERA, J. H., DAHDOUNH-GUEBAS, F., MCKEE, K., BOSIRE, J. O., CANNICCI, S., DIELE, K., FROMARD, F., KOEDAM, N. & MARCHAND, C. 2014. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment. *Global ecology and biogeography*, 23, 726-743.
- MURDIYARSO, D., PURBOPUSPITO, J., KAUFFMAN, J. B., WARREN, M. W., SASMITO, S. D., DONATO, D. C., MANURI, S., KRISNAWATI, H., TABERIMA, S. & KURNIANTO, S. 2015. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature climate change*, 5, 1089-1092.
- NURDIANSAH, D. & DHARMAWAN, I. W. E. 2021. Struktur komunitas dan kondisi kesehatan mangrove di Pulau Middleburg-Miossu, Papua Barat. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13, 81-96.
- OCHIAI, O., TADONO, T., HAYASHI, M., HARADA, M., HAMAMOTO, K., ROSENQVIST, A., BUNTING, P., LUCAS, R., HILARIDES, L. & GRANZIERA, B. M. 2022. Satellite-based map of global mangrove extent and changes: Global Mangrove Watch (GMW).
- PRIMAVERA, J., SAVARIS, J., BAJOYO, B., COCHING, J., CURNICK, D., GOLBEQUE, R., GUZMAN, A., HENDERIN, J., JOVEN, R. & LOMA, R. 2012. Manual on community-based mangrove rehabilitation. *Mangrove Manual Series*, 1, 240.
- RAZALI, S. M., NURUDDIN, A. A. & LION, M. 2019. Mangrove vegetation health assessment based on remote sensing indices for Tanjung Piai, Malay Peninsular. *Journal of Landscape Ecology*, 12, 26-40.
- RUDIANTO, R., BENGEN, D. G. & KURNIAWAN, F. 2020. Causes and effects of mangrove ecosystem damage on carbon stocks and absorption in East Java, Indonesia. *Sustainability*, 12, 10319.
- SAFEI, R., INDRIANI, Y., DARMAWAN, A. & KASKOYO, H. 2019. Status pemantauan kesehatan hutan yang dikelola oleh kelompok tani hutan shk lestari. *Jurnal Silva Tropika*, 3, 185-198.
- SPALDING, M. 2010. *World atlas of mangroves*, Routledge.
- SUKOJO, B. M. & ARINDI, Y. N. 2019. Analisa perubahan kerapatan mangrove berdasarkan nilai normalized difference vegetation index menggunakan citra landsat 8 (Studi Kasus: Pesisir Utara Surabaya). *Geoid*, 14, 1-5.
- SUSILAWATI, N. G. K., TOKNOK, B. & KORJA, I. N. 2018. Faktor Penyebab Kerusakan Hutan Mangrove di Desa Buranga Kecamatan Ampibabo Kabupaten Parigi Moutong. *Jurnal Forest Sains*, 15, 91-99.

- THOMPSON, J. N. 2019. *The geographic mosaic of coevolution*, University of Chicago Press.
- WANG, L., JIA, M., YIN, D. & TIAN, J. 2019. A review of remote sensing for mangrove forests: 1956–2018. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111223.
- WATTS, G., BATTARBEE, R. W., BLOOMFIELD, J. P., CROSSMAN, J., DACCACHE, A., DURANCE, I., ELLIOTT, J. A., GARNER, G., HANNAFORD, J. & HANNAH, D. M. 2015. Climate change and water in the UK—past changes and future prospects. *Progress in Physical Geography*, 39, 6-28.
- XIMENES, A. C., CAVANAUGH, K. C., ARVOR, D., MURDIYARSO, D., THOMAS, N., ARCOVERDE, G. F., DA CONCEIÇÃO BISPO, P. & VAN DER STOCKEN, T. 2023. A comparison of global mangrove maps: Assessing spatial and bioclimatic discrepancies at poleward range limits. *Science of the Total Environment*, 860, 160380.
- ZHANG, J., YANG, X., WANG, Z., ZHANG, T. & LIU, X. 2021. Remote sensing based spatial-temporal monitoring of the changes in coastline mangrove forests in China over the last 40 years. *Remote sensing*, 13, 1986.
- ZHANG, Z., AHMED, M. R., ZHANG, Q., LI, Y. & LI, Y. 2023. Monitoring of 35-year mangrove wetland change dynamics and agents in the sundarbans using temporal consistency checking. *Remote Sensing*, 15, 625.