

# Estimasi Stok Karbon Hutan Mangrove Di Wilayah Pesisir Kabupaten Langkat Provinsi Sumatera Utara

Reisha Azzahra Putri Restanta\*

Prodi Ilmu Lingkungan Universitas Sebelas Maret Surakarta, Indonesia 57126

Received: 25/07/2025 Accepted: 11/02/2026

## Abstract

Carbon emissions into the atmosphere are one of the factors contributing to climate change. This condition is exacerbated by the increasing number of damaged ecosystems, including mangrove ecosystems. Mangrove forests are one of the coastal ecosystems that play an important role in mitigating climate change through blue carbon storage. This study aims to estimate the carbon stock of mangrove forests in the coastal area of Langkat Regency in 2018 and 2023 using Sentinel-2A satellite imagery and to calculate the spatial and temporal changes that have occurred. The methods used include image processing to obtain the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) value, which is linked to biomass stocks using a second-order polynomial regression model. The results show that in 2018, the area of high-density mangroves reached 13,567.54 ha with a total carbon stock of around 148.92 million tons of C. In 2023, the area of mangrove vegetation with high NDVI decreased slightly to 13,176.93 ha with a carbon stock of 133.85 million tons of C. The southern region of Langkat Regency, such as Tanjung Pura and Secanggang Districts, had the highest carbon concentration. Conversely, a decrease in carbon stock values was found in several parts of the northern coast. This study confirms that the use of satellite imagery and NDVI is effective for estimating mangrove carbon stocks spatially and temporally.

**Keywords:** carbon stock; Langkat Regency; mangrove; NDVI; Sentinel-2A

## Abstrak

Pelepasan karbon ke alam merupakan salah satu faktor terjadinya perubahan iklim. Kondisi tersebut diperparah dengan semakin banyaknya ekosistem yang rusak termasuk ekosistem Hutan Mangrove. Hutan Mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peran penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon biru. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi stok karbon hutan mangrove di wilayah pesisir Kabupaten Langkat pada tahun 2018 dan 2023 dengan menggunakan citra satelit Sentinel-2A serta menghitung perubahan spasial dan temporal yang terjadi. Metode yang digunakan meliputi pengolahan citra untuk memperoleh nilai Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), yang dihubungkan dengan stok biomassa menggunakan model regresi polinomial orde dua. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada tahun 2018, luas Mangrove berkerapatan tinggi mencapai 13.567,54 ha dengan total stok karbon sekitar 148,92 juta ton C. Pada tahun 2023, luas vegetasi mangrove dengan NDVI tinggi sedikit menurun menjadi 13.176,93 ha dengan stok karbon sebesar 133,85 juta ton C. Wilayah selatan Kabupaten Langkat, seperti Kecamatan Tanjung Pura dan Secanggang, memiliki konsentrasi karbon tertinggi. Sebaliknya, penurunan nilai stok karbon ditemukan di beberapa bagian pesisir utara. Penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan citra satelit dan NDVI efektif untuk estimasi stok karbon mangrove secara spasial dan temporal.

**Kata kunci:** Kabupaten Langkat; Mangrove; NDVI; Sentinel-2A; stok karbon

---

\* **Corresponding Author:** [reisha.restanta@gmail.com](mailto:reisha.restanta@gmail.com)

## PENDAHULUAN

Pelepasan karbon ke alam merupakan salah satu faktor terjadinya perubahan iklim (Farista & Virgota, 2021). Kondisi tersebut diperparah dengan semakin banyaknya ekosistem yang rusak termasuk ekosistem hutan mangrove. Hutan mangrove memiliki fungsi ekologis yang berperan penting bagi keseimbangan ekosistem pesisir, yaitu sebagai pelindung garis pantai dan mencegah abrasi air laut (Worthington et al., 2020). Potensi tersebut menjadikan hutan mangrove berperan penting dalam mengurangi efek dari perubahan iklim (Rifandi & Abdillah, 2020). Peran ekosistem mangrove dalam upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim telah memperoleh pengakuan yang cukup besar dalam beberapa tahun terakhir (Dinilhuda et al., 2020). Ekosistem mangrove diketahui memiliki kemampuan dalam menyerap dan menyimpan karbon yang cukup tinggi (Waru et al., 2022). Berdasarkan penelitian Bachmid et al. (2018), fungsi optimal hutan mangrove dalam menyerap karbon bisa mencapai 77,9% yang kemudian akan di simpan ke dalam biomassa pohon mangrove pada batang, akar dan daun. Hutan mangrove memiliki kapasitas untuk menyimpan karbon empat kali lebih banyak daripada hutan tropis dan memiliki tingkat penyerapan karbon lima kali lebih cepat dibandingkan dengan hutan di daerah lain (Donato et al., 2011).

Indonesia memiliki luas mangrove sekitar 3,73 juta hektar atau hampir 25% dari total luas mangrove dunia, menjadikannya negara dengan mangrove terluas di dunia (Onrizal, 2010). Kawasan hutan mangrove di Kabupaten Langkat sendiri memiliki luas hutan mangrove sebesar 28,702,0402 Ha (Hamzah et al. 2020). Salah satu kecamatan di wilayah pesisir, yakni Kecamatan Pangkalan Susu merupakan wilayah yang memiliki tutupan mangrove yang cukup luas. Tutupan lahan mangrove di Kecamatan Pangkalan Susu mengalami penurunan luas setiap tahunnya akibat degradasi lingkungan yang dipicu oleh peningkatan jumlah penduduk, terutama di kawasan pesisir (Marbun et al., 2022).

Perambahan kawasan dan alih fungsi lahan hutan mangrove menjadi masalah yang sering ditemukan di daerah penelitian, dengan demikian penelitian tentang karbon mangrove sangat penting untuk dilakukan dengan tujuan untuk mengukur dan menganalisis kapasitas penyimpanan karbon pada mangrove (Azizah et al. 2024). Menurut Saragi-Sasmito et al. (2019), estimasi yang akurat mengenai stok karbon mangrove sangat penting sebagai dasar penerapan strategi konservasi dan pengelolaan yang efektif. Beberapa penelitian terdahulu yang melakukan pengukuran biomassa dan stok karbon dengan metode pengukuran langsung di lapangan faktanya mengalami beberapa tantangan, meliputi kondisi hutan yang padat yang menghambat aksesibilitas dan dipengaruhi oleh fluktuasi pasang surut, sehingga diperlukan metode alternatif untuk melaksanakan kegiatan tersebut (Karang et al., 2024). Teknologi penginderaan jauh dinilai efektif sebagai alat dan cara untuk memperkirakan kandungan cadangan karbon hutan mangrove dalam skala yang lebih luas serta dapat menghindari metode pengukuran karbon secara destruktif (Marzuki et al., 2023).

Potensi stok karbon hutan mangrove di Lubuk Kertang telah dilakukan dengan metode pengambilan sampel non-destruktif dengan mengukur diameter pohon (DBH). Menurut hasil penelitian Ikhwan (2021), Total rata-rata stok karbon pada hutan mangrove alami sebesar 158 MgC/ha, hutan mangrove restorasi sebesar 84 MgC/ha, dan mangrove yang telah ditebang sebesar 46 MgC/ha. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah luas lokasi penelitian, metode pengambilan data melalui hasil rekaman citra satelit menggunakan metode penginderaan jauh dengan perhitungan stok karbon berdasarkan nilai NDVI dan tanpa data plot lapangan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di wilayah pesisir Kabupaten Langkat Provinsi Sumatra Utara. Pada wilayah pesisir ini terdapat beberapa kecamatan, yakni Kecamatan Babalan, Kecamatan Brandan Barat, Kecamatan Gebang, Kecamatan Pangkalan Susu, Kecamatan Pematang Jaya, Kecamatan Secanggang, dan Kecamatan Tanjung Pura. Luas wilayah penelitian mencapai 111.102, 456064 Ha. Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember – Mei tahun 2025.

### Tahap Pengumpulan Data

Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur untuk memperoleh gambaran tentang simpanan karbon. Lokasi yang dipilih adalah mangrove di Kabupaten Langkat tepatnya pada wilayah pesisirnya. Setelah lokasi ditentukan, dilakukan identifikasi variabel yang berkaitan dengan simpanan karbon

mangrove. Data yang akan dipakai pada penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder. Data primer pada penelitian ini meliputi data citra satelit dari Copernicus yaitu Sentinel-2A. Sementara itu, data sekunder mencakup data dari kajian literatur, dokumen, penelitian, dan buku meteorologi (suhu, kelembapan, cuaca) yang dapat mempengaruhi mangrove. Setelah data dikumpulkan, kemudian dilakukan pengolahan data citra.

**Tahap Pengolahan Data**

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan software ArcGIS, Envi 5.3, dan Microsoft Excel. Pengolahan data dimulai dengan analisis spasial yaitu koreksi geometrik dan koreksi radiometrik. Koreksi geometrik berfungsi untuk memperbaiki kesalahan posisi piksel yang disebabkan oleh faktor sistematis dan non-sistematis seperti kelengkungan bumi serta perbedaan tinggi objek di permukaan. Koreksi radiometrik berfungsi memperbaiki nilai piksel di dalam citra sehingga sesuai dengan nilai pantulan spectral objek sesungguhnya. Data yang telah dilakukan koreksi kemudian dipotong sesuai dengan daerah penelitian.

**Tahap Analisis Data**

Data primer yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil rekaman Citra Satelit Sentinel 2A di wilayah penelitian dengan pemilihan tutupan awan < 9% dengan resolusi spasial 10m. Dalam pemrosesan citra Sentinel-2A mencakup klasifikasi koreksi atmosfer yang diterapkan pada produk ortoimage dan produk reflektansi terkoreksi (European Space Agency, 2015). Citra Sentinel-2A telah terkoreksi geometrik dan radiometrik secara sistematis yang dilakukan oleh pihak Sentinel.

Citra Sentinel-2A dilakukan pra-processing, yaitu koreksi geometrik, koreksi radiometrik, selanjutnya dilakukan proses komposit band dan cropping. Koreksi geometrik untuk memperbaiki koordinat pada citra satelit agar sesuai dengan koordinat geografis. Koreksi radiometrik diperlukan untuk menyamakan kondisi atmosfer pada setiap citra, dengan menghilangkan noise pada citra yang disebabkan oleh distorsi akibat posisi cahaya matahari. Cropping, yaitu pemotongan citra pada koordinat tertentu untuk mendapatkan bagian tertentu dari gambar.

Citra yang telah dikoreksi kemudian diklasifikasikan untuk mendapatkan sebaran mangrove. Pertama dilakukan komposit band citra, komposit band menggunakan perangkat lunak ENVI 5.3 dengan menggabungkan tiga band multispektral dari citra Sentinel 2A, yaitu band 8A (NIR), band 11 (SWIR), dan band 4 (Red) yang menghasilkan tampilan false color (Dharmawan et al., 2020). Klasifikasi dilakukan untuk membedakan vegetasi mangrove dan non mangrove menggunakan metode klasifikasi terbimbing (supervised classification) dengan metode Maximum likelihood. Klasifikasi terbimbing (supervised classification) merupakan metode pengelompokan objek citra dengan memilih piksel sampel dalam citra yang dapat mewakili kelas tertentu dengan menentukan objek sampel atau region of interest (ROI) (Febrianto et al., 2022). Kemudian hasil klasifikasi yang diambil hanya luasan mangrove dan dihitung luasannya menggunakan tool calculate geometry pada ArcGIS. Hasil perhitungan luasan mangrove pada wilayah pesisir Kabupaten Langkat kemudian digabungkan dengan data batas wilayah menggunakan tool intersect untuk mengetahui persebaran mangrove

Citra satelit yang telah diklasifikasikan kemudian ditransformasi dengan rumus NDVI (Normaslized Different Vegetation Index). Nilai NDVI berkisar dari -1 hingga +1, dengan keterangan nilai positif yang tinggi menunjukkan vegetasi sehat, sedangkan nilai negatif menunjukkan permukaan non-vegetasi seperti air atau aspal. Persamaan sebagai berikut:

$$NDVI = ((NIR - R) / ((NIR + R)) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- NDVI = *Normaslized Different Vegetation Index*
- NIR = Nilai Reflektansi spectral pada *band* inframerah dekat
- R = Nilai reflektansi spectral pada *band* merah

Perhitungan biomassa dilakukan menggunakan model terpilih yang menggunakan nilai klasifikasi NDVI yang sudah dilakukan.

$$y = 2388,5x^2 - 1816,2x + 484,86 \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

y : Biomassa (ton/ha)

x : nilai NDVI

Untuk mengetahui simpanan karbon, perlu dilakukan konversi biomassa menjadi karbon dengan menggunakan rumus perhitungan karbon. Kandungan karbon pada mangrove memiliki persentase sebesar 0,47. Berikut merupakan rumus perhitungan karbon (SNI 7724-2019).

$$Cv = Bov \% C\ organic \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

Cv = Kandungan karbon dari biomassa vegetasi

Bov = Total biomassa vegetasi

%C organic = Nilai persentase kandungan karbon (0,47)

Tutupan mangrove dibedakan menjadi dua kategori, yaitu kerapatan rendah (NDVI 0,2–0,4) yang ditampilkan dalam warna kuning dan kerapatan tinggi (NDVI > 0,4) yang ditampilkan dalam warna hijau.

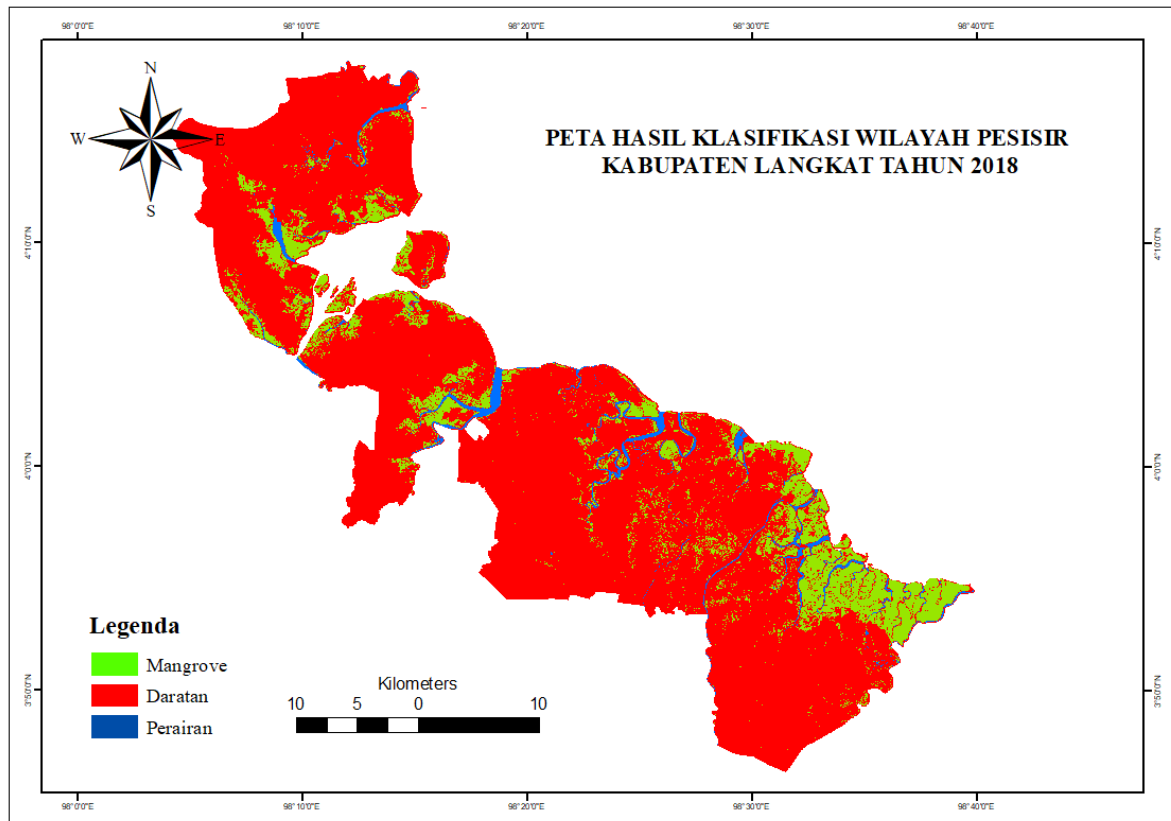
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemetaan tutupan lahan berbasis klasifikasi citra satelit Sentinel-2A tahun 2018 dan 2023 menunjukkan perubahan spasial yang signifikan pada wilayah pesisir Kabupaten Langkat. Hasil klasifikasi dibagi menjadi tiga kategori utama, yaitu vegetasi mangrove (hijau), daratan non-mangrove (merah), dan perairan (biru). Berdasarkan perbandingan visual antara kedua peta, tampak adanya pergeseran luas dan distribusi tutupan mangrove dari tahun 2018 ke 2023 yang tersebar di sepanjang garis pantai timur Kabupaten Langkat, khususnya di kecamatan Tanjung Pura, Secanggang, dan Gebang.

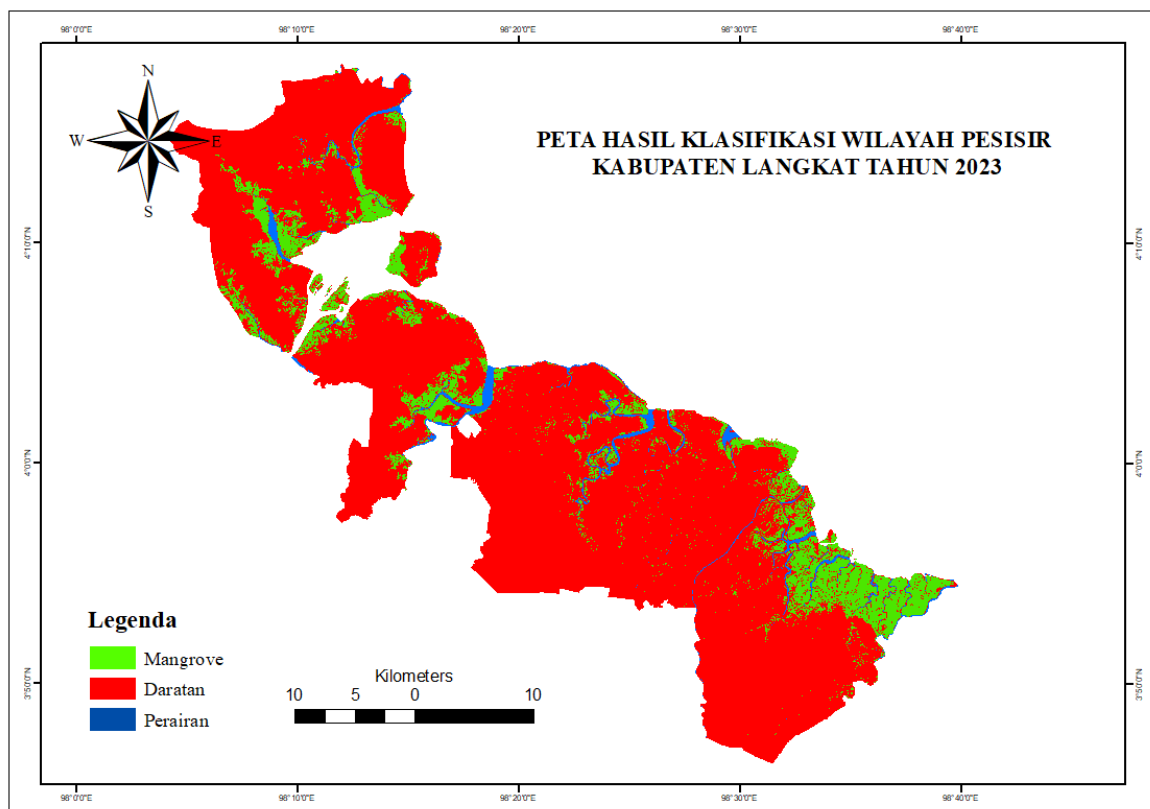
Pada tahun 2018, area tutupan mangrove masih terfokus di wilayah pesisir timur dan menyebar di sekitar muara sungai dan estuaria, meskipun dalam luasan yang tampak lebih terbatas dibandingkan tahun 2023. Wilayah mangrove cenderung terfragmentasi dan belum terhubung secara kontinu. Hal ini mungkin disebabkan oleh tekanan antropogenik seperti pembukaan lahan, aktivitas tambak tradisional, serta degradasi alami akibat banjir rob dan intrusi air laut yang menyebabkan kehilangan vegetasi tepi pantai (Rahman et al., 2024). Sebaliknya, pada peta tahun 2023 terlihat perluasan area mangrove yang lebih merata dan menyambung antarblok vegetasi, terutama di wilayah timur dan tenggara Kabupaten Langkat. Ini mengindikasikan adanya keberhasilan rehabilitasi mangrove dan peningkatan tutupan vegetasi yang mungkin terjadi akibat program restorasi mangrove nasional atau regenerasi alami pada area mangrove muda. Kondisi ini sejalan dengan tren peningkatan nilai NDVI dan stok karbon pada wilayah mangrove berkepadatan tinggi seperti yang telah dijelaskan dalam subbab sebelumnya.

Distribusi spasial mangrove yang lebih luas pada tahun 2023 juga memperlihatkan adanya pemulihan ekosistem mangrove yang sebelumnya terdegradasi. Perubahan ini penting secara ekologis karena memperluas habitat bagi fauna pesisir, meningkatkan perlindungan pantai dari abrasi, serta meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon biru (Sievers et al., 2023). Berdasarkan overlay visual peta, beberapa wilayah di utara seperti Pematang Jaya dan Pangkalan Susu juga menunjukkan pertumbuhan mangrove baru yang signifikan.

Hasil klasifikasi wilayah pesisir Kabupaten Langkat ini menegaskan pentingnya pemantauan perubahan tutupan lahan secara berkala menggunakan citra satelit dan klasifikasi berbasis NDVI. Perubahan positif dalam luasan mangrove dari tahun 2018 ke 2023 menunjukkan potensi besar kawasan ini dalam mendukung mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan stok karbon, sekaligus memperkuat argumentasi bahwa konservasi dan rehabilitasi mangrove di pesisir Langkat harus terus dipertahankan dan diperluas. Peta hasil klasifikasi mangrove Tahun 2018 dan Tahun 2023 ditampilkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



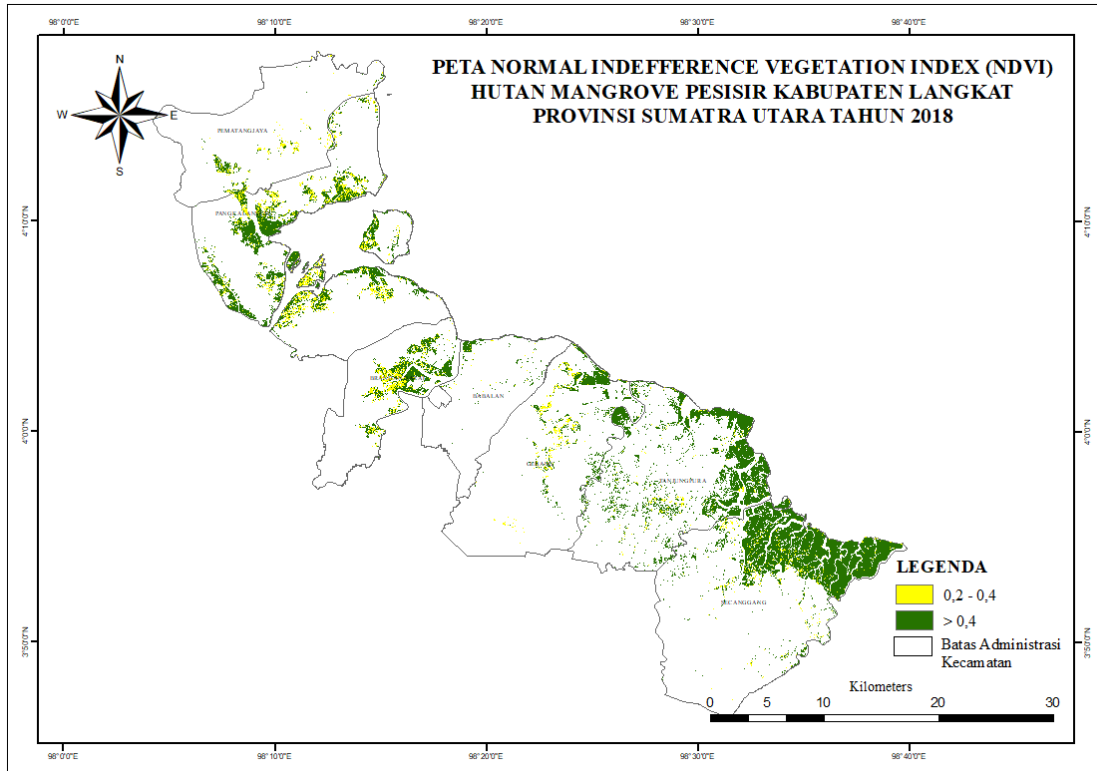
**Gambar 1.** Peta Hasil Klasifikasi Mangrove Tahun 2018



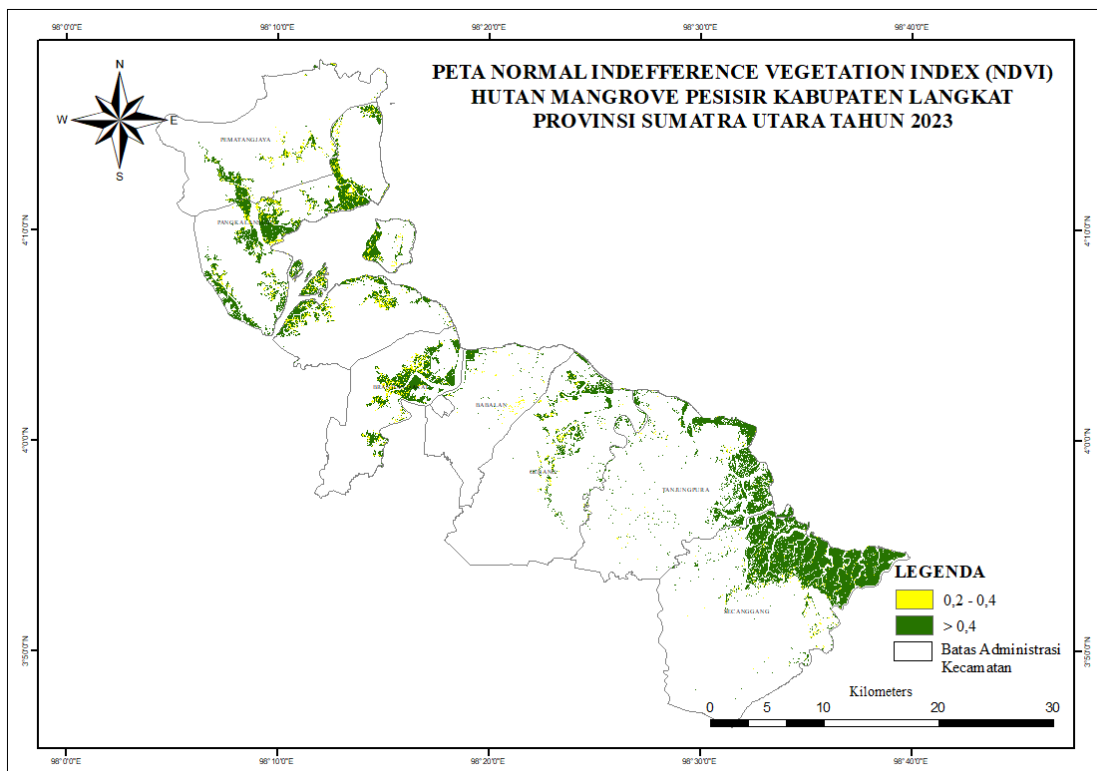
**Gambar 2.** Peta Hasil Klasifikasi Mangrove Tahun 2023

### Analisis Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Indeks kerapatan vegatsi atau biasa dikenal dengan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) merupakan indeks yang digunakan untuk mengukur kerapatan vegetasi. Selain kerapatan vegetasi, NDVI merupakan indeks kehijauan atau aktivitas fotosintesis vegetasi. Pada penelitian ini, indeks kerapatan vegetasi digunakan pada sebaran mangrove yang telah diolah pada citra sebelumnya seperti Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Peta NDVI Mangrove Pesisir Kabupaten Langkat Tahun 2018



Gambar 4. Peta NDVI Mangrove Pesisir Kabupaten Langkat Tahun 2023

Analisis spasial menggunakan nilai NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) merupakan salah satu metode penting dalam mengukur kerapatan dan kesehatan vegetasi mangrove. Pada peta NDVI tahun 2018 dan 2023 untuk wilayah pesisir Kabupaten Langkat, tutupan mangrove dibedakan menjadi dua kategori, yaitu kerapatan rendah (NDVI 0,2–0,4) yang ditampilkan dalam warna kuning dan kerapatan tinggi (NDVI > 0,4) yang ditampilkan dalam warna hijau. Nilai NDVI yang lebih tinggi menunjukkan tutupan vegetasi yang lebih sehat dan rapat, sedangkan nilai lebih rendah mengindikasikan vegetasi yang jarang, stres, atau mengalami degradasi (Navarro et al., 2019).

Pada tahun 2018, area dengan kerapatan tinggi memiliki cakupan luas sebesar 13.567,54 hektar, sementara area dengan kerapatan rendah tercatat seluas 2.188,05 hektar. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar kawasan mangrove masih berada dalam kondisi vegetasi yang baik. Sebaran mangrove berkepadatan tinggi banyak ditemukan di wilayah selatan dan tenggara, khususnya di Kecamatan Secanggang, Tanjung Pura, dan sebagian Gebang. Sebaliknya, kawasan dengan NDVI rendah tersebar dalam bentuk spot-spot terpisah, banyak ditemukan di wilayah pesisir barat seperti Pematang Jaya dan Pangkalan Susu.

Pada tahun 2023, terjadi penurunan luas area dengan NDVI rendah menjadi 1.408,12 hektar, dan penurunan ringan pada NDVI tinggi menjadi 13.176,93 hektar. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun ada peningkatan kualitas vegetasi di beberapa lokasi (terlihat dari berkurangnya area NDVI rendah), terdapat juga kemungkinan konversi lahan, perubahan struktur vegetasi, atau tekanan lingkungan yang menyebabkan hilangnya sebagian area mangrove rapat. Wilayah dengan penurunan NDVI tinggi sebagian terdeteksi di bagian tengah pesisir Langkat.

Perubahan tersebut dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain regenerasi alami pada kawasan rehabilitasi, pengaruh musim pada nilai NDVI, serta tekanan antropogenik seperti pembangunan tambak atau pemukiman pesisir. Penurunan area NDVI rendah juga dapat mengindikasikan peningkatan kerapatan vegetasi di area tersebut, sehingga berpindah kategori ke kelas kerapatan tinggi. Hasil ini memperkuat pentingnya pemantauan spasial jangka panjang untuk mengidentifikasi tren pemulihan maupun degradasi ekosistem mangrove.

Analisis perubahan NDVI ini menunjukkan bahwa mangrove berkepadatan tinggi tetap mendominasi luas wilayah dan berkontribusi besar dalam menyimpan stok karbon pesisir Kabupaten Langkat. Sementara itu, penurunan signifikan pada area NDVI rendah menandakan potensi keberhasilan rehabilitasi mangrove yang telah dilakukan. Oleh karena itu, pemanfaatan citra satelit dan pengindeksan NDVI terbukti efektif dalam mendeteksi dinamika vegetasi dan sangat relevan untuk estimasi stok karbon berbasis spasial. Luas Wilayah Mangrove berdasarkan Klasifikasi NDVI disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Luas Wilayah Mangrove berdasarkan Klasifikasi NDVI

NDVI	Number of Pixel (10m x 10m)		Area (ha)	
	2018	2023	2018	2023
Kerapatan Rendah	218805	140812	2188,05	1408,12
Kerapatan Tinggi	1356754	1317693	13567,54	13176,93

**Estimasi Biomassa**

Sebaran biomassa mangrove diatas permukaan tanah dihasilkan dari persamaan model yang sudah dipilih. Selanjutnya hasil model tersebut dikalkulasi untuk menghitung sebaran biomassa hutan mangrove setiap wilayah administrasi yang berada di sepanjang pesisir Kabupaten Langkat. Penghitungan sebaran biomassa tersebut dilakukan pada software ArcGIS dengan perintah Raster Calculator. Hasil perhitungan biomassa disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Perhitungan Biomassa

Kecamatan	Total Biomassa (ton)			
	2018		2023	
	0,2-0,4	0,4-1,0	0,2-0,4	0,4-1,0
<b>Babalan</b>	193239,7561	3687698,072	754927,85	3099699,70
<b>Brandan Barat</b>	5430976,297	17931193,85	3957112,29	21873510,34
<b>Gebang</b>	3501975,242	16229960,2	1556625,72	17610494,73
<b>Pangkalan Susu</b>	15075437,96	52348919,74	10501063,45	62052198,28
<b>Pematang Jaya</b>	2375292,99	3457886,051	1903069,08	8026553,80
<b>Secanggang</b>	4246699,664	112901945,1	1789609,67	109865270,30
<b>Tanjung Pura</b>	2735060,622	72524724,57	490155,48	41301948,71
<b>Total</b>	<b>33558682,53</b>	<b>279082327,61</b>	<b>20952563,54</b>	<b>263829675,86</b>

Analisis distribusi biomassa berdasarkan data klasifikasi NDVI dan wilayah administratif menunjukkan adanya variasi spasial yang signifikan antar kecamatan di pesisir Kabupaten Langkat. Pada tahun 2018, total biomassa mangrove tertinggi berada pada kelas NDVI tinggi (0,4–1), yaitu sebesar 279.082.327,61 ton, sedangkan kelas NDVI rendah (0,2–0,4) hanya menyumbang 33.558.682,53 ton. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar kawasan mangrove pesisir Langkat pada periode tersebut berada dalam kondisi vegetasi yang rapat dan sehat.

Secara spasial, kecamatan Tanjung Pura, Secanggang, dan Pangkalan Susu mencatat biomassa tertinggi pada kelas kerapatan tinggi (>0,4 NDVI) dengan nilai berturut-turut sebesar 72,52 juta ton, 112,9 juta ton, dan 52,34 juta ton. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kawasan selatan dan tengah pesisir Kabupaten Langkat memiliki struktur hutan mangrove yang dominan dan relatif tidak terfragmentasi. Sementara itu, kecamatan seperti Babalan dan Pematang Jaya memiliki total biomassa yang lebih rendah, baik untuk kelas NDVI rendah maupun tinggi, yang kemungkinan disebabkan oleh tekanan lahan atau areal mangrove yang lebih sempit.

Pada tahun 2023, terjadi penurunan biomassa total pada kelas NDVI rendah menjadi 20.952.563,54 ton, yang berarti terjadi pengurangan signifikan pada area dengan kerapatan vegetasi rendah. Penurunan biomassa ini terlihat nyata di kecamatan seperti Gebang (dari 3,5 juta ton menjadi 1,55 juta ton), Secanggang (dari 4,2 juta ton menjadi 1,78 juta ton), dan Tanjung Pura (dari 2,7 juta ton menjadi 0,49 juta ton). Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh peningkatan tutupan vegetasi di area tersebut sehingga bergeser ke kelas NDVI tinggi atau akibat degradasi dan hilangnya sebagian kawasan mangrove.

Sementara itu, pada kelas NDVI tinggi tahun 2023, total biomassa hanya sedikit menurun menjadi 263.829.675,86 ton, yang menunjukkan bahwa sebagian besar kawasan mangrove berkepadatan tinggi tetap terjaga atau mengalami regenerasi. Kecamatan dengan nilai biomassa tertinggi masih dipegang oleh Secanggang (109,86 juta ton) dan Tanjung Pura (41,3 juta ton), diikuti oleh Pangkalan Susu (62 juta ton) dan Brandan Barat (21,87 juta ton). Meskipun terdapat sedikit penurunan dibandingkan tahun 2018, kestabilan nilai ini menunjukkan keberhasilan konservasi atau rehabilitasi kawasan mangrove di beberapa lokasi.

Beberapa kecamatan seperti Babalan dan Pematang Jaya menunjukkan penurunan pada kedua kelas NDVI. Kecamatan Babalan, mengalami penurunan dari 3,6 juta ton ke 3,09 juta ton pada NDVI tinggi, dan dari 193 ribu ton menjadi 754 ribu ton pada NDVI rendah. Penurunan ini patut dicermati karena dapat menjadi indikator tekanan antropogenik atau perubahan pemanfaatan lahan yang tidak sejalan dengan prinsip konservasi. Oleh karena itu, wilayah ini dapat menjadi prioritas pemantauan atau intervensi lebih lanjut.

Dari hasil perhitungan biomassa tahun 2018 dan 2023, dapat disimpulkan bahwa kawasan mangrove dengan kerapatan tinggi tetap menjadi kontributor utama stok karbon di Kabupaten Langkat, meskipun terdapat dinamika perubahan di beberapa kecamatan. Penurunan nilai biomassa pada NDVI rendah secara umum mengindikasikan adanya transformasi struktur vegetasi, baik ke arah pemulihan (menjadi kerapatan tinggi) maupun ke arah degradasi (hilang). Oleh sebab itu, pendekatan spasial melalui klasifikasi NDVI sangat penting dalam menentukan kebijakan restorasi dan pengelolaan mangrove yang berbasis data.

Secara keseluruhan, distribusi dan perubahan biomassa di tingkat kecamatan memberikan pemahaman lebih dalam terhadap kondisi dan potensi karbon mangrove di wilayah pesisir Langkat. Hal ini penting sebagai dasar ilmiah dalam mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui pendekatan karbon biru (blue carbon), serta mendukung pelaksanaan kebijakan rehabilitasi mangrove nasional seperti program Penanaman Mangrove Serentak Nasional oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

**Estimasi Stok Karbon**

Data biomassa per-piksel kemudian dikonversi menjadi karbon menggunakan rumus perhitungan karbon (SNI 7724-2019) yang menyatakan bahwa karbon mangrove memiliki persentase sebesar 0,47 dari biomassa. Berikut merupakan data hasil konversi karbon. Hasil perhitungan stok karbon disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Perhitungan Stok Karbon

Kecamatan	Total Stok Karbon (ton C)			
	2018		2023	
	0,2-0,4	0,4-1,0	0,2-0,4	0,4-1,0
<b>Babalan</b>	90822,68538	1733218,094	354816,09	1456858,86
<b>Brandan Barat</b>	2552558,86	8427661,111	1859842,78	10280549,86
<b>Gebang</b>	1645928,364	7628081,295	731614,09	8276932,52
<b>Pangkalan Susu</b>	7085455,841	24603992,28	4935499,82	29164533,19
<b>Pematang Jaya</b>	1116387,705	1625206,444	894442,47	3772480,29
<b>Secanggang</b>	1995948,842	53063914,21	841116,55	51636677,04
<b>Tanjung Pura</b>	1285478,492	34086620,55	230373,07	19411915,89
<b>Total</b>	15772580,79	131168693,98	9847704,87	123999947,65
<b>Total Karbon (ton C/ha)</b>	<b>7208,51</b>	<b>9667,83</b>	<b>6993,51</b>	<b>9410,38</b>

Perhitungan total stok karbon berdasarkan kelas NDVI dan wilayah administratif menunjukkan adanya dinamika spasial dan temporal yang menarik antara tahun 2018 dan 2023. Nilai stok karbon dihitung berdasarkan konversi 50% dari total biomassa, yang dibagi dalam dua kelas kerapatan vegetasi: NDVI 0,2–0,4 (kerapatan rendah) dan NDVI 0,4–1 (kerapatan tinggi). Pada tahun 2018, total stok karbon wilayah pesisir Kabupaten Langkat mencapai 148.923.920,78 ton C, yang didominasi oleh area mangrove dengan kerapatan tinggi sebesar 131.168.693,98 ton C, sedangkan kelas kerapatan rendah hanya menyumbang 15.772.580,79 ton C.

Sebagian besar stok karbon pada tahun 2018 berasal dari Kecamatan Secanggang dengan total 53 juta ton C, diikuti oleh Tanjung Pura (34 juta ton C) dan Pangkalan Susu (24,6 juta ton C). Ketersediaan karbon yang tinggi ini sejalan dengan dominasi area mangrove berkepadatan tinggi di wilayah tersebut. Sementara itu, Kecamatan seperti Babalan dan Pematang Jaya hanya menyumbang sekitar 1,7 juta ton C dan 1,6 juta ton C untuk NDVI tinggi, serta di bawah 0,12 juta ton C untuk NDVI rendah, mencerminkan keterbatasan luasan atau tingkat gangguan pada vegetasi mangrove di daerah tersebut.

Pada tahun 2023, terjadi penurunan total stok karbon kelas NDVI rendah menjadi 9.847.704,87 ton C, menandakan pengurangan karbon pada vegetasi berkepadatan rendah. Penurunan ini paling drastis terjadi di kecamatan Tanjung Pura dan Secanggang, yang masing-masing kehilangan sekitar 1,1 juta ton C dan 1,1 juta ton C dari kelas NDVI 0,2–0,4. Hal ini dapat dikaitkan dengan dua kemungkinan: (1) peningkatan kerapatan vegetasi sehingga area tersebut kini masuk dalam kelas NDVI tinggi, atau (2) terjadinya degradasi hutan mangrove dan konversi lahan.

Sebaliknya, pada kelas NDVI tinggi tahun 2023, stok karbon secara total mengalami sedikit peningkatan menjadi 123.999.947,65 ton C, dengan wilayah dominan tetap berada di Kecamatan Secanggang (51,63 juta ton) dan Tanjung Pura (19,41 juta ton). Meski secara agregat menurun dibanding tahun 2018, stabilitas nilai stok karbon ini menunjukkan efektivitas pengelolaan atau proses alami yang mampu menjaga keberlangsungan ekosistem mangrove dengan kerapatan tinggi di wilayah tersebut.

Terdapat penurunan nilai karbon yang cukup mencolok di Kecamatan Pangkalan Susu, dari 24,6 juta ton menjadi 29,1 juta ton, yang justru memperlihatkan kenaikan dibanding tren umum. Hal ini

menunjukkan kemungkinan adanya kegiatan rehabilitasi atau pertumbuhan alami yang berhasil di daerah ini, meningkatkan luas dan densitas vegetasi mangrove. Sedangkan wilayah seperti Brandan Barat dan Babalan mengalami penurunan pada kedua kelas NDVI, sehingga perlu perhatian lebih lanjut dalam hal konservasi.

Jika dilihat dari total karbon per hektar, terdapat penurunan dari 7.208,51 ton C/ha pada kelas kerapatan rendah di tahun 2018 menjadi 6.993,51 ton C/ha di tahun 2023. Sementara itu, pada kelas kerapatan tinggi terjadi sedikit penurunan dari 9.667,83 ton C/ha menjadi 9.410,38 ton C/ha. Hal ini menandakan bahwa penurunan stok karbon tidak hanya terjadi secara spasial, tetapi juga dalam hal efisiensi penyimpanan karbon per satuan luas, yang kemungkinan dipengaruhi oleh tekanan lingkungan, intrusi air laut, dan aktivitas manusia seperti alih fungsi lahan.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan stok karbon ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove dengan kerapatan tinggi tetap menjadi penyumbang utama cadangan karbon biru di wilayah pesisir Kabupaten Langkat. Namun, penurunan pada kelas NDVI rendah dan di beberapa kecamatan harus menjadi perhatian dalam kebijakan restorasi dan perlindungan mangrove. Oleh karena itu, pemantauan rutin berbasis NDVI dan pemodelan stok karbon sangat penting untuk mendukung pengelolaan ekosistem mangrove yang berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan iklim.

### Dinamika Stok Karbon

**Tabel 4.** Dinamika Stok Karbon Hutan Mangrove Pesisir Kabupaten Langkat

NDVI	Total Stok Karbon (ton C/ha)	
	2018	2023
0,2-0,4	7208,51	6993,51
>0,4	9667,83	9410,38

Berdasarkan Tabel 4, stok karbon tahun 2018 untuk kelas NDVI 0,2–0,4 tercatat sebesar 7.208,51 ton C/ha, sedangkan kelas >0,4 mencapai 9.667,83 ton C/ha. Sementara itu, pada tahun 2023, stok karbon untuk masing-masing kelas mengalami sedikit penurunan dan peningkatan: 6.993,51 ton C/ha untuk NDVI rendah dan 9.410,38 ton C/ha untuk NDVI tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa stok karbon cenderung lebih stabil atau meningkat pada wilayah dengan tutupan mangrove yang rapat.

Peta stok karbon tahun 2018 memperlihatkan sebaran spasial yang cukup luas dengan dominasi warna hijau kekuningan, yang menunjukkan nilai karbon sedang hingga tinggi. Wilayah dengan stok karbon tertinggi banyak ditemukan di bagian selatan Kabupaten Langkat, khususnya di Kecamatan Secanggang dan Tanjung Pura, yang secara visual menunjukkan konsentrasi warna hijau yang lebih luas dan padat. Sementara itu, area dengan nilai karbon rendah (warna merah) lebih tersebar di wilayah utara seperti Pematang Jaya dan Pangkalan Susu, yang mengindikasikan kerapatan vegetasi rendah atau degradasi tutupan mangrove.

Pada peta tahun 2023, sebaran stok karbon menunjukkan pola yang berbeda. Terdapat peningkatan signifikan pada nilai maksimum stok karbon (dari 181,513 menjadi 497,805), dengan persebaran warna hijau yang tetap dominan namun lebih menyebar di beberapa wilayah yang sebelumnya berwarna kuning atau oranye. Ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kerapatan dan volume biomassa di sebagian area mangrove. Namun, warna merah juga masih tampak di beberapa area, mengindikasikan bahwa degradasi vegetasi tetap terjadi di beberapa lokasi meskipun ada perbaikan di tempat lain.

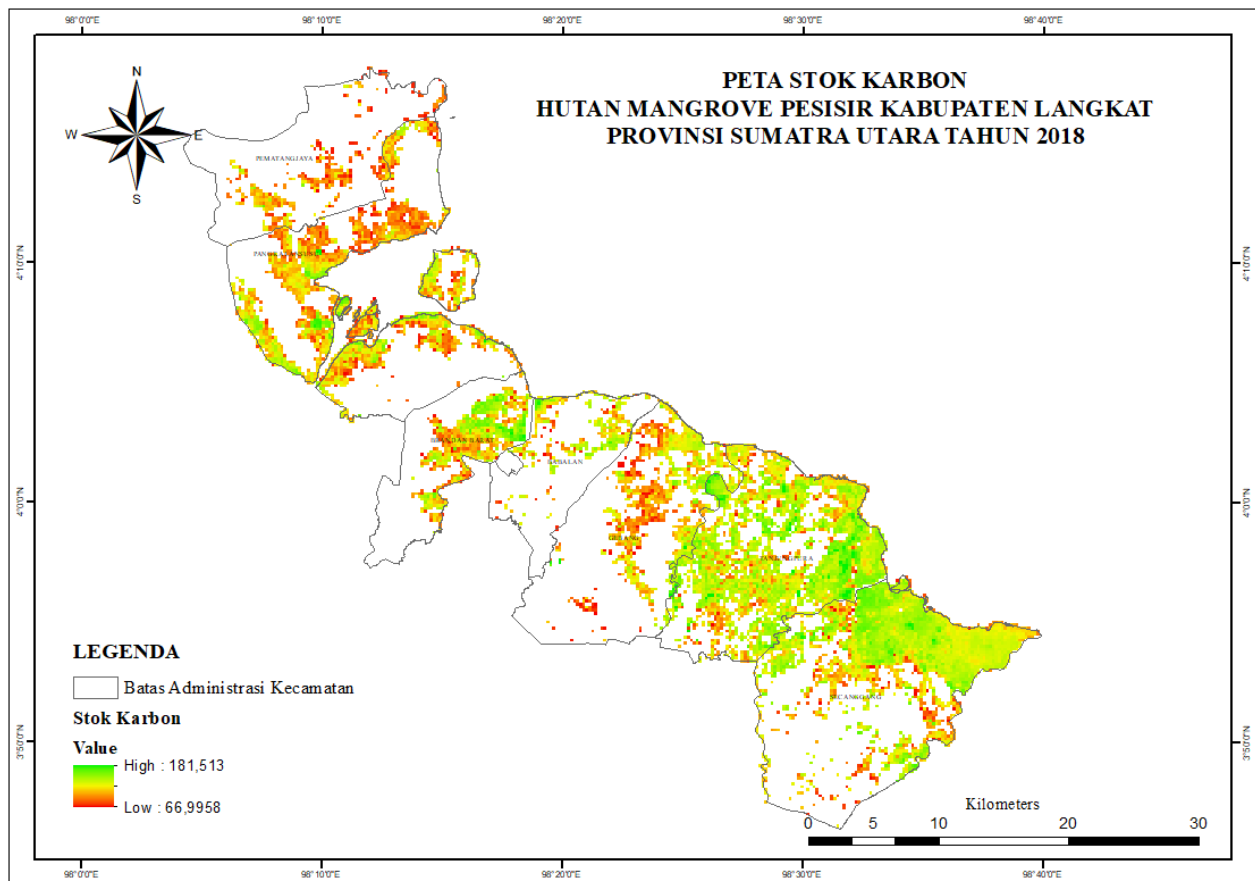
Perbandingan spasial antar tahun menunjukkan bahwa sebagian besar peningkatan stok karbon terjadi di wilayah yang sebelumnya memiliki NDVI rendah dan berhasil pulih menjadi lebih rapat, sedangkan penurunan stok karbon banyak ditemukan di area yang sebelumnya berkerapatan sedang yang mengalami tekanan. Misalnya, beberapa bagian barat Pangkalan Susu dan utara Gebang mengalami penurunan NDVI yang tampak pada perpindahan warna dari kuning/hijau menjadi merah. Sebaliknya, beberapa wilayah pesisir tengah dan selatan justru memperlihatkan perubahan dari kuning ke hijau.

Penurunan stok karbon per hektar pada NDVI rendah dari 7.208,51 ton C/ha (2018) menjadi 6.993,51 ton C/ha (2023) menunjukkan bahwa kawasan dengan vegetasi jarang mengalami degradasi struktural atau gangguan yang menyebabkan berkurangnya cadangan karbon. Penurunan ini juga menunjukkan bahwa area

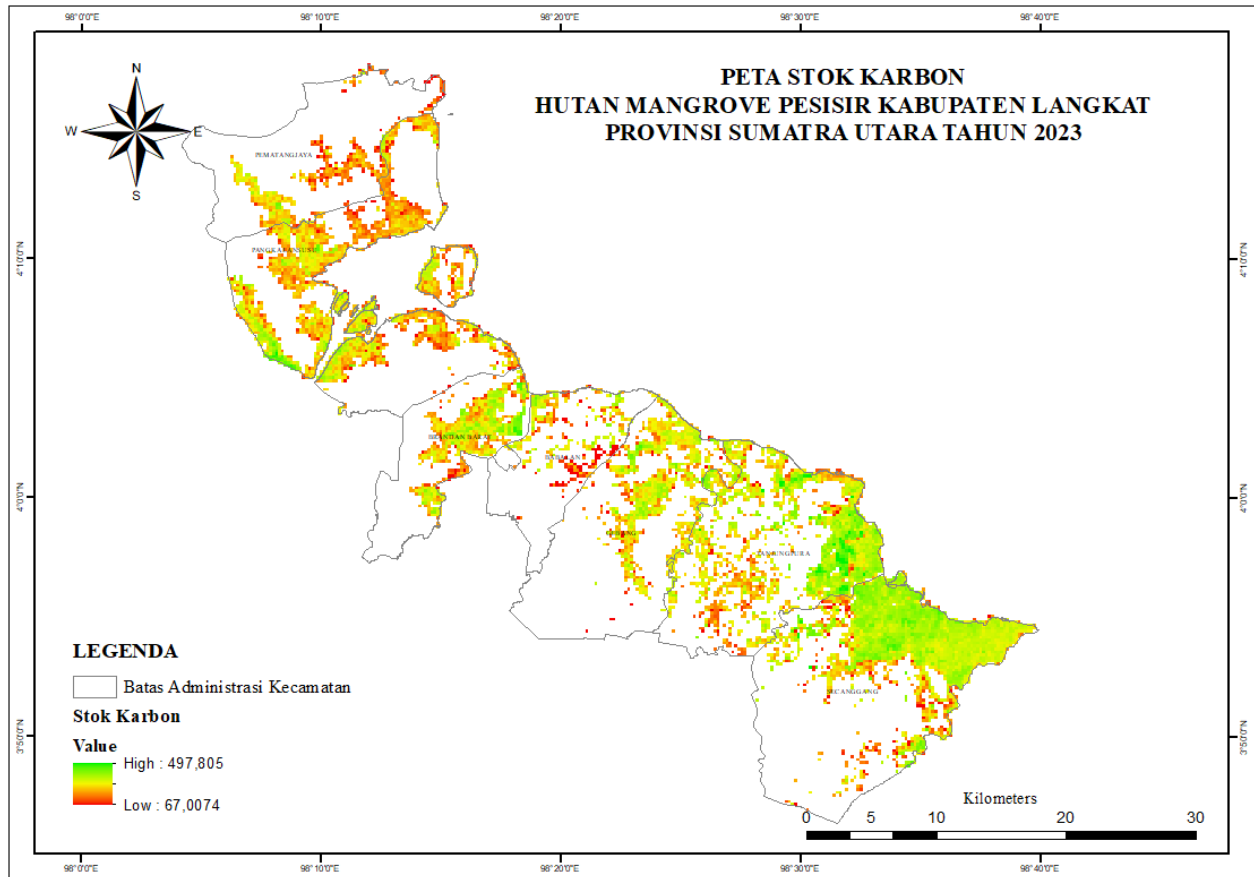
yang tidak mengalami peningkatan NDVI rentan terhadap kehilangan karbon akibat deforestasi, perubahan tutupan lahan, atau perubahan lingkungan fisik seperti intrusi air laut dan abrasi pantai.

Sebaliknya, kenaikan stok karbon pada NDVI tinggi meskipun tidak terlalu besar (dari 9.667,83 ke 9.410,38 ton C/ha) mengindikasikan kestabilan vegetasi mangrove dengan tutupan rapat. Stabilitas ini menunjukkan bahwa kawasan tersebut memiliki fungsi ekologis yang kuat dan mampu menyerap serta menyimpan karbon dalam jumlah besar, bahkan dalam kondisi lingkungan yang dinamis (Kauffman et al., 2020). Hal ini juga mendukung pentingnya menjaga kawasan dengan NDVI tinggi sebagai zona konservasi prioritas dalam kebijakan pengelolaan mangrove.

Secara keseluruhan, peta dan data stok karbon membuktikan bahwa pemantauan spasial berbasis NDVI dan stok karbon memberikan informasi penting untuk evaluasi efektivitas perlindungan dan rehabilitasi mangrove. Dengan pemetaan dua periode ini, dapat diidentifikasi wilayah yang memerlukan intervensi lebih lanjut, serta area yang berhasil dipulihkan. Pendekatan ini sangat penting dalam mendukung perencanaan pengelolaan sumber daya pesisir berbasis data, serta mendukung kontribusi Kabupaten Langkat dalam mitigasi perubahan iklim melalui pelestarian karbon biru (blue carbon ecosystem). Peta stok karbon mangrove pesisir Kabupaten Langkat Tahun 2018 dan Tahun 2023 di tampilkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



**Gambar 5.** Peta stok karbon Mangrove pesisir Kabupaten Langkat tahun 2018



**Gambar 6.** Peta Stok karbon Mangrove Pesisir Kabupaten Langkat Tahun 2023

## SIMPULAN DAN SARAN

Perhitungan stok karbon dilakukan dengan memanfaatkan NDVI dari citra Sentinel-2A melalui model regresi polinomial ( $R^2 \approx 0,7969$ ) untuk mengonversi nilai NDVI menjadi estimasi biomassa, yang kemudian dikonversi menjadi karbon ( $\approx 50\%$  dari biomassa). Hasilnya menunjukkan bahwa pada tahun 2018 kawasan mangrove pesisir Langkat didominasi vegetasi berkepadatan tinggi (NDVI  $> 0,4$ ) seluas  $\sim 13.567,54$  ha, sedangkan kepadatan rendah (NDVI  $0,2-0,4$ )  $\sim 2.188,05$  ha. Stok karbon total tahun 2018 diperkirakan mencapai  $\sim 148,92$  juta ton C, dengan kontribusi terbesar dari area mangrove ber-NDVI tinggi ( $\sim 131,17$  juta ton C) dan sisanya dari area NDVI rendah ( $\sim 15,77$  juta ton C).

Pemetaan stok karbon mangrove menunjukkan perbedaan spasial yang mencolok antara 2018 dan 2023. Pada tahun 2018, stok karbon tinggi terkonsentrasi di pesisir selatan Langkat (terutama Kecamatan Secanggang dan Tanjung Pura) yang memiliki hamparan mangrove rapat luas, sedangkan wilayah utara seperti Pematang Jaya dan Pangkalan Susu didominasi stok karbon lebih rendah. Pada 2023, nilai maksimum stok karbon meningkat (dari  $\sim 181,5$  menjadi  $\sim 497,8$  dalam satuan indeks peta) dan area bernilai karbon tinggi (zona hijau pada peta) meluas ke wilayah yang sebelumnya ber-NDVI sedang. Banyak area mangrove ber-NDVI rendah tahun 2018 yang berhasil pulih menjadi berkepadatan tinggi pada 2023 (tercermin dari perubahan warna peta dari kuning/merah menjadi hijau), sementara beberapa lokasi mengalami degradasi (misalnya bagian barat Pangkalan Susu dan utara Gebang berubah dari hijau/kuning ke merah).

Sebaiknya melaksanakan pemantauan rutin kesehatan mangrove dengan teknologi penginderaan jauh. Penerapan analisis NDVI secara berkala (misalnya citra Sentinel-2 setiap tahun) dapat berfungsi sebagai sistem peringatan dini terhadap deforestasi atau degradasi mangrove. Peningkatan kapasitas dinas terkait dalam pengolahan data satelit akan membantu deteksi dini perubahan tutupan mangrove, sehingga intervensi restorasi dapat dilakukan cepat dan tepat.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terima Kasih ditujukan kepada asisten praktikum Sistem Informasi Lingkungan dan kepada Program Studi Ilmu Lingkungan dan Universitas Sebelas Maret.

## DAFTAR PUSTAKA

- Azizah, R., Alamsyah, R., Mutahharah, M., Akram, A., Nurhaliza, N., & Maulana, W. (2024). Potensi Serapan Karbon Hutan Mangrove Pesisir Sinjai Utara Kabupaten Sinjai. *HUTAN TROPIKA*, 19(1), 141–149. <https://doi.org/10.36873/jht.v19i1.14262>
- Bachmid, F., Sondak, C. F. A., & Kusen, J. D. (2018). Estimasi Penyerapan Karbon Hutan Mangrove Bahowo Kelurahan Tongkaina Kecamatan Bunaken. *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, 1(1), 8–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.35800/jplt.6.1.2018.19463>
- Dinilhuda, A., Akbar, A. A., Jumiaty, & Herawati, H. (2020). Potentials of mangrove ecosystem as storage of carbon for global warming mitigation. *Biodiversitas*, 21(11), 5353–5362. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211141>
- 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(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Farista, B., & Virgota, A. (2021). Serapan Karbon Hutan Mangrove di Bagek Kembar Kecamatan Sekotong Kabupaten Lombok Barat. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 9(1), 170–178. <https://doi.org/10.33394/bjib.v9i1.3777>
- Ikhwan, M. (2021). Potensi Stok Karbon Hutan Mangrove dan Tutupan Lahan Lainnya di Lubuk Kertang, Sumatra Utara. *Fakultas Kehutanan, Universitas Sumatera Utara*.
- Karang, I. W. G. A., Nuarsa, I. W., Hendrawan, I. G., Dewi, N. M. N. B. S., Yasa, P. K., & Krisnanda, I. M. D. (2024). Satellite remote sensing techniques for mapping and estimating mangrove carbon stocks in the small island of Gili Meno, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Biodiversitas*, 25(9), 3189–3200. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250941>
- Kauffman, J. B., Adame, M. F., Arifanti, V. B., Schile-Beers, L. M., Bernardino, A. F., Bhomia, R. K., Donato, D. C., Feller, I. C., Ferreira, T. O., Jesus Garcia, M. del C., MacKenzie, R. A., Megonigal, J. P., Murdiyarso, D., Simpson, L., & Hernández Trejo, H. (2020). Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients. *Ecological Monographs*, 90(2). <https://doi.org/10.1002/ecm.1405>
- Marbun, Y. K., Jaya, M. A., Rais, M., Sari, D. P., & Damanik, M. R. S. D. (2022). Analisis Perubahan Luasan Tutupan Hutan Mangrove di Kecamatan Pangkalan Susu, Kabupaten Langkat. *Journal of Laguna Geography*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.52562/joulage.v1i1.318>
- Marzuki, Nurdin, N., Yasir, I., Mashoreng, S., & Selamat, M. B. (2023). Estimation of Biomass Carbon Stock in Mangrove Ecosystems using Remote Sensing on Nunukan Island Nunukan Regency North Kalimantan. *Majalah Ilmiah Globē*, 25(1), 63–76. <https://jurnal.big.go.id/GL/article/view/96>
- Onrizal. (2010). Perubahan Tutupan Hutan Mangrove di Pantai Timur Sumatera Utara Periode 1977-2006. *Jurnal Biologi Indonesia*, 6(2), 163–172.
- Rifandi, R. A., & Abdillah, R. F. (2020). Estimasi Stok Karbon Dan Serapan Karbon Pada Tegakan Pohon Mangrove Di Hutan Mangrove Trimulyo, Genuk, Semarang. *Journal of Environmental Sustainability*, 1(2), 63–70. <https://doi.org/10.31331/envoist.v1i2.1475>
- Saragi-Sasmito, M. F., Murdiyarso, D., June, T., & Sasmito, S. D. (2019). Carbon stocks, emissions, and aboveground productivity in restored secondary tropical peat swamp forests. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(4), 521–533. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9793-0>

- Sievers, M., Brown, C. J., McGowan, J., Turschwell, M. P., Buelow, C. A., Holgate, B., Pearson, R. M., Adame, M. F., Andradi-Brown, D. A., Arnell, A., Mackey, B. G., Ermgassen, P. S. E. zu, Gosling, J., McOwen, C. J., Worthington, T. A., & Connolly, R. M. (2023). Co-occurrence of biodiversity, carbon storage, coastal protection, and fish and invertebrate production to inform global mangrove conservation planning. *The Science of the Total Environment*, 904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166357>
- Waru, A. T., Rukminasari, N., Inaku, D. F., Yanuarita, D., & Supriadi. (2022). Estimasi Cadangan Karbon di Atas Permukaan pada Hutan Mangrove Kuri Caddi Menggunakan Citra Sentinel-2A Estimation of Above Ground Carbon in Kuri Caddi Mangrove using Sentinel-2A Imagery. *IJCCS*, 4(1), 13–24.
- Worthington, T. A., Andradi-Brown, D. A., Bhargava, R., Buelow, C., Bunting, P., Duncan, C., Fatoyinbo, L., Friess, D. A., Goldberg, L., Hilarides, L., Lagomasino, D., Landis, E., Longley-Wood, K., Lovelock, C. E., Murray, N. J., Narayan, S., Rosenqvist, A., Sievers, M., Simard, M., ... Spalding, M. (2020). Harnessing Big Data to Support the Conservation and Rehabilitation of Mangrove Forests Globally. *One Earth*, 2(5), 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.04.018>