

Estimasi Cadangan Karbon di Hutan Suaka Margasatwa Padang Sugihan Menggunakan Pendekatan Alometrik dan Citra Satelit Sentinel-2A

Estimating Carbon Stock in the Padang Sugihan Wildlife Sanctuary Forest Using Allometric Models and Sentinel-2A Imagery

Atep Edi Hikmana¹⁾, M. Umar Harun^{2)*}, Sarno³⁾, Jun Harbi^{4,5)}

¹Program Studi Pengelolaan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

²Program Studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia

³Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia

⁴Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Muhammadiyah Palembang, Palembang, Indonesia

⁵Pusat Studi Lingkungan dan Pembangunan Berkelanjutan, Universitas Muhammadiyah Palembang, Palembang, Indonesia

*Penulis korespondensi: mumarharun@unsri.ac.id

Received August 2025, Accepted October 2025, Published October 2025

ABSTRAK

Ekosistem hutan rawa gambut di Sumatera Selatan berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon dan fungsi hidrologisnya. Namun, tekanan antropogenik seperti pembalakan liar, konversi lahan, dan kebakaran berulang telah menyebabkan degradasi ekosistem yang signifikan, termasuk di kawasan Suaka Margasatwa Padang Sugihan seluas ±86.932 ha. Kawasan ini merupakan habitat penting bagi flora dan fauna endemik, tetapi mengalami penurunan tutupan hutan dan fungsi ekologis yang berdampak pada kapasitas penyimpanan karbon. Penelitian ini bertujuan mengestimasi kerapatan vegetasi dan stok karbon di kawasan tersebut melalui kombinasi observasi lapangan, analisis spasial (perubahan tutupan lahan, NDVI, dan stok karbon), serta pendekatan alometrik. Sebanyak delapan plot berukuran 20×20 m ditetapkan berdasarkan peta tutupan lahan tahun 2024 dengan kesamaan habitus vegetasi hutan sekunder. Analisis dilakukan sesuai SNI 7724:2011 tentang pengukuran dan penghitungan cadangan karbon. Hasil menunjukkan adanya perubahan signifikan tutupan lahan selama periode 2020–2024, dengan penurunan hutan rawa sekunder dan peningkatan area terbuka, perkebunan, serta badan air. Nilai NDVI dan hasil pengukuran alometrik menunjukkan variasi spasial yang mencerminkan dinamika pertumbuhan vegetasi dan potensi serapan karbon. Plot 8 dan Lokus 4 mencatat akumulasi karbon tertinggi, masing-masing 1,602 dan 10,63 ton CO₂e ha⁻¹, dipengaruhi oleh dominasi spesies Mahang (Lauraceae), kerapatan, dan umur vegetasi. Temuan ini menegaskan bahwa hutan rawa sekunder memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan karbon dan mendukung upaya restorasi ekosistem gambut di tingkat lanskap, sekaligus memberikan dasar ilmiah bagi pengelolaan dan konservasi kawasan Padang Sugihan secara berkelanjutan.

Kata kunci: alometrik, cadangan karbon, Padang Sugihan, sentinel-2A

ABSTRACT

Peat swamp forests in South Sumatra play a vital role in climate change mitigation through carbon storage and hydrological regulation. However, anthropogenic pressures such as illegal logging, land conversion, and recurring fires have led to severe ecosystem degradation, including within the Padang Sugihan Wildlife Reserve, which covers approximately 86,932 hectares. This reserve serves as a critical habitat for endemic flora and fauna but has experienced a decline in forest cover and ecological functions, ultimately affecting its carbon storage capacity. This study aimed to estimate vegetation density and carbon stock through a combination of field observations, spatial analysis (land cover change, NDVI, and carbon stock), and allometric approaches. Eight plots measuring 20×20 m were established based on the 2024 land cover map, representing similar secondary forest vegetation structures. The analysis followed SNI 7724:2011 standards for carbon stock measurement and calculation. The results revealed significant land cover changes between 2020 and 2024, including a reduction in secondary peat swamp forest and an increase in open areas, plantations, and water bodies. NDVI values and allometric measurements indicated spatial variations reflecting vegetation growth dynamics and carbon absorption potential. Plot 8 and Locus 4 recorded the highest carbon accumulation, at 1.602 and 10.63 tons CO₂e ha⁻¹, respectively, influenced by the dominance of Mahang species (Lauraceae family), vegetation density, and stand age. These findings highlight the critical role of secondary peat swamp forests in maintaining carbon balance and supporting peatland ecosystem restoration at the landscape level. The results also provide scientific evidence for developing sustainable management and conservation strategies for the Padang Sugihan Wildlife Reserve.

Keywords: allometric, carbon stocks, Padang Sugihan, sentinel-2A

PENDAHULUAN

Pemanasan global akibat peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) dari aktivitas manusia telah menempatkan pengelolaan karbon sebagai isu lingkungan utama secara global. Hutan, terutama ekosistem lahan gambut tropis, berperan penting sebagai penyerap karbon (carbon sink) dan penyeimbang siklus karbon dunia. Namun, deforestasi, konversi lahan, dan degradasi ekosistem telah menurunkan kapasitas hutan dalam menyimpan karbon, sehingga mempercepat akumulasi gas rumah kaca di atmosfer (Farahisah et. al, 2021).

Gambut memiliki karakteristik unik dan berfungsi sebagai pengatur tata air, pengendali banjir, habitat bagi berbagai jenis makhluk hidup, serta sebagai penyimpan karbon yang signifikan, sehingga berperan dalam mengendalikan kestabilan iklim global (Kementerian Lingkungan Hidup, 2012). Maas (2003) menyatakan bahwa kesuburan gambut lebih dipengaruhi oleh kondisi lingkungannya, dengan gambut di daerah cekungan (topogen) dan pantai cenderung lebih subur. Ekosistem hutan rawa gambut merupakan ekosistem yang rapuh terhadap kondisi yang kurang menguntungkan (Masganti et al., 2017). Ekosistem ini memiliki kedalaman gambut yang bervariasi dari 25 cm hingga lebih dari 15 meter, dengan kekayaan flora dan fauna yang khas dan bernilai tinggi (Daryono, 2009). Keunikan ekosistem hutan rawa gambut membuatnya memiliki peran penting secara ekologi, ekonomi, dan sosial. Namun, karena sifatnya yang rapuh, pengelolaan ekosistem gambut perlu dilakukan dengan sangat hati-hati.

Secara ekologis, ekosistem hutan rawa gambut berfungsi sebagai penambat karbon (*carbon sink*), memiliki fungsi hidrologis, dan menjadi niche ecology bagi berbagai flora dan fauna (Maftuah dan Nurzakiah, 2017). Rieley et al. (1996) menyatakan bahwa pembentukan gambut di wilayah tropis dimulai dari adanya genangan di daerah rawa, danau, atau cekungan, yang didukung oleh curah hujan tinggi sehingga proses pencucian basa-basa dan pemasaman tanah berlangsung intensif, diikuti oleh penurunan aktivitas mikroorganisme pengurai bahan organik. Di wilayah non-tropis, gambut terbentuk karena didukung oleh suhu dingin dan kondisi jenuh air, sehingga proses dekomposisi berlangsung lambat (Mitsch dan Gosselink, 2000). Puncak kubah gambut merupakan bagian tertinggi dan paling tebal dalam suatu ekosistem gambut, mencapai lebih dari 10 meter.

Indonesia memiliki sekitar 14 juta hektar lahan gambut, dan Sumatera Selatan merupakan salah satu provinsi dengan sebaran gambut terluas, yakni sekitar 2,09 juta hektar yang tersebar di 36 Kesatuan Hidrologis Gambut (KHG) (Asiah et. al, 2024). Tekanan antropogenik seperti perubahan tata guna lahan, kebakaran, dan konversi untuk pertanian telah menyebabkan degradasi lebih dari 1,2 juta hektar lahan gambut sejak 1997, menjadikan Sumatera Selatan sebagai wilayah prioritas mitigasi emisi

berbasis lahan (Yuningsih et. al 2020; Holifah et. al, 2023).

Salah satu kawasan hutan gambut di Sumatera Selatan yang selama ini banyak terdampak adalah Suaka Margasatwa (SM) Padang Sugihan, dengan luas sekitar 86.932 hektar. Kawasan ini merupakan benteng terakhir ekosistem hutan rawa gambut di Sumatera bagian selatan dan habitat utama gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*). Secara ekologis, SM Padang Sugihan terdiri dari mosaik vegetasi hutan rawa sekunder, padang rumput rawa, dan tegakan gelam (*Melaleuca cajuputi*), yang mendukung fungsi ekologis penting seperti pengaturan hidrologi, penyimpanan karbon, dan konservasi keanekaragaman hayati. Namun, dalam dua dekade terakhir, kawasan ini mengalami degradasi serius akibat kebakaran berulang, pembalakan liar, pembukaan kanal, dan konversi lahan, yang menyebabkan penurunan fungsi ekologis, ancaman terhadap keanekaragaman hayati, dan peningkatan emisi karbon akibat oksidasi lapisan gambut yang terekspos udara (Farahisah et. al, 2021).

Ekosistem gambut di Sumatera Selatan memiliki kedalaman bervariasi dari 200 cm hingga lebih dari 850 cm, dengan kandungan karbon organik tanah sekitar 56–58% dan prediksi cadangan karbon tanah berkisar antara 1,67 hingga 9,05 juta ton C/ha, tergantung kedalaman dan kondisi lahan. Karbon tersimpan dalam dua bentuk utama, yaitu biomassa vegetasi hidup/di atas permukaan (*aboveground carbon*) dan karbon tanah organik (*soil organic carbon*). Perubahan hidrologi akibat aktivitas manusia dapat meningkatkan laju dekomposisi dan emisi karbon, sehingga pemetaan dan estimasi stok karbon yang akurat sangat penting sebagai dasar pengelolaan dan restorasi ekosistem gambut.

Pendekatan alometrik merupakan metode standar untuk mengestimasi biomassa dan stok karbon vegetasi melalui pengukuran diameter dan tinggi pohon, dengan konversi biomassa ke karbon sekitar 47% sesuai SNI 7724:2011 (Lestariningsih et. al. 2018). Penggunaan model alometrik telah banyak diterapkan pada berbagai ekosistem, termasuk mangrove dan hutan rawa, untuk memperkirakan cadangan karbon baik di atas maupun di bawah permukaan tanah. Sementara itu, penginderaan jauh, khususnya citra satelit Sentinel-2A, memungkinkan pemetaan tutupan lahan dan analisis kerapatan vegetasi (misal NDVI) secara spasial dan efisien. Integrasi data lapangan dan citra satelit terbukti meningkatkan akurasi estimasi distribusi spasial stok karbon.

Meskipun telah banyak penelitian terkait ekosistem gambut dan mangrove di Indonesia, kajian integratif yang mengombinasikan pendekatan alometrik dan analisis citra satelit untuk estimasi stok karbon di kawasan konservasi seperti SM Padang Sugihan masih sangat terbatas. Sebagian besar studi sebelumnya berfokus pada aspek kerusakan lahan, keanekaragaman vegetasi, atau hidrologi, tanpa mengaitkan secara spesifik struktur vegetasi, perubahan tutupan lahan, dan distribusi spasial

cadangan karbon. Selain itu, ketidakpastian dalam pemetaan kedalaman gambut dan stok karbon akibat keterbatasan data lapangan dan variasi metode masih menjadi tantangan utama (Farahisah et. al, 2021). Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mampu mengintegrasikan data alometrik dan penginderaan jauh untuk menghasilkan estimasi stok karbon yang lebih akurat dan spasial, sebagai dasar perumusan strategi pengelolaan dan restorasi berkelanjutan (Ibrahim dan Muhsoni, 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan karbon di kawasan Suaka Margasatwa Padang Sugihan dengan mengintegrasikan pendekatan alometrik dan analisis citra satelit Sentinel-2A. Penelitian ini menganalisis perubahan tutupan lahan periode 2020–2024, menilai kerapatan vegetasi berdasarkan nilai NDVI, mengestimasi biomassa dan stok karbon di atas permukaan tanah menggunakan model alometrik, serta mengintegrasikan hasil analisis lapangan dan spasial untuk menentukan distribusi spasial cadangan karbon di kawasan hutan rawa gambut tersebut. Hasil penelitian diharapkan memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi serapan dan penyimpanan karbon di SM Padang Sugihan, serta menjadi referensi ilmiah bagi upaya konservasi dan mitigasi perubahan iklim berbasis pengelolaan lahan gambut berkelanjutan di Provinsi Sumatera Selatan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan terpadu yang menggabungkan pengukuran lapangan (allometrik) dan analisis spasial berbasis citra satelit Sentinel-2A untuk mengestimasi cadangan karbon pada kawasan Suaka Margasatwa (SM) Padang Sugihan, Provinsi Sumatera Selatan. Tahapan penelitian meliputi: (1) penentuan lokasi dan plot pengamatan, (2) akuisisi dan pengolahan citra Sentinel-2A, (3) perhitungan indeks vegetasi NDVI, (4) klasifikasi tutupan lahan, (5) pengukuran biomassa vegetasi dan estimasi stok karbon, serta (6) analisis spasial dan validasi hasil.

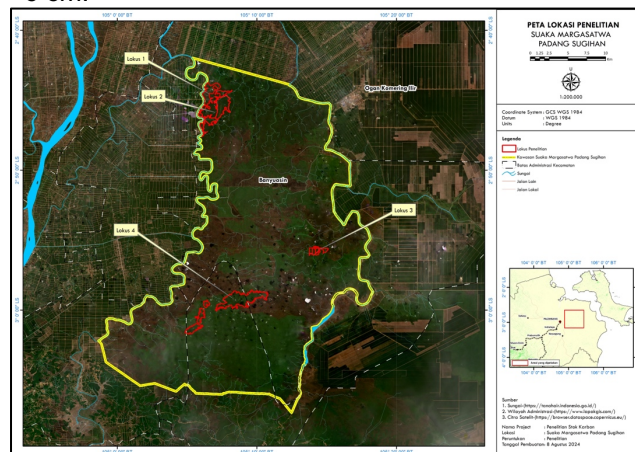
Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada Desember 2024 di Suaka Margasatwa Padang Sugihan, yang masuk dalam wilayah administrasi Kabupaten Banyuasin dan Kabupaten Ogan Komering Ilir (OKI), Provinsi Sumatera Selatan. Secara geografis, lokasi penelitian berada pada koordinat 105°04'01"–105°11'16" BT dan 02°45'18"–03°04'34" LS. Akses menuju lokasi dapat ditempuh melalui jalur sungai maupun transportasi darat dari Kota Palembang. Visualisasi lokasi penelitian lihat Gambar 1.

Penentuan Lokasi dan Plot Penelitian

Plot pengamatan ditetapkan berdasarkan hasil klasifikasi citra Sentinel-2A tahun 2024 dan peta tutupan lahan, dengan mempertimbangkan variasi kondisi vegetasi yang mewakili tipe ekosistem utama kawasan. Sebanyak 8 plot pengamatan berukuran

20 m × 20 m ditetapkan menggunakan *stratified purposive sampling* untuk mewakili tiga kategori utama penutupan lahan, yaitu: (1) hutan rawa sekunder, (2) lahan terbuka, dan (3) rawa atau semak basah. Penempatan plot dilakukan dengan mempertimbangkan keseragaman habitus vegetasi, aksesibilitas lapangan, serta posisi topografi yang relatif datar. Koordinat setiap plot direkam menggunakan GPS, dan data vegetasi dicatat secara lengkap untuk setiap individu pohon dengan diameter ≥6 cm.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Data dan Sumber Informasi

Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yaitu: (1) data primer, berupa hasil pengukuran lapangan (diameter, tinggi pohon, dan jenis vegetasi) dari 8 plot pengamatan; dan (2) data sekunder, berupa citra satelit Sentinel-2A Level-1C periode tahun 2020–2024 dengan resolusi spasial 10 m, yang diperoleh melalui platform Copernicus Open Access Hub.

Perhitungan NDVI dan Analisis Tutupan Lahan

Analisis indeks vegetasi dilakukan menggunakan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) untuk mengidentifikasi tingkat kehijauan dan kerapatan vegetasi. Rumus NDVI dituliskan sebagai berikut:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

dengan NIR = reflektansi band inframerah dekat (Band 8 Sentinel-2A); dan RED = reflektansi band merah (Band 4 Sentinel-2A).

Nilai NDVI diklasifikasikan ke dalam lima kelas tingkat kerapatan vegetasi (mengacu pada Fatmawati & Ruchlihadiana, 2024) seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi NDVI

Nilai Range	Keterangan
-0.1 < NDVI < -0.003	Badan Air/Lahan Tidak Bervegetasi
-0.003 < NDVI < 0.15	Kerapatan Vegetasi Sangat Rendah
0.15 < NDVI < 0.25	Kerapatan Vegetasi Sedang
0.25 < NDVI < 0.35	Kerapatan Vegetasi Tinggi
0.35 < NDVI < 1	Kerapatan Vegetasi Sangat Tinggi

Nilai NDVI digunakan untuk menilai kondisi vegetasi secara spasial serta menjadi dasar dalam stratifikasi penentuan lokasi plot penelitian.

Klasifikasi Tutupan Lahan

Klasifikasi citra dilakukan menggunakan metode Supervised Classification dengan algoritma Maximum Likelihood pada perangkat lunak ArcGIS 10.8. Titik training sample ditentukan berdasarkan hasil observasi lapangan dan interpretasi visual citra. Lima kelas utama tutupan lahan ditetapkan, yaitu: (1) Hutan rawa sekunder (HRS), (2) Lahan terbuka (LT), (3) Lahan perkebunan (LP), (4) Badan air (BA), dan (5) Rawa (Rw). Hasil klasifikasi diverifikasi dengan data lapangan untuk memastikan keakuratan spasial. Akurasi klasifikasi diukur menggunakan confusion matrix dan dinyatakan dalam persentase ketepatan (*overall accuracy*). Data ini menjadi dasar analisis perubahan tutupan lahan tahun 2020–2024 dan digunakan untuk mengkaji distribusi spasial stok karbon.

Pengukuran Biomassa Vegetasi

Pengukuran biomassa vegetasi di atas permukaan tanah dilakukan dengan metode non-destruktif melalui pengukuran diameter batang (DBH) dan tinggi pohon. Diameter diukur pada ketinggian 1,37 m dari permukaan tanah menggunakan pita ukur pohon (diameter tape). Untuk setiap individu pohon, biomassa dihitung menggunakan persamaan alometrik tropis yang disarankan oleh Dharmawan et al. (2013) dan Ketterings et al. (2001):

$$B = 0,11 \times (\rho D^2 H)^{0,973}$$

dengan B = biomassa pohon (kg/pohon); ρ = berat jenis kayu (g/cm^3); D = diameter batang (cm); dan H = tinggi pohon (m). Nilai biomassa pohon dari setiap plot dikonversi ke satuan ton/ha, kemudian total biomassa diestimasi untuk seluruh area penelitian.

Estimasi Stok dan Konversi ke Ekuivalen CO₂

Mengacu pada SNI 7724:2011, diasumsikan bahwa 47% dari biomassa kering merupakan kandungan karbon. Maka, stok karbon dihitung dengan rumus:

$$C = 0,47 \times B$$

Selanjutnya, kandungan karbon dikonversi menjadi ekuivalen karbon dioksida (CO₂e) dengan faktor konversi 3,67:

$$CO_2e = C \times 3,67$$

Nilai ini digunakan untuk menggambarkan kapasitas penyerapan karbon di tiap plot, yang kemudian diekstrapolasi ke seluruh kawasan SM Padang Sugihan.

Analisis Spasial dan Integrasi Data

Hasil estimasi stok karbon per plot diintegrasikan dengan peta NDVI dan peta klasifikasi tutupan lahan melalui proses spatial overlay di ArcGIS 10.8. Tahap ini menghasilkan peta distribusi spasial stok karbon yang menunjukkan variasi kandungan karbon antar jenis penutupan lahan. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi area dengan potensi serapan karbon tertinggi serta keterkaitannya dengan dinamika perubahan tutupan lahan selama periode 2020–2024.

Validasi dan Analisis Akurasi

Validasi hasil dilakukan dengan menghitung Root Mean Square Error (RMSE) guna menilai tingkat kesesuaian antara data hasil estimasi model spasial dan pengukuran lapangan. Rumus RMSE sebagai berikut:

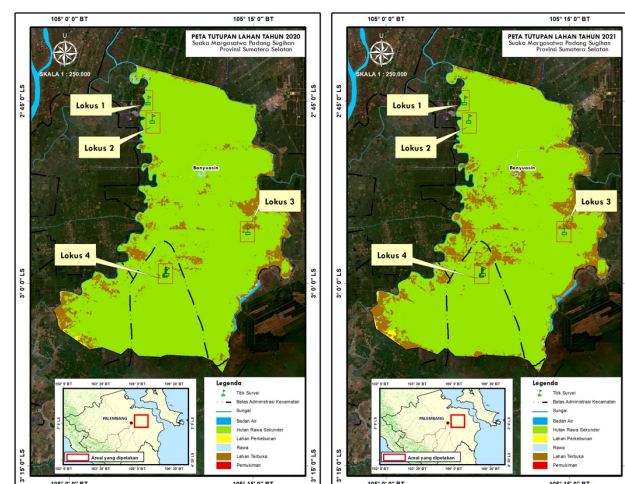
$$RMSE = \sqrt{\sum(Y_i - Y'_i)^2 / n}$$

semakin kecil nilai RMSE, semakin tinggi akurasi model estimasi spasial yang digunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tutupan Lahan 2020-2024

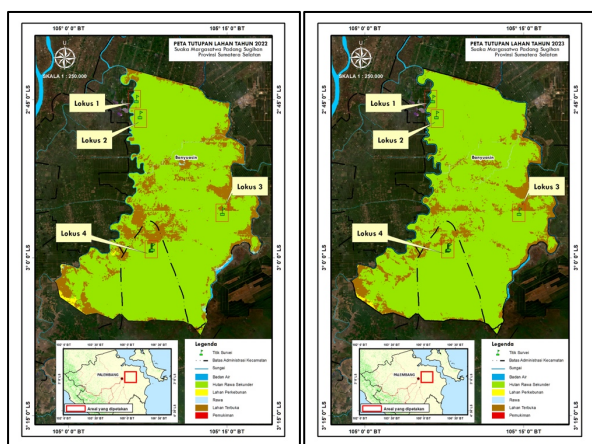
Analisis perbandingan peta tutupan lahan tahun 2020 dan 2021 (Gambar 2) menunjukkan adanya perubahan spasial pada beberapa kategori tutupan lahan di wilayah studi. Area yang ditandai dengan warna hijau muda, yang merepresentasikan hutan sekunder, mengalami penyusutan di beberapa lokasi, terutama di bagian barat dan selatan wilayah kajian. Sebaliknya, area berwarna coklat yang mengindikasikan lahan terbuka dan kuning mempresentasikan wilayah pertanian mengalami perluasan di sekitar area penyusutan hutan sekunder. Perubahan ini dapat diamati pada koordinat geografis tertentu yang ditandai pada peta, menunjukkan dinamika perubahan tutupan lahan dalam kurun waktu satu tahun.



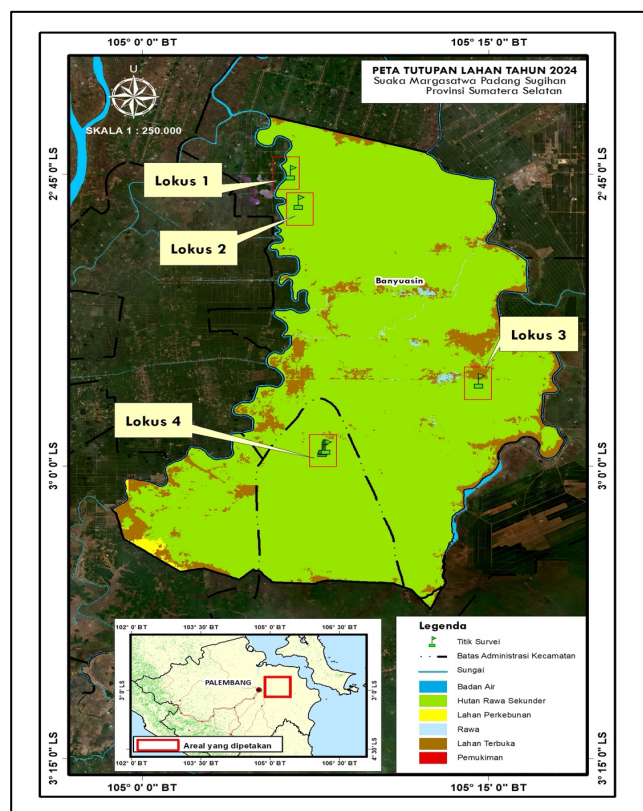
Gambar 2. Tutupan Lahan 2020 (kiri) dan Tutupan Lahan 2021 (Kanan)

Peta menampilkan empat lokasi sampling yang ditandai dengan kotak berwarna merah dan label Lokus 1 hingga Lokus 4. Lokasi-lokasi ini tersebar di berbagai jenis tutupan lahan yang berbeda. Lokus 1 dan 2 terletak di dalam area yang didominasi oleh hutan sekunder, sementara Lokus 3 berada di area yang teridentifikasi sebagai lahan perkebunan. Lokus 4 terletak di area transisi antara hutan sekunder dan lahan terbuka. Informasi ini memberikan konteks spasial untuk data lapangan yang mungkin dikumpulkan dari lokasi-lokasi tersebut, seperti data keanekaragaman hayati, kondisi tanah, atau parameter lingkungan lainnya.

Perubahan tutupan lahan pada tahun 2021-2022 yang dapat dilihat pada (Gambar 2) dimana terjadi penyusutan pada hutan rawa sekunder yang disimbolkan pada warna hijau, dan serta kawasan lahan terbuka serta pertanian bertambah secara bertahap, artinya perubahan tersebut mengakibatkan degradasi pada kawasan hutan rawa sekunder pada tahun 2021-2022, kemudian pada tahun 2022-2023 (Gambar 3) penyusutan terjadi pada kawasan lahan terbuka dan pertanian, sehingga kawasan hutan rawa sekunder berdasarkan hasil analisis terjadi perluasan kembali. Penghijauan daerah tersebut merupakan efek dari kondisi iklim dan kegiatan antropogenik seperti aktivitas manusia yang berkurang. Perubahan tutupan lahan tahun 2024 dapat dilihat pada (Gambar 4).



Gambar 3. Tutupan Lahan 2022 (kiri) dan Tutupan Lahan 2023 (Kanan)



Gambar 4. Tutupan Lahan 2024

Berdasarkan Gambar 4 yang merupakan hasil analisis tutupan lahan yang dilakukan secara spasial pada tahun 2023-2024 kawasan berwarna hijau yang diinterpretasikan sebagai hutan rawa sekunder mengalami perluasan dibandingkan lahan terbuka dan perkebunan yang cenderung mengalami penyusutan, hal ini terjadi dikarenakan tahun 2023-2024 merupakan peralihan iklim *el-nino* dan *la-nina*, serta tidak terjadi kebakaran atau pun efek kemarau yang panjang terutama memasuki tahun 2024, sehingga secara stabilitas ekosistem kembali pulih secara perlahan.

Perubahan tutupan lahan dapat disebabkan oleh faktor alami dan faktor non alami. Faktor alami yang dapat menyebabkan perubahan tutupan lahan di Kota Samarinda yakni dikarenakan curah hujan yang tinggi, tanah longsor dan suksesi vegetasi. Sedangkan faktor non alami dapat terjadi disebabkan karena aktivitas dari manusia. Aktivitas manusia yang menjadi penyebab diantaranya adanya aktivitas pertambangan rakyat, vegetasi menjadi perkebunan buatan, dan pembangunan prasarana (Gifari et al., 2023). Berdasarkan analisis yang dilakukan, sehingga hasil secara tabulasi diinterpretasikan pada (Tabel 2).

Seperti ditunjukkan pada Tabel 2, data yang menyajikan hasil analisis tutupan lahan dari tahun 2020 hingga 2024 menunjukkan dinamika spasial yang dipengaruhi oleh faktor antropogenik dan alami. Badan Air mengalami fluktuasi luas, menurun dari 231 ha (2020) menjadi 177 ha (2021), lalu meningkat menjadi 250 ha (2022), sebelum menyusut kembali ke 208 ha (2023) dan naik menjadi 222 ha (2024). Perubahan ini berkorelasi dengan variabilitas curah hujan dan konversi lahan. Hutan rawa sekunder mengalami penurunan dari 80.256 ha (2020) menjadi 74.546 ha (2021), lalu 70.408 ha (2022), 69.405 ha (2023), dan meningkat menjadi 73.016 ha (2024). Penurunan ini terutama disebabkan oleh alih fungsi lahan menjadi lahan terbuka dan perkebunan, sementara ekspansi pada 2024 menunjukkan adanya pemulihan ekosistem.

Lahan Perkebunan menunjukkan tren fluktuatif, dari 141 ha (2020) menjadi 69 ha (2021), meningkat ke 164 ha (2022), 176 ha (2023), dan menurun menjadi 168 ha (2024). Konversi ke hutan rawa sekunder dan lahan terbuka mencerminkan dinamika pemanfaatan lahan untuk pertanian. Lahan terbuka mengalami perubahan signifikan, menurun dari 7.248 ha (2020) ke 5.211 ha (2021), lalu meningkat ke 8.198 ha (2022), menyusut ke 6.474 ha (2023), dan turun drastis menjadi 4.792 ha (2024). Konversi terbesar terjadi menuju hutan rawa sekunder, menunjukkan tekanan dan pemulihan ekosistem secara simultan. Kategori rawa mengalami penurunan dari 263 ha (2020) menjadi 87 ha (2021), dengan konversi dominan ke lahan terbuka. Perubahan ini mengindikasikan pengaruh hidrologi dan aktivitas manusia terhadap degradasi lahan basah.

Tabel 2. Perubahan Tutupan Lahan

Tutupan lahan	TL 2021 (Ha)					Total (Ha)
	BA	HRS	LP	LT	Rw	
BA	177	22	4	25	3	231
HRS	118	74546	114	5453	24	80256
LP	1	7	69	65	1	141
LT	9	1951	47	5211	30	7248
Rw	8	87	2	133	33	263
Total	313	76613	235	10886	91	88139
Tutupan lahan	TL 2022 (ha)					Total (Ha)
	BA	HRS	LP	LT	Rw	
BA	250	41	2	16	2	177
HRS	29	70408	43	6090	30	74546
LP	3	20	164	47	1	69
LT	70	2318	167	8198	130	5211
Rw	7	12	1	40	32	33
Total	359	72799	376	14391	196	80036
Tutupan lahan	TL 2023 (ha)					Total (Ha)
	BA	HRS	LP	LT	Rw	
BA	208	68	1	82	0	250
HRS	87	69405	15	3293	0	70408
LP	2	90	176	107	0	164
LT	48	6474	67	7802	1	8198
Rw	4	56	1	134	1	32
Total	349	76094	261	11418	3	79051
Tutupan lahan	TL 2024 (ha)					Total (Ha)
	BA	HRS	LP	LT	Rw	
BA	222	92	4	30	1	208
HRS	60	73016	129	2745	154	69405
LP	1	7	168	85	0	176
LT	25	6354	148	4792	103	7802
Rw	0	0	0	2	1	1
Total	309	79469	450	7654	258	77593

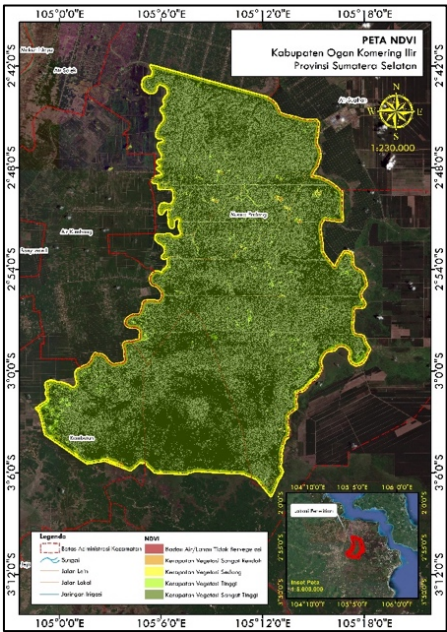
Keterangan: BA = Badan Air; HRS = Hutan Rawa Sekunder; LP = Lahan Perkebunan; LT = Lahan Terbuka; Rw = Rawa

Estimasi Stok Karbon di Hutan Suaka Margasatwa Air Sugihan

Analisis NDVI di Kawasan Suaka Margasatwa Padang Sugihan digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kerapatan vegetasi dan menilai kondisi ekologis serta dinamika vegetasi secara spasial (Gambar 6). Analisis NDVI menggunakan citra Sentinel-2A beresolusi 10 meter untuk mengidentifikasi kerapatan vegetasi berdasarkan spektrum warna (Gambar 6), di mana vegetasi dengan kanopi rapat memantulkan gelombang inframerah dekat lebih tinggi. Metode *supervised classification* diterapkan untuk membedakan tutupan lahan melalui sampling citra, yang kemudian digunakan dalam estimasi stok karbon. Estimasi stok karbon dilakukan dengan meng-overlay tutupan lahan aktual terhadap kawasan terencana, berdasarkan kesamaan vegetasi yang terdeteksi dari citra resolusi tinggi. Nilai stok karbon dikonversi ke ekuivalen CO₂

dengan mengalikan hasil estimasi dengan luas areal prediksi. Hasil analisis menunjukkan variasi spasial nilai allometrik, di mana wilayah berwarna kuning memiliki nilai seragam, sedangkan area berwarna oranye menunjukkan nilai lebih tinggi. Distribusi nilai allometrik dan potensi emisi CO₂ dijelaskan dalam Tabel 3.

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 3, Plot 7 yang terletak di Lokus 4 dengan tutupan hutan rawa sekunder, menunjukkan nilai ekuivalen CO₂ tertinggi sebesar 6,22 ton CO₂ e ha⁻¹ berdasarkan diameter batang (DBH) dan biomassa. Lokus ini memiliki kerapatan vegetasi tinggi dan variasi diameter batang yang signifikan, sehingga menghasilkan potensi emisi karbon terbesar dibandingkan lokus lainnya. Biomassa pohon meningkat seiring bertambahnya diameter, sebagai hasil dari proses fotosintesis yang mengonversi CO₂ atmosfer menjadi senyawa organik (Dharmawan et al., 2013). Pemilihan pohon contoh dilakukan dengan mempertimbangkan komposisi spesies dan representasi kelas diameter, sehingga distribusi vegetasi dan dinamika biomassa dapat dianalisis secara komprehensif. Grafik hasil analisis allometrik ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta Analisis NDVI

Tabel 3. Total Hasil Analisis Alometrik

Plot	Total		
	Biomass (ton ha ⁻¹)	Karbon (ton ha ⁻¹)	Ekuivalen CO ₂ (ton CO ₂ e ha ⁻¹)
1	0.29	0.08	0.29
2	0.21	0.06	0.21
3	0.29	0.08	0.29
4	0.48	0.23	0.84
5	0.47	0.22	0.80
6	0.46	0.22	0.80
7	3.60	1.69	6.22
8	1.15	0.54	1.98

Hasil analisis allometrik yang ditampilkan dalam Gambar 7 menunjukkan bahwa plot 7 memiliki nilai biomassa tertinggi dibandingkan dengan plot lainnya. Dengan demikian, estimasi ekuivalen karbon dioksida (CO_2) pada plot ini juga lebih tinggi. Faktor utama yang mempengaruhi hal ini adalah tingkat kerapatan vegetasi dan usia tanaman dalam plot tersebut. Vegetasi yang lebih rapat cenderung memiliki kapasitas fotosintesis yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan akumulasi biomassa. Selain itu, tanaman yang lebih tua berkontribusi terhadap penyimpanan karbon dalam jumlah yang lebih besar. Kombinasi kedua faktor ini menghasilkan nilai ekuivalen CO_2 yang lebih tinggi pada plot 7 dibandingkan dengan plot lainnya. Berdasarkan jumlah total ekuivalen CO_2 pada masing-masing lokus dapat dilihat pada Tabel 4.

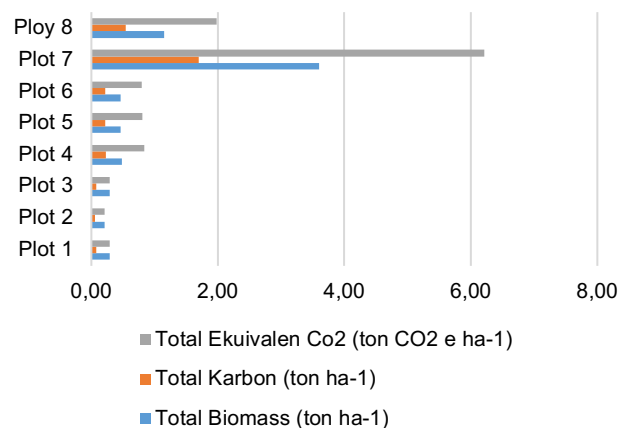
Tabel 4. Hasil Analisis Potensi Emisi CO_2 berdasarkan Tutupan Lahan

Lokus	Jenis Tutupan Lahan	Tutupan Lahan Rencana (ha^{-1})	Stok Karbon (ton ha^{-1})	Potensi CO_2 ($\text{ton CO}_2 \text{ e ha}^{-1}$)
1	HRS	229.53	66.56	244.07
1	HRS	1.31	0.38	1.39
1	HRS	367.51	106.58	390.79
2	HRS	380.48	79.90	292.97
2	LT	0.60	0.13	0.47
2	HRS	0.01	0.00	0.01
3	HRS	51.63	14.97	54.90
3	HRS	31.12	9.02	33.09
3	HRS	19.78	5.74	21.04
3	HRS	0.26	0.08	0.28
3	HRS	29.56	8.57	31.44
3	HRS	1.49	0.43	1.58
3	HRS	2.31	0.67	2.45
3	LT	0.66	0.19	0.70
3	HRS	3.27	0.95	3.48
3	LT	3.75	1.09	3.99
4	HRS	788.31	8379.69	30725.53
4	HRS	148.25	1575.86	5778.17
4	HRS	106.84	1135.68	4164.16
4	HRS	46.00	488.97	1792.89
4	HRS	2.64	28.05	102.85

Keterangan: BA = Badan Air; HRS = Hutan Rawa Sekunder; LP = Lahan Perkebunan; LT = Lahan Terbuka; Rw = Rawa

Lokus 4 mencatat nilai ekuivalen CO_2 tertinggi sebesar 10,63 $\text{ton CO}_2 \text{ e ha}^{-1}$, jauh melebihi lokus lainnya yang berada di bawah 0,3 $\text{ton CO}_2 \text{ e ha}^{-1}$ (lihat Tabel 5). Perbedaan ini disebabkan oleh umur tanaman yang lebih tua dan kerapatan vegetasi yang tinggi, yang menghasilkan heterogenitas diameter batang dan peningkatan biomassa. Akumulasi karbon yang signifikan di Lokus 4 mencerminkan dominasi vegetasi dibandingkan lokus lain. Selanjutnya, analisis

akurasi dilakukan melalui uji RMSE, dengan hasil disajikan pada Tabel 5.



Gambar 7. Hasil Analisis Allometrik pada Masing-Masing Plot

Tabel 5. Jumlah Total Ekuivalen CO_2 pada Masing-Masing Lokus

Lokus	Total Ekuivalen CO_2 ($\text{ton CO}_2 \text{ e ha}^{-1}$)
Lokus 1	0.29
Lokus 2	0.21
Lokus 3	0.29
Lokus 4	10.63

Hasil uji RMSE pada Tabel 6 menunjukkan total nilai sebesar 41, dengan nilai terendah -18 pada Lokus 3. RMSE digunakan untuk mengevaluasi akurasi pemodelan spasial terhadap data observasi. Nilai RMSE di Lokus 3 berada dalam rentang toleransi, menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan hubungan spasial antara koordinat geografis dan tutupan lahan yang dioverlay dengan data stok karbon. Semakin kecil nilai RMSE, semakin tinggi akurasi estimasi spasial dan stok karbon. Hasil ini mengindikasikan bahwa model yang digunakan cukup efektif dalam memetakan distribusi tutupan lahan dan potensi karbon. Analisis lanjutan dapat dilakukan dengan membandingkan nilai RMSE antar lokus untuk mengidentifikasi pola kesalahan dan meningkatkan akurasi pemodelan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan terpadu antara pengukuran alometrik dan analisis citra satelit Sentinel-2A efektif untuk mengestimasi cadangan karbon pada ekosistem hutan rawa gambut di Suaka Margasatwa Padang Sugihan. Hasil analisis spasial dan pengukuran lapangan memperlihatkan bahwa perubahan tutupan lahan selama periode 2020–2024 berpengaruh nyata terhadap sebaran cadangan karbon, di mana kawasan dengan vegetasi rapat dan umur tegakan lebih tua memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang lebih tinggi dibandingkan area terbuka atau terdegradasi.

Kerapatan vegetasi yang tinggi, dominasi spesies pohon dari famili Lauraceae dan jenis pionir seperti Mahang (*Macaranga* sp.), serta kondisi ekosistem yang mulai pulih pasca kebakaran, menjadi faktor penting yang menentukan besarnya nilai stok karbon. Pendekatan berbasis NDVI terbukti mampu menggambarkan variasi spasial kerapatan vegetasi dan berkontribusi terhadap peningkatan akurasi estimasi karbon di lapangan.

Secara ilmiah, penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi antara data lapangan dan penginderaan jauh dalam pemantauan stok karbon ekosistem gambut tropis. Metode ini tidak hanya menghasilkan estimasi yang lebih representatif, tetapi juga dapat diterapkan untuk kawasan konservasi lain dengan karakteristik ekosistem serupa.

Dari sisi praktis, hasil penelitian ini mendukung upaya pengelolaan FOLU Net Sink 2030 di Provinsi Sumatera Selatan, khususnya melalui kegiatan rehabilitasi dan konservasi hutan rawa gambut. Identifikasi area dengan potensi serapan karbon tinggi dapat menjadi dasar penetapan zona prioritas restorasi dan perencanaan kegiatan monitoring karbon berkelanjutan.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pengembangan metodologi estimasi stok karbon, tetapi juga mendukung penguatan kebijakan konservasi berbasis data spasial yang berorientasi pada mitigasi perubahan iklim dan keberlanjutan ekosistem hutan rawa gambut.

Tabel 6. Hasil Uji RMSE Stok Karbon dan Tutupan Lahan

Lokus	Lokus Stok Karbon		Tutupan Lahan dan Stok Karbon		Error X	Error Y	RMSE
	X	Y	X'	Y'			
1	511873.60	9693572.46	511968.53	9693440.28	95	-132	-2
1	511140.12	9694186.17	511140.12	9694186.17	0	0	0
1	513927.14	9695325.32	513926.36	9695211.91	-1	-113	-5
2	512628.46	9697049.42	512945.29	9696951.80	317	-98	10
2	511783.14	9697672.59	511783.14	9697672.59	0	0	0
2	511643.92	9697020.40	511643.92	9697020.40	0	0	0
3	527216.59	9676202.50	527182.04	9676153.10	-35	-49	-4
3	526085.68	9676102.60	526085.68	9676102.60	0	0	0
3	526518.36	9676243.03	526518.36	9676243.03	0	0	0
3	526367.97	9676691.53	526353.59	9676318.86	-14	-373	-18
3	525682.62	9676172.16	525681.01	9676121.24	-2	-51	-3
3	525722.16	9676488.86	525722.16	9676488.86	0	0	0
3	526418.14	9676661.41	526418.14	9676661.41	0	0	0
3	526501.38	9676274.14	526504.09	9676670.49	3	396	19
3	526326.71	9676703.90	526326.71	9676703.90	0	0	0
3	526079.95	9676118.44	526397.90	9676716.55	318	598	44
4	516476.72	9669848.55	516512.43	9669810.42	36	-38	0
4	510071.79	9665929.13	510129.81	9665933.12	58	4	3
4	511073.36	9667674.35	511025.59	9667665.12	-48	-9	-3
4	511815.89	9669213.55	511834.01	9669212.69	18	-1	1
4	513138.25	9668429.28	513135.88	9668421.53	-2	-8	0
TOTAL RMSE							41

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Sriwijaya atas dukungan fasilitas penelitian dan pendampingan akademik yang diberikan selama proses penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada National Institute of Forest Science (NIFoS), Korea Selatan, atas kolaborasi dan kontribusi dalam penyediaan data serta penguatan kapasitas penelitian lapangan. Dukungan dari seluruh pihak yang terlibat dalam kegiatan penelitian ini sangat berarti bagi terselesaikannya naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Asiah-Z.A., S., Puna, S., Lestariningsih, W., & Rahman, I. (2024). Perbandingan Jumlah Cadangan Karbon Mangrove Aboveground dan Belowground di Gili Petagan, Sambelia, Lombok Timur. *Journal of Marine Research*. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i2.43504>.
- Curran, P.J. 1985. *Principle of Remote Sensing*. New York: John Wiley & Sons.
- Daryono, H., 2009. Potensi, permasalahan dan kebijakan yang diperlukan dalam pengelolaan hutan dan lahan rawa gambut secara lestari.

- Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*. 6(2), pp 71–101.
- Dharmawan, I.W.S., Saharjo, B.H., Supriyanto, Arifin, H.S., dan Siregar, C.A., 2013. Persamaan Alometrik Dan Cadangan Karbon Vegetasi Pada Hutan Gambut Primer Dan Bekas Terbakar (Allometric Equation And Vegetation Carbon Stock At Primary And Burnt Peat Forest). *Jurnal Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam*. 10 (2), 175-191.
- Farahisah, H., Yulianda, F., & Effendi, H. (2021). Struktur Komunitas, Cadangan Karbon, dan Estimasi Nilai Ekonomi Mangrove di Muara Sungai Musi. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 26, 228-234. <https://doi.org/10.18343/JIPI.26.2.228>.
- Gifari, O.I, Kusriani. Yuana, K.A. 2023. Analisis Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Metode Klasifikasi Terbimbing pada Data Citra Penginderaan Jauh Kota Samarinda-Kalimantan Timur. *Informatika Mulawarman: Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*. 18 (2). DOI : 10.30872/jim.v18i2.5716.
- Holifah, M, Yuningsih L, Lensari D, Harbi J. 2023. A Study of Above-Surface Carbon Storage in the Post-Coal Mining Area of PT Bukit Asam. *Sriwijaya Journal of Environment*, 8(2): 70-75.
- Ibrahim, A., & Muhsoni, F. (2020). Estimasi Stok Karbon Pada Ekosistem Hutan Mangrove di Desa Lembung Paseser, Kecamatan Sepuluh, Kabupaten Bangkalan. 1:498-507. <https://doi.org/10.21107/JUVENIL.V1I4.8947>.
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2012. Strategi Nasional. Pengelolaan Lahan Gambut Berkelanjutan di Indonesia. Deputi Bidang pengendalian Kerusakan Lingkungan dan Perubahan Iklim. 50 halaman
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2022. Rencana operasional Indonesia's FOLU Net Sink 2030 (Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 168/Menlhk/PKTL/PLA.1/2/2022 tanggal 24 Februari 2022. Jakarta, Indonesia: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Kettering, Q. M., R. Coe, M. van Noordwijk, Y. Ambagau. C. A. Palm., 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for pre dicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*. Elsevier.
- Kusumowidagdo, Mulyadi, et al. 2007. *Penginderaan Jauh dan Interpretasi Citra*. Semarang: LAPAN dan UNNES.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 304 pp 1623-1626.
- Lasco, J.K., S. Brown, dan B. Schlamadinger, 1998. Forest harvest and wood products: sources and sinks of atmospheric carbon dioxide. *Forest Science*. 44(2): 272-284.
- Lestariningsih, W., Soenardjo, N., & Pribadi, R. (2018). Estimasi Cadangan Karbon pada Kawasan Mangrove di Desa Timbulsloko, Demak, Jawa Tengah. *Buletin Oseanografi Marina*. <https://doi.org/10.14710/BULOMA.V7I2.19574>.
- Maas, A., 2003. Peluang dan Konsekuensi Pemanfaatan Lahan Rawa Pada Masa Mendatang. Pidato pengukuhan Guru besar pada Fakultas Pertanian UGM Yogyakarta. 19 Juli 2003
- Maftuah, E., dan Nurzakiah, S., 2017. Pemulihan dan Konservasi Lahan Gambut. Dalam: Agroekologi Rawa, Masganti., Maftu'ah, E., Noor, M., Fahmi, A., Alwi, M., Susanti, M.A., Subgio, H., Thamrin, M., Simatupang, R. dan Sosiawan, H. Eds. PT. Raja Grafindo Persada, Depok: pp 470-500.
- Masganti, Anwar, K., dan Susanti, M.A., 2017. Potensi dan Pemanfaatan Lahan Gambut Dangkal untuk Pertanian. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1), pp 43-52.
- Mitsch. W.J dan J.G. Gosselink. 2000. *Wetlands*. Edisi ke-3. John Wiley dan Sons. Inc. New York. pp 920
- Rielely, J.O., Ahmad-shah, A.A. dan Brady, M.A., 1996. The extent and nature of tropical pat swamps. Dalam: E. Maltby, C.P. Immirzi dan R.J. Safford (eds). *Tropical Lowland Peatlands of Southeast Asia. Proceedings of a Workshop on Integrated Planning and Management of Tropical Lowland Peatlands*. IUCN. Gland, Switzerland. pp 17-53
- Sedjo, R. A., dan A. M. Solomon, 1988. *Climate and Forests*. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxemburg, Austria.
- Wetland International Indonesia. 2022. Keanekaragaman Jenis Tumbuhan di Hutan Rawa Gambut. Seri Pengelolaan Hutan dan Lahan Gambut, Silvikultur, vol 1.
- Yuningsih L, Imanda I, Lensari D, Harbi J. 2020. Estimation of Carbon Stock in Sungai Merah Protection Forest, Musi Banyuasin Regency of South Sumatra Province. *Sriwijaya Journal of Environment*, 5 (3): 161-165.