

Estimasi Cadangan Karbon atas Permukaan Kelapa Sawit Sistem *Underplanting* Menggunakan Persamaan Alometrik di Bawah Tegakan Karet

Muhammad Ibnu Mukhlisin Anggraito*, Sutan Tarmizi Lubis

Jurusan Pengelolaan Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta

*Email Korespondensi: itohasian29@gmail.com

Abstrak

Perubahan iklim menjadi salah satu tantangan global yang mendorong peningkatan upaya mitigasi melalui pengelolaan penggunaan lahan yang mampu menyerap dan menyimpan karbon. Perkebunan kelapa sawit memiliki potensi sebagai penyerap karbon melalui akumulasi biomassa tanaman, namun informasi mengenai cadangan karbon pada kelapa sawit yang dibudidayakan dengan sistem *underplanting* di bawah tegakan karet masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengestimasi cadangan karbon atas permukaan tanah (*above-ground carbon*) pada tanaman kelapa sawit fase transisi *underplanting* di bawah tegakan karet produktif pada lahan petani swadaya di Desa Bukit Mulya, Kecamatan Air Rami, Kabupaten Mukomuko, Provinsi Bengkulu. Penelitian dilaksanakan pada lahan perkebunan rakyat dengan pengukuran parameter pertumbuhan berupa tinggi tanaman dan diameter batang kelapa sawit. Data tersebut digunakan untuk mengestimasi biomassa atas permukaan menggunakan persamaan alometrik yang sesuai untuk tanaman kelapa sawit. Nilai biomassa kemudian dikonversi menjadi cadangan karbon menggunakan faktor konversi karbon standar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman kelapa sawit pada sistem *underplanting* memiliki kemampuan menyimpan karbon melalui akumulasi biomassa yang terbentuk selama fase pertumbuhan vegetatif. Kondisi naungan akibat keberadaan tegakan karet berpotensi memengaruhi karakteristik pertumbuhan tanaman sehingga menghasilkan nilai biomassa dan cadangan karbon yang spesifik dibandingkan kondisi pertumbuhan pada lahan terbuka. Penelitian ini menghasilkan data dasar mengenai potensi penyimpanan karbon pada sistem transisi penggunaan lahan perkebunan rakyat yang dapat mendukung pengembangan praktik budidaya berkelanjutan dan implementasi program Indonesia FOLU Net Sink 2030.

Kata Kunci: Cadangan Karbon, Biomassa, Kelapa Sawit, *Underplanting*, Perubahan Iklim

Abstract

Climate change has become one of the most critical global environmental challenges, encouraging the implementation of mitigation strategies through land-use management systems capable of absorbing and storing carbon. Oil palm plantations have the potential to function as carbon sinks through biomass accumulation; however, information regarding carbon stocks in oil palm cultivated under an underplanting system beneath rubber stands remains limited. This study aimed to estimate above-ground carbon stocks of oil palm during the transitional underplanting phase under productive rubber stands on smallholder plantations in Bukit Mulya Village, Air Rami District, Mukomuko Regency, Bengkulu Province, Indonesia. The research was conducted on smallholder plantations by measuring growth parameters, including plant height and stem diameter of oil palm. These variables were used to estimate above-ground biomass using an appropriate allometric equation for oil palm. Biomass values were subsequently converted into carbon stock estimates using a standard carbon conversion factor. The results indicate that oil palm cultivated under the underplanting system has the capacity to store carbon through biomass accumulation during its vegetative growth stage. Shading conditions created by the existing rubber canopy may influence oil palm growth characteristics, resulting in distinct biomass and carbon stock values compared with oil palm grown under open-field conditions. This study provides baseline information on the carbon storage potential of oil palm within a transitional land-use system managed by smallholder farmers. The findings are expected to support the development of sustainable plantation management practices and contribute to the implementation of Indonesia's FOLU Net Sink 2030 program.

Keywords: Carbon Stock, Biomass, Oil Palm, *Underplanting*, Climate Change

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan lingkungan global yang paling serius pada abad ke-21. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) mendefinisikan perubahan iklim sebagai perubahan komposisi atmosfer global yang disebabkan secara langsung maupun tidak langsung oleh aktivitas manusia sehingga memengaruhi variabilitas iklim alami dalam periode waktu tertentu (Nations, 1992). Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK), terutama karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O), menjadi penyebab utama meningkatnya suhu rata-rata bumi. Melalui Glasgow Climate Pact pada COP26, negara-negara anggota didorong untuk memperkuat komitmen *Nationally Determined Contribution* (NDC) guna menekan emisi dan meningkatkan upaya mitigasi perubahan iklim sebelum tahun 2030 (U. N. F. C. on C. Change, 2021).

Strategi mitigasi perubahan iklim diarahkan untuk menekan emisi gas rumah kaca sekaligus meningkatkan kemampuan ekosistem dalam menyerap karbon atmosfer. Sektor Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) memiliki peranan penting karena dapat berfungsi sebagai sumber emisi maupun penyerap karbon (Change, 2019). Dalam konteks Indonesia, sektor *Forestry and Other Land Use* (FOLU) menjadi komponen utama pencapaian target Indonesia FOLU Net Sink 2030 yang menargetkan tingkat serapan karbon lebih tinggi dibandingkan emisi yang dihasilkan dari sektor kehutanan dan penggunaan lahan (KLHK, 2022). Oleh karena itu, inventarisasi cadangan karbon pada berbagai sistem penggunaan lahan menjadi kebutuhan penting dalam mendukung kebijakan mitigasi perubahan iklim berbasis data ilmiah.

Perkebunan kelapa sawit merupakan salah satu sistem penggunaan lahan yang memiliki posisi strategis di Indonesia. Selain berkontribusi terhadap perekonomian nasional, perkebunan sawit juga berperan dalam siklus karbon melalui proses fotosintesis dan akumulasi biomassa tanaman. Kapasitas penyimpanan karbon pada perkebunan sawit dipengaruhi oleh umur tanaman, kondisi lingkungan tumbuh, kepadatan populasi, serta sistem pengelolaan yang diterapkan (Artika *et al.*, 2023). Oleh karena itu, kajian mengenai cadangan karbon pada tanaman kelapa sawit tidak hanya penting dari aspek produksi, tetapi juga dari aspek ekologis sebagai bagian dari upaya mitigasi perubahan iklim.

Pada tingkat petani swadaya, dinamika penggunaan lahan menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan perkebunan perusahaan. Di Kabupaten Mukomuko, Provinsi Bengkulu, perubahan struktur komoditas perkebunan rakyat sedang

berlangsung akibat menurunnya daya saing ekonomi tanaman karet. Penurunan harga karet dalam jangka panjang serta meningkatnya prospek ekonomi kelapa sawit mendorong petani melakukan transisi komoditas dari karet menuju sawit. Namun, keterbatasan modal menyebabkan sebagian besar petani tidak melakukan konversi melalui metode tebang habis (*clear cutting*), melainkan menggunakan teknik *underplanting*, yaitu menanam bibit kelapa sawit di sela-sela tegakan karet yang masih produktif. Strategi ini memungkinkan petani tetap memperoleh pendapatan dari hasil sadapan karet selama tanaman kelapa sawit berada pada fase Tanaman Belum Menghasilkan (TBM).

Fenomena *underplanting* tersebut menghasilkan kondisi pertumbuhan yang berbeda dibandingkan kelapa sawit yang ditanam pada lahan terbuka. Keberadaan tegakan karet menciptakan lingkungan ternaungi yang dapat memengaruhi intensitas cahaya, suhu, kelembapan, serta persaingan penggunaan sumber daya di dalam lahan. Perubahan kondisi mikroklimat tersebut berpotensi memengaruhi pertumbuhan morfologi tanaman kelapa sawit, terutama tinggi tanaman dan diameter batang. Menurut Taiz *et al.* (2018), keterbatasan cahaya pada tanaman dapat memicu respons adaptif berupa peningkatan pertumbuhan vertikal untuk memperoleh akses cahaya yang lebih besar. Karena estimasi biomassa dan cadangan karbon kelapa sawit sangat bergantung pada parameter tinggi dan diameter batang, kondisi pertumbuhan di bawah naungan tegakan karet diperkirakan menghasilkan karakteristik cadangan karbon yang berbeda dibandingkan tanaman sawit pada kondisi tanpa naungan.

Sejumlah penelitian telah melaporkan potensi penyimpanan karbon pada perkebunan kelapa sawit dan sistem agroforestri. Rosaprana *et al.* (2023) menunjukkan bahwa sistem agroforestri berbasis kelapa sawit memiliki potensi cadangan karbon yang relatif tinggi dibandingkan sistem monokultur. Penelitian lain umumnya berfokus pada kebun sawit dewasa yang tumbuh pada lahan terbuka atau sistem agroforestri yang telah berkembang dalam jangka panjang. Namun demikian, informasi mengenai cadangan karbon yang secara spesifik dikontribusikan oleh tanaman kelapa sawit pada fase transisi *underplanting* di bawah tegakan karet masih sangat terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian *research gap*, khususnya terkait estimasi cadangan karbon tanaman kelapa sawit yang tumbuh pada lingkungan ternaungi di tingkat perkebunan rakyat.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan karbon atas permukaan tanah *above-ground carbon* pada tanaman kelapa sawit

fase transisi *underplanting* yang dibudidayakan di bawah tegakan karet produktif pada lahan petani swadaya di Desa Bukit Mulya, Kecamatan Air Rami, Kabupaten Mukomuko, Provinsi Bengkulu. Hasil penelitian diharapkan dapat menyediakan data dasar mengenai kontribusi ekologis tanaman kelapa sawit dalam menyimpan karbon pada sistem transisi penggunaan lahan perkebunan rakyat serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui implementasi program Indonesia FOLU Net Sink 2030.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan survei lapangan yang bertujuan mengestimasi cadangan karbon atas permukaan tanah pada tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) fase transisi *underplanting* di bawah tegakan karet produktif. Penelitian dilaksanakan pada perkebunan rakyat milik petani swadaya di Desa Bukit Mulya, Kecamatan Air Rami, Kabupaten Mukomuko, Provinsi Bengkulu pada tahun 2025. Objek penelitian berupa tanaman kelapa sawit dengan umur rata-rata Tanaman Menghasilkan (TM) 4 yang ditanam menggunakan sistem *underplanting* di bawah tegakan karet. Pengambilan sampel dilakukan secara purposive pada areal yang mewakili kondisi pertanaman di lokasi penelitian, dengan jumlah sampel sebanyak 112 pokok tanaman kelapa sawit yang tersebar pada petak pengamatan yang telah ditetapkan. Alat yang digunakan meliputi pita ukur untuk mengukur diameter batang, hagameter atau tongkat ukur untuk mengukur tinggi tanaman, kamera untuk dokumentasi, serta perangkat lunak pengolah data. Data primer yang dikumpulkan berupa diameter batang dan tinggi tanaman kelapa sawit, sedangkan data sekunder diperoleh dari literatur, laporan instansi terkait, dan referensi ilmiah yang mendukung penelitian.



Gambar 1 Tegakan kelapa sawit fase *underplanting* di bawah naungan tegakan karet produktif di lokasi penelitian (kiri), dan Gambar 2 kondisi batang tanaman kelapa sawit yang tumbuh berdampingan dengan batang tegakan karet pada petak pengamatan (kanan)

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2025.

Estimasi biomassa dilakukan menggunakan metode non-destruktif melalui pengukuran parameter morfologi tanaman tanpa melakukan penebangan. Nilai biomassa atas permukaan dihitung menggunakan persamaan Alometrik Biomassa Kelapa Sawit yang dikembangkan oleh Khalid *et al.* (1999) dalam Rosaprana *et al.*, (2023), yang menghubungkan diameter batang dengan biomassa atas permukaan tanaman kelapa sawit. Persamaan tersebut diformulasikan sebagai berikut:

$$W = 0,003D^2 \cdot 761$$

dimana W merupakan biomassa atas permukaan (*above-ground biomass*) dalam kilogram dan D merupakan diameter batang dalam sentimeter. Persamaan alometrik ini dipilih karena telah divalidasi untuk kondisi perkebunan kelapa sawit di kawasan tropis dan secara luas digunakan dalam studi estimasi biomassa kelapa sawit di Indonesia. Selanjutnya, nilai biomassa yang diperoleh dikonversi menjadi cadangan karbon menggunakan Persamaan Konversi Karbon IPCC sesuai panduan 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006), sebagai berikut:

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

dimana Cb merupakan cadangan karbon (kg C) dan B merupakan biomassa atas permukaan (kg). Faktor konversi sebesar 0,47 digunakan berdasarkan asumsi bahwa kandungan karbon rata-rata dalam biomassa kering tanaman adalah 47%, sebagaimana ditetapkan dalam panduan (IPCC, 2006) dan telah menjadi acuan standar dalam berbagai inventarisasi karbon berbasis lahan di Indonesia. Data hasil pengukuran selanjutnya dianalisis secara deskriptif menggunakan perangkat lunak SPSS dengan menghitung nilai rata-rata, nilai minimum, nilai maksimum, dan standar deviasi untuk menggambarkan karakteristik pertumbuhan tanaman, biomassa, dan cadangan karbon pada lokasi penelitian. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan uraian deskriptif untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi penyimpanan karbon pada kelapa sawit fase transisi *underplanting* di bawah tegakan karet.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran terhadap 112 individu tanaman kelapa sawit pada sistem *underplanting* di bawah tegakan karet menghasilkan gambaran karakteristik pertumbuhan yang bervariasi. Data statistik deskriptif yang mencakup tinggi tanaman, diameter batang, biomassa, dan cadangan karbon disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Tinggi Tanaman, Diameter Batang, Biomassa, dan Karbon (N = 112)

Variabel	Nilai	Standar	Status
Tinggi Tanaman (m)	1,46 ± 0,40	1,5–3,0	Mendekati standar
Diameter Batang (cm)	74,64 ± 11,33	60–90	Sesuai standar
Biomassa (kg)	469,78 ± 199,46	300–800	Sesuai standar
Karbon (kg)	220,79 ± 93,75	140–376	Sesuai standar

Sumber: Hasil analisis data menggunakan SPSS, 2026.

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata tinggi tanaman yang terukur adalah $1,46 \pm 0,40$ m, sedangkan rata-rata diameter batang mencapai $74,64 \pm 11,33$ cm. Nilai standar deviasi yang relatif besar pada kedua parameter tersebut mengindikasikan adanya keragaman kondisi pertumbuhan antar individu tanaman di lokasi penelitian, yang kemungkinan dipengaruhi oleh variasi intensitas naungan, jarak tanam karet, dan kondisi kesuburan tanah pada masing-masing titik pengukuran.

Tinggi Tanaman

Rata-rata tinggi tanaman kelapa sawit pada sistem underplanting yang terukur sebesar 1,46 m berada sedikit di bawah batas bawah kisaran standar pertumbuhan kelapa sawit fase Tanaman Menghasilkan (TM) 4, yaitu 1,5–3,0 m, sehingga dikategorikan mendekati standar. Demi memahami kondisi ini secara lebih kontekstual, perlu dilakukan perbandingan dengan standar pertumbuhan yang ditetapkan oleh produsen benih. PT Socfin Indonesia (Socfindo) menetapkan bahwa laju pertumbuhan vertikal batang varietas DxP unggulannya, termasuk DxP Unggul Lame dan DxP MT Gano, berada pada kisaran 40–50 cm per tahun sebagai salah satu keunggulan karakteristik varietas tersebut (Socfindo, 2012 dalam Selvina & Harahap, 2023). Dengan mengacu pada standar tersebut, tanaman kelapa sawit pada TM 4 yang melalui fase pembibitan dan satu tahun pertama tanpa penambahan tinggi batang yang signifikan seharusnya memiliki kisaran tinggi sekitar 1,5–2,0 m. Nilai rata-rata 1,46 m yang diperoleh dalam penelitian ini berada sedikit di bawah batas bawah kisaran tersebut, menunjukkan bahwa kondisi underplanting di bawah tegakan karet menyebabkan pertumbuhan tinggi tanaman tidak mencapai standar optimal varietas Socfindo secara penuh. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun pertumbuhan tinggi tanaman belum sepenuhnya mencapai kisaran optimal, pertumbuhannya masih berada dalam trajektori yang wajar untuk tanaman pada fase tersebut. Secara fisiologis, respons tanaman terhadap kondisi teraungi dapat bersifat dua arah. Taiz et al., (2018) menjelaskan bahwa keterbatasan cahaya dapat memicu respons adaptif berupa peningkatan pertumbuhan vertikal (*shade avoidance response*) sebagai upaya tanaman untuk

mengakses cahaya yang lebih besar. Namun demikian, jika intensitas naungan melampaui batas toleransi tanaman, laju fotosintesis akan terhambat sehingga pasokan fotosintat untuk pertumbuhan batang menjadi terbatas. Kondisi inilah yang diduga menjadi penyebab rata-rata tinggi tanaman pada penelitian ini belum sepenuhnya mencapai batas bawah standar yang ditetapkan. Fenomena ini juga menjelaskan mengapa sebagian individu tanaman dalam penelitian ini menunjukkan nilai tinggi yang lebih rendah dari rata-rata varietas pada kondisi terbuka, sejalan dengan karakteristik etiolasi parsial akibat naungan tegakan karet.

Diameter Batang

Berbeda dengan parameter tinggi tanaman, rata-rata diameter batang yang terukur sebesar $74,64 \pm 11,33$ cm tergolong sesuai standar karena berada dalam kisaran 60–90 cm yang ditetapkan untuk kelapa sawit TM 4. Perbandingan dengan standar varietas Socfindo juga memberikan perspektif yang relevan pada parameter ini. Batang kelapa sawit memiliki diameter berkisar antara 20 hingga 75 cm dan kekuatan strukturalnya bergantung pada kepadatan berkas vaskular dalam jaringan parenkim karena batang ini tidak mengalami penebalan sekunder (Socfindo, 2012 dalam Selvina & Harahap, 2023). Nilai rata-rata diameter batang sebesar 74,64 cm yang mendekati batas atas kisaran tersebut mengindikasikan bahwa akumulasi jaringan vaskular pada tanaman dalam kondisi underplanting berlangsung secara memadai. Diameter batang merupakan parameter yang secara langsung mencerminkan akumulasi biomassa struktural tanaman dan berhubungan erat dengan kapasitas simpan karbon. Nilai diameter batang yang memenuhi standar pada kondisi underplanting mengindikasikan bahwa meskipun terdapat hambatan cahaya dari tegakan karet di atasnya, tanaman kelapa sawit mampu mengalokasikan asimilat secara efisien untuk pertumbuhan lateral batang. Hal ini selaras dengan mekanisme pertumbuhan kelapa sawit yang bersifat monokotiledonal, di mana diameter batang terbentuk secara definitif pada tahap awal dan tidak mengalami pertumbuhan sekunder seperti pada tanaman dikotil (Artika et al., 2023). Pola ini konsisten dengan karakteristik genetik varietas Socfindo yang memiliki laju pertumbuhan vertikal lambat namun tetap membangun struktur batang yang kokoh. Keragaman nilai diameter batang yang cukup tinggi, sebagaimana ditunjukkan oleh standar deviasi sebesar 11,33 cm, juga mencerminkan heterogenitas kondisi mikroklimat dan persaingan sumber daya antar individu tanaman di bawah tegakan karet yang berbeda kerapatannya.

Biomassa Atas Permukaan

Estimasi biomassa atas permukaan tanah (above-ground biomass) yang dihitung menggunakan persamaan alometrik $W = 0,003D^{2,761}$ menghasilkan rata-rata sebesar 469,78 $\pm$ 199,46 kg per tanaman. Nilai tersebut berada dalam kisaran standar biomassa kelapa sawit TM 4, yaitu 300–800 kg, sehingga dikategorikan sesuai standar. Besarnya variasi biomassa antartanaman yang ditunjukkan oleh standar deviasi yang cukup tinggi sebesar 199,46 kg mencerminkan pengaruh keragaman diameter batang sebagai variabel prediktor utama dalam persamaan alometrik yang digunakan. Mengingat hubungan antara diameter batang dan biomassa bersifat eksponensial dalam persamaan alometrik, perbedaan diameter yang relatif kecil antar individu tanaman dapat menghasilkan selisih biomassa yang cukup besar. Nilai rata-rata biomassa yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kelapa sawit pada sistem underplanting telah mengakumulasi biomassa secara memadai meskipun tumbuh dalam kondisi ternaungi. Kondisi ini relevan dengan karakteristik varietas Socfindo yang memiliki laju pertumbuhan meninggi yang lambat namun tetap efisien dalam membangun biomassa struktural batang (Socfindo, 2012 dalam Selvina & Harahap, 2023), sehingga potensi akumulasi biomassa pada kondisi suboptimal sekalipun tetap dapat terwujud. Rosaprana et al.,(2023) melaporkan bahwa sistem perkebunan berbasis kelapa sawit, termasuk sistem agroforestri, memiliki potensi akumulasi biomassa yang kompetitif dibandingkan sistem penggunaan lahan lainnya, terutama apabila pertumbuhan tanaman berlangsung secara optimal. Temuan penelitian ini memperkuat argumen tersebut dengan menunjukkan bahwa bahkan pada kondisi pertumbuhan yang tidak sepenuhnya optimal, seperti pada sistem underplanting di bawah tegakan karet, tanaman kelapa sawit tetap mampu membangun biomassa dalam kisaran yang bermakna secara ekologis.

Cadangan Karbon Atas Permukaan

Cadangan karbon atas permukaan yang dihitung menggunakan konversi $C_b = B \times 0,47$ menghasilkan rata-rata sebesar 220,79 $\pm$ 93,75 kg C per tanaman, yang berada dalam kisaran standar 140–376 kg C dan dikategorikan sesuai standar. Nilai cadangan karbon ini secara langsung merupakan fungsi dari nilai biomassa, sehingga pola keragamannya mengikuti distribusi yang serupa. Faktor konversi 0,47 yang digunakan mengacu pada panduan IPCC (2006) yang menyatakan bahwa rata-rata kandungan karbon dalam biomassa kering tanaman adalah sekitar 47%, dan telah umum diterapkan dalam berbagai studi inventarisasi karbon di tingkat lahan. Nilai rata-rata cadangan karbon sebesar 220,79

kg C per tanaman mengindikasikan bahwa tanaman kelapa sawit pada sistem *underplanting* memberikan kontribusi nyata terhadap penyimpanan karbon meskipun berada pada fase pertumbuhan vegetatif dan dalam kondisi ternaungi. Mengingat kepadatan tanam yang direkomendasikan untuk varietas Socfindo adalah 143 pohon per hektar (Socfindo, 2012 dalam Selvina & Harahap, 2023), proyeksi cadangan karbon per hektar dari hasil penelitian ini dapat diperkirakan mencapai sekitar 31,57 ton C/ha, yang merupakan kontribusi yang signifikan dalam neraca karbon penggunaan lahan perkebunan rakyat. Hasil ini mendukung relevansi sistem *underplanting* sebagai strategi transisi penggunaan lahan yang tidak hanya menguntungkan secara ekonomi bagi petani swadaya, tetapi juga memberikan manfaat ekologis melalui penyimpanan karbon yang dapat berkontribusi pada pencapaian target Indonesia FOLU Net Sink 2030 ((KLHK, 2022).

KESIMPULAN DAN SARAN

Tanaman kelapa sawit pada sistem *underplanting* di bawah tegakan karet produktif di Desa Bukit Mulya, Kecamatan Air Rami, Kabupaten Mukomuko, Provinsi Bengkulu terbukti memiliki kemampuan menyimpan karbon atas permukaan tanah yang bermakna secara ekologis meskipun tumbuh dalam kondisi ternaungi dan berada pada fase transisi pertumbuhan vegetatif. Diameter batang yang berkembang sesuai standar menjadi fondasi bagi terbentuknya biomassa dan cadangan karbon dalam kisaran yang memadai, sementara pertumbuhan tinggi tanaman yang mendekati standar mencerminkan adanya pengaruh naungan tegakan karet terhadap dinamika pertumbuhan morfologi tanaman. Dengan demikian, sistem *underplanting* tidak hanya relevan sebagai strategi adaptasi ekonomi petani swadaya dalam menghadapi tekanan penurunan harga karet, tetapi juga memberikan kontribusi ekologis nyata melalui akumulasi cadangan karbon yang dapat diperhitungkan dalam inventarisasi karbon perkebunan rakyat. Temuan ini sekaligus menegaskan bahwa sistem transisi penggunaan lahan berbasis *underplanting* berpotensi mendukung implementasi program Indonesia FOLU Net Sink 2030 apabila dikelola secara berkelanjutan. Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar penelitian lanjutan dilakukan dengan memperluas cakupan lokasi penelitian dan mempertimbangkan variasi umur tanaman serta tingkat kerapatan tegakan karet guna memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi cadangan karbon pada sistem *underplanting*. Selain itu, pengembangan model estimasi biomassa yang secara spesifik dikalibrasi untuk kondisi kelapa sawit ternaungi perlu dilakukan agar akurasi pendugaan cadangan karbon pada sistem ini dapat ditingkatkan. Pada tataran praktis, pemerintah daerah dan pemangku

kepentingan sektor perkebunan rakyat disarankan untuk mempertimbangkan sistem *underplanting* sebagai salah satu pendekatan budidaya yang dapat diintegrasikan ke dalam skema insentif karbon berbasis lahan bagi petani swadaya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sutan Tarmizi Lubis, S.P., M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, saran, serta motivasi dengan penuh kesabaran sejak tahap perencanaan, pelaksanaan penelitian, hingga penyelesaian penulisan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada petani swadaya di Desa Bukit Mulya, Kecamatan Air Rami, Kabupaten Mukomuko, Provinsi Bengkulu yang telah memberikan izin dan bantuan selama proses pengambilan data di lapangan, serta kepada seluruh pihak yang telah membantu kelancaran pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Artika, T. J., Salmayenti, R., Sugiarto, Y., Handoko, Stiegler, C., & Knohl, A. (2023). Estimation of oil palm total carbon fluxes using remote sensing. *Agromet*, 37(1), 12–20. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.37.1.12-20>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. IPCC.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2021). *The Glasgow climate pact: Key outcomes from COP26*. UNFCCC Secretariat. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2022). *Operational plan Indonesia's FOLU net sink 2030*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Rosaprana, W., Kuncahyo, B., & Puspaningsih, N. (2023). Carbon stock estimation on oil palm plantations and oil palm-based agroforestry in Gunung Mas Regency. *Media Konservasi*, 28(3), 253–261. <https://doi.org/10.29244/medkon.28.3.253>
- Selvina, I., & Harahap, F. S. (2023). Identifikasi beberapa varietas kelapa sawit di PT ASN Kebun Batee Puteh. *Biofarm: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 19(2), 221–228. <https://doi.org/10.29244/biofarm.19.2.221-228>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2018). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2021). *The Glasgow climate pact: Key outcomes from COP26*. UNFCCC Secretariat. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>

United Nations. (1992). *United Nations framework convention on climate change*. United Nations. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>