

Quantification of Total Biomass and Carbon Stock in Oil Palm Plantations Based on Compartments: Main Stand and Understory Vegetation

Khoirul Ummah Al-faruq¹, Betti Yuniasih^{1*}, Amir Noviyanto¹

¹Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, INSTIPER, Yogyakarta, Indonesia;

Article History

Received : February 09th, 2026

Revised : April 30th, 2026

Accepted : May 12th, 2026

*Corresponding Author:

Betti Yuniasih, Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, INSTIPER, Yogyakarta, Indonesia; Email: betti@instiperjogja.ac.id

Abstract: Oil palm plantations play a role in carbon storage; however, field-based information on biomass and carbon stock distribution among vegetation compartments remains limited. This study aimed to estimate biomass and carbon stocks of oil palm plantations based on main stand components and understory vegetation across immature (TBM), prime mature (TM Prime), and old mature (TM Old) growth phases. Field measurements were conducted in Central Kalimantan using plot sampling with a planting density of approximately 143 trees ha⁻¹. Main stand biomass was estimated non-destructively using compartment-based allometric equations, while understory biomass was measured destructively. The results showed an increase in biomass from approximately 94 kg tree⁻¹ at the TBM stage to 486–517 kg tree⁻¹ at the TM Prime stage and 495–582 kg tree⁻¹ at the TM Old stage, following a sigmoid growth pattern. Carbon stock was predominantly contributed by the oil palm main stand (5290.59 t C ha⁻¹), whereas understory vegetation contributed only a minor proportion (0.247 t C ha⁻¹). These findings provide transparent empirical data to support greenhouse gas accounting *within the Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) framework*.

Keywords: Biomass; Carbon; Oil palm; Understory vegetation.

Pendahuluan

Vegetasi memiliki peran fundamental dalam menjaga keseimbangan karbon global melalui penyerapan karbon dioksida dari atmosfer dan menyimpannya dalam bentuk biomassa Keenan et al. (2023). Proses fotosintesis menjadikan tumbuhan sebagai komponen biologis utama dalam siklus karbon, karena karbon yang diserap akan terakumulasi pada jaringan tanaman seperti batang, pelepah, daun, akar, serta komponen vegetatif lainnya Sukarman et al. (2020). Potensi simpanan karbon pada vegetasi menjadi salah satu indikator penting dalam menilai fungsi ekologis suatu ekosistem, terutama dalam mitigasi perubahan iklim (Zomer et al., 2016a).

Perkebunan kelapa sawit merupakan salah satu sistem penggunaan lahan tropis yang memiliki posisi kompleks dalam diskursus perubahan iklim Xu et al. (2022). Berdasarkan Fahamsyah (2018) kelapa sawit sering

dikaitkan dengan peningkatan emisi gas rumah kaca, terutama akibat perubahan penggunaan lahan, pembukaan lahan, dan praktik budidaya yang kurang berkelanjutan Lewis et al. (2020). Perspektif tersebut perlu dikaji secara ilmiah yang menjelaskan kapasitas perkebunan kelapa sawit dalam menyimpan karbon melalui akumulasi biomassa vegetasi Murphy (2024). Tegakan kelapa sawit sebagai tanaman tahunan memiliki struktur biomassa yang berkembang seiring bertambahnya umur tanaman, mulai dari fase tanaman belum menghasilkan hingga tanaman menghasilkan. Biomassa yang terbentuk pada batang, pelepah, akar, dan komponen generatif menunjukkan bahwa perkebunan kelapa sawit memiliki cadangan karbon vegetatif yang perlu dihitung secara terukur dan berbasis data lapangan (Erina, 2024).

Masih terbatasnya informasi empiris yang menggambarkan distribusi biomassa secara rinci antar kompartemen vegetasi

Anggraini & Arifin (2021). Banyak estimasi karbon pada perkebunan kelapa sawit masih disajikan secara agregat, sehingga kontribusi masing-masing komponen seperti tegakan utama dan vegetasi bawah belum tergambarkan secara proporsional Henson (2017). Kondisi tersebut menyebabkan pemahaman terhadap peran ekologis perkebunan kelapa sawit sebagai penyimpan karbon menjadi kurang komprehensif (Fatonah *et al.*, 2025).

Pendekatan kuantifikasi biomassa dan stok karbon yang dilakukan berdasarkan pemisahan kompartemen vegetasi, yaitu tegakan utama kelapa sawit dan vegetasi bawah Luke *et al.* (2019). Pemisahan ini memberikan ruang analisis yang lebih spesifik untuk mengetahui besarnya kontribusi masing-masing kompartemen terhadap total stok karbon perkebunan. Pendekatan berbasis kompartemen menjadi penting karena dapat menghasilkan estimasi karbon yang lebih detail, transparan, dan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan Yahya *et al.* (2022). Penelitian ini bertujuan untuk mengkuantifikasi total biomassa dan stok karbon pada perkebunan kelapa sawit berdasarkan kompartemen tegakan utama dan vegetasi bawah Keenan *et al.* (2023). Penyediaan data tersebut dapat memperkuat penilaian peran perkebunan kelapa sawit dalam penyimpanan karbon, mendukung perhitungan emisi dan serapan karbon, serta menjadi dasar bagi pengelolaan perkebunan yang lebih berkelanjutan dan akuntabel.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat Penelitian

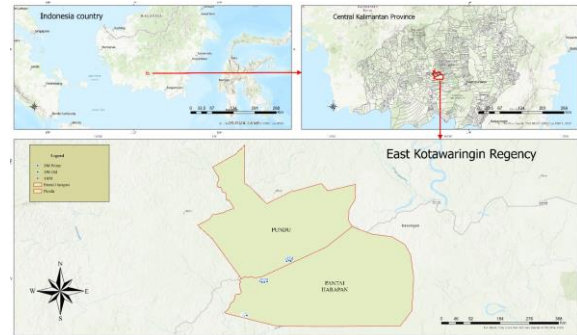
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan April hingga Mei 2025 di areal perkebunan kelapa sawit PT. XYZ yang berlokasi di Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah.

Desain Penelitian

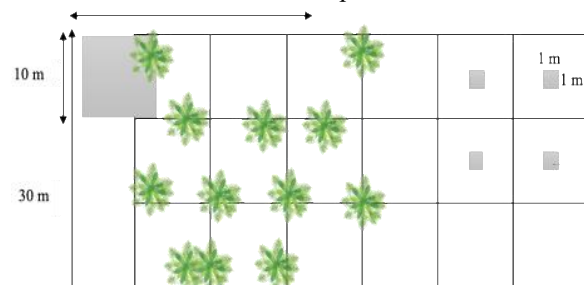
Deskripsi sempel penelitian

Lokasi penelitian dipilih salah satunya karena memiliki areal tanaman kelapa sawit dengan fase pertumbuhan yang berbeda, yaitu tanaman belum menghasilkan (TBM) ±2 tahun, tanaman menghasilkan fase muda (TM Prime)

13-18 tahun, dan tanaman menghasilkan tua (TM Old) 25-27 tahun.



Gambar 1. Lokasi penelitian



Gambar 2. Ilustrasi plot sempel biomassa

Pengambilan sampel dilakukan menggunakan random sampling dengan metode plot, sehingga setiap unit pengamatan pada masing-masing fase pertumbuhan memiliki peluang yang sama untuk terpilih sebagai sampel.

a) Jumlah sempel

Sampel diambil menggunakan metode plot 25x25 meter (kerapatan ±143 pohon ha⁻¹; 9 m × 7,8 m). Jumlah sampel penelitian terdiri atas 9 blok/ 60 plot dengan 536 sampel tegakan kelapa sawit yang mewakili tiga fase pertumbuhan tanaman, yaitu TBM, TM Muda, dan TM Tua.

b) Teknik sampling

Teknik pengambilan sampel dalam penelitian ini menggunakan random sampling dengan metode plot.

c) Variabel penelitian

Variabel penelitian meliputi biomassa tegakan utama kelapa sawit, biomassa vegetasi bawah, biomassa total, dan stok karbon pada setiap fase umur tanaman.

d) Pengambilan data, alat dan bahan

Biomassa tegakan utama diestimasi secara non-destruktif menggunakan persamaan alometrik berdasarkan parameter morfologi tanaman, yaitu tinggi batang, lingkaran batang, diameter batang, jumlah pelepah aktif, ukuran pelepah ke-17, serta komponen generatif berupa jumlah bunga betina, jumlah tandan buah, dan berat janjang rata-rata pada tanaman menghasilkan. Biomassa vegetasi bawah diukur secara destruktif menggunakan kuadran 1 m × 1 m untuk memperoleh berat basah dan berat kering vegetasi bawah. Pengambilan data dilakukan melalui pengukuran langsung di lapangan pada tegakan kelapa sawit dan vegetasi bawah yang terdapat di dalam plot pengamatan. Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi GPS, pita ukur, meteran, kuadran 1 m × 1 m, timbangan digital, jangka sorong, parang atau gunting tanaman, kantong sampel, oven pengering, kamera, dan alat tulis. Bahan yang digunakan berupa tegakan kelapa sawit pada beberapa fase umur, vegetasi bawah, sampel biomassa hasil pengambilan lapangan, serta perangkat lunak (Avenza Maps).

Prosedur penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui tiga tahap, yaitu pra-lapangan, lapangan, dan pasca-lapangan. Tahap pra-lapangan meliputi penentuan blok pengamatan berdasarkan fase umur tanaman kelapa sawit, yaitu TBM, TM Muda, dan TM Tua, serta penetapan titik sampel secara acak pada setiap blok. Tahap lapangan dilakukan dengan pengukuran biomassa tegakan utama secara non-destruktif. Pada tahap yang sama, biomassa vegetasi bawah diambil secara destruktif, kemudian sampel ditimbang untuk memperoleh berat basah. Tahap pasca-lapangan meliputi pengeringan sub-sampel vegetasi bawah menggunakan oven hingga berat konstan, perhitungan biomassa setiap kompartemen, konversi biomassa menjadi stok karbon, serta penyajian hasil berdasarkan fase umur tanaman dan kompartemen vegetasi.

Analisis data

Biomassa vegetasi bawah diukur destruktif menggunakan kuadran 1 m × 1 m (Asari et al., 2017).

$$B_v = \frac{BK \text{ sampel } (g)}{BB \text{ sampel } (g)} \times \text{total } BB (g)$$

Biomassa vegetasi bawah dihitung dengan mengalikan berat kering hasil kuadran 1 × 1 m dengan luas area kebun yang tertutup vegetasi bawah setelah dikurangi piringan dan jalan panen (Yahya et al. 2022).

$$T_B = \pi (r_1 z)^2 h 100 \rho$$
$$\rho = (\times (0,0076) + 0,086) / 1000$$

Lingkar batang diukur pada ketinggian 1,3 m untuk memperoleh jari-jari batang ($r = a/2\pi$), dikoreksi dengan faktor tanpa pelepah ($z = 0,78$), dan dikalikan tinggi batang hingga dasar pelepah (h) untuk menghitung volume batang $\pi(r \times z)^2 h$, yang selanjutnya dikalikan berat jenis batang (ρ) berdasarkan umur tanaman untuk memperoleh biomassa kering batang (Beyer & Rademacher, 2021)

$$F_B = (0,102 l d) + 0,21$$

Biomassa pelepah dihitung dari lebar (l) dan tebal (d) petiola pelepah ke-17 menggunakan rumus di atas, yang menghasilkan biomassa kering per pelepah. Biomassa pelepah per pokok diperoleh dengan mengalikan nilai F_B dengan jumlah pelepah aktif (Corley & Tinker, 2015).

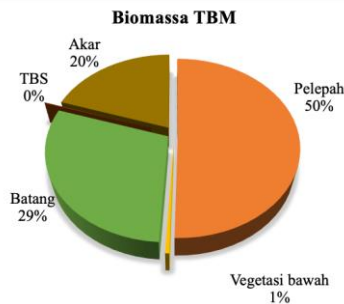
Total biomassa di atas permukaan tanah (AGB) dihitung sebagai penjumlahan biomassa batang dan pelepah ($AGB = T_B + F_B$) Fatonah et al. (2025). Pada fase tanaman menghasilkan, biomassa tandan per pokok dihitung menggunakan rumus $BKT = 0,53 \times BJR \times$ (jumlah bunga betina + jumlah tandan buah), sedangkan biomassa akar diasumsikan sebesar $\frac{1}{4}$ dari total biomassa batang, pelepah, dan tandan. Biomassa kering total per pokok diperoleh dari penjumlahan seluruh komponen biomassa, dan nilai tersebut digunakan untuk menghitung stok karbon kelapa sawit per hektar berdasarkan kepadatan tanaman (SPH) (Lewis et al., 2020b).

$$\text{Karbon stok} = (\text{Berat kering total} \times 0,0976 + 0,0708) \times \text{SPH}$$

Stok karbon dihitung dari biomassa kering dengan fraksi karbon 0,47 dan dinyatakan sebagai ton C ha⁻¹ untuk analisis deskriptif per kompartemen dan fase umur (Fatonah et al., 2025).

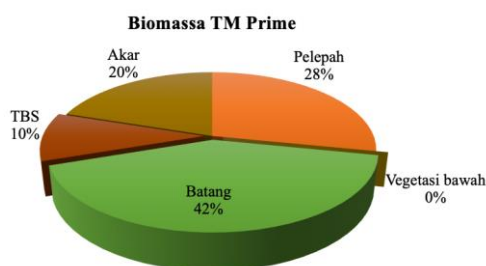
Hasil dan Pembahasan

Akumulasi biomassa perkebunan kelapa sawit terjadi sejalan dengan perkembangan struktur morfologi, terutama pertumbuhan batang, pelepah, akar, dan komponen tajuk yang meningkat dalam ukuran dan kompleksitasnya sejalan dengan bertambahnya umur pokok kelapa sawit (Hambali & Rivai, 2017).



Gambar 3. Kompartemen biomassa fase TBM

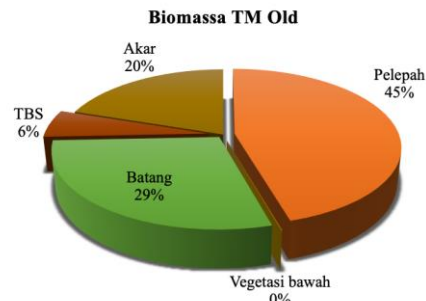
Pada fase TBM (± 2 tahun), biomassa total kelapa sawit masih rendah dengan rata-rata sekitar 94 kg pokok⁻¹, yang didominasi oleh pelepah dan akar, sementara biomassa batang masih terbatas dan biomassa tandan buah segar (TBS = 0) akibat perlakuan kastrasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa alokasi biomassa pada fase awal pertumbuhan difokuskan pada pembentukan struktur vegetatif pokok kelapa sawit sebagai sistem penopang, sehingga total biomassa per pokok masih relatif rendah (Murphy, 2024a).



Gambar 4. Kompartemen biomassa fase TM Muda

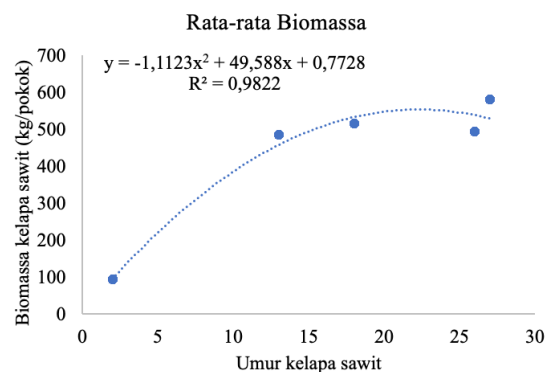
Pada fase TM Muda (13–18 tahun), biomassa meningkat sangat tajam dengan kisaran 486–517 kg pokok⁻¹. Peningkatan ini terutama disumbang oleh batang sebagai kompartemen biomassa terbesar, diikuti oleh pelepah, akar, dan TBS. Fase ini merepresentasikan kondisi pertumbuhan optimum kelapa sawit, di mana akumulasi biomassa struktural dan generatif

berlangsung maksimal dan menekan vegetasi bawah (Anggraini & Arifin, 2021).



Gambar 5. Kompartemen biomassa fase TM Tua

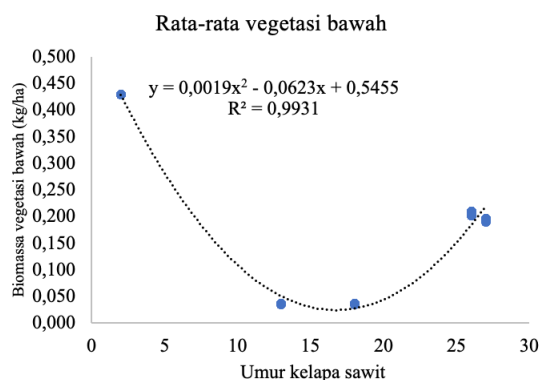
Pada fase TM Tua (25–27 tahun), biomassa total tetap tinggi dengan kisaran 495–582 kg pokok⁻¹, namun peningkatannya relatif lebih lambat dibandingkan fase TM Muda. Pada fase ini, kontribusi pelepah relatif meningkat, sedangkan biomassa TBS cenderung menurun, yang mengindikasikan penurunan efisiensi generatif, hal ini menunjukkan akumulasi biomassa sudah mencapai titik maksimum, hasil reaksi kimia atau hasil proses fotosintesis pada tanaman tua lebih banyak dialihkan untuk pemeliharaan jaringan, bukan pembentukan biomassa baru. Akibatnya, biomassa tampak stabil, berfluktuasi, atau bahkan menurun bila terjadi penurunan fungsi fisiologis, perubahan struktur kanopi, atau tekanan lingkungan dan manajemen. (Anggraini & Arifin, 2021).



Gambar 6. Kurva sigmoid biomassa kelapa sawit

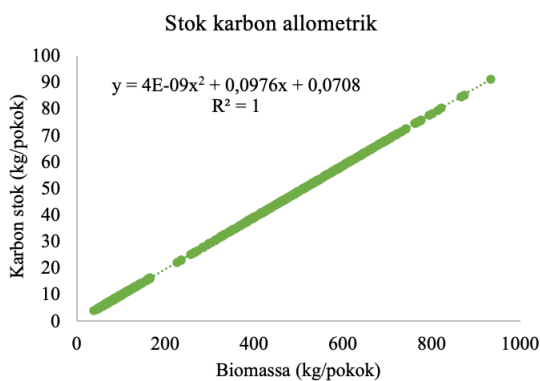
Kurva pertumbuhan biomassa menunjukkan pola sigmoid yang jelas, dengan fase pertumbuhan lambat pada TBM (± 94 kg pokok⁻¹), diikuti fase akumulasi biomassa maksimum pada TM Muda (± 486 – 517 kg pokok⁻¹), dan fase kejenuhan pertumbuhan pada TM Tua (± 495 – 582 kg pokok⁻¹). Akumulasi biomassa kelapa sawit meningkat pesat hingga

mencapai fase optimum pada kisaran umur 8-18 tahun, kemudian melambat dan cenderung stabil seiring bertambahnya umur tanaman sehingga memasuki fase peremajaan (Hambali & Rivai, 2017).



Gambar 7. Biomassa vegetasi bawah

Biomassa vegetasi bawah tertinggi ditemukan pada fase TBM (2 tahun) yang didominasi *mucuna bracteate* dan *pueraria javanica* dengan rata-rata 0,429 kg ha⁻¹. Pada fase TM Muda (13–18 tahun), biomassa vegetasi bawah menurun tajam menjadi 0,034–0,036 kg ha⁻¹ seiring meningkatnya kerapatan tajuk. Pada fase TM Tua (26–27 tahun), biomassa vegetasi bawah kembali meningkat menjadi 0,190–0,209 kg ha⁻¹ yang didominasi *borreria laevis* dan *nephrolepis biserrata*, namun masih lebih rendah dibandingkan fase TBM Luke et al., 2019).



Gambar 8. Allometrik carbon kelapa sawit

Hubungan antara biomassa dan stok karbon menunjukkan pola linier yang kuat, di mana peningkatan biomassa dari sekitar 94 kg pokok⁻¹ pada TBM menjadi >500 kg pokok⁻¹ pada TM Tua secara langsung meningkatkan stok karbon. Fraksi karbon sebesar 0,47, peningkatan biomassa tersebut berimplikasi pada

peningkatan stok karbon dari kategori rendah pada TBM menjadi sangat tinggi pada fase TM Muda dan TM Tua (Karuru et al., 2021)

Secara kuantitatif, setiap peningkatan biomassa sebesar 100 kg/pokok diikuti oleh peningkatan stok karbon sekitar 9,76 kg C/pokok. Pada biomassa rendah sekitar 60–100 kg/pokok, stok karbon berada pada kisaran 6–10 kg C/pokok, sedangkan pada biomassa yang lebih tinggi, yaitu 300–500 kg/pokok, stok karbon meningkat secara proporsional pada kisaran 30–50 kg C/pokok (Beyer & Rademacher, 2021).

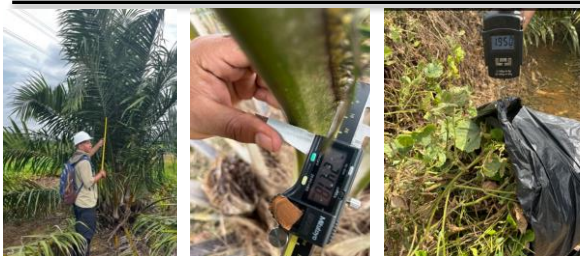
Stok karbon total perkebunan didominasi oleh tegakan kelapa sawit, sedangkan kontribusi vegetasi bawah relatif sangat kecil. Akumulasi kedua komponen tersebut menghasilkan stok karbon kebun yang secara praktis merepresentasikan stok karbon dari kelapa sawit sebagai komponen utama (Yahya et al., 2022b).

Tabel 1. Stok Carbon Perkebunan kelapa sawit

No	Parameter	Satuan	Kisaran
1.	Stok karbon vegetasi bawah	ton/ha	0,247
2.	Stok karbon kelapa sawit	ton/ha	5290,59
3.	Stok karbon kebun	ton/ha	5290,84

Biomassa kelapa sawit meningkat seiring bertambahnya umur tanaman, dengan pola yang konsisten pada tiga fase pertumbuhan, yaitu tanaman belum menghasilkan (TBM ±2 tahun), tanaman menghasilkan fase prima (TM Muda 13–18 tahun), dan tanaman menghasilkan tua (TM Tua 25–27 tahun) (Lewis et al., 2020b).

Pada fase TBM, biomassa per pokok masih relatif rendah karena pertumbuhan tanaman difokuskan pada pembentukan struktur vegetatif awal seperti pelepah, batang muda, dan sistem perakaran. Memasuki fase TM Muda, biomassa meningkat sangat tajam sebagai akibat dari akumulasi massa vegetatif yang intensif, terutama pada batang dan pelepah, yang mencerminkan fase pertumbuhan optimum. Pada fase TM Tua, biomassa per pokok tetap tinggi namun laju peningkatannya melambat dan cenderung stabil, mengindikasikan bahwa tanaman telah mendekati batas fisiologis pertumbuhan biomassa (Sulaiman et al., 2012).



Gambar 9. Pengukuran kompartemen pada fase TBM

Perubahan biomassa tersebut juga tercermin pada komposisi komponen penyusunnya. Pada fase TBM, biomassa didominasi oleh pelepah dan akar, sementara batang belum berkembang optimal dan tandan buah segar (TBS) dikastrasi. Dominasi oleh pelepah dan akar, memfokuskan pembentukan tajuk dan sistem perakaran sebagai dasar pertumbuhan. Pelepah berperan penting dalam fotosintesis, sedangkan akar menunjang penyerapan air dan hara. Batang belum berkembang optimal dan TBS belum terbentuk karena dilakukan kastrasi untuk mengarahkan energi tanaman sepenuhnya pada pertumbuhan vegetatif. (Hambali & Rivai, 2017).



Gambar 10. Pengukuran kompartemen pada fase TM

Fase TM Muda, batang menjadi penyumbang biomassa terbesar di atas permukaan tanah, diikuti oleh pelepah, akar, dan TBS. Sementara itu, pada fase TM Tua, kontribusi biomassa pelepah relatif lebih tinggi dibanding fase sebelumnya, sedangkan biomassa TBS cenderung menurun, yang mengindikasikan penurunan efisiensi generatif pada tanaman tua meskipun biomassa struktural masih tinggi (Asari *et al.*, 2017).

Hasil pemodelan alometrik menunjukkan bahwa biomassa batang, akar, dan TBS mengikuti pola kuadratik dengan koefisien negatif, yang menandakan peningkatan biomassa hingga mencapai fase optimum pada TM Muda kemudian melambat atau menurun pada fase tanaman tua. Sebaliknya, biomassa pelepah menunjukkan koefisien kuadratik positif, yang mengindikasikan kecenderungan peningkatan biomassa pelepah yang

berlangsung sepanjang umur tanaman. Pola ini menegaskan bahwa pelepah merupakan komponen biomassa yang relatif stabil dan berperan penting dalam akumulasi biomassa jangka panjang pada perkebunan kelapa sawit (Karuru *et al.*, 2021); (Septiwibowo *et al.*, 2019).

Hubungan antara biomassa dan stok karbon menunjukkan pola linier yang kuat, peningkatan biomassa kering secara langsung diikuti oleh peningkatan stok karbon yang tersimpan di dalam jaringan tanaman. Hal ini mencerminkan karbon merupakan fraksi proporsional dari biomassa kering kelapa sawit dan tidak bergantung secara langsung pada umur tanaman maupun komposisi bagian penyusunnya Murphy (2025). Biomassa dapat digunakan sebagai indikator utama dalam estimasi stok karbon melalui pendekatan alometrik, baik pada tingkat individu tanaman maupun skala hektar (E Henson, 2017b) Luke *et al.*, 2019)

Berbeda dengan biomassa pokok kelapa sawit, biomassa vegetasi bawah menunjukkan pola yang berlawanan terhadap perkembangan umur tanaman. Pada fase TBM, vegetasi bawah relatif tinggi akibat kanopi yang belum rapat sehingga intensitas cahaya matahari masih mencapai permukaan tanah yang dapat membantu metabolisme dan memecah masa dormansi pada vegetasi bawah (Beyer & Rademacher, 2021).

Memasuki fase TM Muda, peningkatan kerapatan tajuk menekan intensitas cahaya dan menyebabkan biomassa vegetasi bawah menurun drastis hingga mencapai nilai minimum. Pada fase TM Tua, biomassa vegetasi bawah kembali meningkat meskipun tidak setinggi fase TBM, yang dipengaruhi oleh perubahan struktur kanopi, fisiologi tanaman, serta praktik pengelolaan kebun (Luke *et al.*, 2019b).

Secara keseluruhan, pola pertumbuhan biomassa kelapa sawit mengikuti kurva sigmoid yang merepresentasikan fase pertumbuhan vegetatif awal, fase akumulasi biomassa maksimum, dan fase kejenuhan pertumbuhan Chong *et al.* (2017). Perbedaan laju akumulasi biomassa antar fase umur tidak hanya mencerminkan perkembangan struktur vegetatif tanaman, tetapi juga menentukan besarnya cadangan karbon yang tersimpan dalam sistem perkebunan kelapa sawit. Hubungan antara umur tanaman, biomassa, dan stok karbon menjadi dasar penting dalam penilaian potensi peran perkebunan kelapa sawit sebagai penyerap karbon (Ariesca *et al.*, 2023; Zomer *et al.*, 2016b)

Kesimpulan

Biomassa dan stok karbon perkebunan kelapa sawit meningkat seiring bertambahnya umur tanaman. Fase TBM memiliki biomassa paling rendah karena tanaman masih berada pada tahap pembentukan struktur vegetatif awal. Fase TM Muda menunjukkan peningkatan biomassa yang lebih tinggi akibat perkembangan batang, pelepah, akar, dan komponen generatif. Pada fase TM Tua, biomassa tetap tinggi, namun laju peningkatannya cenderung lebih stabil karena tanaman telah mendekati fase kejenuhan pertumbuhan. Stok karbon perkebunan kelapa sawit didominasi oleh tegakan utama. Vegetasi bawah memberikan kontribusi yang lebih kecil terhadap total stok karbon kebun.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini bagian dari penelitian multidisiplin yang didanai oleh Grant Riset Sawit pada Tahun 2024 dengan nomor kontrak: PRJ-171/DPKS/2024. Biaya publikasi didukung oleh Institut Pertanian Stiper (INSTIPER) Yogyakarta.

Referensi

- Anggraini, S., & Arifin, Y. W. (2021). Analysis Of Palm Oil Carbon Stock Generating Plant Phase (TM <20 Years) In Silk Land With 40-60 Cm. *AGRITEPA: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.37676/agritepa.v8i1.1290>
- Ariesca, R., Sau, A. A. W. T., Adinugroho, W. C., Setiawan, A. A. R., Ahamed, T., & Noguchi, R. (2023). Land Swap Option for Sustainable Production of Oil Palm Plantations in Kalimantan, Indonesia. *Sustainability*, 15(3), 2394. <https://doi.org/10.3390/su15032394>
- Asari, N., Suratman, M. N., & Jaafar, J. (2017). Modelling and mapping of above ground biomass (AGB) of oil palm plantations in Malaysia using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 38(16), 4741–4764. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1325533>
- Beyer, R., & Rademacher, T. (2021). Species Richness and Carbon Footprints of Vegetable Oils: Can High Yields Outweigh Palm Oil's Environmental Impact? *Sustainability*, 13(4), 1813. <https://doi.org/10.3390/su13041813>
- Chong, K. L., Kanniah, K. D., Pohl, C., & Tan, K. P. (2017). A review of remote sensing applications for oil palm studies. *Geospatial Information Science*, 20(2), 184–200. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1337317>
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2015). *The Oil Palm* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118953297>
- E Henson, I. (2017b). A Review Of Models For Assessing Carbon Stocks And Carbon Sequestration In Oil Palm Plantations. *Journal of Oil Palm Research*, 29(1), 1–10. <https://doi.org/10.21894/jopr.2017.2901.01>
- Erina, N. G. F. (2024). Peran RSPO dan ISPO Pada Keberlanjutan Industri Minyak Kelapa Sawit di Indonesia: Studi Kasus Indofood. *Briliant: Jurnal Riset dan Konseptual*, 9(2), 290–298. <https://doi.org/10.28926/briliant.v9i2.1814>
- Fahamsyah, E. (2018). *Sistem ISPO Untuk Menjawab Tantangan Dalam Pembangunan Kelapa Sawit Indonesia Yang Berkelanjutan*. 43. <https://doi.org/https://doi.org/10.14203/jmi.v43i1.718>
- Fatonah, S., Yulianti, G. A., Yusfiati, Y., Yulminarti, Y., & Fitmawati, F. (2025). Estimation of Aboveground Carbon Stock in Oil Palm Plantations on Tapung Peatland, Kampar, Riau. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(4), 5662–5670. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i4.10223>
- Hambali, E., & Rivai, M. (2017). The Potential of Palm Oil Waste Biomass in Indonesia in 2020 and 2030. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65, 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012050>
- Karuru, S. S., Rasyid, B., & Millang, S. (2021). Carbon stock estimation on some land cover: Secondary forest, agroforestry, palm oil plantation and paddy fields. *IOP*

- Conference Series: Earth and Environmental Science*, 637(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/637/1/012056>
- Keenan, T. F., Luo, X., Stocker, B. D., De Kauwe, M. G., Medlyn, B. E., Prentice, I. C., Smith, N. G., Terrer, C., Wang, H., Zhang, Y., & Zhou, S. (2023a). A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO₂. *Nature Climate Change*, 13(12), 1376–1381. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01867-2>
- Lewis, K., Rumpang, E., Kho, L. K., McCalmont, J., Teh, Y. A., Gallego-Sala, A., & Hill, T. C. (2020a). An assessment of oil palm plantation aboveground biomass stocks on tropical peat using destructive and non-destructive methods. *Scientific Reports*, 10(1), 2230. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58982-9>
- Luke, S. H., Purnomo, D., Advento, A. D., Aryawan, A. A. K., Naim, M., Pikstein, R. N., Ps, S., Rambe, T. D. S., Soeprapto, Caliman, J.-P., Snaddon, J. L., Foster, W. A., & Turner, E. C. (2019b). Effects of Understory Vegetation Management on Plant Communities in Oil Palm Plantations in Sumatra, Indonesia. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 33. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00033>
- Murphy, D. J. (2025). Carbon Sequestration for Global-Scale Climate Change Mitigation: Overview of Strategies Plus Enhanced Roles for Perennial Crops. *Crops*, 5(3), 39. <https://doi.org/10.3390/crops5030039>
- Septiwibowo, B., Hadiwijaya, B., & Caliman, J.-P. (2019). CO₂ balance on oil palm agrosystem in Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 336(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/336/1/012022>
- Sukarman, S., Mulyani, A., & Purwanto, S. (2020). Modifikasi Metode Evaluasi Kesesuaian Lahan Berorientasi Perubahan Iklim. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.21082/jsdl.v12n1.2018.1-11>
- Sulaiman, O., Salim, N., Nordin, N. A., Hashim, R., Ibrahim, M., & Sato, M. (2012). The Potential Of Oil Palm Trunk Biomass As An Alternative Source For Compressed Wood. *BioResources*, 7(2), 2688–2706. <https://doi.org/10.15376/biores.7.2.2688-2706>
- Xu, Y., Yu, L., Ciais, P., Li, W., Santoro, M., Yang, H., & Gong, P. (2022). Recent expansion of oil palm plantations into carbon-rich forests. *Nature Sustainability*, 5(7), 574–577. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00872-1>
- Yahya, S., Mira Ariyanti, & Yenni Asbur. (2022b). Perpektif Baru: Manajemen Vegetasi Bawah Tegakan Pada Budidaya Kelapa Sawit Berkelanjutan. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 50(3), 343–356. <https://doi.org/10.24831/jai.v50i3.44605>
- Zomer, R. J., Neufeldt, H., Xu, J., Ahrends, A., Bossio, D., Trabucco, A., Van Noordwijk, M., & Wang, M. (2016a). Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Scientific Reports*, 6(1), 29987. <https://doi.org/10.1038/srep29987>