

Perbandingan Model Alometrik untuk Estimasi Biomassa dan Stok Karbon Kelapa Sawit Indonesia Berbasis Global Canopy Height

Lita Hardiyanti^a, Rika Hernawati^{a,*}, Soni Darmawan^a, Dhimas Wiratmoko^b

^aTeknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. Khp Hasan Mustopa No.23, Neglasari, Kec. Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat 40124, Indonesia

^bPusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS), Jl. Brigjend Katamso No.51, Kp. Baru, Kec. Medan Maimun, Kota Medan, Sumatera Utara 20158, Indonesia

* Korespondensi Penulis: rikah@itenas.ac.id



Dikirim: 10 Juli 2026;

Diterima: 30 Juli 2026;

Diterbitkan: 3 Agustus 2026.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan membandingkan tiga model alometrik berbasis tinggi, yaitu Khalid (1999), Dewi (2009), dan Thenkabail (2004) untuk mengestimasi biomassa di atas permukaan tanah (aboveground biomass/AGB) dan stok karbon perkebunan kelapa sawit Indonesia berbasis Global Canopy Height (GCH). Wilayah studi mencakup perkebunan kelapa sawit di Indonesia, sedangkan evaluasi hubungan umur-biomassa dilakukan pada blok perkebunan PTPN III Sei Dadap, Kabupaten Asahan. Data yang digunakan meliputi GCH resolusi 10 m, peta perkebunan kelapa sawit resolusi 10 m, dan data tahun tanam per blok. Pengolahan dilakukan pada Google Earth Engine melalui ekstraksi dan masking tinggi kanopi, penerapan tiga model alometrik, konversi AGB menjadi stok karbon menggunakan fraksi karbon 0,47, perbandingan hasil antarmodel, serta regresi logaritmik terhadap umur tanaman. Hasil menunjukkan bahwa ketiga model menghasilkan pola spasial yang relatif serupa, tetapi memberikan nilai estimasi yang berbeda. Model Khalid menghasilkan AGB dan stok karbon tertinggi, model Dewi terendah, sedangkan model Thenkabail berada di antara keduanya. Hubungan umur tanaman dengan AGB dan stok karbon menunjukkan pola logaritmik dengan r^2 sebesar 0,76-0,77. Hasil ini menegaskan bahwa pemilihan model alometrik sangat memengaruhi besaran estimasi, sehingga validasi menggunakan data lapangan diperlukan untuk menentukan model yang paling representatif bagi perkebunan kelapa sawit Indonesia.

Kata kunci: Biomassa di atas permukaan tanah; global canopy height; google earth engine; kelapa sawit; model alometrik; stok karbon.

Abstract. This study aimed to compare three height-based allometric models, namely Khalid (1999), Dewi (2009), and Thenkabail (2004) for estimating aboveground biomass (AGB) and carbon stocks of Indonesian oil palm plantations using Global Canopy Height (GCH). The study area covered oil palm plantations in Indonesia, while the age-biomass relationship was evaluated in the PTPN III Sei Dadap plantation, Asahan Regency. The datasets comprised 10 m GCH, a 10 m oil palm plantation map, and block-level planting-year data. Processing was conducted in Google Earth Engine through canopy-height extraction and masking, application of the three allometric models, conversion of AGB to carbon stocks using a carbon fraction of 0.47, inter-model comparison, and logarithmic regression against plantation age. The results showed that the three models produced relatively similar spatial patterns but different estimates. The Khalid model generated the highest AGB and carbon stock estimates, the Dewi model the lowest, and the Thenkabail model intermediate values. Plantation age showed a logarithmic relationship with AGB and carbon stocks, with r^2 values of 0.76-0.77. These findings demonstrate that allometric model selection strongly influences estimate magnitude; therefore, field validation is required to identify the most representative model for Indonesian oil palm plantations.

Keywords: aboveground biomass; allometric model; carbon stock; global canopy height; google earth engine; oil palm.

I. PENDAHULUAN

Indonesia adalah produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia [4]. Luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia tercatat sebesar 16,83 juta hektar dengan total produksi sebesar 46,82 juta ton pada tahun 2022, menjadikan Indonesia sebagai penghasil utama crude palm oil secara global [4]. Pada periode 2024/2025, Indonesia memproduksi 47,47 juta ton total produksi minyak kelapa sawit global yang tersebar di berbagai provinsi seperti Riau, Kalimantan, Sumatra [5]. Besarnya skala perkebunan ini tidak hanya berdampak pada ekonomi, tetapi juga memiliki implikasi terhadap siklus karbon dan perubahan iklim global [6].

Perkebunan kelapa sawit memiliki peran ganda dalam siklus karbon [7]. Pada satu sisi konversi hutan menjadi perkebunan menghasilkan emisi karbon signifikan [8], namun di sisi lain tanaman yang tumbuh aktif menyerap dan menyimpan karbon dalam biomasanya [9]. Oleh karena itu, estimasi stok karbon perkebunan kelapa sawit menjadi krusial dalam mendukung pelaporan inventarisasi gas rumah kaca nasional [10], dengan mengacu pada pedoman *Intergovernmental Panel on Climate Change* [11] yang menggunakan fraksi karbon sebesar 0,47 ton C per ton berat kering biomassa.

Estimasi biomassa di atas permukaan tanah kelapa sawit (AGB) umumnya dilakukan menggunakan persamaan alometrik berbasis tinggi pohon (H) [12]. Beberapa penelitian mengembangkan persamaan alometrik menggunakan variabel tinggi pohon (H) sebagai prediktor utama, di antaranya [1] di perkebunan Malaysia, [2] dalam konteks perkebunan tropis Indonesia, dan [3] di perkebunan Afrika Barat. Meskipun ketiganya menggunakan variabel prediktor yang sama, perbedaan kondisi tapak dan lokasi pengembangan model berpotensi menghasilkan estimasi biomassa di atas permukaan tanah yang berbeda signifikan ketika diterapkan pada perkebunan yang sama [13][14][15][16], sehingga kajian perbandingan antar model menjadi sangat diperlukan.

Pengukuran tinggi pohon secara konvensional melalui survei lapangan dinilai kurang efisien untuk skala nasional yang mencapai lebih dari 16 juta hektar [17]. Sebagai alternatif, data Global Canopy Height (GCH) dari penginderaan jauh menawarkan solusi yang lebih efisien. Potapov et al., (2021) menghasilkan peta tinggi kanopi global resolusi 30 m melalui integrasi data GEDI dengan Landsat, sementara [18] mengembangkan peta tinggi kanopi global pada resolusi 10 m dengan menggabungkan data GEDI dan Sentinel-2, yang mencakup seluruh wilayah Indonesia.

Pemanfaatan data tinggi pohon dari penginderaan jauh untuk estimasi stok karbon kelapa sawit telah dibuktikan dalam beberapa penelitian. [19] berhasil memetakan tinggi pohon kelapa sawit tahunan selama dua dekade di Semenanjung Malaysia menggunakan spaceborne LiDAR

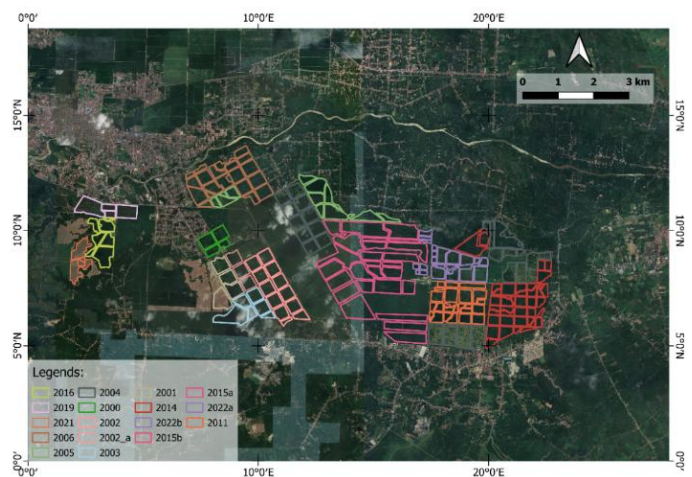
ICESat-2, sedangkan [3] membuktikan bahwa penggabungan persamaan alometrik dengan data penginderaan jauh mampu menghasilkan estimasi stok karbon kelapa sawit pada skala regional.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini menerapkan data GCH [18] sebagai sumber data tinggi pohon untuk membandingkan tiga model alometrik [1][3][2] dalam mengestimasi biomassa dan stok karbon kelapa sawit di Indonesia yang belum pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian ini juga akan memverifikasi kewajaran hasil estimasi melalui analisis korelasi AGB dengan data umur tanaman di PTPN III Sei Dadap, Asahan. Serta diharapkan dapat berkontribusi pada pemantauan stok karbon yang selaras dengan panduan pelaporan inventarisasi gas rumah kaca nasional berdasarkan [11].

II. METODOLOGI

2.1 Wilayah Studi

Penelitian ini dilakukan pada seluruh wilayah perkebunan kelapa sawit di Indonesia dengan menggunakan data *Global Canopy Height* (GCH) dan *Global Map of Oil Palm Plantations*. Analisis hubungan umur tanaman dengan biomassa dan stok karbon dilakukan menggunakan data umur tanam pada tingkat blok perkebunan di PTPN III Sei Dadap, Kabupaten Asahan, Sumatera Utara, seperti pada **Gambar 1** sebagai lokasi studi referensi.



Gambar 1. Blok umur tanam kelapa sawit di Asahan

2.2 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data Global Canopy Height (GCH) dari [18] dengan resolusi 10 m berbasis Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) dan Sentinel 2 yang mencakup seluruh Indonesia. Data Global Map of Oil Palm Plantations dari [20] yang berisikan kumpulan data berupa peta global perkebunan kelapa sawit skala industri dan

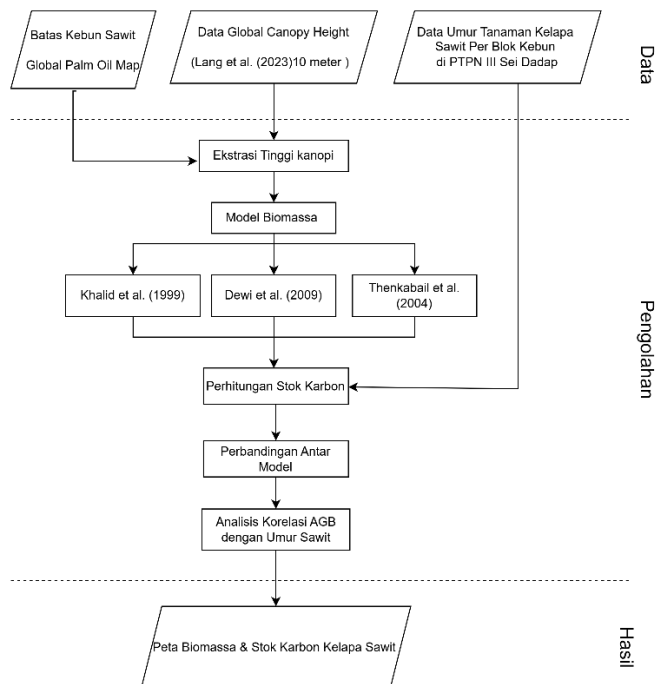
petani kecil dengan resolusi 10 m untuk tahun 2019 yang mencakup wilayah-wilayah untuk mendeteksi perkebunan kelapa sawit dengan menggunakan citra yang telah diklasifikasikan sehingga menghasilkan jaringan konvolusional yang didasarkan pada komposit setengah tahunan Sentinel-1 dan Sentinel-2. Selain itu penelitian ini menggunakan data umur tanaman kelapa sawit per blok kebun yang diperoleh dari pihak pengelola perkebunan sebagai data referensi. Data yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum dalam Tab 1.

TABEL 1. Data yang Digunakan

Data	Tahun
Data Global Canopy Height from the Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)	2020
Global Map of Oil Palm Plantations (BIOPAMA)	2019-2021
Oil Palm Planting Year Data	2000-2022

2.3 Metode

Metodologi penelitian ini terdiri atas tahapan ekstraksi tinggi kanopi, estimasi biomassa, perhitungan stok karbon, perbandingan antar model, serta analisis hubungan umur tanaman dengan biomassa dan stok karbon. Estimasi GCH yaitu model [1], [2], dan [3]. Ketiga model dipilih karena sama-sama menggunakan tinggi tanaman sebagai variabel prediktor utama, namun dikembangkan dengan pendekatan alometrik yang berbeda sehingga berpotensi menghasilkan estimasi biomassa yang berbeda ketika diterapkan pada data Global Canopy Height (GCH). Model Khalid dirancang berdasarkan biomassa per pohon yang diubah menjadi biomassa per hektar, model Dewi memakai persamaan regresi linier yang berdasar pada tinggi tanaman, sementara model Thenkabail mengandalkan hubungan empiris antara tinggi batang dan biomassa. Perbedaan dalam pendekatan tersebut menjadi alasan untuk membandingkan ketiga model dalam penelitian ini. Secara keseluruhan, langkah-langkah penelitian disajikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Metodologi

2.4 Ekstraksi Tinggi Kanopi

Pada tahapan ini dilakukan untuk memperoleh data tinggi kanopi dari data Global Canopy Height (GCH) tahun 2020 dengan resolusi 10 meter, kemudian data tersebut dipotong (clip) sesuai wilayah Indonesia dan dilakukan filter dengan menggunakan data tinggi kelapa sawit yang realistis, yaitu 1 sampai 30 meter. Selanjutnya, data GCH tersebut dilakukan masking menggunakan data BIOPAMA sehingga hanya pikselnya yang teridentifikasi sebagai perkebunan kelapa sawit untuk dilakukan analisis pada Google Earth Engine (GEE).

2.5 Model Biomassa

Estimasi biomassa dilakukan dengan menggunakan tiga model alometrik berbasis tinggi pohon. Model pertama menggunakan persamaan $AGB_{khalid} = 725 + 197 \times h_{tot}$, yang menghitung biomassa per pohon kemudian dikonversi menjadi biomassa per hektar menggunakan asumsi kepadatan tanam [1]. Model kedua menggunakan persamaan linear $AGB_{Dewi} = 0,0976 \times h_{tot} + 0,076$ yang menghasilkan estimasi langsung dalam satuan ton per hektar [2]. Model ketiga menggunakan persamaan $AGB_{Thenkabail} = 0,3747 \times h_{trunk} + 3,6334$ berdasarkan tinggi batang sebagai variabel utama, menghasilkan biomassa dalam satuan Mg per hektar [3]. Kemudian dilakukan penyamaan satuan untuk menilai perbedaan hasil estimasi biomassa pada skala nasional.

2.6 Perhitungan Stok Karbon

Estimasi stok karbon dihitung dari nilai AGB masing-masing model dengan menggunakan faktor konversi karbon dari [11] sebesar 47% yang merepresentasikan kandungan karbon rata-rata biomassa tanaman berkayu.

2.7 Perbandingan Antar Model

Perbandingan antar model ini dilakukan untuk melihat konsistensi estimasi AGB dan stok karbon dari ketiga pendekatan alometrik. Perbedaan nilai estimasi antar model dianalisis untuk mengidentifikasi uncertainty range pada masing-masing model terhadap variasi nilai tinggi kanopi yang diperoleh dari GCH. Perbandingan antara ketiga model dilakukan tidak hanya dengan memperhatikan besar estimasi biomassa dan stok karbon, tetapi juga mempertimbangkan keterkaitan kedua parameter ini dengan umur tanaman. Nilai rata-rata biomassa dan stok karbon pada setiap kelompok umur dibandingkan untuk mengevaluasi konsistensi pola pertumbuhan yang dihasilkan oleh masing-masing model alometrik. Selanjutnya dilakukan analisis regresi logaritmik antara umur tanaman dengan biomassa dan stok karbon untuk memperoleh koefisien determinasi r^2 sebagai indikator kekuatan hubungan antara variabel-variabel tersebut.

2.8 Analisis Korelasi AGB dengan Umur Kelapa Sawit

Analisis korelasi dilakukan dengan nilai rata-rata AGB hasil estimasi dari ketiga model dengan data umur tanaman kelapa sawit per blok kebun di PTPN III Sei Dadap, Kabupaten Asahan. Tujuannya untuk menganalisis sejauh mana estimasi AGB dengan menggunakan tinggi kanopi GCH dapat memperlihatkan pola pertumbuhan biomassa di lapangan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Ekstraksi Tinggi Kanopi Kelapa Sawit Menggunakan Global Canopy Height (GCH)

Tahapan awal yang dilakukan pada penelitian ini adalah melakukan ekstraksi tinggi kanopi kelapa sawit dengan menggunakan data Global Canopy Height (GCH) tahun 2020 dengan resolusi spasial 10 yang dikembangkan oleh [18]. Data GCH tersebut digunakan untuk memberikan informasi mengenai tinggi vegetasi untuk merepresentasikan struktur secara vertikal dari vegetasi pada skala nasional. Pada penelitian ini data GCH dipotong berdasarkan batas administrasi Indonesia, kemudian dilakukan penyaringan data nilai tinggi vegetasi antara 1 - 30 m untuk menghilangkan nilai yang tidak realistis bagi pertumbuhan kelapa sawit serta meminimalkan pengaruh kesalahan pengukuran pada area nonvegetasi maupun vegetasi dengan tinggi ekstrem.

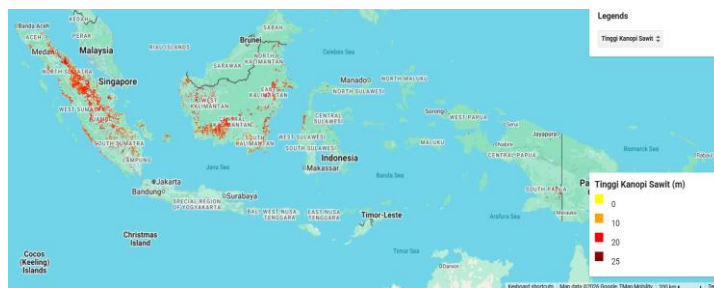
Hasil dari ekstraksi GCH di tingkat nasional dapat dilihat pada **Gambar 3**, penyebaran tinggi kanopi

menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan antar wilayah di Indonesia. Daerah yang memiliki banyak hutan, seperti pulau Kalimantan, Papua, dan Sumatra menunjukkan nilai tinggi kanopi yang relatif besar dengan mendominasi warna hijau tua. Sebaliknya, daerah dengan lahan terbuka, kawasan pertanian, atau wilayah perkotaan memiliki tinggi kanopi yang lebih rendah, ditandai dengan warna kuning hingga hijau muda. Perbedaan spasial tersebut mencerminkan variasi struktur vegetasi yang dipengaruhi oleh jenis tutupan lahan dan beberapa faktor lainnya. Hal tersebut sejalan dengan penelitian [18], yang menunjukkan bahwa data GCH secara konsisten menggambarkan sebaran tinggi tanaman di tingkat global dengan menggunakan kombinasi data GEDI LiDAR dan citra Sentinel-2.



Gambar 3. Global Canopy Height Indonesia

Untuk memperoleh data yang berisikan informasi tinggi kanopi perkebunan kelapa sawit maka dilakukan masking menggunakan data BIOPAMA *Global oil palm Plantations*. Hasil masking pada **Gambar 4** menunjukkan bahwa persebaran perkebunan kelapa sawit banyak di pulau Sumatra dan Kalimantan, sedangkan Sulawesi dan Papua memiliki luasan yang relatif lebih kecil. Hal tersebut sesuai dengan distribusi utama perkebunan kelapa sawit di Indonesia sesuai dengan penelitian [17]. Hasil ekstraksi menunjukkan bahwa tinggi kanopi kelapa sawit umumnya berada pada rentang 5-25 meter, dengan dominasi kelas tinggi 10-20 meter. Rentang tersebut menggambarkan karakteristik pertumbuhan kelapa sawit yang meningkat seiring pertambahan umur hingga mencapai fase dewasa. Oleh karena itu, tinggi kanopi merupakan parameter yang memiliki kaitan dalam pemodelan alometrik karena memiliki hubungan erat dengan biomassa di atas permukaan tanah dan stok karbon [18][21].



Gambar 4. Tinggi Kanopi Kelapa Sawit Indonesia

3.2 Estimasi Biomassa di Atas Permukaan Tanah (Aboveground Biomass/AGB) dan Stok Karbon

Estimasi biomassa dan stok karbon kelapa sawit dilakukan dengan menggunakan tiga model yang berbeda yaitu [1] [3]. Dari ketiga model alometrik tersebut menunjukkan bahwa pola distribusi biomassa di Indonesia relatif sama, meskipun menghasilkan besaran nilai yang berbeda. Hal tersebut disebabkan oleh penggunaan variabel tinggi kanopi dari data GCH [18] sebagai satu-satunya variabel bebas pada ketiga model alometrik. Maka perbedaan yang muncul antar model lebih menggambarkan perbedaan struktur dan koefisien persamaan alometrik dibandingkan perbedaan distribusi spasialnya. Hal tersebut konsisten dengan [14] yang menyatakan bahwa sumber utama perbedaan estimasi biomassa terletak pada rumusan model alometrik yang digunakan bukan pada data yang dimasukkan. Konsentrasi biomassa yang tinggi pada ketiga model terlihat terutama di Sumatra bagian Utara dan Kalimantan yang merupakan pusat utama perkebunan kelapa sawit di Indonesia [4]. Pola ini sesuai dengan dengan penyebaran perkebunan skala besar yang terdeteksi dari peta batas area kebun sawit yang digunakan sebagai analisis.

Hasil estimasi AGB menggunakan model [2] menunjukkan bahwa sebagian besar perkebunan kelapa sawit di Indonesia memiliki nilai biomassa yang relatif rendah hingga sedang, nilai AGB yang dihasilkan berkisar antara 0,7538 - 1,9304 ton ha⁻¹ **Gambar 5a**, dengan tingkat biomassa yang lebih tinggi pada perkebunan yang berada di Sumatra bagian Utara dan Kalimantan. Rentang nilai tersebut didapatkan dari persamaan linear yang dikembangkan [2], yakni $AGB = 0,0976 \times H_{tot} + 0,076$, dengan menggunakan koefisien yang relatif kecil sehingga menghasilkan estimasi biomassa yang konservatif. Dengan pendekatan berbasis tinggi pohon diketahui cenderung menghasilkan nilai biomassa yang lebih rendah dibandingkan model berbasis biomassa per pohon [13].

Model [1] menghasilkan estimasi AGB yang jauh lebih tinggi berkisar 286,144 - 607,648 ton ha⁻¹ **Gambar 5c**, tingginya nilai tersebut disebabkan oleh persamaan Khalid et al., (1999), yakni $AGB = 725 + 197 \times H_{tot}$, yang dikembangkan berdasarkan biomassa per pohon yang kemudian dikonversikan menjadi ton per hektar

menggunakan pendekatan kepadatan tanam sekitar 136 pohon ha⁻¹. Pendekatan konversi berbasis kepadatan tanam ini menghasilkan nilai AGB per satuan luas yang lebih besar. Model alometrik berbasis biomassa per pohon yang dikembangkan dari data destruktif cenderung menghasilkan estimasi lebih tinggi karena memperhitungkan seluruh komponen biomassa pohon secara langsung [15].

Model [3] menghasilkan nilai AGB sekitar 5,7317 - 9,3288 Mg ha⁻¹ **Gambar 5e**, nilai tersebut berada di antara estimasi model [2] dan [1] apabila dibandingkan secara kuantitatif berdasarkan skala persamaan, namun masih jauh lebih rendah dibandingkan model [1]. Perbedaan ini disebabkan oleh persamaan [3], yakni $AGB = 0,3747 \times H_{trunk} + 3,6334$, pada persamaan tersebut menggunakan tinggi batang sebagai variabel utama dan menghasilkan biomassa langsung dalam satuan Mg ha⁻¹ tanpa konversi berbasis kepadatan tanam. Pada penelitian [3] nilai karbon per satuan luas sebesar 14,75–14,94 Mg ha⁻¹ untuk kelapa sawit berumur 1-5 tahun pada perkebunan kelapa sawit di Afrika Barat. Meskipun menghasilkan nilai yang berbeda, ketiga model memperlihatkan pola distribusi spasial yang serupa yaitu biomassa yang tinggi terletak di pusat perkebunan kelapa sawit di Sumatra dan Kalimantan. Hal ini menunjukkan bahwa pola spasial sepenuhnya dipengaruhi oleh distribusi tinggi kanopi dari data GCH, sedangkan besaran nilai estimasi ditentukan oleh struktur persamaan alometrik yang digunakan.

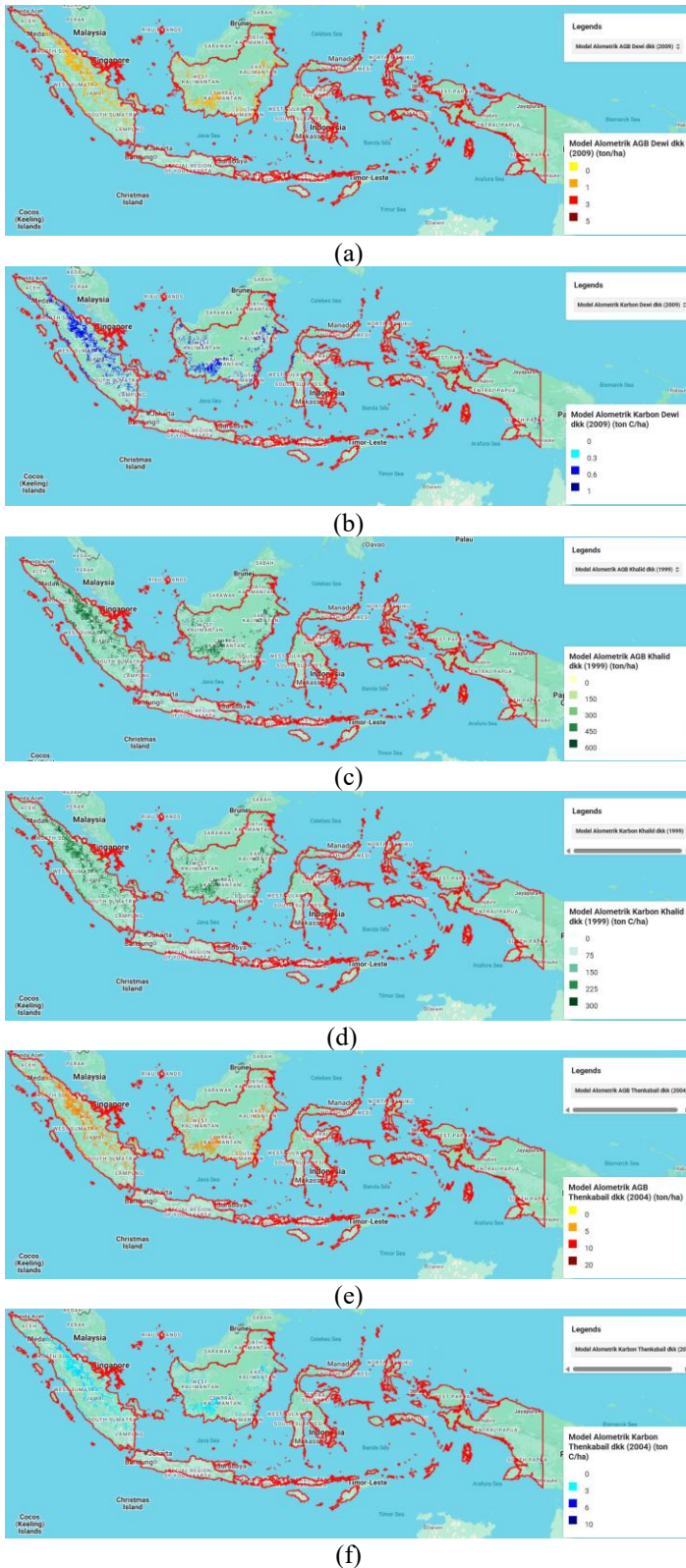
Estimasi stok karbon diperoleh dengan mengalikan nilai AGB masing-masing model menggunakan faktor konversi karbon sebesar 0,47 sesuai dengan pedoman [11]. Maka pola distribusi spasial stok karbon pada ketiga model sama dengan pola distribusi biomassa **Gambar 5(b), 5(d), dan 5(f)**. Penerapan faktor konversi [11] sebesar 0,47 ini mengasumsikan kandungan karbon yang konsisten di seluruh komponen biomassa dalam hutan tropis, dan telah digunakan secara luas dalam estimasi stok karbon berbasis model alometrik. Model [2] menunjukkan jumlah karbon berkisar 0,3568 - 0,9072 ton C ha⁻¹ **Gambar 5b**, model [3] menunjukkan jumlah karbon sebesar 2,6939 - 4,3845 ton C ha⁻¹ **Gambar 5f**, model [1] menghasilkan estimasi stok karbon tertinggi berkisar 134,4876 - 285,5945 ton C ha⁻¹ **Gambar 5d**. Seperti yang ditunjukkan pada hasil biomassa, model [1] menghasilkan estimasi jumlah karbon tertinggi, sementara model [2] memberikan estimasi terendah. Selisih ini semata-mata mencerminkan adanya perbedaan estimasi AGB di masing-masing model, mengingat faktor konversi karbon yang diterapkan sama untuk ketiga model tersebut.

3.3 Hubungan Umur Tanaman dengan Biomassa dan Stok Karbon

Data umur tanaman yang digunakan pada analisis ini berasal dari blok perkebunan kelapa sawit PTPN III Sei Dadap, Kabupaten Asahan, Sumatera Utara. Data tersebut berupa tahun tanam setiap blok kelapa sawit dimana terdapat 16 blok tahun tanam mulai dari tahun 2000 sampai 2022, yang kemudian dikonversi menjadi umur tanaman pada saat akuisisi data GCH. Penggunaan data pada tingkat blok memungkinkan perhitungan nilai rata-rata biomassa dan stok karbon pada setiap kelompok umur sehingga hubungan antara umur tanaman dengan hasil estimasi ketiga model alometrik dapat dianalisis secara lebih baik.

Hasil estimasi biomassa di atas permukaan tanah (*Aboveground Biomass/AGB*) dan stok karbon menunjukkan adanya hubungan antara umur tanaman kelapa sawit dengan nilai biomassa dan karbon yang dihasilkan dari ketiga model alometrik yang digunakan, peningkatan umur tanam juga diikuti dengan peningkatan nilai AGB dan stok karbon. Pada model [1], nilai AGB meningkat dari 286,144 ton ha⁻¹ pada umur 0,5 tahun menjadi 607,64 ton ha⁻¹ pada umur 22 tahun. Pola serupa juga terlihat pada model [3] yang nilai AGB meningkat dari 5,73 ton ha⁻¹ menjadi 9,33 ton ha⁻¹, dan model [2] yang meningkat dari 0,7538 ton ha⁻¹ menjadi 1,9304 ton ha⁻¹ dalam rentang umur yang sama. Karena stok karbon dihitung dengan menggunakan faktor konversi karbon dari [11] sebesar 47% dari biomassa, maka pola peningkatan karbon mengikuti pola peningkatan biomassa pada setiap modelnya, hasil dapat dilihat pada Tab 2.

Peningkatan jumlah biomassa dan stok karbon seiring bertambahnya umur tanam dalam penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya. Menurut [22] umur tanam kelapa sawit memiliki pengaruh nyata terhadap stok karbon yang dihasilkan, hal tersebut menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan dalam stok karbon kelapa sawit di berbagai kelompok umur yang telah diamati. Pada hasil penelitian [22] stok karbon kelapa sawit pada umur 20 tahun ke atas menghasilkan stok karbon tertinggi, dan nilainya berbeda jauh dengan umur 5 tahun, namun tidak jauh berbeda dengan umur 11 tahun. Pada umur 11 tahun, stok karbon berada di tengah-tengah sehingga tidak menunjukkan perbedaan yang cukup jauh dengan umur 5 tahun maupun 20 tahun ke atas [22]. Dan umur 5 tahun ke bawah memiliki stok karbon terendah, berbeda dengan umur 11 tahun dan 20 tahun ke atas [22].



Gambar 5. Distribusi Spasial Model Alometrik (a) AGB Dewi, (b) Stok Karbon Dewi, (c) AGB Khalid, (d) Stok Karbon Khalid, (e) AGB Thenkabail, (f) Stok Karbon Thenkabail.

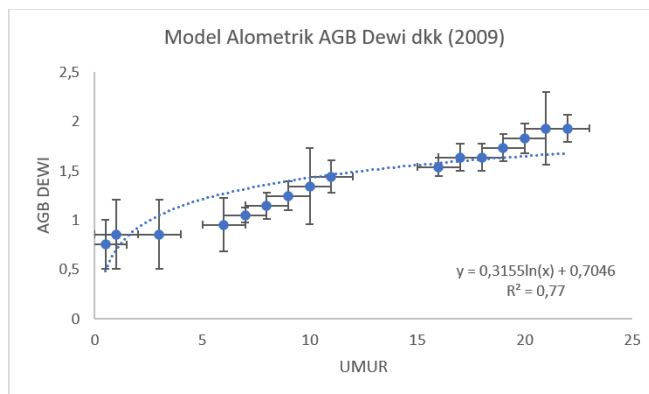
TABEL 2. Rata-Rata AGB dan Stok Karbon dengan Umur Tanam

Tahun	Umur	AGB	Karbon	AGB	Karbon	AGB	Karbon
Tanam	Dewi	Dewi	Khalid	Khalid	Thenkabail	Thenkabail	
2000	22	1,93	0,90	607,64	285,59	9,32	4,38
2001	21	1,93	0,90	607,64	285,59	9,32	4,38
2002	20	1,83	0,86	580,85	273,00	9,02	4,24
2003	19	1,73	0,81	554,06	260,41	8,72	4,10
2004	18	1,63	0,76	527,27	247,81	8,42	3,96
2005	17	1,63	0,76	527,27	247,81	8,42	3,96
2006	16	1,54	0,72	500,48	235,22	8,12	3,82
2011	11	1,44	0,67	473,68	222,63	7,83	3,68
2012	10	1,34	0,63	446,89	210,04	7,53	3,53
2013	9	1,24	0,58	420,10	197,44	7,23	3,39
2014	8	1,14	0,54	393,31	184,85	6,93	3,25
2015	7	1,05	0,49	366,51	172,26	6,63	3,11
2016	6	0,95	0,44	339,72	159,67	6,33	2,97
2019	3	0,85	0,40	312,93	147,07	6,03	2,83
2021	1	0,85	0,40	312,93	147,07	6,03	2,83
2022	0,5	0,75	0,35	286,14	134,48	5,73	2,69

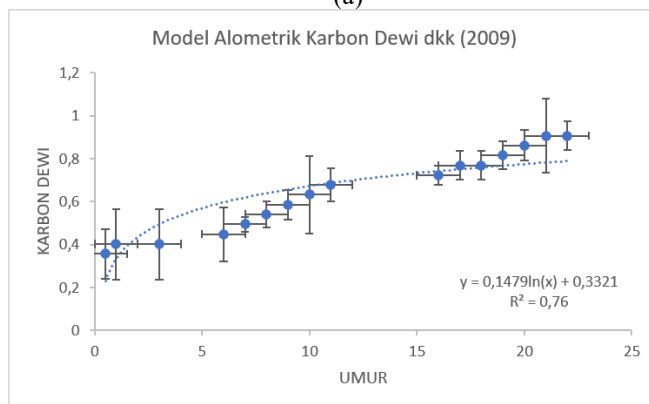
Berdasarkan hasil analisis yang sudah dilakukan, adanya hubungan antara umur tanam dengan AGB mengikuti logaritmik dengan nilai koefisien determinasi r^2 yang relatif sama pada seluruh model. Model [2] menghasilkan persamaan $AGB = 0,3155\ln(x) + 0,7046$ dengan nilai $r^2 = 0,7669$ **Gambar 6a**, sedangkan model [1] menghasilkan persamaan $AGB = 86,373\ln(x) + 271,71$ dengan nilai $r^2 = 0,7651$ **Gambar 6c**. Model [3] menunjukkan persamaan $AGB = 0,9664\ln(x) + 5,5702$ dengan nilai $r^2 = 0,7651$ **Gambar 6e**. Nilai r^2 yang berkisar antara 0,76–0,77 menunjukkan bahwa sekitar 76% variasi biomassa dapat dijelaskan oleh umur tanaman, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model [23][1][3].

Pola yang sama juga terlihat pada estimasi stok karbon, model [2] menghasilkan persamaan $y = 0,1479\ln(x) + 0,3321$ **Gambar 6b**, model [1] $y = 40,595\ln(x) + 127,71$ **Gambar 6d**, dan model [3] $y = 0,4542\ln(x) + 2,618$ **Gambar 6f**, dengan nilai r^2 yang hampir sama 0,765. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan umur tanaman yang diikuti oleh meningkatnya kemampuan tanaman dalam menyimpan karbon, karena stok karbon merupakan proporsi tetap dari biomassa yang terakumulasi selama pertumbuhan tanaman [11] [23].

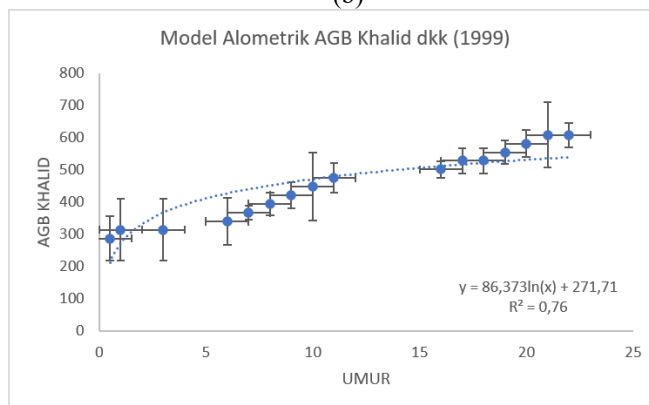
Berdasarkan nilai rata-rata Tab 2 setiap kelompok umur, biomassa dan stok karbon meningkat pada seluruh model. Model [1] menunjukkan peningkatan AGB dari 286,14 menjadi 607,64 ton ha⁻¹, model [3] dari 5,73 menjadi 9,32 ton ha⁻¹, sedangkan model [2] dari 0,75 menjadi 1,93 ton ha⁻¹ pada rentang umur 0,5–22 tahun. Tren yang sama juga terjadi pada stok karbon, mengindikasikan bahwa umur tanaman merupakan faktor utama yang memengaruhi akumulasi biomassa dan karbon pada kelapa sawit [23][1].



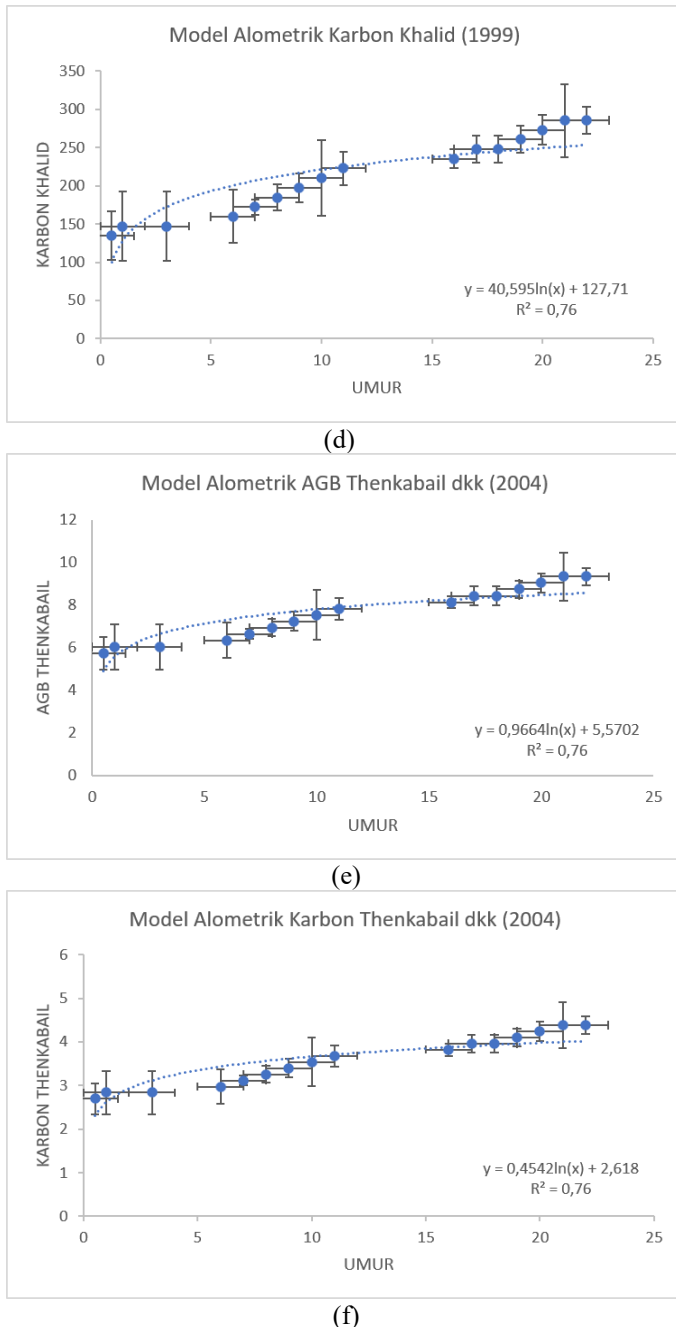
(a)



(b)



(c)



Gambar 6. Model Regresi Logaritmik yang Menunjukkan Hubungan antara Usia Tanaman, AGB, dan Stok Karbon (a) AGB Dewi, (b) Stok Karbon Dewi, (c) AGB Khalid, (d) Stok Karbon Khalid, (e) AGB Thenkabail, (f) Stok Karbon Thenkabail.

3.4 Perbandingan ketiga model alometrik

Ketiga model menunjukkan tren peningkatan biomassa dan stok karbon yang serupa terhadap umur tanaman, namun menghasilkan nilai estimasi yang berbeda. Pada umur 22 tahun, model [1] menghasilkan 607,64 ton ha⁻¹ AGB dan 285,59 ton C ha⁻¹, sedangkan

model [3] menghasilkan 9,33 ton ha⁻¹ AGB dan 4,38 ton C ha⁻¹, sementara model [2] hanya menghasilkan 1,93 ton ha⁻¹ AGB dan 0,91 ton C ha⁻¹. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pemilihan model alometrik sangat memengaruhi besarnya estimasi biomassa dan stok karbon.

Walaupun menghasilkan nilai absolut yang berbeda, ketiga model memiliki nilai r^2 yang hampir sama (0,76), sehingga seluruh model mampu menggambarkan hubungan umur tanaman terhadap biomassa dan karbon dengan tingkat konsistensi yang serupa. Dengan demikian, perbedaan utama ketiga model terletak pada skala estimasi yang dihasilkan oleh masing-masing persamaan alometrik, bukan pada pola hubungan umur terhadap pertumbuhan biomassa.

Perbedaan estimasi dipengaruhi oleh dasar penyusunan masing-masing model. Model [1] dikembangkan dari biomassa per pohon yang dikonversi menjadi biomassa per hektar menggunakan asumsi kepadatan tanam, [3] menggunakan hubungan empiris antara tinggi batang dan biomassa dalam satuan Mg ha⁻¹, sedangkan model [2] menggunakan persamaan regresi linear dengan koefisien yang relatif kecil. Oleh karena itu, penggunaan data tinggi kanopi yang sama dapat menghasilkan estimasi biomassa yang berbeda ketika diterapkan pada model alometrik yang berlainan.

Nilai estimasi biomassa yang jauh lebih tinggi pada model Khalid terutama disebabkan oleh pendekatan penyusunan persamaan alometriknya. Persamaan tersebut dikembangkan dari hasil pengukuran biomassa destruktif pada tingkat individu pohon dan kemudian dikonversi menjadi biomassa per satuan luas menggunakan asumsi kepadatan tanam sekitar 136 pohon ha⁻¹[1]. Konversi tersebut menyebabkan setiap kenaikan tinggi tanaman menghasilkan peningkatan biomassa yang jauh lebih besar dibandingkan model Dewi maupun Thenkabail yang secara langsung memodelkan hubungan empiris antara tinggi tanaman dan biomassa per satuan luas.

Selain itu, model Khalid dikembangkan pada kondisi perkebunan kelapa sawit matang di Malaysia sehingga ketika diterapkan secara nasional menggunakan data tinggi kanopi GCH, model ini cenderung menghasilkan estimasi maksimum yang lebih tinggi. Oleh karena itu, estimasi yang dihasilkan oleh model Khalid harus ditafsirkan dengan hati-hati dan sebaiknya dikonfirmasi dengan data lapangan sebelum menjadi pedoman dalam inventarisasi biomassa nasional.

Analisis standar deviasi menunjukkan bahwa variasi biomassa dan karbon tetap terdapat pada setiap kelompok umur, yang kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan kondisi pertumbuhan tanaman, struktur tajuk, dan variasi tinggi kanopi yang direkam oleh Global Canopy Height (GCH). Meskipun demikian, nilai r^2 yang relatif tinggi menunjukkan bahwa umur tanaman tetap menjadi faktor

dominan dalam menjelaskan variasi biomassa dan stok karbon pada penelitian ini.

Secara keseluruhan, ketiga model alometrik mampu menggambarkan hubungan positif antara umur tanaman dengan biomassa dan stok karbon. Namun, besarnya perbedaan nilai estimasi menunjukkan bahwa pemilihan model alometrik merupakan faktor penting dalam pemetaan biomassa dan stok karbon berbasis Global Canopy Height (GCH). Oleh karena itu, validasi menggunakan data lapangan diperlukan untuk menentukan model yang paling representatif bagi kondisi perkebunan kelapa sawit di Indonesia.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis tiga model alometrik, yaitu [1] [3], untuk memperkirakan biomassa di atas tanah (AGB) dan stok karbon dari perkebunan kelapa sawit di Indonesia, dengan menggunakan data Global Canopy Height (GCH) yang tersedia di Google Earth Engine. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa ketiga model tersebut menunjukkan pola distribusi spasial yang serupa dan juga menunjukkan hubungan logaritmik positif antara usia perkebunan dan akumulasi biomassa, dengan koefisien determinasi r^2 sekitar 0,76. Namun, terdapat perbedaan yang mencolok dalam nilai perkiraan biomassa dan karbon. Model Khalid memberikan perkiraan tertinggi, sedangkan model Dewi menghasilkan perkiraan terendah, dengan model Thenkabail berada di antara keduanya. Variasi ini terutama dipengaruhi oleh perbedaan dalam pengembangan masing-masing persamaan alometrik, termasuk pemilihan dataset kalibrasi, variabel prediktor, dan satuan hasil yang digunakan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa usia perkebunan merupakan faktor krusial dalam memperkirakan biomassa dan akumulasi karbon, serta bahwa pemilihan model alometrik memiliki dampak yang signifikan terhadap akurasi hasil estimasi. Penggabungan data Global Canopy Height dengan Google Earth Engine berhasil memfasilitasi penilaian biomassa dan stok karbon yang cepat, seragam, dan luas di seluruh Indonesia. Namun, validasi lapangan tetap penting untuk mengidentifikasi model alometrik terbaik guna menggambarkan karakteristik perkebunan kelapa sawit Indonesia secara akurat serta meningkatkan keandalan evaluasi biomassa dan stok karbon secara nasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia (Kemendikti Saintek) atas dukungan pendanaan yang diberikan dalam penelitian ini. Terima kasih kepada PT Perkebunan Nusantara III Sei Dadap, Asahan, Sumatera Utara, Dr. Dhimas Wiratmoko PPKS Medan. Kepada LP2M Itenas Bandung, Program Studi Teknik Geodesi

Itenas Bandung, serta Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Khalid, Z. Z. Zin, and J. M. Anderson, "QUANTIFICATION OF OIL PALM BIOMASS AND NUTRIENT VALUE IN A MATURE PLANTATION. II. BELOW-GROUND BIOMASS," *J. Oil Palm Res.*, vol. 11, pp. 63–71, 1999.
- [2] S. Dewi, N. Khasanah, S. Rahayu, A. Ekadinata, and M. van Noordwijk, "Carbon Footprint of Indonesian Palm Oil Production: A Pilot Study," Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF), SEA Regional Office, 2009. Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: <https://apps.worldagroforestry.org/downloads/publications/PDFs/LE09147.PDF>
- [3] P. S. Thenkabail *et al.*, "Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, no. 23, pp. 5447–5472, Dec. 2004, doi: 10.1080/01431160412331291279.
- [4] Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, "OUTLOOK KOMODITAS PERKEBUNAN KELAPA SAWIT," Jakarta, 2024. Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: https://satudata.pertanian.go.id/assets/docs/publikasi/OUTLOOK_KELAPA_SAWIT_2024_FINAL.pdf
- [5] Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, "ANALISIS KINERJA PERDAGANGAN KOMODITAS KELAPA SAWIT," Jakarta, Jul. 2025. Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: https://satudata.pertanian.go.id/assets/docs/publikasi/Buku_Analisis_Kinerja_Perdagangan_Kelapa_Sawit_2025_tte_sign.pdf
- [6] D. J. Murphy, "Carbon Sequestration by Tropical Trees and Crops: A Case Study of Oil Palm," *Agriculture 2024*, Vol. 14, Page 1133, vol. 14, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.3390/AGRICULTURE14071133.
- [7] M. Maisarah, R. Dian, and E. B. Febrianto, "Uji Serapan Karbon (Sekuestrasi) Tanaman Kelapa Sawit sebagai Baseline Pada Trading Karbon," *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 7, no. 1, pp. 17–25, Nov. 2024, doi: 10.38035/rj.v7i1.1160.
- [8] A. Wibowo, "KONVERSI HUTAN MENJADI TANAMAN KELAPA SAWIT PADA LAHAN GAMBUT: IMPLIKASI PERUBAHAN IKLIM DAN KEBIJAKAN (Conversion of Forest to

- Oilpalm Plantation on Peatland: Implication on Climate Change and Policy) ,” *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, vol. 7, pp. 251–260, 2010.
- [9] Syahrudin, *The Potential of Oil Palm and Forest Plantations for Carbon Sequestration on Degraded Land in Indonesia*. Göttingen, Germany: Cuvillier Verlag, 2005.
- [10] Maisarah, I. O. Yosephin, H. F. S. Simbolon, R. Dian, and E. B. Febrianto, “Analisis Serapan Karbon Beneficial Plant pada Lahan Kelapa Sawit Berbasis Life Cycle Assessment (LCA),” *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 8, no. 1, pp. 723–739, 2025.
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use,” Japan, 2006. Accessed: Aug. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- [12] S. Issa, B. Dahy, T. Ksiksi, and N. Saleous, “Allometric equations coupled with remotely sensed variables to estimate carbon stocks in date palms,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 41, no. 18, pp. 7141–7166, 2020.
- [13] M. H. Jusof Khadidi, N. K. Al-Shorgani, E. Ali, E. A. Hamid, and M. S. Kalil, “A New Flocculant-Coagulant with Potential Use for Industrial Wastewater Treatment,” *2nd International Conference on Environment, Energy and Biotechnology*, vol. 51, no. 26, pp. 139–142, 2013, doi: 10.7763/IPCBE.2013.V51.26.
- [14] J. Chave *et al.*, “Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees,” *Glob. Chang. Biol.*, vol. 20, no. 10, pp. 3177–3190, Oct. 2014, doi: 10.1111/gcb.12629.
- [15] K. Lewis *et al.*, “An assessment of oil palm plantation aboveground biomass stocks on tropical peat using destructive and non-destructive methods,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 2230, Feb. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-58982-9.
- [16] P. Migolet, K. Goïta, A. Ngomanda, and A. P. Mekui Biyogo, “Estimation of Aboveground Oil Palm Biomass in a Mature Plantation in the Congo Basin,” *Forests*, vol. 11, no. 5, p. 544, May 2020, doi: 10.3390/f11050544.
- [17] P. Potapov *et al.*, “Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 253, p. 112165, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.rse.2020.112165.
- [18] N. Lang, W. Jetz, K. Schindler, and J. D. Wegner, “A high-resolution canopy height model of the Earth,” *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 7, no. 11, pp. 1778–1789, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41559-023-02206-6.
- [19] J. Zang, W. Ni, and Y. Zhang, “Spatially-explicit mapping annual oil palm heights in peninsular Malaysia combining ICESat-2 and stand age data,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 295, p. 113693, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rse.2023.113693.
- [20] A. Descals, S. Wich, E. Meijaard, D. L. A. Gaveau, S. Peedell, and Z. Szantoi, “High-resolution global map of smallholder and industrial closed-canopy oil palm plantations,” *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, no. 3, pp. 1211–1231, Mar. 2021, doi: 10.5194/essd-13-1211-2021.
- [21] G. P. Asner *et al.*, “A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping,” *Oecologia*, vol. 168, no. 4, pp. 1147–1160, Apr. 2012, doi: 10.1007/s00442-011-2165-z.
- [22] F. N. Syaputra, R. M. Hartati, and B. Yuniasih, “Stok Karbon pada Berbagai Umur Kelapa Sawit Perkebunan Kelapa Sawit,” *AGROISTA : Jurnal Agroteknologi*, vol. 9, no. 2, pp. 82–88, Nov. 2025, doi: 10.55180/agi.v9i2.2208.
- [23] R. H. V. Corley and P. B. Tinker, *The Oil Palm*. Wiley, 2015. doi: 10.1002/9781118953297.



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)