

MODEL ALLOMETRIK BIOMASSA POHON SHOREA LAEVIS (BANGKIRAI) UNTUK Mendukung INVENTARISASI KARBON HUTAN BERKELANJUTAN

Allometric Model Of Shorea Laevis (Bangkirai) Tree Biomass To Support Sustainable Forest Carbon Inventory

Widia Sri Utami^{1*}, Muhammad Rafii Nur Fauzan², Letus Sepsamli², dan Oshlifin Rucmana Saud²,

¹Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia 78115

²Fakultas Kehutanan dan Lingkungan Tropis Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia 75119

ABSTRACT. Accurate carbon stock estimates are crucial for sustainable forest planning to mitigate global climate change in East Kalimantan. One of the natural laboratories with a strategic location near the Capital City of Nusantara (IKN) is KWA Bukit Bangkirai. This location has potential for *Shorea laevis* (Bangkirai) trees, which have high carbon sequestration due to large diameter and height. Allometric models are commonly used, which are general in nature and include tree density, so they cannot describe internal and external factors that affect growth. Tree density usually requires felling trees to obtain value. On the other hand, this can cause carbon sequestration to decrease. One technique for carbon estimation through sustainable carbon inventory requires a technique that does not involve felling trees, namely, using an allometric model that is appropriate for growth conditions and minimizes errors. This study aims to create an allometric model of *Shorea laevis* trees for sustainable carbon inventory. The research method used primary data generated from inventory by measuring diameter (DBH) (cm) and total tree height (m). The inventory was conducted by census on PUP I and PUP II, which have an area of 1 hectare. Biomass and carbon calculations refer to SNI 7724 of 2019. Allometric model was developed using descriptive statistical analysis, outlier testing, linear and nonlinear regression analysis, model fit testing, and model validation testing. The best allometric model for sustainable carbon inventory is power model $Y=0.001 D^{2.476}$, which has an R^2 -Adj (0.986), standard error estimated (0.144), NRMSE (4.413), and MAPE (1.751), meaning that the model can be estimated in excellent category.

Keywords: Allometric Equation; Carbon Inventory; Forest Management; *Shorea laevis*; Trees Biomass

ABSTRAK. Estimasi cadangan karbon yang akurat sangat penting untuk perencanaan hutan berkelanjutan dalam hal mitigasi perubahan iklim global di Kalimantan Timur. Salah satu laboratorium alam yang memiliki lokasi strategis dengan Ibu Kota Nusantara (IKN) yaitu KWA Bukit Bangkirai. Lokasi ini memiliki potensi jenis pohon *Shorea laevis* (Bangkirai) yang memiliki serapan karbon yang tinggi karena memiliki pertumbuhan pohon mencapai diameter dan ketinggian yang besar. Model allometrik biasanya digunakan yaitu bersifat umum dan menyertakan berat jenis pohon sehingga tidak dapat menggambarkan kondisi faktor internal dan eksternal yang memengaruhi pertumbuhannya. Berat jenis pohon biasanya mengharuskan menebang pohon untuk mendapatkan nilainya. Disisi lain dapat menyebabkan serapan karbon menurun. Salah satu teknik untuk estimasi karbon melalui inventarisasi karbon berkelanjutan diperlukan teknik tanpa menebang pohon yaitu menggunakan model allometrik yang sesuai dengan kondisi pertumbuhannya dan meminimalkan kesalahan. Penelitian ini bertujuan untuk untuk membuat model allometrik pohon *Shorea laevis* untuk inventarisasi karbon yang berkelanjutan. Metode penelitian menggunakan data primer yang dihasilkan dari inventarisasi dengan mengukur diameter (DBH) (cm) dan tinggi pohon total (m). Inventarisasi dilakukan secara sensus pada PUP I dan PUP II yang memiliki luas sebesar 1 hektar. Perhitungan biomassa dan karbon mengacu pada SNI 7724 Tahun 2019. Model allometrik yaitu dengan analisis statistik deskriptif, uji pencilan, analisis regresi linier dan non linier, uji kecocokan model, serta uji validasi model. Model allometrik terbaik untuk inventarisasi karbon berkelanjutan yaitu model Power $Y=0,001 D^{2,476}$ memiliki R^2 -Adj (0,986), *standard error estimated* (0,144), NRMSE (4,413), dan MAPE (1,751) artinya model dapat mengestimasi dalam kategori sangat baik.

Kata kunci: Model Allometrik; Inventarisasi Karbon; Pengelolaan Hutan; Bangkirai; Biomassa Pohon;

Penulis untuk korespondensi: surel: widia.sriutami@fahatan.untan.ac.id

PENDAHULUAN

Hutan tropis berfungsi sebagai penyerap CO₂ yang disimpan dalam biomassa vegetasi salah satunya pohon (Utami et al., 2025). Estimasi cadangan karbon yang akurat sangat penting untuk perencanaan hutan berkelanjutan dalam hal mitigasi perubahan iklim global (Utami et al., 2024). Bangkirai (*Shorea laevis*) adalah salah satu jenis pohon yang paling umum di hutan Kalimantan, baik secara ekologis maupun komersial (Toni et al., 2024). Spesies ini dikenal memiliki kerapatan kayu yang tinggi, yang meningkatkan potensi simpanan karbon per pohon (Alpian et al., 2023). Teknik untuk mengestimasi biomassa tanpa penebangan (non-destruktif) yaitu menggunakan model allometrik. Model ini menghubungkan variabel yang sulit diukur seperti volume, biomassa, dan karbon, dengan parameter geometris pohon yang mudah diukur di lapangan seperti diameter dan tinggi (Souwakil et al., 2025). Penggunaan model allometrik yang tepat sangat penting untuk efisiensi inventarisasi hutan dan pelaporan emisi dalam skema FoLU Net Sink (Mosley et al., 2025).

Penelitian sebelumnya telah dilakukan mengenai model allometrik spesies Dipterocarpaceae. Sebagian besar model allometrik yang digunakan saat ini bersifat regional atau umum (*pantropical*) (Ebuy et al., 2011). Model allometrik penelitian sebelumnya bersifat *pantropical* dan sangat sering digunakan karena menyertakan variabel kerapatan kayu (BJ) (Chave et al., 2014). Selain itu dalam skema perdagangan karbon di Kalimantan Timur, penggunaan model Basuki et al., (2009) sering kali lebih disukai oleh auditor karena sifatnya yang lokal (*site-specific*), sehingga tingkat ketidakpastiannya (*uncertainty*) lebih rendah dibandingkan model global. Namun, arsitektur pohon dan rasio biomassa dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan di Bukit Bangkirai, Inhutani I Batu Ampar, seperti mikroklimat dan struktur tanah. Menggunakan model umum pada lokasi tertentu seringkali menghasilkan bias estimasi yang tinggi. Meskipun karakteristik kayu Bangkirai yang sangat padat berbeda dari jenis meranti lainnya, model allometrik yang dikembangkan khusus untuk *Shorea laevis* belum tersedia di wilayah konservasi

dan produksi Bukit Bangkirai khususnya untuk inventarisasi karbon berkelanjutan di Kalimantan Timur.

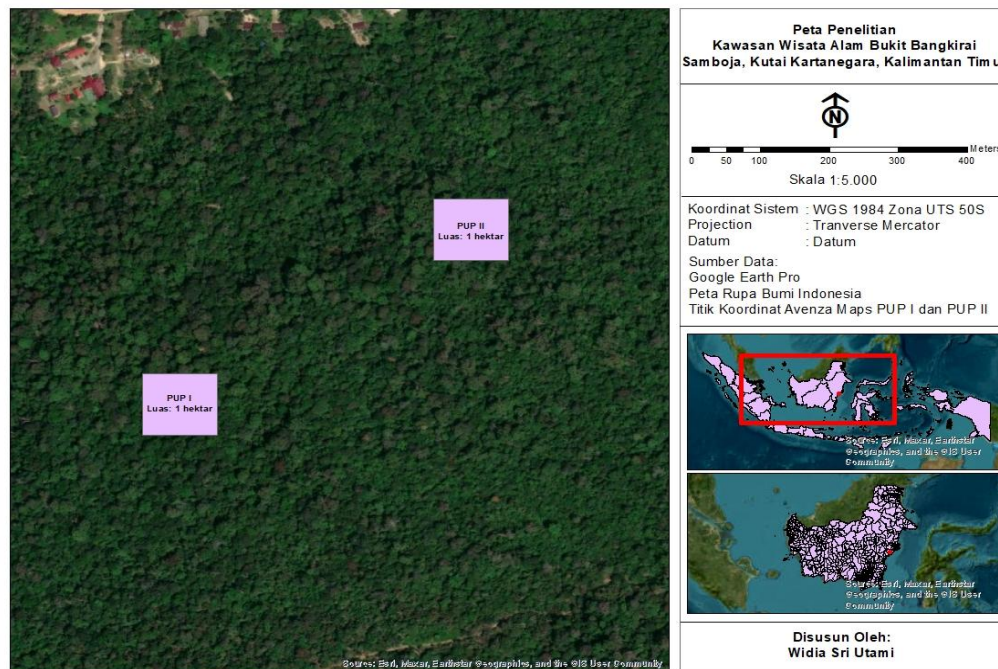
Kalimantan Timur telah menjadi pionir dalam perdagangan karbon di Indonesia, terutama melalui program insentif keuangan untuk pelestarian hutan (Zandri et al., 2025). Kalimantan Timur adalah provinsi pertama di Indonesia yang berhasil menjalankan program *Forest Carbon Partnership Facility-Carbon Fund* (FCPF-CF) dari Bank Dunia (Wiati et al., 2022). Program ini menargetkan penurunan emisi sebesar 22 juta ton CO₂ dari sektor kehutanan dan lahan (Stefannie & Khairin, 2025). Kalimantan Timur telah menerima pembayaran berbasis hasil (*Result-Based Payment*) tahap pertama senilai USD 20,9 juta sekitar Rp300-338 miliar dari total komitmen USD 110 juta (Andalia et al., 2025). Salah satu yang memiliki potensi serapan karbon yaitu PT Inhutani I yang mengelola KWA Bukit Bangkirai. KWA Bukit Bangkirai memiliki manfaat dalam pelestarian hutan dan data potensi serapan karbon sehingga diperlukan instrumen dalam inventarisasi karbon berkelanjutan. Instrumen ini diharapkan mampu menghitung karbon yang akurat guna mendukung strategi manajemen hutan berkelanjutan dan potensi perdagangan karbon di masa depan. Sebagai kawasan hutan hujan tropis yang terjaga, Bukit Bangkirai menyediakan informasi mengenai kemampuan tegakan hutan primer seperti pohon *Shorea laevis* (Bangkirai) dalam menyimpan karbon. Data inventarisasi karbon berkelanjutan dapat dilaporkan ke Sistem Registri Nasional (SRN) (Sitohang, 2025). Laporan SRN ini sebagai bagian dari pencapaian pengurangan emisi provinsi (Andalia et al., 2025). Bukit Bangkirai mengembangkan konsep pelestarian yang dapat menjadi basis data ekonomi karbon di tingkat tapak yaitu program adopsi dimana pengunjung atau perusahaan dapat mengadopsi pohon dengan membayar biaya pemeliharaan tertentu (Rosleine et al., 2023). Setiap pengadopsi mendapatkan informasi perkembangan pohon mereka, yang secara tidak langsung merupakan pencatatan inventarisasi biomassa secara berkala. Selain itu lokasi Bukit Bangkirai strategis dari Ibu Kota Nusantara (IKN) yang menjadikannya laboratorium alam penting. Sehingga diperlukanlah standarisasi inventarisasi karbon berkelanjutan dengan

biometrika melalui pengukuran rutin terhadap diameter (DBH) dan tinggi pohon *Shorea laevis* (Bangkirai) sebagai input utama model allometrik. Dari hasil inventarisasi tersebut sehingga data biomassa yang dihasilkan dapat menggambarkan karakteristik pohon *Shorea laevis* (Bangkirai) sesuai dengan kondisi pertumbuhannya di Bukit Bangkirai. Data inventarisasi pohon *Shorea laevis* (Bangkirai) dapat mengoptimalkan nilai ekonomi melalui jasa lingkungan melalui ekspansi program adopsi data pertumbuhan pohon sebagai sertifikat karbon mikro. Sehingga data pemantauan karbon di Bukit Bangkirai melalui inventarisasi dapat menyediakan data karbon yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model allometrik pohon *Shorea laevis* untuk inventarisasi karbon yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Bukit Bangkirai, PT Inhutani I, Batu Ampar. Bukit Bangkirai adalah kawasan konservasi hutan hujan tropis basah yang dikelola oleh PT Inhutani I (Unit Manajemen Hutan Tanaman Batu Ampar). Kawasan ini merupakan salah satu miniatur hutan alam tropis yang masih asli di Kalimantan Timur dan kini menjadi bagian strategis dari wilayah penyangga Ibu Kota Nusantara (IKN). Penelitian ini dilaksanakan di petak ukur permanen (PUP) I dan II. Peta lokasi penelitian pada Gambar 1. PUP I dan PUP II masing – masing memiliki luas 1 hektar.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian pada PUP I dan PUP II

Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan yaitu Arcmap 10.8, alat tulis, Microsoft Excel, IBM SPSS 26, *tally sheet*, Avenza Maps, GPS Garmin, phiband, meteran, tali rafia, clinometer, dan tongkat 4 meter. Bahan yang digunakan yaitu pohon *Shorea laevis* (Bangkirai) di petak ukur permanen (PUP) I dan II. Pohon sebagai bahan penelitian yaitu memiliki diameter >19 cm.

Metode Pengumpulan Data Penelitian

Data penelitian berupa data primer yang dihasilkan dari inventarisasi pohon menggunakan phiband untuk mendapatkan diameter (DBH) pengukuran mengacu pada (Hinrichs et al., 1998) dan tinggi pohon total (LHK RI, 2021). Data biomassa dan karbon mengacu berdasarkan SNI 7724: 2019 (BSN, 2019). Data yang diinventarisasi hanya data pohon yang berdiameter >19 cm.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi yang akan diinventarisasi untuk titik awal pada PUP I dan PUP II;
2. Melakukan inventarisasi secara sensus dengan luasan PUP I dan II masing – masing adalah 1 hektar dengan menggunakan plot persegi berukuran 100 m x 100 m;
3. Mengukur diameter (DBH) dan tinggi total;
4. Mencatat pada tally sheet; 5. Kebutuhan data menyesuaikan SNI 7724 Tahun 2019.

Analisis Data Penelitian

Analisis data untuk mengetahui kelas diameter pohon *Shorea laevis* (Bangkirai) dengan menghitung nilai minimum, nilai maksimum, jumlah pohon, jangkauan data, kelas interval, panjang interval, serta frekuensi kelas diameter menggunakan Microsoft Excel dan rumus sebagai berikut (Niyayesh & Uygun, 2025; Nurhaswinda et al., 2025; Li et al., 2024)

Min = menggunakan fungsi = Min (sel) pada Microsoft Excel

Max = menggunakan fungsi = Max (sel) pada Microsoft Excel

N = menggunakan fungsi = $Count$ (sel) pada Microsoft Excel

$R = Max - Min$

$KI = 1 + (3,3 * \log (n))$

$PKI = 1 + \frac{R}{KI}$

Keterangan:

Min adalah nilai minimum; Max adalah nilai maksimum; N adalah jumlah pohon *Shorea laevis* (Bangkirai); R adalah rentang atau jangkauan data; KI adalah kelas interval; dan PKI adalah panjang kelas interval.

Analisis data untuk menghitung biomassa dan karbon mengacu pada SNI 7724 Tahun 2019 (BSN, 2019). Data analisis berupa perhitungan volume pohon berdiri (*volume standing stock*) dalam satuan m^3 (Hinrichs et al., 1998) serta perhitungan tinggi total mengacu pada (LHK RI, 2021) dalam satuan meter. Rumus sebagai berikut.

$$t = \frac{H_{top} - H_{base}}{H_{pole} - H_{base}} \times T$$

$$V_{pb} = \frac{1}{4} \pi \times D^2 \times t \times f$$

$$B = V_{pb} \times WD \times BEF$$

$$C_p = B \times \% C \text{ Organik}$$

$$C_t = \frac{C_x}{1000} \times \frac{10000}{LPUP}$$

Keterangan:

t adalah tinggi total pohon (m); T adalah tinggi tongkat yang digunakan yaitu 4 meter; V_{pb} adalah volume pohon berdiri (m^3); D adalah diameter pohon (DBH) (cm); f adalah faktor koreksi karbon SNI 7724 2019 yaitu 0,6; B adalah biomassa (kg); V_{pb} adalah volume pohon berdiri (m^3); WD adalah *wood density* atau berat jenis; BEF adalah *biomass expansion factor* yaitu 1,3 – 1,5; C_p adalah karbon pohon; $\%C$ organik adalah 0,47% (SNI 7724 2019); C_t adalah karbon per hektar; C_x adalah total karbon pada masing – masing PUP; $LPUP$ adalah luas masing – masing PUP yaitu 1 hektar.

Analisis data untuk pengembangan model allometrik yaitu menggunakan perangkat lunak IBM SPSS 26 untuk analisis statistik deskriptif untuk mengetahui data penelitian dalam kategori baik melalui perbandingan nilai rata – rata dengan standar deviasi (Bahaludin et al., 2025). Data tidak memiliki bias yaitu nilai standar deviasi harus memiliki nilai lebih kecil dari rata – rata (Utami et al., 2024; Suhartati et al., 2025). Kemudian melakukan uji *box plot (outlier)* untuk mengetahui apakah data memiliki bias atau *error* (Utami et al., 2025). Data pencilan biasanya ditandai bentuk (o) atau (*) (Mazarei et al., 2025). Uji kecocokan model dengan Uji F dan uji T untuk mengetahui pengaruh model terhadap koefisien dan konstanta (Austin & Yirdaw, 2025) pada model allometrik juga dilakukan dengan menggunakan signifikansi nilai $\alpha=0,05$ yang artinya data memiliki tingkat kepercayaan sebesar 95% dengan kesalahan yang dimiliki sebesar 5% (Maponga et al., 2025) dengan menggunakan perangkat lunak. Pengembangan model allometrik juga perlu dilakukan uji validasi model dengan menggunakan NRMSE (*Normalized Root Mean Square Error*) dan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) sehingga semakin akurat dan model dapat menggambarkan sesuai keadaan

pertumbuhannya. NRMSE memiliki tujuan untuk memungkinkan perbandingan akurasi antara model yang bekerja pada dataset dengan skala atau satuan yang berbeda (Zhang et al., 2023). MAPE memiliki tujuan untuk memberikan gambaran seberapa besar penyimpangan prediksi terhadap nilai aktualnya secara relatif (Ghazanfari et al., 2025).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (At - Ft)^2}{n}}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{VAR}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{At - Ft}{At} \right|$$

Keterangan:

RMSE adalah *root means square error*; At adalah data aktual, Ft adalah data estimasi atau prediksi; n adalah jumlah pohon; NRMSE adalah bentuk modifikasi dari RMSE (*Root Mean Squared Error*) yang telah dinormalisasi agar nilainya menjadi tidak bersatuan; BAR adalah rata – rata biomassa aktual; dan MAPE adalah metrik yang mengukur rata-rata selisih absolut antara nilai prediksi dan nilai aktual, yang kemudian dinyatakan dalam bentuk persentase.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Data distribusi kelas diameter menunjukkan variasi ukuran pohon, yang diinventarisasi untuk menghitung estimasi biomassa dan simpanan karbon merupakan indikator penting dalam penyusunan model alometrik. Tabel 1 menjelaskan bahwa sebaran diameter pohon *Shorea laevis* di lokasi penelitian menunjukkan pola yang mendominasi pada kelas diameter kecil hingga menengah. Diameter pohon terbesar adalah 40-59 cm (22 pohon) dan 20-39 cm (20 pohon). Pohon yang mendominasi adalah pada fase pertumbuhan aktif. Pohon kelas ini memiliki laju pertumbuhan yang relatif cepat dalam konteks akumulasi karbon, sehingga berperan penting dalam penyerapan karbon berkelanjutan. Jumlah frekuensi yang signifikan menurun seiring dengan pertumbuhan pola kurva J terbalik. Meskipun jumlahnya sedikit, pohon dengan diameter besar menyimpan cadangan karbon yang jauh lebih besar secara individu daripada pohon kecil. Hanya ada tiga pohon

dengan diameter 100-119 cm dan tidak ada yang memiliki diameter di atas 120 cm. Model alometrik yang dihasilkan dalam penelitian ini memiliki tingkat akurasi tinggi pada rentang diameter 20 hingga 50 cm, karena memiliki pohon sebanyak 42 yang cukup besar pada rentang tersebut.

Distribusi diameter yang didominasi oleh kelas kecil hingga menengah (20-59 cm) menunjukkan bahwa hutan tersebut sedang dalam fase pertumbuhan aktif. Inventarisasi berkelanjutan mengandalkan pohon-pohon kecil ini untuk menggantikan posisi pohon tua yang nantinya akan mati atau ditebang. Distribusi yang mendominasi di kelas dengan diameter kecil sampai menengah menjamin regenerasi tegakan. Pohon dengan diameter besar (100-119 cm) memiliki peran sebagai penyimpan karbon utama. Walaupun jumlahnya sedikit yaitu 3 pohon, massa karbon yang disimpan dalam satu pohon besar bisa setara dengan puluhan pohon kecil.

Pengelola hutan dapat memprediksi potensi simpanan karbon di masa depan saat kelas diameter rendah ini beralih ke kelas diameter yang lebih tinggi dengan menggunakan model alometrik yang tepat. Dari perspektif inventarisasi karbon berkelanjutan, struktur ini sangat menguntungkan karena hutan memiliki serapan karbon masa depan yang besar. Selain itu distribusi kelas diameter dapat menjadi indikator kesehatan hutan dan cadangan karbon hutan (Hartoyo et al., 2025). Kebijakan pengelolaan hutan harus memberikan status perlindungan khusus untuk pohon-pohon besar ini karena hanya 3 pohon dalam kategori dengan diameter di atas 100 cm ditemukan berdasarkan hasil inventarisasi. Pohon-pohon besar ini akan melepaskan emisi karbon dalam jumlah besar jika ditebang, menjadikannya reservoir karbon yang tidak dapat dihilangkan dalam skema perdagangan karbon atau pembayaran jasa lingkungan (Kigomo et al., 2025). Kebijakan inventarisasi karbon berkelanjutan tidak boleh hanya bersifat sekali jalan. Diperlukan kebijakan monitoring berkala setiap 2-5 tahun menggunakan Plot Ukur Permanen (PUP) untuk memantau pergeseran kelas diameter. Data ini akan menjadi dasar perhitungan *gain and loss* karbon yang dinamis, yang merupakan syarat utama dalam prinsip *Transparency, Accuracy, Completeness, Comparability, and Consistency* (TACCC) pada standar internasional.

Tabel 1. Distribusi kelas diameter pohon *Shorea laevis* (Bangkirai)

No.	Kelas Diameter	Frekuensi
1	20-39	20
2	40-59	22
3	60-79	8
4	80-99	2
5	100-119	3
6	120-139	0

Integrasi data distribusi kelas diameter Tabel 1 dan estimasi karbon pada Tabel 2 menjelaskan bahwa akumulasi karbon pada pohon *Shorea laevis* tidak berbanding lurus dengan jumlah individu melainkan akumulasi karbon sangat dipengaruhi oleh distribusi kelas diameter. Perbandingan antara PUP I dan PUP II di mana PUP I yang memiliki jumlah pohon lebih sedikit (26 individu) justru menyimpan cadangan karbon dua kali lipat lebih besar (100,130 kg) dibandingkan PUP 2 (50,049 kg dengan 31 individu). Hal ini membuktikan bahwa secara empiris pohon – pohon pada kelas diameter besar (100 – 119 cm) dengan frekuensi yang rendah pada Tabel 1 memiliki kontribusi yang signifikan terhadap total stok karbon dibandingkan dengan populasi pohon kecil yang memiliki frekuensi banyak. Secara biologis karena adanya peningkatan volume batang yang eksponensial seiring bertambahnya diameter, yang kemudian dikonversi menjadi biomassa melalui model alometrik (Lee & Lee, 2025). Dalam konteks inventarisasi karbon berkelanjutan harus ada strategi upaya dalam perlindungan pohon – pohon berdiameter besar dengan upaya menjaga regenerasi pohon pada kelas diameter kecil untuk menjamin ketersediaan cadangan karbon di masa depan (Ogana et al., 2025).

Tabel 2 menunjukkan bahwa PUP I memiliki efisiensi penyimpanan karbon yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan PUP II.

Total biomassa PUP II (106,487 kg) hampir dua kali lipat biomassa PUP I (213,043 kg), karena PUP I memiliki dimensi diameter (DBH) dan tinggi pohon yang lebih besar. Tabel 2 menunjukkan bahwa volume pohon berdiri pada PUP I (238,544 m³) lebih besar dibanding dengan PUP II (119,233 m³) karena diameter pohon yang besar akan mempengaruhi volume pohon berdiri. Volume pohon berdiri mengacu pada perhitungan SNI 7724: 2019 yaitu hasil perkalian dari diameter yang dikuadratkan dengan tinggi total yang telah dikonversi ke dalam meter kubik (BSN, 2019). Perhitungan tinggi total ini mengacu pada LHK RI, (2021) dalam satuan meter. Semakin besar diameter pohon dan tinggi total pohon maka akan semakin besar pula volume kayu yang dihasilkan. Tinggi pohon memiliki hubungan yang bersifat linear, tinggi pohon bertambah dua kali lipat dengan diameter pohonnya tetap sehingga volume pohon akan bertambah sekitar dua kali lipat. Perhitungan volume juga menggunakan faktor bentuk yang disesuaikan dengan SNI 7724: 2019 untuk karbon yaitu sebesar 0,6. Faktor bentuk ini untuk mengoreksi bahwa bentuk pohon tidak berbentuk silinder sempurna. Tinggi pohon total dan diameter pohon yang lebih besar memiliki efisiensi penyimpanan karbon yang dominan dibandingkan dengan kerapatan tegakan secara kuantitas pada PUP II. Rata – rata kandungan karbon per hektar yaitu sebesar 0,075 ton.

Tabel 2. Estimasi biomassa dan karbon pohon *Shorea laevis* (Bangkirai)

PUP	Jumlah pohon	Volume Pohon Berdiri (m ³)	Total Biomassa (Kg)	Karbon Per Plot (Kg)	Karbon per ha (Ton)
I	26	238,544	213,043	100,130	0,100
II	31	119,233	106,487	50,049	0,050
Rata - Rata				75,090	0,075

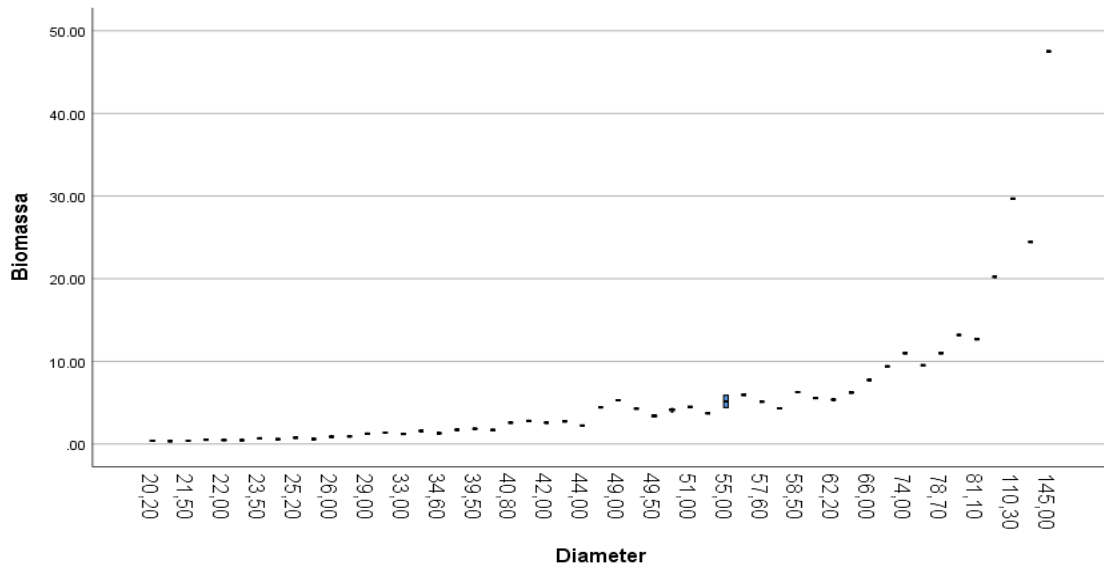
Analisis terhadap karakteristik fisik dan akumulasi massa pohon sangat krusial dalam menyusun model alometrik yang representatif. Data statistik deskriptif pada Tabel 3 menunjukkan rentang dimensi pohon yang sangat luas. Pohon sampel memiliki diameter minimum 20,20 cm dan maksimum mencapai 145,00 cm. Selain itu tinggi total minimum 19,20 m dan maksimum mencapai 58 m. Rentang yang lebar ini sangat ideal untuk penyusunan model alometrik karena mencakup berbagai fase pertumbuhan pohon. Terdapat variasi biomassa yang sangat kontras, dengan nilai minimum 0,340 kg hingga maksimum 47.510 kg per pohon. Rendahnya nilai standar deviasi pada diameter (25,690) dibandingkan rata – rata (49,691) bahwa distribusi diameter merata. Namun tingginya nilai standar deviasi pada biomassa (8,097) dibandingkan rata-ratanya (5,606) mengonfirmasi bahwa distribusi biomassa tidak merata dan sangat dipengaruhi oleh keberadaan pohon-pohon berdiameter besar yang memiliki frekuensi 3 pohon. Mengingat tingginya standar deviasi biomassa (8,097), penggunaan model alometrik spesifik *Shorea laevis* sangat direkomendasikan untuk menggantikan model umum. Hal ini penting agar estimasi karbon pada tingkat tapak tidak mengalami

bias yang dapat merugikan dalam skema insentif karbon.

Keakuratan sebuah model alometrik sangat bergantung pada kualitas data input yang mencakup keragaman dimensi pohon di lapangan (Lee & Lee, 2025). Analisis statistik deskriptif dan uji *boxplot* memberikan gambaran kritis mengenai karakteristik biomassa *Shorea laevis*. Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan diameter tidak diikuti dengan peningkatan biomassa secara linear, melainkan eksponensial (Utami et al., 2025). Hal ini terlihat dari titik-titik data yang mulai menanjak tajam setelah melewati diameter 80 cm. Terdapat beberapa titik data yang berada jauh di atas sebaran utama, terutama pada diameter 110,30 cm dan 145,00 cm dengan biomassa mendekati dan mencapai 50.000 kg. Dalam pemodelan alometrik biomassa hutan, data pencilan dari pohon-pohon diameter besar ini tidak seharusnya dibuang (Lee & Lee, 2025). Keberadaan pohon – pohon itu justru sangat krusial karena merepresentasikan simpanan karbon terbesar di hutan primer. Tanpa data pencilan atas ini, model alometrik akan cenderung *underestimate* dalam mengestimasi cadangan karbon hutan berkelanjutan (Iacobucci et al., 2025).

Tabel 3. Analisis statistik deskriptif pohon *Shorea laevis* (Bangkirai)

	Statistik Deskriptif				
	Jumlah pohon	Minimum	Maksimum	Rata - Rata	Standar Deviasi
Diameter	57	20,20	145,00	49,691	25,690
Biomassa	57	0,340	47,510	5,606	8,097
Tinggi Total	57	19,20	58,00	35,209	9,380
Jumlah data valid	57				

Gambar 2. Hasil uji *boxplot* (*outlier*) untuk data pencilan

Model alometrik yang disusun menggunakan rentang data sehingga dapat menjadi alat yang sangat akurat untuk memonitor dinamika penyerapan karbon seiring dengan bertambahnya umur dan ukuran pohon-pohon tersebut di masa mendatang (Pebriandi, Suhardianto, 2025). Penentuan model alometrik yang tepat merupakan tahapan krusial dalam inventarisasi karbon berkelanjutan (Lee & Lee, 2025) karena model tersebut akan menjadi instrumen utama dalam mengonversi data diameter hasil survei lapangan menjadi nilai stok karbon (Greenspoon et al., 2025). Berdasarkan hasil pengujian 11 jenis model pada Tabel 4 model power sebagai model terbaik untuk menduga biomassa *Shorea laevis*. Model ini memiliki koefisien determinasi (Adj-R^2) bernilai 0,986 yang berarti variasi biomassa dapat dijelaskan oleh variabel diameter sebesar 98,6% dan sisanya 1,4% dijelaskan oleh variabel lain. Akurasi tinggi karena memiliki nilai *Standard Error Estimated* terkecil yaitu 0,144 dan *Residual Sum of Squares* terendah sebesar 1,134 dibandingkan model lainnya. Nilai F hitung menunjukkan variabel diameter sangat nyata dalam mempengaruhi estimasi biomassa.

Secara biologis model Power paling sesuai dengan karakteristik pertumbuhan pohon Bangkirai yang ditunjukkan pada Gambar 2. Hubungan diameter dan biomassa memang bersifat non-linear karena seiring bertambahnya diameter sehingga massa kayu tidak bertambah secara konstan (linear), melainkan meningkat seiring bertambahnya volume batang dan kerapatan kayu (Zhu et al., 2025). Hal ini terlihat dari nilai pangkat (2,476) dalam persamaan, yang mencerminkan laju akumulasi biomassa yang masif pada diameter besar. Meskipun model *Quadratic* dan *Cubic* memiliki nilai R^2 sedikit lebih tinggi (0,989), model Power tetap menjadi pilihan utama karena struktur persamaannya yang lebih sederhana dan konsisten secara biologis (Utami et al., 2025). Model polinomial derajat tinggi seperti *Cubic* seringkali mengalami risiko *overfitting* yang dapat menyebabkan estimasi yang tidak masuk akal jika diterapkan pada rentang diameter di luar data sampel. Risiko *overfitting* adalah model menjadi terlalu spesifik pada data inventarisasi dan gagal memprediksi data baru dengan akurat (Cosenza et al., 2025).

Tabel 4. Pengembangan model allometrik pohon *Shorea laevis* (Bangkirai)

Jenis Model Allometrik	Persamaan	R ² -Adj	Std Error Estimated	Residual Sum of Squares	F-Hit	Sig.
Linier	Y= -8,917 + 0,292D	0,857	3,058	414,378	337,562	0,000
Logaritma	Y= -43,509 + 12,969 LnD	0,608	5,068	1412,837	87,922	0,000
Inverse	Y= 16,266 -419,699/D	0,385	6,351	2218,352	36,025	0,000
Quadratic	Y = 1,116 -0,087D + 0.03D ²	0,989	0,840	38,084	2575,869	0,000
Cubic	Y = - 0,00000000006D ³ + 0.003D ² - 0.001D + 1,132	0,989	0,848	38,083	1685,458	0,000
Compound	Y=0,301 1,046 ^D	0,885	0,414	9,440	431,143	0,000
Power	Y= 0.001D ^{2.476}	0,986	0,144	1,134	3990,449	0,000
Sigmoid	Y = e ^{3,498 - 97,449/D}	0,938	0,305	5,108	843,521	0,000
Growth	Y= e ^{-1,200 0.045D}	0,885	0,414	9,440	431,143	0,000
Exponential	Y= 0,301 (e ^{0.045D})	0,885	0,414	9,440	431,143	0,000
Logistic	Y= (1/u +3,759 0.953 ^D) ⁻¹	0,916	0,377	7,820	613,090	0,000

Keterangan: D adalah diameter (DBH); Y adalah biomassa di atas permukaan tanah pohon *Shorea laevis* (Bangkirai); Ln adalah logaritma; dan u adalah batas untuk model logistik yaitu 95.

Model alometrik power pada Tabel 4 dapat digunakan untuk pohon di atas 100 cm, yang memastikan bahwa itu akurat untuk pohon muda, serta dapat mengestimasi potensi biomassa pada pohon berdiameter besar. Pohon berdiameter besar merupakan penyimpan karbon utama di hutan primer. Distribusi pada Tabel 1 memastikan bahwa estimasi karbon dalam inventarisasi di Bukit Bangkirai memiliki tingkat kesalahan (*error*) yang minimal. Validasi model allometrik power untuk *Shorea laevis* (Bangkirai) merupakan cara menentukan model tersebut dapat menggambarkan sesuai kondisi pertumbuhannya. Tabel 5 menjelaskan nilai NRMSE yang rendah (4,413) menunjukkan

bahwa selisih antara nilai biomassa aktual di lapangan dengan nilai biomassa hasil prediksi model sangat kecil. Secara statistik, semakin mendekati nol nilai NRMSE, semakin tinggi presisi model tersebut dalam menggambarkan kondisi nyata. Sedangkan MAPE sebesar 1,751% artinya model ini memiliki tingkat akurasi dapat mengestimasi mencapai 98,249%. Kriteria ini menegaskan bahwa model tersebut memiliki tingkat ketidakpastian yang sangat rendah (Dzulfiqar et al., 2025). Validasi model ini sekaligus memperkuat temuan pada Tabel 4, di mana model Power memiliki *Standard Error Estimated* terkecil (0,144).

Tabel 5. Validasi model allometrik power dengan NRMSE dan MAPE

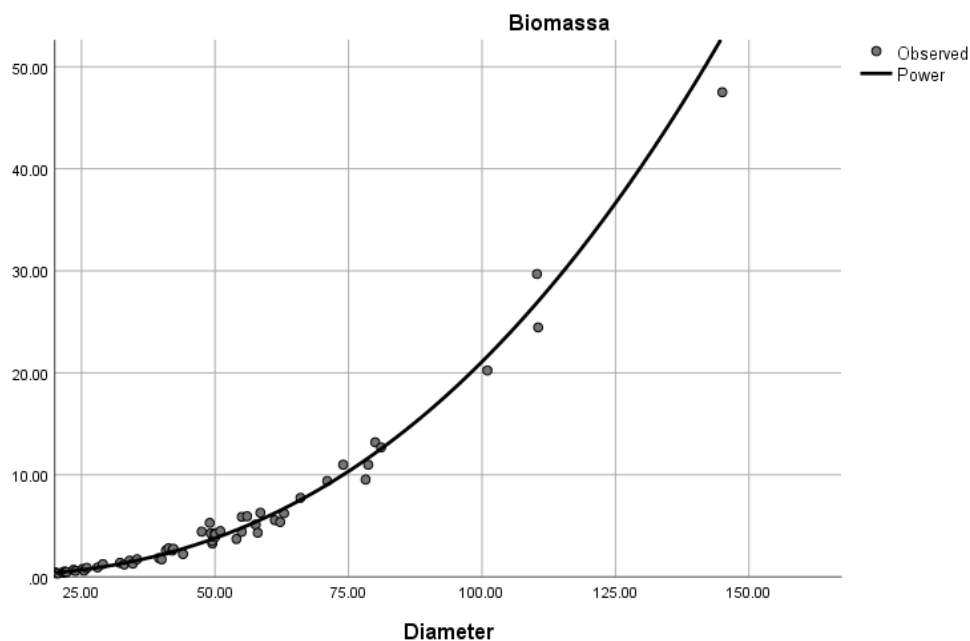
Model allometrik	Persamaan	NRMSE	MAPE	Kriteria
Power	Y= 0.001D ^{2.476}	4,413	1,751	Sangat Baik

Gambar 3 menyajikan visualisasi hubungan antara diameter setinggi dada (DBH) sebagai variabel independen dengan total biomassa pohon *Shorea laevis* sebagai variabel dependen. Grafik berbentuk J – terbalik ditunjukkan pada rentang diameter kecil hingga menengah (25–75 cm), peningkatan biomassa terjadi secara perlahan dan cenderung stabil. Setelah melewati diameter 75 cm, kurva menunjukkan lonjakan

akumulasi iomassa yang sangat signifikan. Hal ini secara biologis merepresentasikan fase di mana pohon Bangkirai telah mencapai kematangan tajuk dan volume batang yang masif. Hutan yang berkelanjutan secara ideal memiliki distribusi diameter berbentuk kurva J-terbalik yang artinya inventarisasi karbon di Bukit Bangkirai dinyatakan berkelanjutan (Istomo et al., 2025). Hal ini menjamin bahwa proses

sekuestrasi karbon tidak akan berhenti karena selalu ada regenerasi pohon yang masuk dalam kelas distribusi diameter yang lebih besar untuk menggantikan karbon yang hilang secara alami (Matakupan et al., 2025). Kesesuaian ini membuktikan bahwa model tersebut memiliki kemampuan prediksi yang sangat konsisten, baik untuk pohon

berukuran kecil maupun pohon-pohon besar yang menjadi pencila (*outliers*) di atas diameter 100 cm. Pola kurva yang terus naik hingga diameter 150 cm menjamin bahwa model ini masih sangat reliabel untuk digunakan pada hutan primer dengan tegakan pohon-pohon tua.



Gambar 3. Grafik hubungan antara diameter (DBH) dengan biomassa pohon *Shorea laevis* (Bangkirai)

Diameter batang tidak hanya mencerminkan ukuran kayu yang terlihat, tetapi juga merupakan proksi dari keseluruhan sistem biologis pohon (Yang et al., 2025). Semakin besar diameter batang, semakin besar pula kemampuan mekanis pohon untuk menopang tajuk yang lebar dan berat. Tajuk yang besar mengandung lebih banyak daun dan cabang, yang berkontribusi signifikan terhadap total biomassa di atas permukaan tanah (Bhebhe et al., 2025). Menurut teori Pipe Model (Shinozaki et al., 1964) terdapat hubungan konstan antara luas penampang batang (diameter) dengan luas jaringan pembuluh (xilem) yang menyuplai air ke daun. Batang yang lebih besar berarti memiliki sistem transportasi yang lebih luas untuk mendukung pertumbuhan jaringan baru, yang secara langsung meningkatkan akumulasi biomassa secara berkelanjutan. Secara biologis, diameter batang yang besar menunjukkan sistem perakaran yang kuat di bawah tanah untuk menjaga stabilitas pohon.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Pohon *Shorea laevis* memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang signifikan namun sangat dipengaruhi oleh struktur diameter individu dibandingkan kerapatan jumlah pohon. Model allometrik terbaik yaitu model power pada rentang diameter 20,20 hingga 145,00 cm. Model ini memiliki tingkat akurasi sangat tinggi yang memiliki nilai NRMSE dan MAPE dibawah 10% yaitu dalam kategori sangat baik untuk mengestimasi biomassa dalam mendukung inventarisasi karbon berkelanjutan. Total biomassa PUP II (106,487 kg) memiliki pohon 31 pohon hampir dua kali lipat biomassa PUP I (213,043 kg) memiliki pohon 26 pohon. Rata – rata kandungan karbon per hektar yaitu sebesar 0,075 ton. Disarankan bagi pengelola hutan atau pemegang izin pemanfaatan hutan untuk menggunakan model alometrik spesifik jenis ini dalam pelaporan stok karbon guna meminimalkan

ketidakpastian data dibandingkan menggunakan model umum.

Saran

Bagi pengelola hutan atau pemegang izin pemanfaatan hutan disarankan untuk menggunakan model alometrik spesifik jenis ini dalam pelaporan stok karbon guna meminimalkan ketidakpastian data dibandingkan menggunakan model umum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Manajemen PT INHUTANI I yang telah memberikan izin akses untuk melakukan penelitian pada PUP I dan PUP II sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar. Tak lupa kepada staf dan personel lapangan KWA Bukit Bangkirai atas pendampingan teknis di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alpian, Sianipar, D., Koroh, D. N., Yanciluk, Nuwa, Supriyati, W., Surasana, I. N., Luhan, G., Wanasetya, A. (2023). Kualitas Briket Arang Serbuk Limbah Bangkirai, Rengas dan Agathis. *Jurnal Daun*, 10(2), 184–204.
- Andalia, C. I., Zainurrahmi, S., & Bangun, B. (2025). Paris Agreement Hingga NDC : Pelaksanaan Pembiayaan Iklim FCPF dalam Mendukung REDD + di Kalimantan Timur Paris Agreement to NDC : Implementation of FCPF Climate Financing in Support of REDD + in East Kalimantan. *KINERJA: Jurnal Ekonomi Dan Manajemen*, 22(4), 470–486.
- Austin, D & Yirdaw, E. (2025). Models for Predicting Tree Diameter at Breast Height from Over and Under Bark Diameter of Stump in Eucalyptus camaldulensis Plantations. *Research Square*, 1–47.
- Badan Standarisasi Nasional, B. (2019). Pengukuran dan Perhitungan Cadangan Karbon Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Berbasis Lahan (land-based carbon accounting). *Badan Standarisasi Nasional, SNI 7724:2*
- Bahaludin, H., Abdullah, M. H., Hussin, M., & Laham, M. F. (2025). *Analysing Malaysian Technology Sector during COVID-19: A Minimum Spanning Tree Approach*. 2(2), 210–220.
- Basuki, T. M., Laake, P. E. Van, Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2009). Forest Ecology and Management Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257(257), 1684–1694. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>
- Bhebhe, Z. M., Liu, X., Zhang, Z., & Paudyal, D. R. (2025). Estimation of Tree Diameter at Breast Height (DBH) and Biomass from Allometric Models Using LiDAR Data: A Case of the Lake Broadwater Forest in Southeast Queensland , Australia. *Remote Sensing*, 17(2523), 1–27.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Cosenza, D N, Saarela, S, Strunk, J, Korhonen, L, Maltamo, M, P. P. (2025). Effects of model-overfit on model-assisted forest inventory in boreal forests with remote sensing data. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 98, 507–521.
- Dzulfiqar, A F, Ferry, A S, S. I. (2025). Metode Statistik dan Machine Learning untuk Prediksi Harga Bahan Pokok Di Jawa Timur. *The Indonesian Journal of Computer Science*, 14(1), 1150–1161.
- Ebuy, A. J., Lokombe, J. P., Ponette, Q., Sonwa, D., Picard, N., Journal, S., Science, F., April, N., Science, F., Ebuy, J., Lokombe, J. P., & Ponette, Q. (2011). Allometric Equation For Predicting Biomass Of Three Tree Species. *Journal of Tropical Forest Science*, 23(2), 125–132.

- Ghazanfari, N., Motlagh, A., Taki, M., Falah, F., Alizadeh, B., Tabatabaei, F., & Vasiee, A. (2025). Biocatalysis and Agricultural Biotechnology Enhancing β -carotene and biomass production in *Blakeslea trispora* using Plackett – Burman design screening and predictive modeling. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 70(November), 103845. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103845>
- Greenspoon, L., Ramot, N., Moran, U., Roll, U., Phillips, R., Noor, E., & Milo, R. (2025). The global biomass of mammals since 1850. *Nature Communications*, 1, 107.
- Hartoyo, A P P, Setiajiati, L K F, Wijayanto, A K, Rifana, H Z, MAdani, H N, Rahmawati, R, Siregar, U. J. (2025). Estimating Vegetation Density Dynamics, Tree Diversity, and Carbon Stock in the Agroforestry System of the Community Forest in Bogor Regency, Indonesia. *Jurnal Sylva Lestari*, 13(January), 120–144.
- Hinrichs A, Ulbricht R, Soedirman S, Solichin. (1998). Panduan survey orientasi di areal HPH untuk pengelolaan hutan lestari. Sustainable Forest Management Project – GTZ. Samarinda.
- Iacobucci, D, Roman, S, Moon, S, Rouzies, D. (2025). RESEARCH ARTICLE A Tutorial on What to Do With Skewness , Kurtosis , and Outliers : New Insights to Help Scholars Conduct and Defend Their Research. *Psychology & Marketing*, 42, 1398–1414. <https://doi.org/10.1002/mar.22187>
- Istomo, Hartoyo, A. P. P., Fitriansyah, M. R. (2025). Korelasi Cadangan Karbon Terhadap Kerapatan Vegetasi Berdasarkan NDVI Di Zona Rehabilitasi Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Journal of Tropical Silviculture*, 16(01), 1–8.
- Kigomo, J. N., Mukovi, J., Bor, N., Leshaye, B., Cheruiyot, T., & Kuria, M. (2025). Advances in Bamboo Science Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks of on-farm bamboo species in the agricultural landscapes of Kenya. *Advances in Bamboo Science*, 11(March), 100139. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2025.100139>
- LHK RI, K. (2021). Permen LHK No.04 Tahun 2021. *Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia*, 3, 1–319
- Lee, S., & Lee, M. J. (2025). *Forest Aboveground Biomass Estimation by the Integration of GEDI LiDAR and National Forest Inventory Data in South Korea*. 41, 407–419.
- Li, Y., Li, J., & Wei, L. (2024). Stable reverse J - shaped diameter distribution occurs in an old - growth karst forest. *Journal of Forestry Research*, 35(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01763-1>
- Maponga, T. S., Ndagurwa, H. G. T., & Witkowski, E. T. F. (2025). South African Journal of Botany Functional traits of *Ziziphus mucronata* below mistletoe-infected trees in a semi-arid African savanna. *South African Journal of Botany*, 176, 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.11.032>
- Matakupan, D. C. E., Holle, Y., Moeljono, S., Pascasarjana, M., Lingkungan, I., Papua, U., Pascasarjana, P., Papua, U., Gunung, J., Amban, S., & Barat, P. (2025). Analisis komposisi dan struktur vegetasi terhadap upaya konservasi burung cenderawasih di Kampung Nij Kabupaten Manokwari Selatan. *CASSOWARY*, 8(2), 29–39.
- Mazarei, A., Sousa, R., Ferreira, H. M., & Mendes-moreira, J. (2025). Online boxplot derived outlier detection. *International Journal of Data Science and Analytics*, 19(1), 83–97. <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00559-0>
- Mosley, F., Niemi, J., & Soimakallio, S. (2025). Applying the greenhouse gas inventory calculation approach to predict the forest carbon sink. *Carbon Balance and Management*, 20(16), 1–10.
- Niyayesh, M., & Uygun, Y. (2025). Predicting endpoint parameters of electric arc furnace – based steelmaking using artificial neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 138, 155–167. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14502-x>

- Nurhaswinda, Muharrona, A., Febriani, E., Jahera, J., Izlyn, N., Nurrabani, Sari, R. J., Adri, R. (2025). Ukuran Dispersi. *Pediaqu : Jurnal Pendidikan Sosial Dan Humaniora*, 4(2), 2378–2751.
- Ogana, F. N., Green, P. C., & Radtke, P. (2025). Forest Ecology and Management Modeling the growth and yield of natural hardwood stands in the southern United States using the Forest Inventory and Analysis data. *Forest Ecology and Management*, 586(December 2024), 122722. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122722>
- Pebriandi, Suhardianto, Y. D. (2025). Jurnal Biologi Tropis Structure and Composition of Urban Forest Stands of Pulau Bungin , Teluk Kuantan City , Kuantan Singingi District. *Jurnal Bio*, 25(1), 775–786.
- Rosleine, D., Dandi, R., Pratama, B. A., Suzuki, E. (2023). Vegetation dynamics of permanent plot in dipterocarp forest Bukit Bangkirai, East Kalimantan, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1271(012047), 1–13. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1271/1/012047>
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., & Kira, T. (1964). A Quantitative Analysis of Plant Form The Pipe Model Theory: I Basic Analyses. *Japanese Journal of Ecology*, 14(3), 97–105.
- Sitohang, F. M. P. (2025). Kontribusi Aktor Nonnegara terhadap Lingkungan Global dalam Perdagangan Karbon melalui Penerapan Sistem Registri Nasional-Pengendalian Perubahan Iklim di Indonesia (SRN-PPI). *Padjajaran Jurnal of International Relations*, 7(2), 137–153. <https://doi.org/10.24198/padjirv7i2.62312>
- Souwakil, A., Mardiatmoko, G., Hatulesila, J. W. (2025). Studi Perbandingan Hasil Perhitungan Pengukuran C-Stok Pada Tumbuhan Sagu Di Tulehu. *MARSEGU Jurnal Sains Dan Teknologi*, 2(7), 442–458.
- Stefannie, D., & Khairin, F. N. (2025). Blue Accounting Practices for Marine Economic Sustainability: A Descriptive Analysis of the Implementation of Blue Accounting in the Fisheries Sector in West Kutai Regency. *American Journal of Humanities and Social Sciences Research (AJHSSR) American*, 09(06), 218–225.
- Suhartati, T., Frankly, E., Sigiro, G., & Wahyudiono, S. (2025). Penilaian Hasil Penanaman Acacia crassiparva menggunakan Plot Jalur dan Plot Lingkaran. *Jurnal Wana Tropika*, 15(01), 18–23. <https://doi.org/10.55180/jwt.v15i1.2058>
- Toni, H., Triyadi, A., Heriyanto, N. M., Mirnanto, E. (2024). Vegetation Diversity and Carbon Stock of the Benyawai-Salajaan Hills Forest Unit , Central Kalimantan. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1421(012024), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1421/1/012024>
- Utami, W. S., Herlambang, H., Kiswanto., Permadi, A., Saud, O. R. (2025). Model Alometrik untuk Menduga Volume Pohon Berdiri Shorea leprosula Miq, PT Gunung Muro Wahana Jaya, Kalimantan Utara. *Jurnal Kehutanan Wahana Forestra : Jurnal Kehutanan*, 20(01), 13–24. <https://doi.org/10.31849/forestra.v20i1.24512>
- Utami, W. S., Purwanto, R., & Sunarta, S. (2024). Model Allometrik Daun Dan Ranting Kayu Putih Di BKPH Subang Jawa Barat. *Jurnal Hutan Tropis*, 12(1), 135–145.
- Wiati, C. B., Dharmawan, I. W. S., Sakuntaladewi, N., Ekawati, S., Wahyuni, T., Maharani, R., Hadiyan, Y., Naibaho, Y., Satria, W. I., Ngatiman, N., Abdurachman, A., Karmilasanti, K., & Laksmita, A. N. (2022). *Challenges to and Strategies for the Climate Village Program Plus : A Lesson Learned from Indonesia*.
- Yang, S., Brandeis, T. J., Helmer, E. H., Marcano-vega, H., Service, U. F., Pike, O. K., Service, U. F., Bot, J., Service, U. F., & Bot, J. (2025). Forest Ecology and Management Predicting species-specific diameter growth rate for Caribbean trees using mixed-effects extreme gradient boosting. *Forest Ecology and Management*, 580(January), 122520. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122520>

- Zandri, H. Z., Grandis, S., Sandi, G. N., Manuel, H., & Kamal, U. (2025). Program Reducing Emission from Deforestation and Forest Degradation Sebagai Solusi Deforestasi di Kalimantan. *JISHUM Jurnal Ilmu Sosial Dan Humaniora*, 3(4), 539–556.
- Zhang, J., Zhao, Y., & Hu, Z. (2023). Unmanned Aerial System-Based Wheat Biomass Estimation Using Multispectral , Structural and Meteorological Data. *Agriculture*, 13(1621), 1–24.
- Zhu, M., Tang, G., Li, S., Chen, L., Chen, S., Xu, Y., & Cai, N. (2025). Industrial Crops & Products Biomass allocation and allometric growth analysis of *Pinus yunnanensis* under different mixed nitrogen and phosphorus fertilization conditions. *Industrial Crops & Products*, 232(March), 121226. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121226>