

PENYUSUNAN DAN VALIDASI MODEL ALOMETRIK BIOMASSA POHON EUKALIPTUS HIBRIDA DI UNIT PENGELOLAAN HUTAN TANAMAN DI SUMATRA UTARA

Development and Validation Allometric Tree Biomass Models for Hybrid Eucalyptus in a Plantation Forest Management Unit in North Sumatra

Rose Ananda Mutiara Kansil¹, Muhdin^{2*}, dan Ronald Hot Marnaek³

(Diterima 5 Desember 2024 /Disetujui 16 Desember 2024)

ABSTRACT

Information on tree biomass potential is closely related to the ability of vegetation to absorb CO₂, which is one of the pollutants that can cause the greenhouse effect. Eucalyptus is one of the tree species cultivated in industrial plantation forests in Indonesia, with a relatively short rotation period (3–5 years), and can act as a carbon dioxide absorber. This study aims to develop an allometric model to estimate the total biomass of hybrid eucalyptus trees in a plantation forest management unit in North Sumatra. The sample trees used in this study included 75 trees with diameters ranging from 1.46 to 17.52 cm and age between 1-5 years. The allometric models were developed using CurveExpert Basic 2.2.3 and RStudio 4.4.0, resulting in five selected models: power (M1), exponential (M2), polynomial (M3), rational (M4), and Hoerl (M5). Subsequently, these five models were validated, also involving two others previously existing allometric models at the same site, ultimately resulting in model M1 ($W = 0.08378D^{2.49572}$) as the best model. This model, based on this study, demonstrated better accuracy compared to other allometric models for estimating the biomass of hybrid eucalyptus trees at the study site.

Keywords: allometric model, biomass, eucalyptus hybrid, model development, model validation

-
1. Alumnus Program Sarjana Program Studi Manajemen Hutan Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680
 2. Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680 ;
*Penulis korespondensi: Muhdin
e-mail: mhdn33@gmail.com
 3. Alumnus Program Magister Sains Program Studi Konservasi Biodiversitas Tropika Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

PENDAHULUAN

Pengelolaan dan pemanfaatan jasa lingkungan hutan secara efektif sebagai penyimpan dan penyerap karbon penting untuk mencapai target pengurangan emisi dalam sektor kehutanan dan lahan lainnya, yang sejalan dengan tujuan FOLU (*Forest and Other Land Use*) *Net Sink* 2030 Indonesia (Iskandar *et al.* 2023). Program ini mencakup berbagai mekanisme yang dirancang untuk menangkap dan menyerap CO₂ dari atmosfer (Wei dan Shen 2022). Konsep penyerapan karbon menjadi cara untuk mengendalikan konsentrasi karbon yang penting diterapkan di berbagai ekosistem hutan (Siregar dan Dharmawan 2011). Kuantifikasi biomassa hutan merupakan langkah mendasar dalam memahami siklus karbon global dan sebagai upaya monitoring serta evaluasi cadangan karbon hutan yang ada. Dalam biometrika hutan, model alometrik dapat digunakan untuk memperkirakan biomassa atau karbon hutan. Oleh karena itu, penting untuk membuat alat atau model untuk memperkirakan biomassa atau karbon hutan tersebut (Onrizal *et al.* 2018).

Salah satu jenis pohon yang banyak diusahakan di hutan tanaman industri di Indonesia dengan potensi penyimpanan biomassa yang besar adalah eukaliptus. Produksi kayu eukaliptus relatif meningkat setiap tahunnya, di mana pada tahun 2020 produksi kayu eukaliptus mencapai 13.350.735 m³, tahun 2021 mencapai 15.806.928 m³, dan pada tahun 2022 mencapai 19.052.214 m³ (BPS 2023). Eukaliptus merupakan jenis pohon yang berpeluang meningkatkan serapan karbon dalam periode rotasi (siklus tebang) yang relatif singkat yaitu 3–5 tahun. Hutan tanaman di dataran tinggi Toba Sumatra Utara didominasi dengan eukaliptus yang dikelola PT Toba Pulp Lestari Tbk. (PT TPL). Eukaliptus hibrida merupakan jenis yang dikembangkan sebagai bahan baku industri pulp dalam skala besar di PT TPL. Spesies eukaliptus hibrida ini telah berhasil dikembangkan dalam jumlah yang banyak, dengan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan dengan sebelum dilakukan persilangan (Latifah dan Sulistiyono 2013).

Model alometrik yang tervalidasi diperlukan untuk menghitung biomassa pohon. Pengembangan model-model alometrik biomassa untuk berbagai jenis pohon dan lokasi tempat tumbuh, penting untuk memperoleh estimasi biomassa dan cadangan karbon yang akurat (Zaenal *et al.* 2020). Penelitian biomassa juga penting untuk dilakukan karena berguna bagi rencana pengelolaan hutan dan penyedia informasi terkait karbon untuk pengelolaan hutan lestari. Dalam konteks ini, perbedaan spesies tanaman, kondisi lokasi, tipe hutan, dan perlakuan silvikultur akan memengaruhi keandalan model alometrik untuk menghasilkan estimasi biomassa dan cadangan karbon yang akurat (Roxburgh *et al.* 2015). Model yang akurat ditentukan berdasarkan kesesuaian bentuk sebaran data (*scatter plot*) dan dipilih model yang paling mendekati sebaran data tersebut. Pendekatan dengan tahapan eksplorasi diperlukan sebelum penentuan base model alometrik, sehingga diperoleh model yang paling sesuai dengan sebaran data tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mendapatkan model alometrik untuk menduga biomassa pohon jenis eukaliptus hibrida (*Eucalyptus* spp.) di PT TPL. dan membandingkan akurasinya dengan model-model alometrik biomassa eukaliptus yang pernah disusun sebelumnya di tempat yang sama.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Pengolahan dan analisis data penelitian dilaksanakan pada bulan Mei sampai dengan bulan Juni 2024 di Departemen Manajemen Hutan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB dengan menggunakan data hasil pengukuran tegakan eukaliptus hibrida di PT TPL, Sumatra Utara. Lokasi penelitian berada di Sektor Aek Nauli dengan sebaran umur tegakan 1–5 tahun.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam pengolahan dan analisis data, antara lain *laptop* dengan perangkat lunak, meliputi *Microsoft Word 2021*, *Microsoft Excel 2021*, *CurveExpert Basic 2.2.3*, dan *RStudio 4.4.0*. Bahan penelitian ini adalah data dimensi pohon berupa data hasil pengukuran lapangan diameter setinggi dada (DBH) dan data hasil perhitungan biomassa dari tegakan eukaliptus hibrida, persilangan antara *Eucalyptus urophylla* dan *Eucalyptus grandis*, hasil pengukuran oleh Marnaek (2024) di PT TPL.

Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data yang juga digunakan oleh Marnaek (2024) berupa data hasil pengukuran dimensi pohon (diameter setinggi dada dan biomassa pohon total) dari tegakan eukaliptus hibrida di PT. TPL Sumatra Utara, yang merupakan sebagian data dari tesis Marnaek (2024) di Sekolah Pascasarjana IPB. Diameter setinggi dada adalah hasil pengukuran langsung terhadap pohon contoh di lapangan, sedangkan biomassa pohon adalah hasil penimbangan terhadap bagian-bagian pohon contoh setelah dioven.

Pengolahan dan Analisis Data

Analisis data dibagi menjadi 2 tahap yang terdiri atas penyusunan dan validasi model. Data primer diperoleh dari pengukuran lapangan berupa diameter pohon eukaliptus hibrida (*Eucalyptus* spp.) pada 5 kompartemen yang mewakili sebaran umur 1–5 tahun. Dari setiap kompartemen diambil 15 pohon contoh. Total jumlah pohon eukaliptus hibrida yang digunakan dalam penelitian ini adalah 75 pohon contoh, dengan pembagian 50 pohon contoh untuk tahap penyusunan model dan 25 pohon contoh untuk tahap validasi model. Masing-masing set data untuk penyusunan maupun validasi model menyebar dari diameter kecil hingga diameter besar.

Penyusunan Model

Model alometrik disusun berdasarkan peubah diameter pohon (D) untuk menduga biomassa pohon total (W) yang mencakup bagian kayu (batang), daun, ranting, dan kulit. Penyusunan model alometrik menggunakan perangkat lunak *CurveExpert Basic 2.2.3* untuk memilih model terbaik dari berbagai kemungkinan model regresi. Berdasarkan hasil analisis *CurveExpert*, dipilih 5 model dengan akurasi paling tinggi dan paling sesuai dalam menggambarkan sebaran data 50 pohon eukaliptus hibrida serta melihat kesederhanaan model. Selanjutnya, analisis data menggunakan perangkat lunak *RStudio 4.4.0* untuk mendapatkan nilai-nilai statistik, meliputi *Root Mean Square Error* (RMSE), R^2 *adjusted*, *Akaike's Information Criterion* (AIC), dan *Bayesian Information Criterion* (BIC). Adapun formulasi ukuran statistik tersebut dituliskan dalam persamaan berikut (Tiryana *et al.* 2011).

1. *Root Mean Square Error* (RMSE)

Root Mean Square Error yaitu akar rata-rata kuadrat simpangan yang menyatakan akurasi dugaan. Nilai RMSE menunjukkan ketepatan dari model pendugaan, semakin baik suatu model pendugaan adalah yang memiliki nilai RMSE terendah (Tiryana *et al.* 2011).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

Keterangan: y_i = nilai biomassa aktual
 \hat{y}_i = nilai biomassa dugaan
 n = jumlah pohon contoh
 p = jumlah parameter model

2. *R-square adjusted* (R^2_{adj})

R^2_{adj} memberikan gambaran besarnya persentase variasi yang dijelaskan oleh variabel bebas yang benar-benar memengaruhi variabel terikat. Modifikasi dari R^2 ini memperhitungkan jumlah parameter dalam suatu model dan umumnya digunakan untuk membandingkan dan menilai model yang paling sesuai dengan data (Pham 2019).

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Keterangan:

\bar{y}_i = nilai rata-rata biomassa

3. *Akaike's Information Criterion* (AIC)

Akaike's Information Criterion (AIC) diperkenalkan oleh Akaike dengan cara menghitung nilai maksimum dari fungsi kemungkinan untuk model (Pham 2019) :

$$AIC = -2\log Lik + 2(p+1)$$

Keterangan:

$\log Lik$ = nilai kemungkinan maksimum tiap model

4. *Bayesian Information Criterion* (BIC)

Bayesian Information Criterion (BIC) diperkenalkan oleh Schwarz (1978), di mana ukuran sampel n yang menunjukkan seberapa kuat pengaruhnya terhadap penalti jumlah parameter dalam model (Pham 2019).

$$BIC = -2\log Lik + (p+1) \log(n)$$

Koefisien atau parameter model ditentukan melalui analisis regresi non-linier menggunakan *package nlme* (Pinheiro *et al.* 2024) dalam *software RStudio* 4.4.0 untuk menghitung parameter model alometrik biomassa (Zaenal *et al.* 2020). Penambahan argumen "weights = varPower()" dalam fungsi dilakukan untuk memberikan estimasi parameter model yang tidak bias. Hal ini berkaitan dengan heteroskedastisitas dari suatu model, di mana model yang paling baik adalah model yang tidak terjadi heteroskedastisitas yang dilihat dari kenormalan dan kehomogenan ragam sisaannya (Mate *et al.* 2015).

Validasi Model

Proses validasi dilakukan sebanyak dua kali dengan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel* 2021 untuk mendapatkan model alometrik terbaik dalam pendugaan biomassa pohon eukaliptus hibrida. Validasi model menggunakan set data yang berbeda dengan set data untuk penyusunan model, yaitu menggunakan data dari 25 pohon contoh. Berdasarkan hasil dari proses penyusunan model alometrik sebelumnya, dipilih 3 model terbaik dari 5 model yang diperoleh. Pada tahap pertama, validasi model menggunakan nilai RMSE, rata-rata bias (*Mean Error*, ME), persen bias (*Percentage Error*, PE), dan rata-rata mutlak persen bias (*Mean Absolute Percentage Error*, MAPE) dengan rumus sebagai berikut (Tiryana *et al.* 2011; Huy *et al.* 2016):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n}$$

$$PE = \frac{100 \cdot ME}{\sum_{i=1}^n y_i / n}$$

$$MAPE = \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i}$$

Ketiga kriteria tersebut didasarkan atas nilai simpangan antar nilai dugaan dan nilai aktual. Model alometrik memiliki akurasi yang semakin tinggi jika nilai RMSE, ME, PE, MAPE yang dimiliki semakin kecil. Proses validasi kedua dilanjutkan dengan membandingkan tiga model terbaik yang diperoleh dalam proses validasi pertama. Validasi tahap dua dilakukan dengan juga melibatkan model alometrik yang telah disusun oleh Onrizal *et al.* (2018) dan Marnaek *et al.* (2024) untuk mengetahui tingkat akurasi model. Kedua model merupakan model alometrik untuk eukaliptus di hutan tanaman yang dikelola oleh PT TPL Sumatra Utara. Model MO adalah model alometrik biomasa yang telah disusun Onrizal *et al.* (2018) untuk jenis *Eucalyptus grandis*, sedangkan model MM adalah model alometrik biomasa yang telah disusun Marnaek *et al.* (2024) untuk jenis eukaliptus hibrida.

Model MO: $W = 0,0678D^{2.5794}$

Model MM: $W = 0,499D^2 - 2,863D + 6,136$

Keterangan: W = biomassa pohon (kg)
D = diameter batang setinggi dada (cm)

Pemilihan model dilakukan dengan melakukan pemeringkatan terhadap skor pada tahap penyusunan dan validasi model. Sistem skoring didasarkan pada nilai-nilai uji statistik dalam masing-masing tahap, dengan nilai skor 1–5, nilai skor 1 untuk nilai validasi tertinggi dan skor 5 untuk nilai validasi terendah. Pada tahap penyusunan model, nilai skor 1 diberikan kepada model dengan nilai RMSE, AIC, dan BIC terendah, serta nilai R^2_{adj} tertinggi. Sementara itu pada tahap validasi model, nilai skor 1 diberikan kepada model dengan nilai RMSE, ME, PE, dan MAPE terendah. Nilai selanjutnya diberikan menggunakan sistem yang sama pada setiap model yang telah disusun. Skor yang diperoleh pada masing-masing tahap kemudian dijumlahkan untuk memperoleh peringkat akhir model dan dipilih model dengan skor terendah sebagai model terbaik dalam penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyusunan Model

Pemilihan model dengan menggunakan *software CurveExpert Basic 2.2.3* memperhatikan nilai koefisien korelasi (R^2) dan *standard error* (SE). Diperkenalkan oleh Wright (1921), nilai R^2 merupakan ukuran statistik yang paling sering digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian suatu model yang menunjukkan seberapa besar variabel terikat ditentukan oleh variabel bebas. Pemilihan model terbaik didasarkan atas kesederhanaan model dan 2 ukuran statistik, yaitu nilai R^2 yang semakin tinggi nilainya maka semakin baik model tersebut karena semakin cocok dengan sebaran dengan datanya, dan sebaliknya nilai SE yang semakin rendah menunjukkan semakin baik suatu model (Akossou dan Palm 2013). Persamaan alometrik yang diperoleh merupakan hubungan antara biomassa pohon total (W) sebagai variabel terikat dengan diameter pohon setinggi dada (D) eukaliptus hibrida sebagai variabel bebas. Tahap penyusunan model alometrik, menggunakan data 50 pohon contoh dari total 75 pohon contoh. Berdasarkan hasil analisis regresi yang diperoleh melalui proses penyusunan menggunakan *software CurveExpert Basic 2.2.3*, terpilih 5 model terbaik, dengan persamaan sebagai berikut:

Power	$W = aD^b$	M1
Eksponensial	$W = a(\exp(bD))$	M2
Polinomial	$W = a + bD + cD^2 + dD^3 + eD^4$	M3
Rasional	$W = (a + bD)/(1 + cD + dD^2)$	M4
Hoerl	$W = ab^D D^c$	M5

Dalam penyusunan model alometrik biomassa, umumnya model-model yang akan disusun telah ditetapkan sejak awal penyusunan (*ad hoc*). Berbeda dengan penelitian sebelumnya, pada penelitian Marnaek *et al.* (2024), model polinomial, logaritma, dan eksponensial telah ditentukan sebagai *base model* yang akan digunakan dalam penyusunan. Penelitian lainnya dalam Onrizal *et al.* (2018), telah menentukan model power untuk penyusunan model alometrik biomassa pada masing-masing bagian pohon, sedangkan penelitian ini membangun model untuk biomassa total pohon eukaliptus hibrida. Penelitian ini bersifat eksploratif dalam penetapan *base model* di awal dengan menggunakan *CurveExpert* untuk menentukan 5 model terbaik dalam tahap proses penyusunan berdasarkan kesederhanaan model, nilai koefisien determinasi, dan nilai SE yang diperoleh. Model yang dipilih juga harus mempertimbangkan kesederhanaan untuk tujuan praktis dan kemudahan penggunaan (Jaya *et al.* 2013). Penyusunan model alometrik dilanjutkan dengan menggunakan *software RStudio* 4.4.0, untuk mendapatkan nilai koefisien dan beberapa nilai statistik kelima model alometrik yang terpilih (Tabel 1).

Tabel 1 Koefisien dan nilai statistik 5 model alometrik biomasa padatahap penyusunan model

Model		Koefisien	RMSE	R ² _{adj}	AIC	BIC
M1	a	0,08378	4,072	97,485	253,545	261,193
	b	2,49572				
M2	a	1,90190	8,181	89,852	288,865	296,513
	b	0,24695				
M3	a	1,13750	4,277	97,226	243,334	256,718
	b	-0,42753				
	C	0,22293				
	D	0,00224				
	E	0,00041				
M4	A	-0,53195	3,473	98,171	243,985	255,457
	B	0,73900				
	C	-0,10106				
	D	0,00290				
M5	A	0,27534	4,418	97,041	244,417	253,977
	B	1,08729				
	C	1,59767				

Setiap model diberikan peringkat berdasarkan nilai R² *adjusted* tertinggi, nilai RMSE, AIC, dan BIC terendah. Semakin rendah nilai RMSE, AIC, dan BIC menunjukkan semakin baik *goodness-of-fit* model tersebut. Sebaliknya, semakin besar nilai R² *adjusted*, maka menunjukkan bahwa suatu model semakin cocok dengan data (Pham 2019). Berdasarkan hasil skoring, peringkat kelima model tahap penyusunan tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2 Skoring 5 model alometrik biomasa pada tahap penyusunan

Model		Skor				Total Skor	Peringkat
		RMSE	R ² _{adj}	AIC	BIC		
M1	Power	2	2	4	4	12	3,5
M2	Eksponensial	5	5	5	5	20	5
M3	Polinomial	3	3	1	3	10	2
M4	Rasional	1	1	2	2	6	1
M5	Hoerl	4	4	3	1	12	3,5

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa model rasional (M4) dengan persamaan $W = (0,73900D - 0,53195)/(1 - 0,10106D + 0,00290D^2)$ merupakan model terbaik pada tahap penyusunan model estimasi biomasa. Di antara kelima model yang disusun, model M4 memiliki nilai RMSE terkecil, yaitu 3,73 kg dan $R^2_{adjusted}$ terbesar yaitu 98,171%. Hal ini berarti bahwa peubah bebas diameter dalam model M4 mampu menjelaskan keragaman biomassa total pohon eukaliptus hibrida dengan baik ($R^2_{adj} > 85\%$). Nilai AIC dan BIC yang diperoleh menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu jauh (< 10) untuk 4 model yaitu M1, M3, M4, M5. Sementara itu, model M2 eksponensial yang merupakan model dengan peringkat terakhir dalam tahap penyusunan memperoleh perbedaan nilai AIC dan BIC > 10 . Standar untuk menilai AIC atau BIC antar model dikategorikan berbeda secara signifikan apabila memiliki perbedaan nilai AIC dan/atau BIC ≥ 10 (Lubke *et al.* 2017).

Validasi Model

Pohon-pohon contoh yang digunakan untuk penyusunan model alometrik biomasa memiliki sebaran diameter antara 1,46–17,52 cm, sedangkan untuk validasi mempunyai sebaran diameter antara 1,97–16,56 cm. Model alometrik pada penelitian ini menggunakan satu peubah bebas yaitu diameter setinggi dada. Menurut Arinah *et al.* (2016), pendugaan biomassa cukup menggunakan peubah bebas diameter apabila ketersediaan data tinggi tanaman tidak dapat dipenuhi pada praktiknya di lapangan. Pengukuran diameter lebih mudah dan praktis di lapangan jika dibandingkan dengan pengukuran tinggi. Berdasarkan proses penyusunan model dengan menggunakan perangkat lunak *RStudio*, diperoleh nilai statistik hasil uji validasi yang tercantum pada Tabel 3.

Tabel 3 Nilai statistik hasil uji validasi 5 model alometrik biomasa pada tahap penyusunan model

Model		RMSE	ME	PE	MAPE
M1	Power	5,117	-1,137	-3,874	13,209
M2	Eksponensial	7,496	-1,357	-4,621	36,712
M3	Polinomial	5,608	-1,196	-4,074	14,186
M4	Rasional	5,400	-0,956	-3,258	14,479
M5	Hoerl	5,498	-1,238	-4,217	13,343

Validasi model dilakukan terhadap 5 model yang telah disusun dengan menggunakan nilai RMSE, ME, PE, dan MAPE. Sebanyak 50 pohon contoh digunakan dalam penyusunan model alometrik pendugaan biomassa dan sisanya sebanyak 25 pohon contoh digunakan dalam uji validasi. Menurut Riady (2011), dalam pengujian validasi diperlukan sepertiga dari jumlah pohon contoh dan tidak digunakan dalam penyusunan model. Validasi model alometrik biomassa sedikitnya membutuhkan 10 pohon contoh (Mugasha *et al.* 2013). Peringkat kelima model dalam proses validasi tahap 1 tersebut tercantum pada Tabel 4.

Tabel 4 Skoring 5 model alometrik proses validasi tahap 1

Model	Skor				Total Skor	Peringkat Validasi 1
	RMSE	ME	PE	MAPE		
M1	1	2	2	1	6	1
M2	5	5	5	5	20	5
M3	4	3	3	3	13	3,5
M4	2	1	1	4	8	2
M5	3	4	4	2	13	3,5

Peringkat yang diperoleh pada proses validasi 1 (Tabel 4) kemudian dijumlahkan dengan peringkat yang diperoleh pada proses penyusunan sebelumnya (Tabel 2). Berdasarkan proses penyusunan dan validasi tahap 1, diperoleh 3 model terbaik secara berturut-turut, yaitu model M4, M1, dan M3, yang tercantum pada Tabel 5.

Tabel 5 Skoring 5 model alometrik biomasa pada proses penyusunan dan validasi tahap 1

Model	Peringkat Validasi	Peringkat Penyusunan	Total Skor	Peringkat
M1 Power	1	3,5	4,5	2
M2 Eksponensial	5	5	10	5
M3 Polinomial	3,5	2	5,5	3
M4 Rasional	2	1	3	1
M5 Hoerl	3,5	3,5	7	4

Dalam aspek penerapan model, persamaan alometrik bersifat spesifik pada lokasi dan spesies tertentu, serta tidak dapat dibandingkan untuk spesies dan lokasi yang berbeda karena akan menghasilkan bentuk pohon dan laju pertumbuhan yang berbeda pula. Hal ini dibuktikan dalam penelitian Maulana (2014) bahwa persamaan pada lokasi dan spesies tertentu akan menghasilkan model alometrik dengan akurasi estimasi tertinggi. Oleh karena itu, tiga model terbaik yang diperoleh dalam proses penyusunan kemudian divalidasi dengan model alometrik yang telah disusun sebelumnya oleh Onrizal *et al.* (2018) dan Marnaek *et al.* (2024). Validasi model memperoleh nilai akurasi yang tercantum pada Tabel 6.

Tabel 6 Nilai uji validasi 3 model alometrik biomasa terbaik dan 2 model pembanding

Model	RMSE	ME	PE	MAPE
M1 Power	5,117	-1,137	-3,874	13,209
M3 Polinomial	5,608	-1,196	-4,074	14,186
M4 Rasional	5,400	-0,956	-3,258	14,479
MO Power oleh Onrizal	5,108	-1,261	-4,297	14,798
MM Polinomial oleh Marnaek	5,278	0,125	0,425	23,931

Model alometrik biomasa MO yang disusun oleh Onrizal *et al.* (2018) dan model alometrik biomasa MM Marnaek *et al.* (2024) mengembangkan persamaan alometrik biomasa untuk hutan tanaman eukaliptus di PT TPL. Sumatra Utara tetapi berbeda jenis. Onrizal *et al.* (2018) mengembangkan persamaan untuk jenis *Eucalyptus grandis* dengan jumlah pohon contoh sebanyak 18 pohon, sedangkan Marnaek *et al.* (2024) untuk jenis pohon eukaliptus hibrida dengan jumlah pohon contoh sebanyak 75 pohon. Validasi silang (*cross validation*) dilakukan untuk menentukan seberapa akurat model ketika diterapkan pada set data yang independen dan bertujuan untuk menghindari bias dalam prediksi biomassa (Nath *et al.* 2019). Hasil skoring proses validasi tahap 2 tercantum pada Tabel 7.

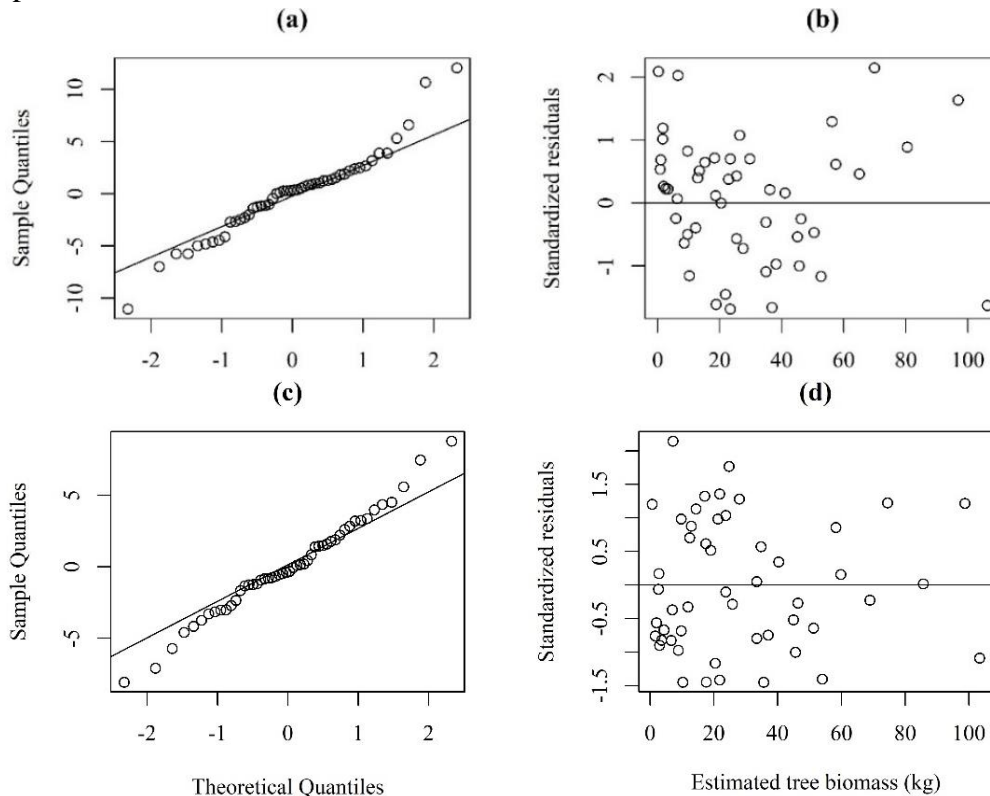
Tabel 7 Skoring akhir 3 model alometrik biomasa terbaik dan 2 model pembanding

Model	Skor				Total Skor	Peringkat Akhir
	RMSE	ME	PE	MAPE		
M1	2	3	3	1	9	1
M3	5	4	4	2	15	4,5
M4	4	2	2	3	11	3
MO	1	5	5	4	15	4,5
MM	3	1	1	5	10	2

Berdasarkan skoring pada tahap penyusunan dan dua tahap validasi, diperoleh hasil akhir model alometrik terbaik pendugaan biomassa eukaliptus hibrida adalah model M1 atau model power ($W = aD^b$) dengan persamaan $W = 0.08378D^{2.49572}$. Menurut definisinya, model power berhubungan dengan hubungan antara dua besaran di mana satu besaran berubah seiring dengan pangkat yang lain (Picard *et al.* 2015). Model M1 memiliki performansi paling baik yang ditunjukkan dengan nilai skoring terendah dari model lainnya. Menurut Sumadi dan Siahaan (2010), pemilihan model terbaik perlu dilakukan berdasarkan sistem skoring terhadap kriteria statistik karena model tertentu dapat memiliki nilai yang lebih tinggi pada suatu kriteria namun rendah pada kriteria statistik lainnya.

Uji Asumsi Kenormalan Sisaan dan Kehomogenan Ragam Sisaan

Uji kenormalan model dilakukan kepada 2 model, yaitu model M1 power yang merupakan model terbaik pada penelitian ini dan M4 rasional yang merupakan model terbaik pada tahap penyusunan model. Kedua uji ini diperoleh menggunakan perangkat lunak *RStudio* 4.4.0 dan hasilnya tercantum pada Gambar 1.



Gambar 1 Kenormalan sisaan M1 (a) M4 (c) dan kehomogenan ragam sisaan M1 (b) dan M4 (d)

Nilai sisaan kedua model sebagian besar berada di sekitar garis lurus yang artinya kedua model memenuhi asumsi kenormalan sisaan (Gambar 1a dan 1c). Plot kuantil kuantil atau QQ membentuk garis 45 derajat ketika nilai yang diamati sesuai dengan distribusi hipotetis. Plot QQ memplot kuantil distribusi variabel terhadap kuantil distribusi pengujian. Jika suatu variabel berdistribusi normal, kasus-kasus dalam plot QQ mengelompok di sekitar garis 0 horizontal (Garson 2012). Selain itu, nilai-nilai sisaan tersebar acak di sekitar nilai nol yang artinya kedua model pun memenuhi asumsi kehomogenan ragam sisaan (Gambar 1b dan 1d) (Zaenal *et al.* 2020). Ragam sisaan terdistribusi secara homogen di sekitar garis nol dan tidak ada pola sistematis dalam distribusi ragam sisaan yang artinya tidak terjadi heteroskedastisitas pada model.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, model alometrik terbaik untuk pendugaan biomassa pohon eukaliptus hibrida pada rentang umur 1–5 tahun di PT TPL secara berurutan, adalah : model power dengan persamaan $W = 0,08378D^{2,49572}$, model polinomial oleh Marnaek *et al.* (2024) dengan persamaan $W = 0,499D^2 - 2,863D + 6,136$, dan model rasional dengan persamaan $W = (0,73900D - 0,53195)/(1 - 0,10106D + 0,00290D^2)$, di mana : D adalah diameter setinggi dada (cm) dan W adalah biomassa pohon (kg).

DAFTAR PUSTAKA

- Akossou AYJ, Palm R. 2013. Impact of data structure on the estimators R-square and adjusted R-square in linear regression. *International Journal Mathematics and Computation*. 20(3):84–93.
- Arinah H, Muhdi, Azhar I. 2016. Pendugaan cadangan karbon pada tanaman bambu talang (*Schizostachyum brachycladum* Kurz.) di hutan rakyat bambu desa pertumbukan Kecamatan Wampu Kabupaten Langkat. *Peronema Forestry Science Journal*. 5(2):34–48.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2023. *Statistik Perusahaan Pembudidaya Tanaman Kehutanan, 2011-2022*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Djomo AN, Chimi CD. 2017. Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: Case study with application to remote sensing. *Forest Ecology and Management*. 391:184–193.
- Garson GD. 2012. *Testing Statistical Assumptions*. Asheboro (US): Statistical Publishing Associates.
- Huy B, Kralicek K, Poudel KP, Phuong VT, Khoa PV, Hung ND, Temesgen H. 2016. Allometric equations for estimating tree aboveground biomass in evergreen broadleaf forests of Viet Nam. *Forest Ecology and Management*. 382:193–205.
- Iskandar M, Siregar IZ, Krisnawati H. 2023. Potential of carbon sequestration enhancement through intensive silvicultural techniques using *Shorea leprosula* plantation in Central Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 24(8): 4699–4513.
- Jaya INS, Agustina TL, Saleh MB, Shimada M, Kleinn C, Fehrmann L. 2013. Above ground biomass estimation of dry land tropical forest using ALOS PALSAR in Central Kalimantan, Indonesia. Di dalam: Fehrmann L, Kleinn C, editor. *Proceedings of the 3rd International DAAD Workshop Forests in Climate Change Research and Policy: The Role of Forest Management and Conservation in a Complex International Setting*; 2012 Nov 28–Des 2; Dubai dan Doha. Jerman: Cuvellier Verlag Göttingen. hlm 107–123.
- Krisnawati H, Adinugroho WC, Imanuddin R. 2012. *Monograf: Model-Model Alometrik untuk Pendugaan Biomassa Pohon pada Berbagai Tipe Ekosistem Hutan di Indonesia*. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitasi, Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.
- Latifah S, Sulistiyono N. 2013. Carbon sequestration potential in aboveground biomass of hybrid eucalyptus plantation forest. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 19(1):54–62.
- Lubke GH, Campbell I, McArtor D, Miller P, Luningham J, van den Berg SM. 2017. Assessing model selection uncertainty using a bootstrap approach: an update. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*. 24(2):230–245.
- Marnaek RH, Setiawan Y, Hermawan R, Muhdin. 2024. Development of allometric model for estimating biomass and carbon storage of hybrid eucalyptus (*E. grandis* x *E. urophylla*) in industrial plantation forests of North Sumatra Province. *Jurnal Sylva Lestari*. 12(3):948–961.
- Mate R, Johansson T, Siteo A. 2015. Stem volume equations for valuable timber species in Mozambique. *Journal of Sustainable Forestry*. 34(8):787–806.
- Maulana SI. 2014. Allometric equations for estimating aboveground biomass in Papua Tropical Forest. *Indonesian Journal of Forestry Research*. 1(2):77–88.
- Mindawati N, Indrawan A, Mansur I, Rusdiana O. 2010. Kajian pertumbuhan tegakan hybrid *Eucalyptus urograndis* di Sumatera Utara. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*. 7(1):39–50.

- Mugasha WA, Eid T, Bollandås OM, Malimbwi RE, Chamshama SAO, Zahabu E, Katani JZ. 2013. Allometric models for prediction of above- and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management*. 310:87–101.
- Muhdi, Sahar A, Hanafiah DS, Zaitunah A, Nababan FWB. 2019. Analysis of biomass and carbon potential on eucalyptus stand in industrial plantation forest, North Sumatra, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 374(1):1–8. doi:10.1088/1755-1315/374/1/012054.
- Nath AJ, Tiwari BK, Sileshi GW, Sahoo UK, Brahma B, Deb S, Devi NB, Das AK, Reang D, Chaturvedi SS, *et al.* 2019. Allometric models for estimation of forest biomass in North East India. *Forests*. 10(2):1–16.
- Nugraha Y. 2011. Potensi karbon tersimpan di Taman Kota 1 Bumi Damai (BSD), Serpong, Tangerang Selatan, Banten [skripsi]. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Onrizal, Hartono R, Kusmana C. 2018. Allometry of biomass and carbon stock of planted *Eucalyptus grandis* forest in Toba Highland. Di dalam: Onrizal, Ambarita H, Kawai H, Valasek P, Majlan EH, editor. Proceedings of the International Conference of Science, Technology, Engineering, Environmental and Ramification Researches; 2018 Agu 30–31; Medan, Indonesia. Medan: SciTePress Publications. hlm 129–131.
- Pham H. 2019. A new criterion for model selection. *Mathematics*. 7(12):1–12.
- Picard N, Rutishauser E, Ploton P, Ngomanda A, Henry M. 2015. Should tree biomass allometry be restricted to power models?. *Forest Ecology and Management*. 353:156–163.
- Pinheiro J, Bates D, R Core Team 2024. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-165. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Prasetyo A, Aiso H, Ishiguri F, Wahyudi I, Wijaya IPG, Ohshima J, Yokota S. 2017. Variations on growth characteristics and wood properties of three Eucalyptus species planted for pulpwood in Indonesia. *Tropics*. 26(2):59–69.
- Riady A. 2011. Penyusunan dan validasi persamaan tabel volume lokal pohon meranti di Areal PT. Intracawood Manufacturing, Kalimantan Timur [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Roxburgh SH, Paul KI, Clifford D, England JR, Raison RJ. 2015. Guidelines for constructing allometric models for the prediction of woody biomass: How many individuals to harvest? *Ecosphere*. 6(3):1–28. doi:10.1890/ES14-00251.1
- Schwarz G. 1978. Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*. 6(2):461–464. doi:10.1214/aos/1176344136.
- Siregar CA, Dharmawan IWS. 2011. Carbon stock of dipterocarp natural forest stands at PT. Sarpatim, Central Kalimantan. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*. 8:337–348. doi:10.20886/jphka.2011.8.4.337-348.
- Sumadi A, Siahaan H. 2010. Model penduga volume pohon kayu bawang (*Disoxylum molliscimum* Burm F.) di Provinsi Bengkulu. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*. 7(5):227–231.
- Tiryana T, Tatsuhara S, Shiraishi N. 2011. Empirical models for estimating the stand biomass of teak plantations in Java, Indonesia. *Journal of Forest Planning*. 16:177–188.
- Vorster AG, Evangelista PH, Stovall AE, Ex S. 2020. Variability and uncertainty in forest biomass estimates from the tree to landscape scale: the role of allometric equations. *Carbon Balance and Management*. 15:1–20.
- Wei J, Shen M. 2022. Analysis of the efficiency of forest carbon sinks and its influencing factors - Evidence from China. *Sustainability*. 14:1–17. doi:10.3390/su141811155.

Wright S. 1921. Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*. 20(7):557–585.

Yudistira P, Karuniasa M, Wardhana YMA. 2019. Model pengelolaan *Eucalyptus pellita* pada hutan industri berkelanjutan. *Jurnal Selulosa*. 9(01):33–38.

Zaenal MS, Tiriyana T, Muhdin. 2020. Allometric models for estimating tree biomass of dryland secondary forest in East Halmahera. *Jurnal Wasian*. 7(2):87–101.