

MODEL PENDUGA BIOMASSA UNTUK TEGAKAN REHABILITASI DI HUTAN PENDIDIKAN GUNUNG WALAT

*Biomass Estimation Models for Rehabilitated Stands in
Gunung Walat University Forest*

Andani Jamilah Mardhotillah¹, Tatang Tiryana^{2*}, Teddy Rusolono², Muhdin²

(Diterima 21 Juni 2024 / Disetujui 27 Juni 2024)

ABSTRACT

Forest rehabilitation plays an important role in increasing forest biomass and carbon stocks. However, there are limited studies that provide information on biomass growth of rehabilitated areas. This study aimed at developing stand biomass growth models for rehabilitated areas in Gunung Walat University Forest. The biomass data of *Pinus merkusii* stands were obtained by establishing and measuring 115 sample plots in various stand ages by applying the stratified systematic sampling method. The stand biomass growth models were developed by using regression analysis with independent variables consisting of age, diameter, height, basal area, and stand density. The results showed that the stand biomass of *Pinus merkusii* could be best estimated by stand age (A , year) and basal area (G , m^2/ha) using the equation of $W = 1,77A^{0,21}G^{1,12}$ ($R^2_{adj} = 99,27\%$ and $RMSE = 2,05$ ton/ha). When the stand basal area data would not be available, the stand biomass could also be estimated using the equation of $W = 0,06A^{-0,52}D^{2,68}$ or $W = 0,00057A^{2,37}N^{1,25}$, which use the stand diameter (D , cm) and stand density (N , trees/ha) in addition to the stand age. These models are useful for the forest manager in estimating and monitoring the stand biomass growth of rehabilitated stands in Gunung Walat University Forest.

Keywords: biomass, growth model, Pinus merkusii, forest rehabilitation

-
1. Mahasiswa Program Magister Ilmu Pengelolaan 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: Tatang Tiryana

e-mail: tangtir@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Saat ini dunia dihadapkan pada permasalahan lingkungan berupa perubahan iklim global yang ditandai dengan meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (GRK). GRK merupakan kumpulan gas yang mampu meningkatkan potensi pemanasan global, yang terdiri dari karbondioksida (CO₂), metana (CH₄), nitrogenoksida (N₂O), hidroflorokarbon (NFC), perflorokarbon (PFC), dan sulfurheksaklorida (SF₆) (Momongan *et al.* 2017). Tingkat konsentrasi karbondioksida (CO₂) pada 2022 telah mencapai rata-rata sebesar 417,6 ppm yang dapat memicu peningkatan suhu permukaan bumi (NASA, 2022). Untuk mengatasi permasalahan ini diperlukan upaya-upaya pengurangan emisi CO₂, antara lain melalui kegiatan rehabilitasi hutan karena vegetasi hutan mampu menyerap emisi CO₂ dari atmosfer dan mengubahnya menjadi biomassa dan cadangan karbon yang tersimpan dalam komponen-komponen tumbuhan.

Salah satu model rehabilitasi hutan yang bertujuan untuk peningkatan cadangan karbon adalah program rehabilitasi tegakan di Hutan Pendidikan Gunung Walat (HPGW), yang dikelola oleh Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB, di Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. Program tersebut dilaksanakan oleh HPGW sejak tahun 2009 melalui kerja sama dengan beberapa perusahaan multinasional yang memberikan dukungan finansial untuk penanaman areal-areal terdegradasi di HPGW. Jenis pohon yang ditanam adalah pinus (*Pinus merkusii*) karena selain mampu menyerap emisi CO₂ juga mampu menghasilkan getah sebagai salah satu produk hasil hutan bukan kayu yang memiliki nilai ekonomi. Kegiatan rehabilitasi di HPGW dilakukan dengan teknik penanaman pengkayaan (*enrichment planting*), karena pohon-pohon pinus tersebut ditanam diantara tegakan tua yang kerapatannya rendah. Dengan demikian, rehabilitasi tegakan di HPGW dapat menyebabkan terbentuknya struktur tegakan dua lantai (*two-storied stands*) yang dicirikan oleh adanya dua lapisan tajuk berbeda (Lundqvist 2017), yaitu lapisan tajuk atas dari tegakan tua dan lapisan tajuk bawah dari tegakan muda hasil penanaman pengkayaan.

Informasi tentang pertumbuhan biomassa tegakan rehabilitasi di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya rehabilitasi tegakan dengan teknik penanaman pengayaan seperti di HPGW. Padahal, informasi pertumbuhan biomassa diperlukan untuk menentukan faktor serapan (*removal factor*) untuk perhitungan potensi serapan emisi CO₂ dari kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan, misalnya melalui program FOLU (*Forest and Other Land Use*) Net Sink 2030 yang dicanangkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) sebagai upaya penurunan emisi GRK dari sektor kehutanan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyusun model pertumbuhan biomassa tegakan pinus di areal rehabilitasi HPGW yang dapat digunakan untuk menduga potensi cadangan karbon dan serapan CO₂ dari tegakan rehabilitasi dengan teknik penanaman pengayaan.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di kawasan Hutan Pendidikan Gunung Walat (HPGW), Sukabumi, Jawa Barat, yaitu di areal rehabilitasi blok TOSO dan CPH. Pengumpulan data lapangan dilaksanakan pada bulan Maret hingga Mei 2023, yang kemudian dilanjutkan dengan analisis data hingga bulan Juni 2023.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam proses pengambilan data di lapangan adalah peta kawasan HPGW, *Global Positioning System* (GPS), *phi-band*, pita ukur, *hypsoneter*, kalkulator, alat tulis, dan *tallysheet*. Alat yang digunakan dalam analisis data adalah laptop yang dilengkapi dengan piranti lunak Microsoft Office 365, ArcGIS 10.8, dan R 4.3.0. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini tegakan pinus di areal rehabilitasi blok TOSO dan COPHI di HPGW.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data lapangan dilakukan dengan menggunakan metode *stratified systematic plot sampling with random start* untuk memperoleh sampel dengan keterwakilan tinggi karena beragamnya umur tegakan rehabilitasi di HPGW. Stratifikasi tegakan rehabilitasi didasarkan atas umur tegakan pinus, mulai umur 1 hingga 14 tahun. Pada setiap umur tegakan dibuat plot-plot lingkaran berukuran 0,04 ha (radius 11,28 m) yang ditempatkan secara sistematis pada jarak datar 50 m. Jumlah plot contoh yang dibuat dan diukur sebanyak 115 plot, yaitu 44 plot di blok COPHI dan 71 plot di blok TOSO, yang ditentukan berdasarkan metode alokasi Neyman dengan mempertimbangkan ukuran dan keragaman tiap stratum (Cochran 1977, Shiver dan Borders 1996). Pada setiap plot contoh dilakukan pencatatan jenis dan umur pohon serta pengukuran diameter setinggi dada (pada ketinggian 1,3 m di atas tanah) dan peninggi tegakan berdasarkan 6 pohon tertinggi.

Tabel 1. Jumlah plot contoh di areal rehabilitasi blok TOSO dan COPHI di HPGW

Umur	Jumlah plot contoh		Total
	Blok TOSO	Blok COPHI	
1	3	-	3
2	3	-	3
5	2	-	2
6	4	-	4
7	4	-	4
8	3	-	3
9	6	4	10
10	6	-	6
11	7	10	17
12	10	-	10
13	23	9	32
14	-	21	21

Analisis Data

Perhitungan Biomassa Tegakan

Berdasarkan data pengukuran di lapangan, maka cadangan biomassa tersimpan pada pohon dapat diukur dengan menggunakan model allometrik yang telah disusun pada penelitian sebelumnya pada lokasi yang sama, yaitu sebagai berikut (Utomo 2020):

$$w = 0,0844d^{2,448} \tag{1}$$

Keterangan:

w = biomassa pohon (kg/pohon)

d = diameter pohon (cm)

Perhitungan biomassa pada tegakan diperoleh dengan menjumlahkan nilai biomassa pohon pada setiap plot dan dibagi luas plot atau dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{a} \quad (2)$$

Keterangan:

W = biomassa tegakan (ton/ha)

w_i = biomassa pohon ke- i

a = luas plot contoh (0,04 ha)

Perhitungan Riap Tegakan

Pendekatan perhitungan riap yang dihitung adalah riap tahunan rata-rata (*Mean Annual Increment, MAI*) dengan formula sebagai berikut:

$$MAI = \frac{X_t}{t} \quad (3)$$

Keterangan:

MAI = riap tahunan rata-rata

X_t = Biomassa tegakan pada umur ke- t (ton/ha),

t = umur tegakan (tahun)

Penyusunan Model

Penyusunan model pertumbuhan biomassa disusun dengan menggunakan *software R 4.3.0* dengan persamaan M1 menggunakan pendekatan linear dan persamaan lainnya menggunakan pendekatan regresi non-linear. Adapun, persamaan-persamaan regresi yang digunakan dalam permodelan adalah sebagai berikut:

$$M1: W = a + bX$$

$$M2: W = aX^b$$

$$M3: W = a(\exp(b/X)) \quad (4a)$$

$$M4: W = a + bX^2 \quad (4b)$$

$$M5: W = a + b(\ln(X)) \quad (4c)$$

$$M6: W = a(\exp(bX)) \quad (4d)$$

$$M7: W = a + bX_1 + cX_2 \quad (4e)$$

$$M8: W = aX_1^b X_2^c \quad (4f)$$

$$M9: W = a(\exp(b/X_1))(\exp(c/X_2)) \quad (4g)$$

$$M10: W = a + bX_1^2 + cX_2^2 \quad (4h)$$

$$M11: W = a + b(\ln(X_1)) + c(\ln(X_2)) \quad (4i)$$

Keterangan:

W = Biomassa tegakan (ton/ha)

X_n = Peubah penduga (yaitu umur (A), diameter (D), tinggi (T), kerapatan tegakan (N), luas bidang dasar tegakan (G))

a, b, c = Koefisien regresi.

Kriteria Pemilihan Model Terbaik

Persamaan yang telah disusun kemudian dilakukan penilaian untuk mengetahui model mana yang paling baik dalam menduga biomassa pohon. Penilaian persamaan penduga biomassa yang telah disusun ini dilakukan dengan mencari nilai beberapa kriteria yaitu nilai koefisien determinasi yang disesuaikan (R^2 adj), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Akaike Information Criterion* (AIC), dan

Bayesian Information Criterion (BIC) yang didapatkan dari *software R 4.3.0*. Perhitungan nilai R^2_{adj} menentukan keeratan hubungan antara peubah tak bebas dengan peubah bebas, di mana semakin tinggi nilai $R^2_{adjusted}$ maka semakin tinggi pula keeratan hubungan peubah tersebut. Adapun rumus $R^2_{adjusted}$ adalah sebagai berikut (Tiryana *et al.* 2011):

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{JKS/(n-p)}{JKT/(n-1)} \quad (5)$$

Keterangan:

JKS = jumlah kuadrat sisa

JKT = jumlah kuadrat total

$n-p$ = derajat bebas sisaan,

$n-1$ = derajat bebas total

AIC dan BIC merupakan salah satu kriteria pemilihan model regresi terbaik yang diusulkan oleh Akaike (1974) dan Schwarz (1978). Kedua kriteria statistik tersebut dihitung dengan metode *maximum likelihood estimation* (MLE) menggunakan rumus sebagai berikut (Tiryana *et al.* 2011):

$$AIC = -2\log Lik + 2(p + 1) \quad (6)$$

$$BIC = -2\log Lik + (p + 1)\log(n) \quad (7)$$

Keterangan:

$\log Lik$ = Nilai fungsi *log-likelihood* untuk penduga parameter

p = jumlah parameter model

n = jumlah sampel

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Tegakan

Tegakan pinus pada areal rehabilitasi TOSO dan COPHI di Hutan Pendidikan Gunung Walat (HPGW) telah berumur 1–14 tahun dan mengalami pertumbuhan seiring dengan bertambahnya umur (Tabel 2). Secara umum, semakin tua umur tanaman maka rata–rata diameter dan tinggi juga akan semakin besar (Audina *et al.* 2020). Misalnya, rata–rata diameter pada tanaman *Pinus merkusii* yang berumur 14 tahun (yaitu 20,44 cm) lebih besar dibandingkan rata–rata diameter pada umur lainnya. Rata–rata diameter yang paling kecil terdapat pada tanaman dengan umur 1 tahun yaitu sebesar 1,01 cm. Namun, pada umur 11–13 tahun rata–rata diameter pinus mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya pertumbuhan diameter tegakan juga dipengaruhi oleh beberapa faktor lainnya, diantaranya kemampuan menyerap sinar matahari, suhu udara, air dan unsur–unsur dalam tanah (Hardjowigeno 1987), faktor lingkungan dan kondisi tempat tumbuh (Daniel *et al.* 1992).

Biomassa tegakan berdasarkan umur pada areal rehabilitasi TOSO dan COPHI memiliki nilai biomassa yang paling besar pada umur 12 tahun (49,98 ton/ha), sedangkan yang paling kecil pada umur 1 tahun (0,03 ton/ha). Namun, laju pertumbuhan biomassa sesuai dengan umur tegakan tersebut mengalami fluktuasi. Hal ini disebabkan karena besarnya biomassa juga dipengaruhi oleh kerapatan atau jumlah pohon yang terdapat pada tegakan tersebut (Kusmana 1993), struktur tegakan serta curah hujan yang terjadi pada lokasi tersebut. Semakin banyak jumlah pohon pada tegakan tersebut maka kandungan biomassa tegakan tersebut akan lebih tinggi yang berakibat pada potensi serapan karbondioksida yang besar.

Tabel 2. Rata-rata dimensi tegakan *Pinus merkusii* di areal rehabilitasi HPGW

Umur (tahun)	Rata-rata				
	Diameter (cm)	Tinggi (m)	Bidang dasar (m ² /ha)	Kerapatan (pohon/ha)	Biomassa (ton/ha)
1	1,008	1,711	0,027	308	0,032
2	1,566	2,915	0,133	608	0,193
5	7,788	7,647	2,932	538	8,718
6	10,406	9,467	4,541	469	15,282
7	10,602	10,249	3,856	444	12,560
8	13,381	12,420	7,330	463	27,438
9	13,368	14,667	7,777	503	29,202
10	17,147	15,836	6,082	242	24,783
11	15,609	13,347	10,422	477	42,353
12	16,158	16,004	12,057	502	49,976
13	16,266	14,095	8,481	385	34,938
14	20,440	19,540	8,000	218	36,375

Model Pertumbuhan

Model pertumbuhan merupakan persamaan untuk menduga pertumbuhan dari suatu tegakan dan mengukur besaran produktivitas baik tinggi, diameter, volume, luas, dan lain sebagainya (Bustomi dan Yulianti 2013). Adapun dalam penelitian ini, model pertumbuhan disusun untuk mengetahui produktivitas biomassa tegakan *Pinus merkusii* dengan peubah penduga yang dapat diukur di lapangan. Model pertumbuhan biomassa tegakan dipilih berdasarkan 5 kriteria statistik diantaranya nilai Standar Error (SE), *Root Mean Square Error* (RMSE), R^2_{adj} , nilai AIC dan BIC. Berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2_{adj}) model yang terbaik merupakan model yang memiliki nilai R^2_{adj} mendekati nilai 1 atau 100 dalam persen. Apabila nilai koefisien determinasi (R^2_{adj}) mendekati 1 maka peubah bebas tersebut dapat menjelaskan peubah terikat dengan baik (Cheng *et al.* 2014). Sedangkan, nilai RMSE, SE, AIC dan BIC model yang dipilih adalah yang memiliki nilai paling kecil pada kriteria tersebut. Tabel 3 menyajikan rekapitulasi model terbaik berdasarkan kriteria-kriteria statistik tersebut.

Model pertumbuhan sangat erat hubungannya dengan waktu, namun waktu saja tidak cukup untuk menjadi peubah penduga biomassa tegakan. Hal ini terbukti dari model pertumbuhan yang hanya menggunakan parameter umur (A), yaitu model M1 ($W = -2,50 + 2,80A$). Model tersebut tidak memenuhi kriteria statistik karena nilai RMSE masih besar dan koefisien determinasinya rendah. Model lainnya yang disusun dengan menggunakan parameter umur tidak memenuhi asumsi kenormalan sisaan dan kehomogenan ragam sisaan, sehingga model-model tersebut tidak sah digunakan untuk menduga biomassa tegakan. Oleh karena itu, diperlukan peubah lainnya untuk menduga biomassa tegakan agar lebih akurat.

Selain umur tegakan, peubah lainnya yang dapat diukur di lapangan adalah diameter, tinggi, luas bidang dasar, dan kerapatan tegakan. Peubah-peubah tersebut dipasangkan dengan umur sebagai peubah-peubah bebas untuk menduga biomassa tegakan. Model dengan satu peubah bebas dan kombinasi dua peubah bebas memiliki nilai-nilai kriteria statistik yang berbeda-beda (Tabel 3).

Berdasarkan kriteria statistik tersebut, model-model dengan peubah bebas luas bidang dasar dan tinggi merupakan model terbaik dengan nilai RMSE sebesar 2,05 ton/ha, R^2_{adj} sebesar 99,27%, nilai AIC sebesar 292,45, dan nilai BIC sebesar 305,32. Adapun model regresinya adalah $W = 1,73A^{0,23}G^{1,12}$. Hal ini berarti bahwa biomassa tegakan *Pinus merkusii* di areal rehabilitasi HPGW dapat dijelaskan dengan baik oleh umur (A) dan bidang dasar (G) tegakannya.

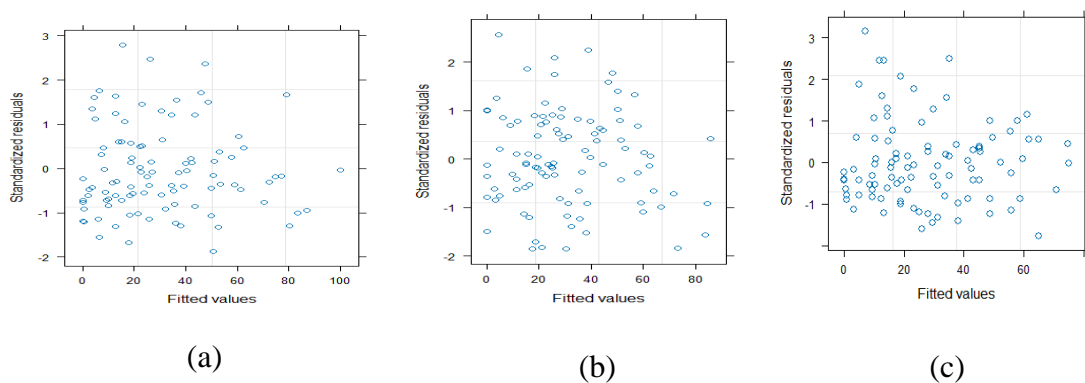
Tabel 3 Rekapitulasi model terbaik untuk menduga biomassa tegakan di areal rehabilitasi HPGW

Peubah bebas	Model	Parameter	Kriteria statistik				
			SE	RMSE	R^2_{adj}	AIC	BIC
Umur (A)	M1	a -2,50	7,86	22,51	13,59%	883,32	891,05
		b 2,80	0,69				
Diameter (D)	M2	a 0,04	0,009	14,88	62,24%	675,07	685,37
		b 2,34	0,07				
Tinggi (T)	M1	a -9,52	5,80	20,17	33,76%	897,42	905,26
		b 2,97	0,42				
Bidang dasar (G)	M2	a 3,03	0,11	2,19	99,18%	431,14	438,87
		b 1,12	0,01				
Kerapatan (N)	M1	a -83,44	23,51	21,88	18,33%	877,85	885,58
		b 19,19	4,04				
Umur (A) dan diameter (D)	M8	a 0,06	0,02	14,49	64,30%	680,59	693,47
		b -0,52	0,21				
		c 2,68	0,17				
Umur (A) dan tinggi (T)	M9	a 189,04	69,87	19,01	38,58%	791,97	804,84
		b -6,07	4,03				
		c -17,37	3,52				
Umur (A) dan bidang dasar (G)	M8	a 1,77	0,10	2,05	99,27%	292,45	305,32
		b 0,21	0,27				
		c 1,12	0,009				
Umur (A) dan kerapatan (N)	M8	a 0,00057	0,00	15,24	60,52%	743,26	756,13
		b 2,37	0,19				
		c 1,25	0,12				

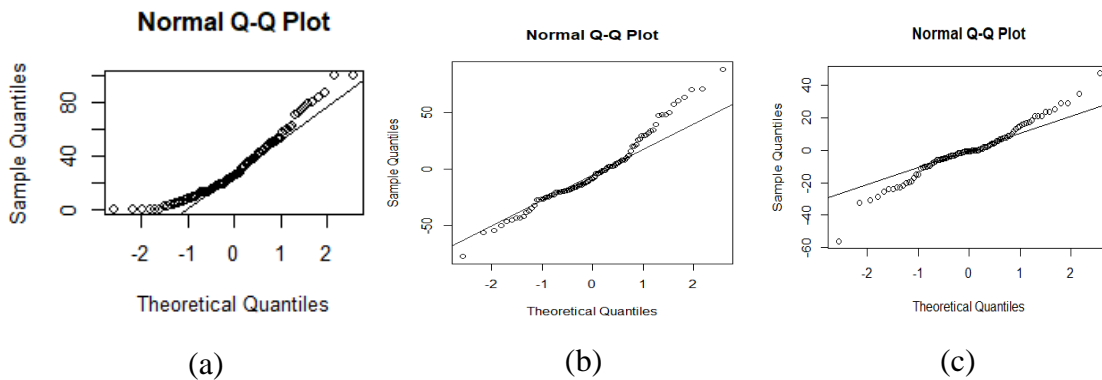
Bidang dasar tegakan merupakan peubah yang tidak mudah diukur langsung di lapangan, sehingga diperlukan model alternatif untuk menduga biomassa tegakan di lapangan. Berdasarkan perbandingan nilai kriteria statistik hasil penyusunan model, maka alternatif model yang dapat digunakan adalah model M8 dengan peubah umur dan diameter yang memiliki nilai RMSE sebesar 14,49 ton/ha, R^2_{adj} sebesar 64,30%, AIC sebesar 680,59, dan BIC sebesar 693,47. Alternatif model lainnya adalah M8 dengan peubah bebas umur dan kerapatan tegakan dengan nilai RMSE sebesar 15,24 ton/ha, R^2_{adj} sebesar 60,52%, AIC sebesar 743,26, dan BIC sebesar 756,13. Nilai-nilai kriteria statistik dari kedua model tersebut menunjukkan bahwa model-model termasuk kuat, yang ditunjukkan oleh nilai R^2_{adj} yang termasuk kuat karena lebih dari 50% (Hair *et al.* 1998). Adapun persamaan dari kedua model tersebut secara berturut-turut adalah $W = 0,06A^{-0,52}D^{2,68}$ atau $W = 0,00057A^{2,37}N^{1,25}$.

Selain memenuhi kriteria statistik, model-model pertumbuhan harus memenuhi juga asumsi-asumsi model regresi model, khususnya kenormalan sisaan dan kehomogenan ragam sisaan. Uji normalitas dilakukan untuk menguji pada suatu model regresi bahwa peubah bebas dan peubah terikat ataupun keduanya memiliki distribusi yang normal atau tidak (Ghozali 2018). Model regresi dapat digunakan untuk menduga dengan baik apabila asumsi keaditifan terpenuhi. Model bersifat aditif dapat dilakukan berdasarkan pola hubungan antara nilai sisaan dengan nilai dugaan.

Berdasarkan hasil verifikasi asumsi model, seluruh model yang terdapat pada Tabel 1 memenuhi asumsi ragam sisaan. Sebagai contoh, untuk model M8 (dengan peubah umur dan bidang dasar, umur dan diameter, serta umur dan kerapatan), grafik homogenitas ragam sisaan (Gambar 2) menunjukkan bahwa sebaran nilai sisaan dan nilai dugaan menyebar acak di sekitar nilai sisaan nol dan tidak membentuk pola tertentu, sehingga dapat disimpulkan bahwa sifat keaditifan model terpenuhi. Selain itu, grafik kenormalan sisaan (Gambar 3) juga menunjukkan bahwa sebaran sisaan mendekati garis lurus sehingga model memenuhi asumsi kenormalan sisaan (Antasari 2010). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa model pertumbuhan biomassa yang telah dipilih yaitu model M8 dengan peubah bebas umur dan luas bidang dasar, umur dan diameter, serta umur dan kerapatan tegakan merupakan model pertumbuhan yang dapat menjelaskan biomassa tegakan pinus dengan baik dibandingkan dengan model-model lainnya yang tidak memenuhi asumsi kenormalan sisaan dan kehomogenan ragam sisaan.



Gambar 2 Plot kehomogenan ragam sisaan dari model pertumbuhan biomassa dengan peubah bebas (a) umur dan bidang dasar, (b) umur dan diameter, dan (c) umur dan kerapatan tegakan

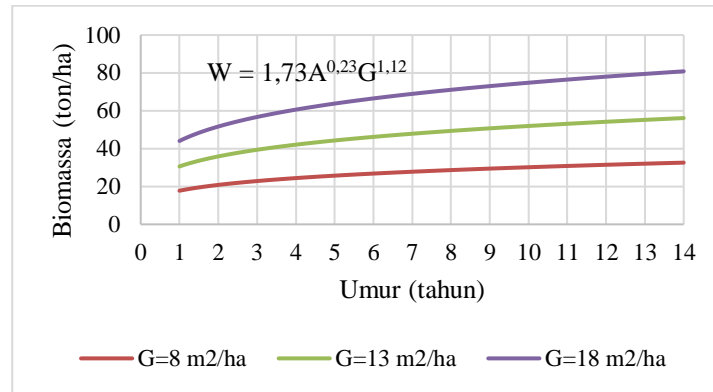


Gambar 3 Plot kenormalan sisaan dari model pertumbuhan biomassa dengan peubah bebas (a) umur dan bidang dasar, (b) umur dan diameter, dan (c) umur dan kerapatan tegakan

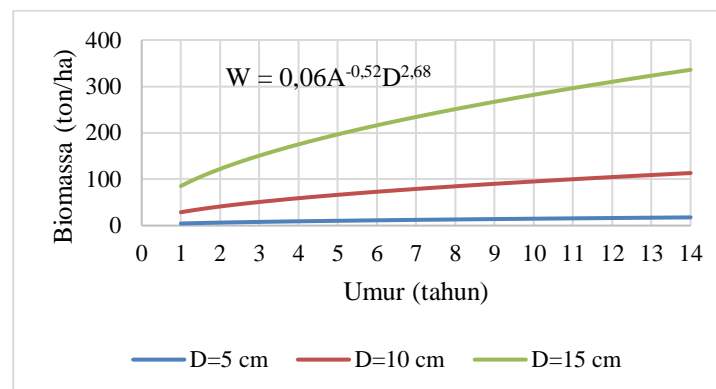
Pertumbuhan dan Riap Biomassa

Berdasarkan kurva pertumbuhan yang disusun berdasarkan model M8 dengan peubah umur dan bidang dasar (Gambar 4a), umur dan diameter (Gambar 4b), dan umur dan kerapatan (Gambar 4c), biomassa tegakan *Pinus merkusii* di areal rehabilitasi HPGW mengalami pertumbuhan seiring dengan bertambahnya umur tegakan. Hal ini sesuai dengan Daniel *et al.* (1987) yang menyatakan bahwa pertumbuhan merupakan fungsi dari umur tegakan yang bergantung pada jenis dan kualitas tempat tumbuh.

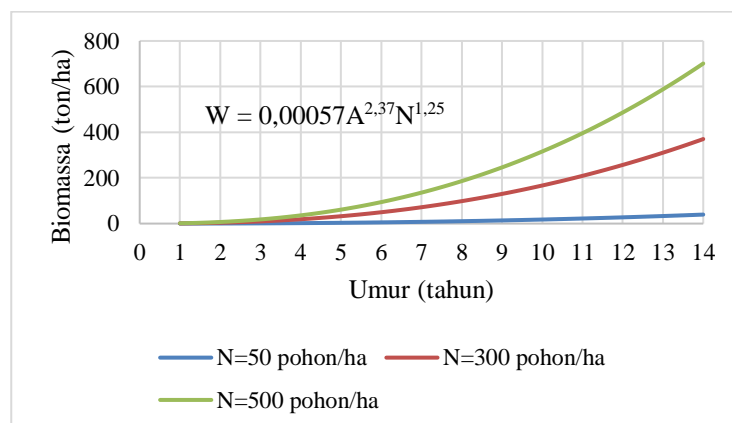
Dari Gambar 4 terlihat bahwa pertumbuhan biomassa tegakan pada umur 1–6 tahun memiliki kemiringan kurva yang tajam, kemudian pada umur 6–14 tahun memiliki kemiringan kurva yang cukup landai. Hal ini menunjukkan bahwa pada umur 1–6 tahun tegakan pinus tersebut memiliki laju pertumbuhan biomassa yang tinggi, namun setelah 6 tahun laju pertumbuhan biomassa cenderung lambat bahkan konstan. Akan tetapi, pola berbeda terlihat pada kurva pertumbuhan dengan peubah umur dan kerapatan (Gambar 4c) karena model pertumbuhannya memiliki RMSE yang lebih tinggi dibandingkan dua model lainnya.



(a)



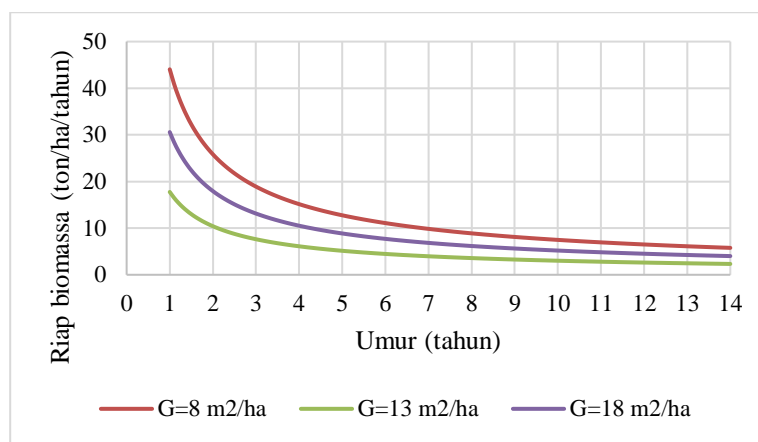
(b)



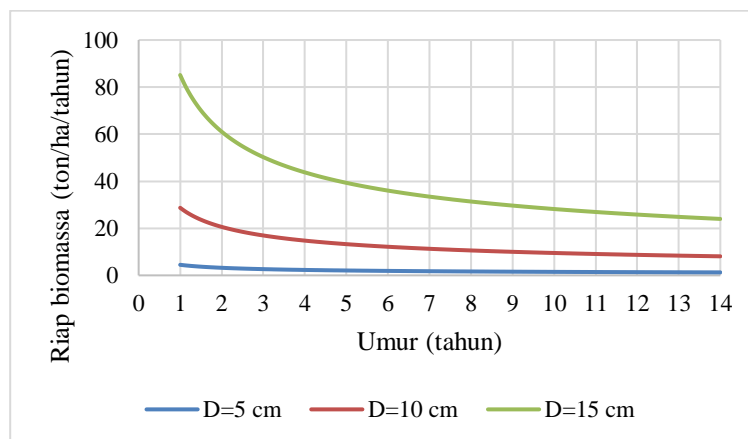
(c)

Gambar 4 Kurva pertumbuhan biomassa tegakan *Pinus merkusii* di areal rehabilitasi HPGW dengan peubah bebas (a) umur dan luas bidang dasar, (b) umur dan diameter, serta (c) umur dan kerapatan tegakan

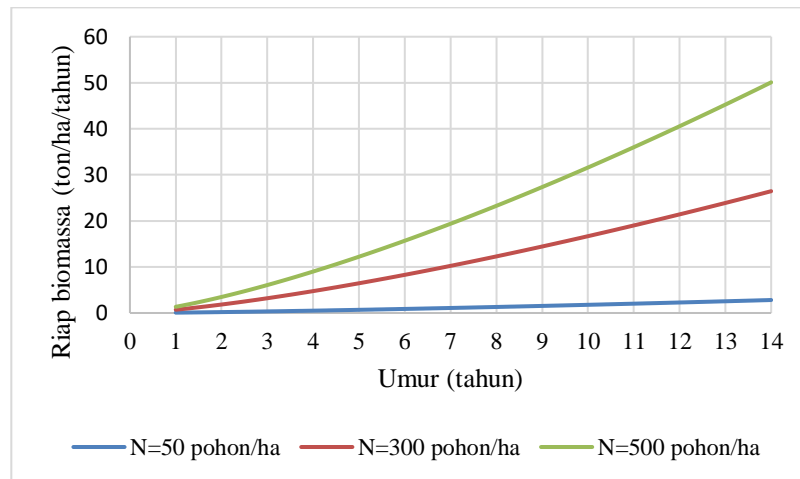
Riap tahunan rata-rata (MAI) biomassa tegakan *Pinus merkusii* di areal rehabilitasi HPGW cenderung semakin menurun seiring bertambahnya umur tegakan dan meningkatnya bidang dasar tegakan (Gambar 5a) dan menurunnya diameter tegakan (Gambar 5b). Akan tetapi, riap biomassa tegakan semakin meningkat seiring meningkatnya umur dan kerapatan tegakan (Gambar 5c). bertambahnya semakin menunjukkan kemudian dihitung dengan menggunakan rumus *Mean Annual Increment* (MAI). Riap biomassa yang semakin tinggi menunjukkan bahwa pohon-pohon dalam tegakan tersebut tumbuh lebih cepat (Suhartati dan Pebriansyah 2021) dan mampu menghasilkan lebih banyak biomassa dalam satu tahun. Riap biomassa pada umur tertua (14 tahun) dan bidang dasar tertentu adalah sebesar 5,77 ton/ha/tahun (Gambar 5a), yang berarti bahwa tegakan pinus yang ditanam tahun 2009 tersebut menghasilkan biomassa dengan laju pertumbuhan sebesar 5,77 ton/ha/tahun.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5 Kurva riap tahunan rata-rata (MAI) biomassa tegakan di areal rehabilitasi HPGW dengan peubah bebas (a) umur dan luas bidang dasar, (b) umur dan diameter, dan (c) umur dan kerapatan tegakan

SIMPULAN

Pertumbuhan biomassa tegakan *Pinus merkusii* di areal rehabilitasi HPGW dapat diduga menggunakan model $W = 1,77A^{0,21}G^{1,12}$ dengan nilai R^2adj sebesar 99,27% dan $RMSE$ sebesar 2,05 ton/ha. Namun, apabila data umur dan luas bidang dasar tidak tersedia maka alternatifnya adalah model pertumbuhan dengan peubah umur dan diameter, yaitu $W = 0,06A^{-0,52}D^{2,68}$ ($R^2adj = 64,30\%$ dan $RMSE = 14,49$ ton/ha), atau model pertumbuhan dengan peubah umur dan kerapatan tegakan, yaitu $W = 0,00057A^{2,37}N^{1,25}$ ($RMSE = 15,24$ ton/ha dan $R^2adj = 60,52\%$). Model-model pertumbuhan tersebut dapat digunakan oleh pengelola HPGW untuk menduga biomassa tegakan di areal rehabilitasi pada berbagai umur dan bidang dasar atau kerapatan tegakan sesuai ketersediaan datanya.

DAFTAR PUSTAKA

- Antasari I. 2010. Penerapan diagnostik sisaan pada model linier rancangan acak kelompok lengkap [skripsi]. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Arief A. 2001. *Hutan dan Kehutanan*. Yogyakarta: Kanisius
- Audina N, Solihat RF, Purwanto A. 2020. Pengaruh kelas umur terhadap produktivitas getah pohon *Pinus merkusii* di KPH Bandung Utara. *Wanamukti*. 23(1):10–21.
- Bustomi S, Yulianti M. 2013. Model hubungan tinggi dan diameter pohon akasia (*Acacia auriculiformis*) sebagai penghasil kayu energi di Kabupaten Purwokerto Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*. 10(3): 155–160.
- Cheng B, Ioannou I, Serafeim G. 2014. Corporate social responsibility and access to finance. *Strategic Management Journal*. 35(1): 1–23.
- Krisnawati H, Djoko W. 2004. Riap diameter tegakan hutan alam rawa bekas tebangan di Provinsi Jambi. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*. 2(1): 156–166.
- Cochran. 1977. *Sampling Techniques*. New York (US): John Wiley & Sons.
- Daniel TW, Helms JA, Baker FS. 1987. *Prinsip-Prinsip Silvikultur*. Djoko Marsono, penerjemah; Oemi Hani'in Soeseno, editor. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Ghozali I. 2018. *Aplikasi Analisis Multivariate SPSS 25 (9th ed.)*. Semarang: Universitas Diponegoro.

- Hair Joseph F, Anderson RE, Tatham RL, Black WC. 1998. *Multivariate Data Analysis. Fifth Edition*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Hardjowigeno S. 1987. *Ilmu Tanah*. Jakarta: Mediyatama Sarana Perkasa.
- Krisnawati H, Djoko W. 2004. Riap diameter tegakan hutan alam rawa bekas tebangan di Provinsi Jambi. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*. 2(1): 156–166.
- Kusmana C. 1993. A study on mangrove forest management base on ecological data in East Sumatra, Indonesia [Disertasi]. Japan: Kyoto University, Faculty of Agricultural.
- Lundqvist L. 2017. Tamm review: Selection system reduces long-term volume growth in Fennoscandic uneven-aged Norway spruce forests. *Forest Ecology and Management*. 391: 362–375.
- Momongan JF, Gosal PH, Kumuru VA. 2017. Efektivitas jalur hijau dalam menyerap emisi gas rumah kaca di Kota Manado. *Jurnal Spasial: Perencanaan Wilayah dan Kota*. 4(1): 36–43.
- Shiver BD, Borders BE. 1996. *Sampling Techniques for Forest Resource Inventory*. New York (US): John Willey & Sons.
- Stas SM, Rutishauser E, Chave J, Anten NPR, Laumonier Y. 2017. Estimating the aboveground biomass in an old secondary forest on limestone in the Moluccas, Indonesia: Comparing locally developed versus existing allometric models. *Forest Ecology and Management* 389: 27–34.
- Suhartati T, Pebriansyah. 2021. Daur volume optimal jati di hutan rakyat (studi kasus di Desa Girikarto, Kecamatan Pangang, Kabupaten Gunung Kidul). *Journal Wanatropika* 11(2):17–25.
- Tiryana T, Tatsuhara S, Shiraishi N. 2011. Empirical model for estimating the stand biomass of teak plantation in Java, Indonesia. *Journal of Forest Planning* 16:177–188.
- Utomo Y. 2020. Model alometrik biomassa pohon pinus di areal rehabilitasi Hutan Pendidikan Gunung Walat (HPGW), Sukabumi, Jawa Barat [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.