

PERSAMAAN ALOMETRIK BIOMASSA DAN MASSA KARBON *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. Studi Kasus Cagar Alam Pulau Dua Banten

*Biomass and Carbon Mass Allometric Equation Models of Avicennia marina (Forsk.) Vierh.
Case Study Pulau Dua Natural Reserve Banten*

Tyas Ayu Lestari¹, Aswin Rahadian², M. Yanuar J. Purwanto³, dan Ietje Wientarsih⁴

¹⁾ Prodi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, IPB,

²⁾ Wetlands International Indonesia,

³⁾ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fateta IPB,

⁴⁾ Fakultas Kedokteran Hewan IPB.

ABSTRACT

Research measurements of carbon stocks *Avicennia marina* has been done by Dharmawan and Siregar (2008) with a DBH 5 cm. Calculation of carbon stocks *Avicennia marina* with DBH less than 5 cm hadn't been done. Currently, approaches to measuring biomass and carbon mass mangrove species is being developed through allometric equation. Allometric equation to estimate carbon stocks are still limited, especially for mangrove with DBH less than 5 cm. Therefore, this research carried out calculations to obtain allometric equations for estimating biomass and carbon mass *Avicennia marina* with DBH less than 5 cm. The results of research can complement allometric equations that have been published previously. Allometric equations constructed using two equations, namely linear and logarithmic with two variables such as total height (x_1) and diameter at breast height / DBH (x_2). Allometric equation to estimated total biomass, root, stem, branch and leaves are $\text{Log } Y_{\text{Total}} = -7.92 + 2.02 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Root}} = -8.37 + 1.94 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Stem}} = -8.83 + 1.99 \text{ Log } (Tt) + 0.419 \text{ Log } (DBH)$, $\text{Log } Y_{\text{Branch}} = -8.63 + 2.01 \text{ Log } (Tt)$, dan $\text{Log } Y_{\text{Leaves}} = -7.73 + 1.63 \text{ Log } (Tt)$. Allometric equation to estimated total carbon root, stem, branch and leaves are $\text{Log } Y_{\text{Total}} = -8.82 + 2.21 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Root}} = -9.11 + 2.04 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Stem}} = -8.89 + 2.06 \text{ Log } (Tt) + 0.467 \text{ Log } (DBH)$, $\text{Log } Y_{\text{Branch}} = -9.41 + 2.13 \text{ Log } (Tt)$, dan $\text{Log } Y_{\text{Leaves}} = -8.46 + 1.64 \text{ Log } (Tt)$.

Key words: Seedling, stake, total height, diameter at breast height

PENDAHULUAN

Informasi terkait karbon hutan yang tersimpan dalam bentuk biomassa sangat diperlukan untuk menggambarkan kondisi suatu ekosistem hutan (Krisnawati *et al.* 2012). Hal tersebut akan menunjang kegiatan pengelolaan ekosistem berkelanjutan dan mengetahui perubahan penggunaan lahan akibat berbagai kegiatan terutama deforestasi. Saat ini, nilai stok karbon hutan sudah mulai didekati dengan pendugaan menggunakan model. Model yang dimaksud adalah model persamaan alometrik. Jenkins *et al.* 2003; Zianis dan Mencuccini 2003, Lehtonen *et al.* 2004 dalam Krisnawati *et al.* 2012 menyatakan bahwa bentuk model alometrik terbagi menjadi dua, yaitu model alometrik biomassa dan model alometrik volume. Model alometrik merupakan sebuah model yang digunakan untuk menggambarkan perubahan yang sistematis dan didalamnya berisi hubungan antara ukuran atau pertumbuhan dari salah satu bagian dengan keseluruhan komponen dalam suatu makhluk hidup (Parresol 1999). Hubungan tersebut dinyatakan secara matematika baik dalam bentuk fungsi logaritma maupun pangkat. Melalui model persamaan alometrik, biomassa dari suatu pohon dapat diduga hanya dengan memasukkan parameter diameter, tinggi, atau

kombinasi keduanya sehingga biomassa tegakan dalam suatu ekosistem dapat dihitung (Krisnawati *et al.* 2012).

Pencarian model persamaan alometrik semakin berkembang pada berbagai jenis pohon termasuk jenis-jenis yang terdapat dalam hutan mangrove. Beberapa penelitian sudah mengembangkan persamaan alometrik khusus untuk jenis mangrove yang tersebar di wilayah Indonesia seperti *Avicennia marina*, *Bruguiera gymnorrhiza*, *Bruguiera parviflora*, *Bruguiera sexangula*, *Bruguiera spp*, *Rhizophora apiculata*, *Rhizophora mucronata*, *Rhizophora spp*, dan *Xylocarpus granatum* (Krisnawati *et al.* 2012). Khusus untuk jenis *Avicennia marina* di wilayah Indonesia, model persamaan alometrik sudah diteliti oleh Dharmawan dan Siregar (2008) dengan variabel diameter setinggi dada (DBH) 6.4-35.2 cm dan tinggi 4.5-10 m. Untuk melengkapi informasi yang sudah tersedia, penelitian difokuskan pada pembangunan model persamaan alometrik untuk jenis *Avicennia marina* yang memiliki DBH ≤ 5 cm dan tinggi ≤ 5 m. Model alometrik yang dibangun meliputi persamaan alometrik untuk menduga nilai biomassa dan massa karbon untuk bagian akar, batang, cabang, daun, dan seluruh bagian pohon secara umum. Model yang dibangun terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu model alometrik utama dan model alometrik tambahan. Model alometrik utama terdiri dari persamaan alometrik

bentuk regresi linear dan logaritmik linear sederhana. Model alometrik tambahan terdiri dari persamaan alometrik bentuk polinomial, logaritmik non linear, dan eksponensial. Persamaan bentuk regresi power tidak digunakan karena regresi tersebut merupakan bentuk konversi dari persamaan logaritmik linear sederhana. Alasan utama pembagian model alometrik menjadi dua bagian utama adalah kondisi sampel *Avicennia marina* yang masih dalam tahap semai dan pancang sehingga belum memasuki kondisi pertumbuhan pohon secara keseluruhan. Proses pertumbuhannya masih dalam wilayah garis lurus linear apabila dikondisikan pada kurva pertumbuhan tanaman. Variabel yang digunakan adalah tinggi total (Tt) sebagai x_1 dan diameter setinggi dada (DBH) sebagai x_2 . Kedua variabel ada yang digunakan secara terpisah maupun digabungkan untuk membentuk persamaan alometrik. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan untuk berbagai kepentingan terutama yang berkaitan dengan pendugaan stok karbon jenis *Avicennia marina* di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan selama 4 bulan, yaitu pada bulan Maret-Juni 2015. Sampel yang digunakan berasal dari hutan mangrove yang tumbuh alami di atas tanah timbul hasil pemasangan perangkat sedimen yang terletak di pesisir Cagar Alam Pulau Dua (CAPD) Banten. Secara administratif, tanah timbul tersebut masuk ke dalam wilayah CAPD. Analisis sampel dilakukan di Laboratorium Kimia Hasil Hutan, Departemen Hasil Hutan-Fakultas Kehutanan IPB.

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian adalah *Global Positioning System* (GPS), meteran, alat tulis, pisau, timbangan, plastik, aluminium foil, karung, alat-alat laboratorium, dan kamera. Bahan-bahan yang digunakan adalah mangrove jenis *Avicennia marina* yang memiliki diameter ≤ 5 cm dan tinggi ≤ 5 m.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan terdiri dari 8 tahapan, yaitu:

1) Pengambilan sampel vegetasi *Avicennia marina* (Dharmawan dan Siregar 2008)

Sampel mangrove diambil secara destruktif dengan mencabut seluruh bagian pohon (akar, batang, cabang, daun). Sampel diambil secara sengaja (*purposive sampling*) berdasarkan gradien ketinggian mulai dari 1-5 m sehingga diperoleh 5 kelompok sampel (I, II, III, IV, dan V). Setiap kelompok terdiri dari 6 sampel, 5 sampel digunakan untuk membangun persamaan alometrik dan 1 sampel digunakan untuk validasi sehingga total sampel yang digunakan pada penelitian adalah 30 sampel. Setiap bagian *Avicennia marina* yang meliputi akar, batang, cabang, dan daun dipisahkan dan ditimbang berat basahanya di lapangan.

2) Penentuan kadar air (Haygreen dan Bowyer 1982)

Bagian dari sampel yang sudah ditimbang berat basahanya di lapangan kemudian dioven selama kurang lebih 3 jam pada suhu 105 °C. Setelah itu, sampel didinginkan di dalam desikator dan ditimbang sampai diperoleh berat yang konstan. Berat basah di lapangan dinyatakan sebagai berat awal (B_0) dan berat sampel setelah dioven dinyatakan sebagai berat akhir (B_k). Kadar air dihitung berdasarkan persamaan:

$$\% \text{ KA} = \frac{B_0 - B_k}{B_k} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

- %KA : Persen kadar air (%)
- B_0 : Berat awal (gr)
- B_k : Berat akhir (gr)

3) Penentuan biomassa (Haygen dan Bowyer 1982)

Penentuan biomassa *Avicennia marina* dilakukan melalui dua cara, yaitu pengovenan dan pendugaan menggunakan model matematis atau persamaan alometrik. Pendugaan biomassa dengan cara pengovenan dilakukan dengan cara mengeringkan setiap bagian *Avicennia marina* (akar, batang, cabang, dan daun) menggunakan oven dengan suhu 102 °C selama 2 hari hingga beratnya konstan. Berat akhir yang diperoleh adalah nilai biomassanya atau disebut berat kering tanur (BKT). Persamaan BKT dinyatakan sebagai:

$$\text{BKT} = \frac{BB}{1 + \frac{\% \text{KA}}{100}} \dots\dots\dots(2)$$

dimana:

- BKT : Berat kering tanur/ biomassa (gr)
- BB : Berat basah di lapangan (gr)
- % KA : Persen kadar air (%)

Penentuan biomassa menggunakan model alometrik dihitung berdasarkan hubungan antara biomassa dengan dimensi pohon, yaitu tinggi dan dimeter setinggi dada (DBH). Model penduga biomassa yang dipilih merupakan model yang memiliki nilai R^2 paling tinggi, simpangan baku (s) paling rendah, dan memenuhi uji validasi model. Secara umum, model penduga biomassa *Avicennia marina* yang digunakan merupakan fungsi dari tinggi total (Tt) dan diameter setinggi dada (DBH) terhadap biomassa (B). Persamaan tersebut, yaitu sebagai berikut:

- Y : $a + bx_1$ (Linear 1 peubah)(3)
- Y : $a + bx_1 + bx_2$ (Linear 2 peubah)(4)
- Log Y : $a + b \text{ Log } x_1$ (Logaritmik linear 1 peubah)(5)
- Log Y : $a + b \text{ Log } x_1 + b \text{ log } x_2$ (Logaritmik linear 1 peubah)(6)
- Y : $a (\text{Exp } bx_1)$ (Eksponensial 1 peubah)(7)
- Y : $a (\text{Exp } bx_2)$ (Eksponensial 1 peubah)(8)
- Y : $a + b (\text{ln } x_1)$ (Logaritmik non linear 1 peubah)(9)
- Y : $a + b (\text{ln } x_2)$ (Logaritmik non linear 1 peubah)(10)
- Y : $a + bx_1^2 + bx_2$ (Polinomial 1 peubah)(11)
- Y : $a + bx_2^2 + bx_1$ (Polinomial 1 peubah)(12)

dimana:

- Y : Biomassa (kg)
- x₁ : Tinggi Total (cm)
- x₂ : Diameter Setinggi Dada (cm)

4) Penentuan kadar zat terbang (ASTM 1990a)

Sampel yang akan diukur kadar zat terbangnya dipotong-potong menyerupai batang korek api untuk bagian akar, batang dan cabang sementara daun dicincang halus. Sampel yang sudah dipotong selanjutnya dimasukkan ke dalam oven selama 48 jam pada suhu 80 °C. Setelah sampel kering kemudian digiling dan disaring menggunakan saringan berukuran antara 40-60 mesh. Sebanyak 2 gram sampel yang sudah berbentuk serbuk dimasukkan kedalam cawan porselen bertutu dan dikeringkan di dalam tanur dengan suhu 950 °C selama 2 menit. Setelah 2 menit, sampel didinginkan di dalam deksikator dan ditimbang kembali beratnya. Kadar zat terbang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$KZT : \frac{B_0 - B_a}{B_0} \times 100\% \dots\dots\dots(13)$$

dimana:

- KZT : Kadar zat terbang (%)
- B₀ : Berat sampel awal (gr)
- B_a : Berat sampel akhir (gr)

5) Penentuan kadar abu (ASTM 1990b)

Sisa sampel yang digunakan dalam penentuan kadar zat terbang dimasukkan kembali ke dalam tanur selama 6 jam dengan suhu 900 °C. Setelah itu, sampel didinginkan di dalam deksikator dan ditimbang sampai beratnya konstan dan dinyatakan dengan berat kadar abu. Kadar abu dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$KA : \frac{B_a}{B_s} \times 100\% \dots\dots\dots(14)$$

dimana:

- KA : Kadar abu (%)
- B_a : Berat contoh uji yang sudah menjadi abu (gr)
- B_s : Berat contoh sisa uji KZT/ berat awal sebelum pengabuan (gr)

6) Penentuan persen karbon organik/% C-organik (SNI 06-3730-1995)

Persentase karbon organik (% C-organik) dihitung berdasarkan persamaan:

$$\%C_{org} : 100\% - KZT - KA \dots\dots\dots(15)$$

dimana:

- % C_{org} : Persen karbon organik (%)
- KZT : Kadar zat terbang (%)
- KA : Kadar abu (%)

7) Penentuan massa karbon

Massa karbon dari *Avicennia marina* dihitung menggunakan dua cara. Cara pertama dilakukan dengan mengalikan nilai biomassa dengan % C-Organik yang sudah diperoleh dari analisis laboratorium (detail perhitungan untuk mencari nilai biomassa dan % C-

Organik setiap bagian *Avicennia marina* sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya). Cara kedua dilakukan melalui pendekatan model persamaan alometrik. Model persamaan alometrik untuk mencari nilai massa karbon dilakukan sama seperti pada biomassa. Seluruh persamaan yang digunakan juga sama.

8) Validasi Model Persamaan Alometrik

Persamaan alometrik yang dihasilkan selanjutnya dilakukan uji validasi. Uji validasi bertujuan mengetahui keandalan model yang dihasilkan. Uji validasi terdiri dari 4 tahapan, yaitu uji *Chi-square*, simpangan agregat/*Agregative deviation* (SA), simpangan rata-rata/*Mean deviation* (SR), dan rata-rata bias absolut/*Mean average error* (MAE).

Uji *Chi-square*(x²_{hitung}) untuk menguji perbedaan nilai dugaan dengan nilai aktualnya. apabila nilai x²_{hitung} ≤ x²_{tabel (α, n-1)} maka hasil dugaan dianggap valid. *Chi-square* dihitung berdasarkan persamaan:

$$x^2_{hitung} = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y} - y)^2}{y}$$

Dengan kaidah keputusan:

x²_{hitung} ≤ x²_{tabel (α, n-1)} : Terima H₀

x²_{hitung} > x²_{tabel (α, n-1)} : Tolak H₀

H₀ : Nilai dugaan tidak berbeda nyata dengan nilai aktualnya

H₁ : Nilai dugaan berbeda nyata dengan nilai aktualnya

Uji simpangan agregat (SA) merupakan selisih dari jumlah nilai aktualnya dengan nilai dugaan sebagai proporsional terhadap nilai dugaan. Model alometrik yang baik adalah yang memiliki nilai SA -1 sampai +1. Selain SA, uji validasi juga dilakukan dengan menghitung nilai simpangan rata-rata (SR). Nilai SR merupakan jumlah mutlak dari selisih antara jumlah dugaan dengan nilai sebenarnya, proporsional terhadap jumlah nilai dugaan. Nilai SR yang baik tidak melebihi 10%. Nilai SA dan SR dihitung berdasarkan persamaan:

$$SA = \frac{(\sum_{i=1}^n \hat{y} - \sum_{i=1}^n y)}{\sum_{i=1}^n \hat{y}} \quad SR = \left\{ \frac{|\sum_{i=1}^n \frac{\hat{y}-y}{\hat{y}}|}{n} \right\} 100\%$$

Uji validasi terakhir adalah melakukan perhitungan rata-rata bias absolut (MAE). Uji ini dilakukan untuk mengetahui ketepatan simpangan suatu nilai dugaan terhadap nilai sebenarnya. Nilai MAE diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan persamaan:

$$MAE_j = \left(\sum |e_{\hat{y}}| \right) / n_j$$

$$e_{\hat{y}} = Y_{ai} - Y_n$$

dimana:

MAE_j : *Mean average error* (rata-rata bias absolut) persamaan ke-j (ton/pohon)

e_{ij} : Simpangan biomassa ke-i dan pada persamaan ke-j
 Y_{ai} : Nilai aktual (ton)
 Y_{ti} : Nilai dugaan (ton)
 N_j : Jumlah data rumus ke-j

4-5 m. Vegetasi yang tumbuh memiliki diameter (DBH) di bawah 5 cm, yaitu 0.7-3.5 cm. Informasi lebih jelas mengenai jumlah individu dan luasan setiap kelas ketinggian *Avicennia marina* di lokasi penelitian disajikan pada Tabel 1. Sampel pohon diambil berdasarkan keterwakilan kelas tinggi total (Tt) yang terdapat di lokasi penelitian. Jumlah sampel yang diambil sebanyak 30 buah dimana 25 buah digunakan untuk mencari persamaan alometrik dan 5 sampel digunakan untuk validasi. Masing-masing kelas tinggi diwakili dengan 5 sampel. Deskripsi data sampel yang diambil disajikan pada Tabel 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Data

Hasil observasi di lokasi penelitian menunjukkan bahwa vegetasi yang tumbuh di sana seragam, yaitu jenis *Avicennia marina*. Mereka tumbuh di sepanjang pesisir Cagar Alam Pulau Dua (CAPD) secara alami setelah kondisi substrat mulai stabil, yaitu sekitar tahun 2012. Hasil analisis pada bulan Maret 2015 menunjukkan bahwa jumlah populasi mangrove di pesisir CAPD sebanyak 34 882 individu pada areal seluas 0.88 ha dengan kerapatan 39 638 ind/ha. Jumlah tersebut mengalami penurunan sebanyak 51 038 individu sejak dilakukan sensus pertama pada tahun 2012 dengan jumlah awal sebanyak 85 920 individu. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa vegetasi yang tumbuh di sana memiliki ukuran kelas ketinggian (tinggi total) mulai dari 0-1 m, 1-2 m, 2-3 m, 3-4 m, dan

Informasi selanjutnya mengenai deskripsi data yang diperoleh ada nilai biomassa rata-rata dan massa karbon rata-rata dari *Avicennia marina*. Nilai-nilai tersebut terdiri dari nilai biomassa dan massa karbon total rata-rata serta nilai biomassa dan massa karbon rata-rata dari setiap bagian *Avicennia marina*. Informasi tersebut disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Berdasarkan informasi dari kedua tabel tersebut diketahui bahwa nilai biomassa dan massa karbon rata-rata pada batang lebih besar dibandingkan pada bagian akar, cabang, dan daun. Sedangkan nilai biomassa dan massa karbon rata-rata paling kecil terdapat pada bagian daun.

Tabel 1 Jumlah vegetasi *Avicennia marina* dan luasannya di lokasi penelitian

Kelas ketinggian (cm)	Jumlah (individu)	Luasan (ha)
0-100	1.311	0.03
100-200	3.306	0.08
200-300	2.102	0.05
300-400	14.487	0.36
400-500	13.676	0.34
Total	34.882	0.88

Sumber: Hasil penelitian (2015)

Tabel 2 Informasi sebaran tinggi total dan diameter sampel

Kelompok Sampel	Tinggi Total (cm)			Diameter (cm)		
	Mean	Standar Deviasi	Standar Error	Mean	Standar Deviasi	Standar Error
I	0.77	0.08	0.03	95.67	5.96	2.43
II	1.17	0.26	0.11	179.50	16.81	6.86
III	1.33	0.41	0.17	253.83	23.23	9.48
IV	2.52	0.18	0.07	385.50	17.41	7.11
V	3.25	0.52	0.21	488.83	21.64	8.83

Ket: I = 0-1 m, II = 1-2 m, III = 2-3 m, IV = 3-4 m, V = 4-5 m

Sumber: Hasil penelitian (2015)

Tabel 3 Biomassa *Avicennia marina* dalam satu pohon

Kelas Ketinggian (cm)	Biomassa pada Bagian <i>Avicennia marina</i> (gram)				Biomassa Total Per Pohon (gram)
	Akar	Batang	Cabang	Daun	
I	20.25	33.64	21.88	31.11	106.87
II	242.33	140.58	115.32	126.53	624.77
III	313.97	316.54	261.79	255.15	971.48
IV	323.17	724.39	253.85	181.47	1.482.88
V	683.54	1.639.57	763.50	564.22	3.650.95
Rata-rata	316.65	570.94	283.27	231.70	1.367.39

Ket: I = 0-1 m, II = 1-2 m, III = 2-3 m, IV = 3-4 m, V = 4-5 m

Sumber: Hasil penelitian (2015)

Tabel 4 Massa karbon *Avicennia marina* dalam satu pohon

Kelas Ketinggian (cm)	Massa Karbon pada Bagian <i>Avicennia marina</i> (gram)				Massa Karbon Total Per Pohon (gram)
	Akar	Batang	Cabang	Daun	
I	6.02	14.94	6.44	6.15	33.56
II	69.37	66.50	35.06	26.76	197.69
III	92.41	150.91	81.68	48.98	373.98
IV	106.60	351.74	78.61	36.82	573.78
V	238.43	952.49	284.84	113.08	1.588.84
Rata-rata	102.57	307.32	97.33	46.36	553.57

Ket: I = 0-1 m, II = 1-2 m, III = 2-3 m, IV = 3-4 m, V = 4-5 m
 Sumber: Hasil penelitian (2015)

Hubungan Biomassa dan Massa Karbon dengan DBH dan Tinggi Total

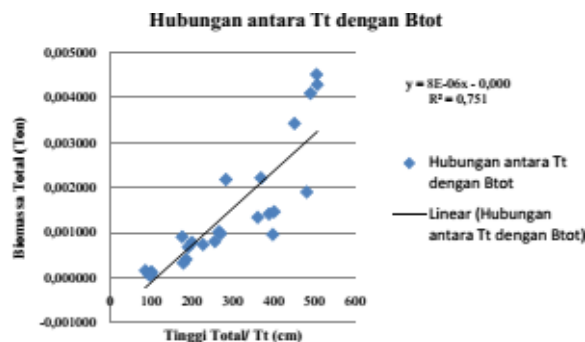
Tinggi total (Tt) dan DBH menjadi variabel yang diperhitungkan dalam mencari model persamaan alometrik dalam penelitian kali ini. Menurut Katterings *et al.* (2001) dalam Maulana dan Pandu (2011), variabel DBH akan meningkatkan efisiensi pengukuran dan akan mengurangi ketidakpastian dari hasil pengukuran berdasarkan persamaan yang dibentuk. Oleh karena itu, keterkaitan keduanya dengan nilai biomassa dan massa karbon dianalisis dan digambarkan dalam kurva linear pada Gambar 1-4.

Hasil analisis menunjukkan bahwa Tt dan DBH memiliki korelasi yang cukup tinggi dengan biomassa total (B_{tot}) dan massa karbon total (C_{tot}) *Avicennia marina*. Nilai koefisien korelasi (R²) antara Tt dengan B_{tot} dan C_{tot} sebesar 0.75 (Gambar 1 dan 2). Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan koefisien korelasi (R²) antara DBH dengan B_{tot} dan C_{tot}, yaitu sebesar 0.8 (Gambar 3 dan 4). Berdasarkan gambaran tersebut, kedua variabel mempengaruhi nilai biomassa dan massa karbon dari *Avicennia marina* sebesar 75-80% dan hanya 20-25% sisanya dipengaruhi oleh variabel lain.

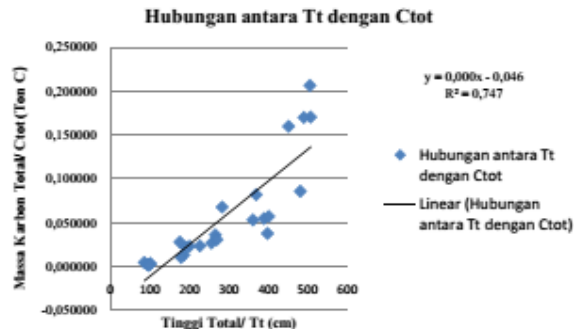
Model Persamaan Alometrik Utama Hasil Penelitian

Komiyama *et al.* (2008) dalam Parvaresh *et al.* (2012) menyatakan bahwa persamaan alometrik pada beberapa dekade terakhir sudah mulai dikembangkan untuk menduga biomassa. Penyusunan model alometrik biomassa pohon mulai berkembang pesat setelah tahun 2000. Dalam rentang waktu tahun 2000-2012, sekitar 77% dari berbagai pustaka yang sudah dipublikasikan menyajikan informasi model alometrik untuk menduga

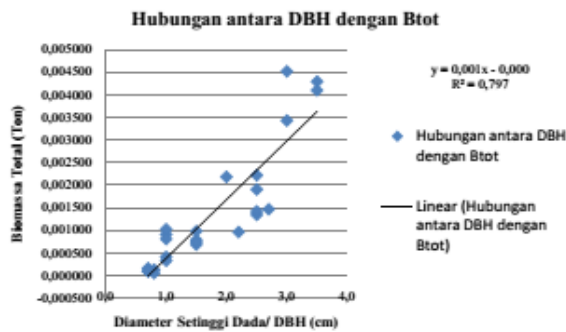
nilai biomassa (Krisnawati *et al.* 2012). Perkembangan tersebut sejalan dengan perkembangan isu perubahan iklim dan tindak lanjut dari komitmen Indonesia dalam menurunkan gas rumah kaca (GRK). Model persamaan alometrik untuk menduga nilai massa karbon belum banyak dilakukan. Informasi yang lebih banyak tersedia meliputi model alometrik untuk menduga nilai biomassa pohon dan volume pohon seperti pada monograf model-model alometrik yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan dan disusun oleh Krisnawati *et al.* (2012). Pendugaan massa karbon biasanya menggunakan persamaan 0.5 x biomassa (Dharmawan dan Siregar 2008). Sementara nilai biomasnya diperoleh melalui persamaan alometrik yang tersedia dengan mengukur nilai DBH, tinggi, atau kompilasi keduanya (Krisnawati *et al.* 2012). Asumsi nilai massa karbon menggunakan 0.5 atau 50% dari biomasnya dijelaskan dalam penelitian Montagu *et al.* (2005) dan Comley dan McGuinness (2005). Model-model alometrik yang sudah dikembangkan khususnya di Indonesia, secara umum disajikan dalam bentuk persamaan Y = axb, dimana x merupakan peubah bebas (DBH, tinggi, atau kompilasi keduanya); Y merupakan peubah tak bebas (biomassa); a merupakan koefisien model alometrik; dan b merupakan eksponen model alometrik. Selain model tersebut, model lain yang banyak disajikan adalah bentuk hubungan logaritma linier, yaitu log (Y) = a + b log (x). Nilai log disini merupakan logaritma berbasis bilangan 10 dari data biomassa atau yang menjadi peubah tidak bebas; nilai Y merupakan biomassa; nilai x merupakan peubah bebas (DBH, tinggi total, maupun kompilasi keduanya); sedangkan nilai a dan b merupakan koefisien regresi.



Gambar 1 Hubungan antara Tt dengan B_{tot}



Gambar 2 Hubungan antara Tt dengan C_{tot}

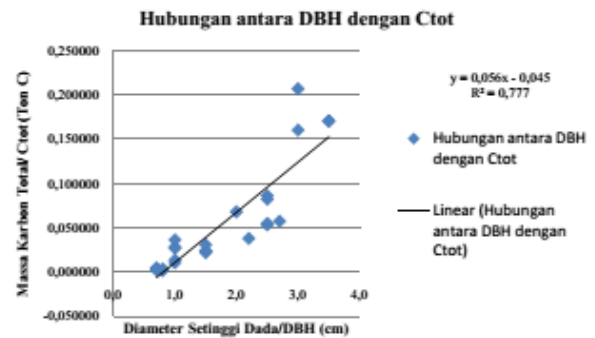
Gambar 3 Hubungan antara DBH dengan B_{tot}

Pada penelitian kali ini, persamaan alometrik utama yang dibangun merupakan persamaan alometrik bentuk linear sederhana dan hubungan logaritma linier. Asumsi yang digunakan untuk membangun kedua bentuk model persamaan alometrik tersebut adalah sampel pohon yang masih berada pada tahap semai dan pancang sehingga kurva pertumbuhan pohon masih diasumsikan berada pada garis lurus linear. Model persamaan alometrik bentuk logaritma linear dapat saja ditransformasikan menjadi bentuk pangkatnya atau persamaan alometrik bentuk power namun pada penelitian kali ini dibiarkan dalam bentuk logaritma linier. Persamaan alometrik lain akan dijelaskan pada bahasan selanjutnya yang meliputi persamaan alometrik bentuk eksponensial, logaritma non linear, dan polinomial pada satu peubah saja, yaitu tinggi total dan DBH.

Persamaan alometrik yang dihasilkan melalui penelitian terbagi menjadi lima bagian, yaitu persamaan alometrik untuk menduga bagian akar, batang, cabang, daun, dan keseluruhan dalam satu bagian pohon baik untuk biomassa maupun massa karbon total. Pada beberapa penelitian yang sudah dipublikasikan, model persamaan alometrik biasanya disajikan dalam dua jenis, yaitu untuk menduga nilai biomassa bagian bawah permukaan (*below ground biomass/ BGB*) dan biomassa bagian atas permukaan tanah (*above ground biomass/ AGB*). Di dalam hutan mangrove, BGB merupakan bagian bawah pohon berupa akar dan sedimen lumpur yang terjepit (Pachpande dan Pejaver 2015). Sedangkan AGB merupakan bagian dari pohon yang meliputi batang, cabang, ranting, daun, bunga, dan buah.

Hasil analisis laboratorium menghasilkan nilai biomassa yang berupa nilai berat kering tanur (BKT) untuk setiap bagian pohon. Analisis laboratorium lebih lanjut menghasilkan nilai massa karbon. Selanjutnya nilai-nilai tersebut dikonversi menjadi persamaan regresi linear dan logaritmik linear. Persamaan yang dibangun menggunakan satu variabel tinggi total, yaitu Tinggi total (Tt) dan dua variabel, yaitu Tt dan DBH sehingga diperoleh 40 persamaan alometrik. Dua puluh persamaan untuk menduga nilai biomassa dan 20 lainnya untuk menduga nilai massa karbon (Tabel 5 dan 6). Dua puluh persamaan tersebut terbagi menjadi masing-masing 4 persamaan untuk menduga biomassa/massa karbon total, akar, batang, cabang, dan daun.

Kehandalan model persamaan alometrik yang dibangun harus memenuhi 3 kriteria, yaitu nilai koefisien determinasi (R^2), koefisien determinasi yang disesuaikan (R^2 adj), dan sisaan/simpangan bakunya (s).

Gambar 4 Hubungan antara DBH dengan C_{tot}

Berdasarkan ketiga parameter tersebut, maka nilai R^2 adj akan menjadi parameter utama dalam menentukan persamaan alometrik terbaik, baik untuk menduga biomassa maupun massa karbonnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien determinasi yang disesuaikan (R^2 adj) dari persamaan alometrik bentuk logaritmik lebih tinggi dibandingkan linear (Tabel 5 dan Tabel 6). Oleh karena itu, bentuk logaritmik akan menjadi prioritas dalam pemilihan persamaan alometrik terbaik untuk menduga biomassa dan massa karbon. Nilai R^2 , R^2 adj, dan simpangan baku tidak terlepas dari jumlah sampel yang digunakan pada penelitian. Pada penelitian, jumlah sampel yang digunakan sebanyak 25 pohon dan jumlah tersebut tidak menjadi keharusan dalam membangun persamaan alometrik. Jumlah sampel sangat disesuaikan dengan kondisi di lapangan, kemampuan peneliti, dan kondisi populasi di lokasi penelitian. Semakin banyak n sampel yang digunakan maka model persamaan alometrik akan semakin baik (Akbar 2012).

Selain ketiga kriteria yang sudah dijelaskan, kehandalan model juga diuji melalui validasi. Dari 4 kriteria uji validasi, kriteria χ^2_{hitung} dan nilai MAE merupakan kriteria utama yang dilihat untuk menentukan kehandalan model. Berdasarkan hasil uji validasi, seluruh model persamaan alometrik untuk menduga biomassa dan massa karbon memiliki nilai χ^2_{hitung} yang lebih kecil dibandingkan χ^2_{tabel} baik untuk menduga biomassa maupun massa karbon. Nilai MAE dari setiap model persamaan alometrik dipilih yang paling kecil. Nilai SA dan SR tidak begitu mempengaruhi secara langsung dalam proses pengujian kehandalan model namun kedua kriteria tersebut menjadi bahan pertimbangan tambahan dalam memilih persamaan alometrik yang paling sesuai untuk menduga biomassa dan massa karbon *Avicennia marina* yang memiliki diameter batang ≤ 5 cm.

Uji terakhir yang dijadikan acuan dalam pemilihan model alometrik terbaik adalah uji asumsi regresi. Uji asumsi regresi yang dilakukan meliputi uji kenormalan dan heteroskedastisitas yang dijelaskan pada bagian Lampiran 1 untuk biomassa dan Lampiran 2 untuk massa karbon. Uji multikolinearitas dan autokorelasi tidak dilakukan karena terdapat beberapa persamaan alometrik dengan satu variabel independen saja, yaitu tinggi total. Persamaan alometrik terbaik yang dipilih adalah persamaan yang memenuhi syarat kenormalan, yaitu asumsi residual yang terdistribusi secara normal, yaitu apabila nilai sisaan (residual) dengan probability

normalnya membentuk garis normal pada pusat sumbu (garis). Syarat lainnya adalah tidak memiliki gejala heteroskedastitas, yaitu jika nilai *fited value* nya dengan sisaan (residual) menyebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh persamaan alometrik untuk menduga biomassa maupun massa karbon baik yang berbentuk linear (1 atau 2 variabel bebas) maupun logaritmik linear (1 atau 2 variabel bebas) memenuhi asumsi normalitas dan tidak memiliki gejala heteroskedastitas.

Sebagai bahan pertimbangan lain, hasil perhitungan aktual biomassa dan massa karbon dari analisis laboratorium dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan berbagai persamaan juga disajikan. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 7 untuk biomassa dan Tabel 8 untuk massa karbonnya. Nilai-nilai tersebut juga menjadi pertimbangan untuk menentukan persamaan alometrik yang dipilih untuk menduga nilai biomassa dan massa karbon *Avicennia marina*. Nilai perhitungan yang lebih mendekati nilai perhitungan secara aktual dapat menjadi prioritas dalam pemilihan model alometrik paling baik untuk menduga biomassa dan massa karbonnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa perhitungan menggunakan persamaan logaritmik 1 variabel menghasilkan nilai biomassa total, akar, cabang, dan daun yang mendekati perhitungan aktualnya. Selanjutnya, hasil analisis menunjukkan bahwa persamaan logaritmik 2 variabel menunjukkan nilai perhitungan yang mendekati nilai aktual biomassa batang.

Berdasarkan hasil analisis, persamaan alometrik terbaik untuk menduga nilai biomassa total, akar, cabang, dan daun adalah persamaan logaritmik linear sederhana dengan satu variabel saja, yaitu tinggi total. persamaan tersebut berturut-turut adalah $\text{Log } Y_{\text{Total}} = -7.92 + 2.02 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 88.8%, $\text{Log } Y_{\text{Akar}} = -8.37 + 1.94 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 73.2%, $\text{Log } Y_{\text{Cabang}} = -8.63 + 2.01 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 82.8%, dan $\text{Log } Y_{\text{Daun}} = -7.73 + 1.63 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 71.2%. Berbeda dengan yang lainnya, persamaan alometrik terpilih untuk menduga biomassa batang adalah persamaan bentuk logaritmik dua variabel, yaitu tinggi total dan DBH. Persamaan yang dimaksud adalah $\text{Log } Y_{\text{Batang}} = -8.83 + 1.99 \text{ Log } (Tt) + 0.419 \text{ Log } (DBH)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 95.3%. Hasil yang sama juga diperoleh untuk persamaan alometrik massa karbon *Avicennia marina*. Persamaan regresi logaritmik dengan satu variabel menjadi persamaan terbaik untuk menduga nilai massa karbon total, akar, cabang, dan daun sedangkan persamaan logaritmik dua variabel menjadi persamaan terbaik untuk menduga massa karbon batang. Persamaan alometrik untuk massa karbon total, akar, cabang, dan daun adalah $\text{Log } Y_{\text{Total}} = -8.82 + 2.21 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 91.6%, $\text{Log } Y_{\text{Akar}} = -9.11 + 2.04 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 78.2%, $\text{Log } Y_{\text{Cabang}} = -9.41 + 2.13 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 83.0%, dan $\text{Log } Y_{\text{Daun}} = -8.46 + 1.64 \text{ Log } (Tt)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 70.7% sedangkan untuk massa karbon batang adalah $\text{Log } Y_{\text{Batang}} = -8.89 + 2.06 \text{ Log } (Tt) + 0.467 \text{ Log } (DBH)$ dengan $R^2\text{-adj}$ 95.2%.

Tabel 5 Persamaan alometrik untuk menduga nilai biomassa *Avicennia marina* dengan diameter ≤ 5 cm

No	Bagian tumbuhan	Jenis persamaan	Variabel (cm)	Persamaan alometrik (ton)	s	R ² (%)	R ² -Adj (%)	Fhit	Validasi			
									X ² hitung	SA	SR (%)	MAE
1	Total	Linear	Tt	$Y = -0.000915 + 0.000008 X_1$	0.0007	75.2	74.1	69.6	0.0027	0.50	71.54	0.0007
2			Tt dan DBH	$Y = -0.000954 + 0.000002X_1 + 0.00103X_2$	0.0006	80.1	78.3	44.33	0.0017	0.59	96.99	0.0006
3		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -7.92 + 2.02 \text{ Log } X_1$	0.1835	89.2	88.8	190.61	0.0022	0.51	119.69	0.0007
4	Tt dan DBH		$\text{Log } Y = -7.42 + 1.79 \text{ Log } X_1 + 0.265 \text{ Log } X_2$	0.1862	89.4	88.4	92.72	0.0020	0.54	119.41	0.0007	
5	Akar	Linear	Tt	$Y = -0.000085 + 0.000001 X_1$	0.0002	58.6	56.8	32.60	0.0017	-2.40	407.90	0.0004
6			Tt dan DBH	$Y = -0.000095 - 0.000000X_1 + 0.000270X_2$	0.0002	67.5	64.6	22.87	0.0011	-0.53	122.46	0.0002
7		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -8.37 + 1.94 \text{ Log } X_1$	0.3076	74.3	73.2	66.47	0.0013	-1.21	301.92	0.0003
8			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -8.76 + 2.12 \text{ Log } X_1 - 0.206 \text{ Log } X_2$	0.3133	74.5	72.2	32.11	0.0013	-1.28	297.87	0.0003
9	Batang	Linear	Tt	$Y = -0.000539 + 0.000004 X_1$	0.0003	82.3	81.5	106.62	0.0011	-0.23	18.20	0.0002
10			Tt dan DBH	$Y = -0.000553 + 0.000002X_1 + 0.000368X_2$	0.0002	85.2	83.9	63.48	0.0024	0.08	65.90	0.0004
11		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -9.18 + 2.35 \text{ Log } X_1$	0.1355	95.4	95.2	472.36	0.0648	0.92	59.92	0.0004
12			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -8.38 + 1.99 \text{ Log } X_1 + 0.419 \text{ Log } X_2$	0.1334	95.7	95.3	244.46	0.0019	-0.07	201.35	0.0004
13	Cabang	Linear	Tt	$Y = -0.000195 + 0.000002 X_1$	0.0002	62.3	60.7	38.03	0.0003	-0.30	92.18	0.0001
14			Tt dan DBH	$Y = -0.000205 + 0.000000X_1 + 0.000264X_2$	0.0002	68.7	65.8	24.10	0.0005	-0.53	114.05	0.0002
15		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -8.63 + 2.01 \text{ Log } X_1$	0.2397	83.5	82.8	116.40	0.0006	-0.89	92.14	0.0002
16			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -7.75 + 1.61 \text{ Log } X_1 + 0.463 \text{ Log } X_2$	0.2417	84.1	82.7	58.21	0.0005	-0.68	85.66	0.0002

No	Bagian tumbuhan	Jenis persamaan	Variabel (cm)	Persamaan alometrik (ton)	s	R ² (%)	R ² -Adj (%)	Fhit	Validasi			
									X ² hitung	SA	SR (%)	MAE
17	Daun	Linear	Tt	$Y = -0.000096 + 0.0000001 X_1$	0.0001	58.4	56.6	32.31	0.0029	7.36	873.38	0.0004
18			Tt dan DBH	$Y = -0.000101 + 0.000000X_1 + 0.000133X_2$	0.0001	61.4	57.9	17.51	0.0010	-1.82	600.69	0.0002
19		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -7.73 + 1.63 \text{ Log } X_1$	0.2620	72.4	71.2	60.20	0.0008	-1.14	258.94	0.0002
20			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -7.42 + 1.49 \text{ Log } X_1 + 0.164 \text{ Log } X_2$	0.2675	72.4	69.9	28.83	0.0008	-1.05	247.74	0.0002

Keterangan: Tt = Tinggi total, DBH = Diameter setinggi dada, x_1 = Tinggi total (Tt), x_2 = DBH
Satuan Y dalam ton, x_1 (Tt) dalam cm, satuan x_2 (DBH) dalam cm

Tabel 6 Persamaan alometrik untuk menduga nilai massa karbon *Avicennia marina* dengan diameter ≤ 5 cm

No	Bagian tumbuhan	Jenis persamaan	Variabel (cm)	Persamaan alometrik (ton)	s	R ² (%)	R ² -Adj (%)	Fhit	Validasi			
									X ² hitung	SA	SR	MAE
1	Total	Linear	Tt	$Y = -0.000464 + 0.000004 X_1$	0.0003	74.7	73.6	67.87	0.0008	-0.31	18.43	0.0002
2			Tt dan DBH	$Y = -0.000479 + 0.000001X_1 + 0.000399X_2$	0.0003	78.5	76.5	40.16	0.0008	-0.49	90.98	0.0003
3		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -8.82 + 2.21 \text{ Log } X_1$	0.1706	92.0	91.6	263.25	0.0007	-0.58	109.04	0.0003
4			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -8.19 + 1.92 \text{ Log } X_1 + 0.329 \text{ Log } X_2$	0.1721	92.9	91.5	129.68	0.0037	-13.90	1983.14	0.0007
5	Akar	Linear	Tt	$Y = -0.000041 + 0.000001 X_1$	0.00006	62.4	60.8	38.20	0.0003	0.07	2.23	0.0001
6			Tt dan DBH	$Y = -0.000044 - 0.000000X_1 + 0.000092X_2$	0.00005	70.9	68.2	26.75	0.0003	-0.65	144.46	0.0001
7		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -9.11 + 2.04 \text{ Log } X_1$	0.2742	79.1	78.2	86.96	0.0004	-1.23	303.36	0.0001
8			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -9.36 + 2.15 \text{ Log } X_1 - 0.130 \text{ Log } X_2$	0.2801	79.1	77.2	41.68	0.0004	-1.35	312.61	0.0001
9	Batang	Linear	Tt	$Y = -0.000326 + 0.000002 X_1$	0.0002	76.6	75.6	75.28	0.0014	-0.64	97.47	0.0001
10			Tt dan DBH	$Y = -0.000333 + 0.000001X_1 + 0.000192X_2$	0.0002	78.9	77.0	41.20	0.0005	-0.19	157.91	0.0001
11		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -9.78 + 2.47 \text{ Log } X_1$	0.1445	95.2	95.0	460.73	0.0002	-0.34	45.06	0.0001
12			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -8.89 + 2.06 \text{ Log } X_1 + 0.467 \text{ Log } X_2$	0.1421	95.6	95.2	239.21	0.0001	-0.22	41.54	0.0001
13	Cabang	Linear	Tt	$Y = -0.000079 + 0.000001 X_1$	0.00006	63.4	61.8	39.89	0.0003	0.14	29.99	0.0001
14			Tt dan DBH	$Y = -0.000082 + 0.000000X_1 + 0.000091X_2$	0.00006	69.0	66.2	24.52	0.0003	-0.83	1162.65	0.0001
15		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -9.41 + 2.13 \text{ log } X_1$	0.2454	83.8	83	118.58	0.0003	-1.01	104.03	0.0001
16			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -8.66 + 1.79 \text{ Log } X_1 + 0.390 \text{ Log } X_2$	0.2486	84.1	82.6	57.97	0.0002	-0.82	96.35	0.0001
17	Daun	Linear	Tt	$Y = -0.000019 + 0.000000 X_1$	0.00003	57.7	55.8	31.34	0.0007	5.15	515.39	0.0001
18			Tt dan DBH	$Y = -0.000020 + 0.000000X_1 + 0.000025X_2$	0.00003	60.4	56.8	16.81	0.0002	-1.82	456.05	0.0000
19		Logaritmik	Tt	$\text{Log } Y = -8.46 + 1.64 \text{ Log } X_1$	0.2673	72.0	70.7	59.05	0.0001	-0.95	120.66	0.0000
20			Tt dan DBH	$\text{Log } Y = -8.09 + 1.47 \text{ Log } X_1 + 0.190 \text{ Log } X_2$	0.2729	72.1	69.5	28.38	0.0001	-0.90	119.06	0.0000

Keterangan: Tt = Tinggi total, DBH = Diameter setinggi dada, x_1 = Tinggi total (Tt), x_2 = DBH
Satuan Y dalam ton, x_1 (Tt) dalam cm, satuan x_2 (DBH) dalam cm

Berdasarkan hasil penelitian dapat diketahui bahwa pada tahap semai sampai pancang dengan diameter pohon kurang dari 5 cm dan ketinggian 0-5 m maka variabel DBH tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai dugaan biomassa dan massa karbon. Variabel tinggi total memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap nilai dugaan tersebut. Namun khusus pada bagian

batang, variabel DBH masih memberikan pengaruh terhadap nilai dugaan.

Model Persamaan Alometrik Lain Hasil Penelitian

Selain kedua macam bentuk persamaan alometrik utama yang sudah dijelaskan sebelumnya, persamaan alometrik bentuk lain juga diujicobakan untuk mencari

persamaan alometrik yang lebih baik dalam menduga nilai biomassa dan massa karbon *Avicennia marina* dengan $DBH \leq 5$ cm. Bentuk persamaan alometrik yang diuji cobakan adalah bentuk eksponensial, logaritmik non linear, dan polinomial. Alasan menggunakan ketiga bentuk persamaan tersebut sebagai bagian dari proses pencarian persamaan alometrik terbaik, yaitu proses pertumbuhan vegetasi yang dapat memasuki wilayah kurva persamaan eksponensial, logaritmik non linear, dan polinomial. Seluruh persamaan diasumsikan

menyebar normal dan tidak mengalami heteroskedistitas. Hasil analisis dari ketiga bentuk persamaan tersebut disajikan pada Tabel 9 untuk menduga nilai biomassa dan Tabel 10 untuk menduga nilai massa karbonnya. Seluruh persamaan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan persamaan terbaik dari persamaan alometrik utama yang telah diperoleh baik untuk menduga nilai biomassa maupun massa karbon dari *Avicennia marina* dengan $DBH \leq 5$ cm.

Tabel 7 Hasil perhitungan biomassa (B) *Avicennia marina* berdasarkan hasil analisis laboratorium dan menggunakan berbagai persamaan alometrik

No	Keterangan	Variabel (cm)	Biomassa Rata-Rata (Ton)				
			Total	Akar	Batang	Cabang	Daun
1	Linear*)	Tt	0.0012	0.0002	0.0005	0.0004	0.0001
2		Tt dan DBH	0.0015	0.0004	0.0005	0.0003	0.0001
3	Logaritmik*)	Tt	0.0014	0.0003	0.0005	0.0003	0.0002
4		TT dan DBH	0.0013	0.0003	0.0006	0.0003	0.0002
5	Hasil analisis laboratorium		0.0014	0.0003	0.0006	0.0003	0.0002

Keterangan: Tt = Tinggi total, DBH = Diameter setinggi

*) = Hasil analisis melalui pendekatan model persamaan alometrik (Merujuk Tabel 5)

Tabel 8 Hasil perhitungan massa karbon (C) *Avicennia marina* berdasarkan hasil analisis laboratorium dan menggunakan berbagai persamaan alometrik

No	Keterangan	Variabel (cm)	Massa Karbon Rata-Rata (Ton C)				
			Total	Akar	Batang	Cabang	Daun
1	Linear *)	Tt	0.0007	0.0002	0.0002	0.0002	0.00002
2	Linear *)	Tt dan DBH	0.0005	0.0001	0.0003	0.0001	0.00002
3	Log 1*)	TT	0.0005	0.0001	0.0003	0.0001	0.00004
4	Log 2*)	TT dan DBH	0.0005	0.0001	0.0003	0.0001	0.00004
5	Hasil analisis laboratorium		0.0006	0.0001	0.0003	0.0001	0.00005

Keterangan: Tt = Tinggi total, DBH = Diameter setinggi

*) = Hasil analisis melalui pendekatan model persamaan alometrik (Merujuk Tabel 6)

Tabel 9 Persamaan alometrik bentuk eksponensial, logaritmik non linear, dan polinomial untuk menduga biomassa *Avicennia marina* dengan $DBH \leq 5$ cm

No	Biomassa	Jenis Persamaan	Variabel (cm)	Persamaan (ton)	R ²	X ² Hit	SA	SR (%)	MAE
1	Total	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 0$	0.67	0.011	-	-	0.0018
2			DBH	$Y = 1x10^{-4} e^{1.167x}$	0.74	0.007	0.77	125.88	0.0013
3	Total	Logaritmik	Tinggi total	$Y = 0.001 \ln(x) - 0.005$	0.47	0.008	-0.44	2996.56	0.0015
4			DBH	$Y = 0.002 \ln(x)$	0.70	0.005	0.29	-	0.0011
5	Total	Polinomial	Tinggi total	$Y = 2x10^{-8}x^2 - 7x10^{-6}x$	0.80	0.013	-10.13	15.68	0.0018
6			DBH	$Y = 0$	0.85	0.011	-	-	0.0018
7	Total	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 3x10^{-5} e^{0.006x}$	0.49	0.009	-1.72	938.18	0.0016
8			DBH	$Y = 3x10^{-5} e^{1.056x}$	0.56	0.006	-0.15	772.09	0.0014
9	Total	Logaritmik	Tinggi total	$Y = 0.0001 \ln(x) - 0.001$	0.38	0.018	2.43	637.68	0.0022
10			DBH	$Y = 0.0001 \ln(x)$	0.63	0.011	-13.29	-	0.0018
11	Total	Polinomial	Tinggi total	$Y = 2x10^{-9}x^2 + 7x10^{-8}x$	0.53	0.009	-1.98	1142.22	0.0016
12			DBH	$Y = 5x10^{-5}x^2 + 3x10^{-5}x + 5x10^{-5}$	0.69	0.008	-0.76	591.17	0.0015
13	Total	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 3x10^{-5} e^{0.008x}$	0.74	0.006	-0.17	538.51	0.0014
14			DBH	$Y = 2x10^{-5} e^{1.388x}$	0.83	0.004	0.48	760.26	0.0008
15	Total	Logaritmik	Tinggi total	$Y = 0.001 \ln(x) - 0.002$	0.46	0.048	0.81	42.46	0.0014
16			DBH	$0.001 \ln(x)$	0.73	0.007	-0.43	-	0.0014
17	Total	Polinomial	Tinggi total	$Y = 1x10^{-8}x^2 - 5x10^{-6}x$	0.91	0.017	2.69	5021.71	0.0021
18			DBH	$Y = 0$	0.90	0.011	-	-	0.0018

No	Biomassa	Jenis Persamaan	Variabel (cm)	Persamaan (ton)	R ²	X ² Hit	SA	SR (%)	MAE
19	Cabang	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 2x10^{-5} e^{0.007x}$	0.63	0.009	-1.70	1110.90	0.0016
20			DBH	$Y = 2x10^{-5} e^{1.1184x}$	0.72	0.007	-0.39	1103.24	0.0014
21		Logaritmik	Tinggi total	$Y = 0.0001 \ln(x) - 0.001$	0.40	0.018	2.43	637.68	0.0022
22			DBH	$Y = 0.0001 \ln(x) + 1x10^{-4}$	0.60	0.010	-3.47	1224.13	0.0017
23	Polinomial	Tinggi total	$Y = 5x10^{-9} x^2 - 2x10^{-6} x$	0.70	0.001	12.94	$4x10^{17}$	0.0019	
24		DBH	$Y = 0$	0.75	0.011	-	-	0.0018	
25	Daun	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 3x10^{-5} e^{0.006x}$	0.61	0.009	-1.72	938.18	0.0016
26			DBH	$Y = 3x10^{-5} e^{0.904x}$	0.60	0.008	-0.94	982.51	0.0015
27		Logaritmik	Tinggi total	$Y = 0$	0.45	0.011	-	-	0.0018
28			DBH	$Y = 0$	0.54	0.011	-	-	0.0018
29		Polinomial	Tinggi total	$Y = 3x10^{-9} x^2 - 6x10^{-7} x$	0.67	0.010	-3.89	493.95	0.0017
30			DBH	$Y = 8x10^{-5} x^2 - 0.000 x$	0.67	0.007	-0.56	854.35	0.0015

Tabel 10 Persamaan alometrik bentuk eksponensial, logaritmik non linear, dan polinomial untuk menduga biomassa *Avicennia marina* dengan DBH ≤ 5 cm

No	Biomassa	Jenis Persamaan	Variabel (cm)	Persamaan (ton)	R ² (%)	X ² Hit	SA	SR (%)	MAE
1	Total	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 4x10^{-5} e^{0.007x}$	71	0.001	-0.74	100.25	0.0004
2			DBH	$Y = 3x10^{-5} e^{1.289x}$	78	0.004	0.35	105.34	0.0007
3		Logaritmik	Tinggi total	$Y = -0.002$	45	0.131	1.42	141.94	0.0028
4			DBH	$Y = 0$	67	0.004	-	-	0.0008
5		Polinomial	Tinggi total	$Y = 1x10^{-8} x^2 - 4x10^{-6} x + 0.000$	84	0.008	8.71	$8x10^{16}$	0.0009
6			DBH	$Y = 0$	84	0.004	-	-	0.0008
7	Akar	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 1x10^{-5} e^{0.006x}$	52	0.003	-9.55	949.35	0.0008
8			DBH	$Y = 8x10^{-6} e^{1.124x}$	60	0.003	-3.39	859.83	0.0006
9		Logaritmik	Tinggi total	$Y = 8x10^{-5} \ln(x)$	37	0.004	-0.92	77.75	0.0005
10			DBH	$Y = 4x10^{-5}$	65	0.004	-19.97	1997.16	0.0008
11		Polinomial	Tinggi total	$Y = 1x10^{-9} x^2 - 2x10^{-7} x + 5x10^{-5}$	58	0.003	-7.89	670.82	0.0007
12			DBH	$Y = 2x10^{-5} x^2 - 5x10^{-6} x + 2x10^{-5}$	73	0.003	-6.31	717.02	0.0007
13	Batang	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 1x10^{-5} e^{0.008x}$	75	0.003	-3.53	523.37	0.0007
14			DBH	$Y = 1x10^{-5} e^{1.456x}$	82	0.001	-0.04	400.90	0.0005
15		Logaritmik	Tinggi total	$Y = 0.000 \ln(x) - 0.001$	44	0.041	1.84	183.89	0.0018
16			DBH	$Y = 7x10^{-5}$	64	0.004	-10.98	1098.38	0.0008
17		Polinomial	Tinggi total	$Y = 9x10^{-9} x^2 - 3x10^{-6} x$	89	0.005	-11.40	46.33	0.0008
18			DBH	$Y = 0$	83	0.004	-	-	0.0008
19	Cabang	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 6x10^{-6} e^{0.007x}$	66	0.004	-10.61	1234.98	0.0008
20			DBH	$Y = 5x10^{-6} e^{1.254x}$	72	0.003	-3.40	1189.08	0.0006
21		Logaritmik	Tinggi total	$Y = 0$	41	0.004	-	-	0.0008
22			DBH	$Y = 3x10^{-5}$	59	0.004	-26.96	2696.21	0.0008
23		Polinomial	Tinggi total	$Y = 2x10^{-9} x^2 - 7x10^{-7} x + 7x10^{-5}$	74	0.004	-10.06	1883.88	0.0008
24			DBH	$Y = 5x10^{-5} x^2 - 7x10^{-7} x + 7x10^{-5}$	78	0.002	-1.54	157.60	0.0005
25	Daun	Eksponensial	Tinggi total	$Y = 6x10^{-6} e^{0.005x}$	60	0.004	-25.20	2240.24	0.0008
26			DBH	$Y = 5x10^{-6} e^{0.944x}$	60	0.004	-12.13	1901.76	0.0008
27		Logaritmik	Tinggi total	$Y = 4x10^{-5} \ln(x)$	44	0.081	0.62	64.45	0.0013
28			DBH	$Y = 6x10^{-5} \ln(x) + 2x10^{-5}$	53	0.004	-16.74	1561.79	0.0008
29		Polinomial	Tinggi total	$Y = 6x10^{-10} x^2 - 1x10^{-7} x + 2x10^{-5}$	66	0.004	-15.10	1398.31	0.0008
30			DBH	$Y = 1x10^{-5} x^2 - 2x10^{-5} x + 3x10^{-5}$	65	0.004	-18.15	1657.81	0.0008

Tabel 11 Hasil perhitungan biomassa menggunakan persamaan alometrik hasil penelitian dan persamaan alometrik pembandingan

No	Keterangan	R ²	n	DBH	Biomassa Rata-Rata (Ton/Pohon)				
					Total	Akar	Batang	Cabang	Daun
1	Hasil analisis laboratorium		25	0.7-3.5	0.0014	0.0003	0.0006	0.0003	0.0002
								0.0011	
2	Persamaan Terpilih dari pencarian model persamaan alometrik (Tabel 5)	0.67-0.96	25	0.7-3.5	0.0013	0.0003	0.0006	0.0003	0.0002
									0.0011
3	Dharmawan & Siregar (2008)	0.85-0.98	47	6.4-35.2	0.0015	0.0006			0.0010
4	Comley & Mc Guinness (2005) dalam Estrada <i>et al.</i> (2014)	0.97	22	1.0-30					0.0014
5	Amarasinghe & Balasubramiam (1992) dalam Estrada <i>et al.</i> (2014)	0.92	29	2.0-12.5					0.0012
6	Clought <i>et al.</i> (dalam Estrada <i>et al.</i> (2014)	0.97	23	5.5-20.4					0.0009

Tabel 12 Hasil perhitungan massa karbon menggunakan persamaan alometrik hasil penelitian dan persamaan alometrik pembandingan

No	Keterangan	R ²	n	DBH	Massa Karbon Rata-Rata (Ton C/Pohon)				
					Total	Akar	Batang	Cabang	Daun
1	Hasil analisis laboratorium		25	0.7-2.5	0.0005	0.0001	0.0003	0.0001	0.00005
								0.00045	
2	Persamaan Terpilih dari pencarian model persamaan alometrik (Tabel 6)	0.68-0.96	25	0.7-3.5	0.0005	0.0001	0.0003	0.0001	0.00004
									0.00044
3	Dharmawan & Siregar (2008)	0.85-0.98	47	6.4-35.2	0.0007	0.0003			0.0005
4	Comley & Mc Guinness (2005) dalam Estrada <i>et al.</i> (2014)	0.97	22	1.0-30					0.0007
5	Amarasinghe & Balasubramiam (1992) dalam Estrada <i>et al.</i> (2014)	0.92	29	2.0-12.5					0.0006
6	Clought <i>et al.</i> (dalam Estrada <i>et al.</i> (2014)	0.97	23	5.5-20.4					0.0005

Berdasarkan hasil analisis yang disajikan pada Tabel 9 dan Tabel 10 dapat diketahui bahwa untuk kasus vegetasi *Avicennia marina* dalam tahap semai dan pancang dengan diameter kurang dari 5 cm, model persamaan alometrik bentuk eksponensial, logaritmik non linear, dan polinomial belum dapat digunakan. Hal tersebut terlihat dari nilai MAE nya yang masih lebih besar dibandingkan persamaan alometrik terbaik dari hasil analisis sebelumnya (persamaan alometrik bentuk logaritmik linear sederhana). Walaupun nilai R^2_{adj} dan X^2_{hitung} nya sudah memenuhi kaidah persyaratan secara statistik, yaitu melebihi 0.50 dan lebih kecil dari pada

Chi-tabel namun nilai-nilainya tidak lebih baik dari persamaan terbaik hasil analisis sebelumnya baik untuk menduga biomassa maupun massa karbon. Hal tersebut sangat logis jika kita asumsikan pada proses pertumbuhan pohon dimana pada tahap semai dan pancang, proses pertumbuhan belum memasuki bagian kurva pertumbuhan secara keseluruhan. Artinya, belum mencapai posisi stabil (vegetasi tua). Vegetasi *Avicennia marina* yang berada di lokasi pertumbuhan tergolong vegetasi muda dan proses pertumbuhannya masih berada dalam garis lurus pada kurva linear.

Perbandingan Persamaan Alometrik Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil perhitungan biomassa dan massa karbon menggunakan persamaan terpilih menunjukkan hasil yang mendekati nilai aktual yang diperoleh dari hasil analisis laboratorium dengan nilai R^2_{adj} berada diatas 0.60 dan simpangan baku yang cukup kecil. Namun, hasil tersebut belum akurat jika tidak dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya yang telah dipublikasi. Hasil penelitian perbandingan yang digunakan berasal dari berbagai lokasi penelitian, yaitu Dharmawan dan Siregar (2008) berada di Purwakarta-Indonesia, Comley dan Mc Guinness (2005) berada di Australia, Amarasinghe dan Balasubramaniam (1992) berada di Srilanka, dan Clought *et al.* (1997) berada di Australia. Seluruh persamaan alometrik perbandingan khusus untuk jenis *Avicennia marina*. Ketiga persamaan alometrik perbandingan membagi tiga bagian *Avicennia marina*, yaitu biomassa total, biomassa atas yang terdiri dari batang, cabang, dan daun serta biomassa bawah yang hanya meliputi akar. Sementara itu, penelitian membagi biomassa menjadi lima bagian, yaitu total, akar, batang, cabang, dan daun. Variabel yang digunakan juga hanya menggunakan DBH dengan kisaran diatas 3 cm sampai 35.2 cm. Sementara itu, penelitian menggunakan variabel DBH dengan kisaran ≤ 5 cm dan variabel tinggi dengan kisaran 0-500 cm. Persamaan alometrik yang dibangun pada penelitian memiliki kelebihan, yaitu dapat menduga biomassa untuk tumbuhan yang masih dalam tahap semai dengan diameter batang yang cukup sulit untuk diukur karena belum memiliki nilai DBH. Informasi mengenai hasil perbandingan nilai biomassa dan massa karbon hasil penelitian dengan persamaan alometrik perbandingan disajikan pada Tabel 11 dan Tabel 12.

Berdasarkan hasil analisis, nilai biomassa dan massa karbon yang dihitung menggunakan persamaan terpilih hampir mendekati nilai aktualnya. Hasil tersebut juga tidak memiliki nilai yang jauh berbeda dengan perhitungan menggunakan persamaan alometrik Dharmawan dan Siregar (2008). Lokasi penelitian dan jenis sampel yang sama kemungkinan mempengaruhi nilai-nilai tersebut. Oleh karena itu, persamaan terpilih yang diperoleh dari hasil penelitian dapat melengkapi persamaan alometrik yang sudah dipublikasikan sebelumnya. Sehingga, proses pendugaan biomassa dan massa karbon dari jenis *Avicennia marina* dapat dilakukan dengan cara non destruktif, lebih mudah, dan menyeluruh (ukuran semai-pohon).

KESIMPULAN

Persamaan alometrik terpilih untuk menduga biomassa total, akar, batang, cabang, dan daun berturut-turut adalah $\text{Log } Y_{\text{Total}} = -7.92 + 2.02 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Akar}} = -8.37 + 1.94 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Batang}} = -8.83 + 1.99 \text{ Log } (Tt) + 0.419 \text{ Log } (DBH)$, $\text{Log } Y_{\text{Cabang}} = -8.63 + 2.01 \text{ Log } (Tt)$, dan $\text{Log } Y_{\text{Daun}} = -7.73 + 1.63 \text{ Log } (Tt)$. Persamaan alometrik untuk menduga massa karbon total, akar, batang, cabang, dan daun adalah $\text{Log } Y_{\text{Total}} = -8.82 + 2.21 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Akar}} = -9.11 + 2.04 \text{ Log } (Tt)$, $\text{Log } Y_{\text{Batang}} = -8.89 + 2.06 \text{ Log } (Tt) + 0.467 \text{ Log } (DBH)$,

$\text{Log } Y_{\text{Cabang}} = -9.41 + 2.13 \text{ Log } (Tt)$, dan $\text{Log } Y_{\text{Daun}} = -8.46 + 1.64 \text{ Log } (Tt)$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Wetlands International Indonesia (WII) yang sudah membiayai seluruh penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar A. 2012. Persamaan alometrik untuk menduga kandungan karbon jenis meranti (*Shorea terysmaniana*) di Hutan Alam Rawa Gambut Kalimantan Tengah. *Jurnal Penelitian Sosial dan ekonomi Kehutanan* (9): 1-11.
- [ASTM] American Society for Testing Material. 1990a. *ASTM D 2866-94. Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon*. Philadelphia.
- [ASTM] American Society for Testing Material. 1990b. *ASTM D 5832-98. Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon*. Philadelphia.
- Comley BWT, Mc Guinness KA. 2005. Above-and-below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Australian Journal of Botany* 53(5): 431-436.
- Dharmawan IWS, Siregar CA. 2008. Karbon tanah dan pendugaan karbon tegakan *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. Di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam* (4): 317-328.
- Estrada *et al.* 2014. Allometric models for aboveground biomass estimation of the mangrove *Avicennia schaueriana*. *Hydrobiologia*: 11.
- Haygreen JG, Bowyer JL. 1982. *Hasil Hutan dan Ilmu Kayu*. Hardikusmo SA, penerjemah; Prawirohatmodjo, editor. Yogyakarta: Gadjah Mada University Pr. Terjemahan dari: Forest Product and Wood Science, An.
- Krisnawati H, Adinugroho WC, Imanuddin R. 2012. *Monograf Model-Model Alometrik untuk Pendugaan Biomassa Pohon pada Berbagai Tipe Ekosistem Hutan di Indonesia*. Bogor: Badan Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitasi-Kementerian Kehutanan dan Lingkungan Hidup.
- Maulana SI, Pandu J. 2011. Persamaan alometrik genera *Intsia sp.* Untuk pendugaan biomassa atas tanah pada hutan tropis Papua Barat. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan* 8 (4): 1-10.
- Montagu KD, Duttmer K, Barton CVM, Cowie AL. 2005. Developing general allometric relationship for regional estimates of carbon sequestration-an example using *Eucalyptus pilularis* from seven contrasting sites. *Forest Ecology dan Management* 204(1): 115-129.
- Pachpande SC, Pejaver M. 2015. Natural carbon sequestration by dominant mangrove species *Avicennia marina* var. *Accutissima* ex Staf and *Moldenke* ex *Moldenke* found across Thane Creek,

- Maharashtra, India. *International Journal of Scientific and Engineering Research* (6): 1162-1165.
- Parvaresh H, Parvaresh E, Zahedi G. 2012. Establishin allometric relationship using crown diameter for the estimation of above-ground of grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk) Vierh in mangrove forest of Sirik, Iran. *J. Basic. Appl. Sci* 2(2): 1763-1769.
- [SNI] Standar Nasional Indonesia. 1995. *SNI Nomor 06-3730-1995 Tentang Arang Aktif Teknis*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.