

**MODEL ALOMETRIK UNTUK ESTIMASI BIOMASSA POHON PADA
HUTAN LAHAN KERING SEKUNDER DI HALMAHERA TIMUR**

***ALLOMETRIC MODELS FOR ESTIMATING TREE BIOMASS OF DRYLAND SECONDARY
FOREST IN EAST HALMAHERA***

Mujahidah Sylviari Zaenal, Tatang Tiryana* dan Muhdin

Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor (IPB),
Kampus IPB Darmaga, Bogor, 16680, Indonesia
Telp./Fax. (0251) 8621244, *Email: tangtir@apps.ipb.ac.id

Diterima: 6 Agustus 2020; Direvisi: 1 September 2020; Disetujui: 7 Desember 2020

ABSTRAK

Pendugaan biomassa hutan sekunder diperlukan untuk mendukung pengurangan emisi karbon dioksida melalui peningkatan cadangan karbon hutan. Umumnya, biomassa hutan diduga secara tidak langsung menggunakan model-model alometrik biomassa pohon yang disusun berdasarkan pengambilan sampel destruktif dari sejumlah pohon contoh. Ketersediaan model-model alometrik biomassa untuk hutan sekunder di Indonesia masih terbatas, khususnya untuk ekosistem hutan sekunder di bagian timur Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun model-model alometrik biomassa pohon jenis campuran di hutan sekunder Halmahera Timur, Maluku Utara, serta untuk membandingkan akurasi model-model alometrik lokal tersebut dengan model-model alometrik lain yang umum digunakan dalam pendugaan biomassa hutan sekunder. Pengukuran biomassa pohon dilakukan secara destruktif terhadap 18 pohon jenis campuran (dengan kisaran diameter 5,4 – 36,9 cm) di hutan sekunder. Sampel-sampel dari tiap bagian pohon (batang, cabang, ranting, dan daun) dianalisis di laboratorium untuk menentukan biomassa tiap pohon contoh. Model-model alometrik disusun menggunakan analisis regresi non-linier, yang kemudian dibandingkan dengan model-model alometrik lain. Penelitian ini menunjukkan bahwa biomassa pohon jenis campuran di lokasi penelitian dapat diduga secara akurat menggunakan model M7 yang menggunakan peubah diameter, tinggi dan kerapatan kayu. Model alometrik lokal tersebut lebih akurat dibandingkan dengan model-model alometrik lain yang umum digunakan untuk pendugaan biomassa hutan tropis. Alternatifnya, model M3 yang menggunakan peubah diameter dan tinggi juga dapat digunakan ketika data kerapatan kayu tidak tersedia. Model-model alometrik lokal dari penelitian ini dapat memperkaya ketersediaan model-model alometrik biomassa untuk ekosistem hutan sekunder di bagian timur Indonesia.

Kata kunci: hutan sekunder, jenis campuran, model alometrik, pengambilan sampel destruktif, REDD+

ABSTRACT

Biomass estimation of secondary forests is required to support the emission reduction of carbon dioxide through an enhancement of forest carbon stocks. Commonly, forest biomass is indirectly estimated using tree biomass allometric models that are developed based on a destructive sampling of sample trees. The availability of biomass allometric models for secondary forests in Indonesia is still limited, particularly for secondary forest ecosystems in eastern Indonesia. This study aimed to develop allometric biomass models for mixed-species trees in a secondary forest of East Halmahera, North Maluku, and to compare their accuracies with some other allometric biomass models that commonly used for estimating biomass of secondary forests. The tree biomass measurement was conducted by using a destructive sampling of 18 mixed-species trees (with diameter range of 5,4 – 36,9 cm) in a secondary forest. The samples of each tree component (stem, branch, twig, and leaf) were analyzed in a laboratory to determine the biomass of each sample tree. Allometric models were developed by using a non-linear regression analysis, which were then compared with other allometric models. This study revealed that the biomass of mixed-species trees in the study area could be estimated accurately using the M7 model that used diameter, height, and wood density variables. Such local allometric model was more accurate than other allometric models commonly used for estimating tropical forest biomass. Alternatively, the M3 model that used diameter and height variables could also be used when wood density data was not available. The local allometric models from this study can enrich the availability of biomass allometric models for secondary forest ecosystems in eastern Indonesia.

Keywords: allometric model, destructive sampling, mixed-species, REDD+, secondary forest

PENDAHULUAN

Salah satu tantangan dalam pengelolaan hutan alam di Indonesia adalah pemulihan ekosistem hutan sekunder yang luasnya mencapai 37,8 juta ha (31,3 %) dari total luas kawasan hutan (MoEF, 2018). Pemulihan ekosistem hutan sekunder tidak hanya dapat meningkatkan produktivitas hasil kayu, melainkan juga dapat meningkatkan cadangan karbon (van Breugel *et al.*, 2011) dalam upaya pengurangan emisi gas rumah kaca melalui mekanisme *Reducing emissions from Deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests, and enhancement of forest carbon stocks* (REDD+).

Penerapan mekanisme REDD+ memerlukan data dan informasi mengenai potensi biomassa dan cadangan karbon hutan secara akurat pada tingkat regional dan nasional (Stas *et al.*, 2017). Namun pengukuran biomassa dan cadangan karbon hutan secara langsung melalui pengambilan sampel destruktif (*destructive sampling*) sulit dilakukan pada skala luas, karena memerlukan sumberdaya (biaya, waktu, dan tenaga) yang tinggi serta dapat merusak tegakan hutannya. Umumnya, pendugaan biomassa tegakan dilakukan secara tidak langsung menggunakan model-model alometrik biomassa pohon. Model alometrik biomassa merupakan model statistika untuk menduga biomassa pohon berdasarkan diameter dan/atau tinggi pohon (Ketterings *et al.*, 2001; Kuyah *et al.*, 2012) serta kerapatan kayu sebagai peubah penting dalam pendugaan biomassa di hutan tropis (Chave *et al.*, 2014). Oleh karena itu, untuk mendukung pendugaan biomassa dan cadangan karbon yang akurat diperlukan pengembangan model-model alometrik biomassa untuk berbagai jenis pohon dan lokasi tempat tumbuh (Basuki *et al.*, 2009).

Model-model alometrik biomassa pohon belum banyak dikembangkan untuk wilayah timur Indonesia, yaitu Sulawesi, Kepulauan Maluku, Nusa Tenggara, dan Papua (Anitha *et al.*, 2015; Krisnawati *et al.*, 2012). Penggunaan model-model alometrik biomassa pohon yang dibuat untuk wilayah barat Indonesia dapat memberikan nilai dugaan biomassa yang kurang akurat (*underestimate* atau *overestimate*) jika diterapkan pada wilayah bagian timur Indonesia (Stas *et al.*, 2017). Hal ini disebabkan oleh tingginya perbedaan keanekaragaman hayati dan karakteristik ekosistem hutan antara wilayah barat dan timur Indonesia, yang ditandai oleh garis Wallace (Anitha *et al.*, 2015). Oleh karena itu, pendugaan biomassa hutan di wilayah timur Indonesia memerlukan model-model alometrik biomassa yang sesuai dengan karakteristik

vegetasi dan tipe ekosistem hutannya. Penggunaan model-model alometrik biomassa yang spesifik dapat memberikan nilai dugaan biomassa yang lebih akurat sesuai dengan kondisi tempat tumbuh atau tipe hutan (Stas *et al.*, 2017), serta mengurangi ketidakpastian dalam pendugaan biomassa dan cadangan karbon hutan (Anitha *et al.*, 2015; Chave *et al.*, 2014).

Pengembangan model-model alometrik biomassa untuk jenis pohon dan/atau tipe hutan di wilayah timur Indonesia masih relatif terbatas dalam hal sebaran lokasi dan cakupan jenis pohonnya. Model-model alometrik biomassa yang sudah dikembangkan di Maluku adalah untuk jenis pala (Mardiatmoko *et al.*, 2016) dan jenis-jenis pohon di hutan karst sekunder Pulau Seram (Stas *et al.*, 2017). Model-model alometrik yang tersedia di Papua adalah untuk marga *Instia* spp. (Maulana & Pandu, 2011a) dan marga *Pometia* spp. (Maulana & Pandu, 2011b). Oleh karena itu, pengembangan model-model alometrik untuk wilayah timur Indonesia masih diperlukan karena beragamnya jenis pohon dan tipe ekosistem hutan.

Salah satu wilayah timur Indonesia yang memerlukan ketersediaan model-model alometrik biomassa adalah Halmahera Timur di Maluku Utara, yang didominasi oleh hutan alam sekunder dengan beragam jenis pohon. Selain model alometrik biomassa yang dikembangkan oleh Stas *et al.* (2017), belum ada model alometrik lokal untuk pendugaan biomassa hutan sekunder di Halmahera Timur. Ketika model alometrik lokal tidak tersedia, alternatifnya adalah menggunakan model alometrik lokal dari Ketterings *et al.* (2001) dan Stas *et al.* (2017) serta model alometrik global dari Chave *et al.* (2014). Namun model-model alternatif tersebut belum tentu akurat jika digunakan untuk pendugaan biomassa hutan sekunder di Halmahera Timur. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyusun model-model alometrik biomassa pohon jenis campuran di hutan sekunder Halmahera Timur, Maluku Utara, serta untuk membandingkan akurasi model-model alometrik lokal tersebut dengan model-model alometrik lain yang umum digunakan dalam pendugaan biomassa hutan sekunder.

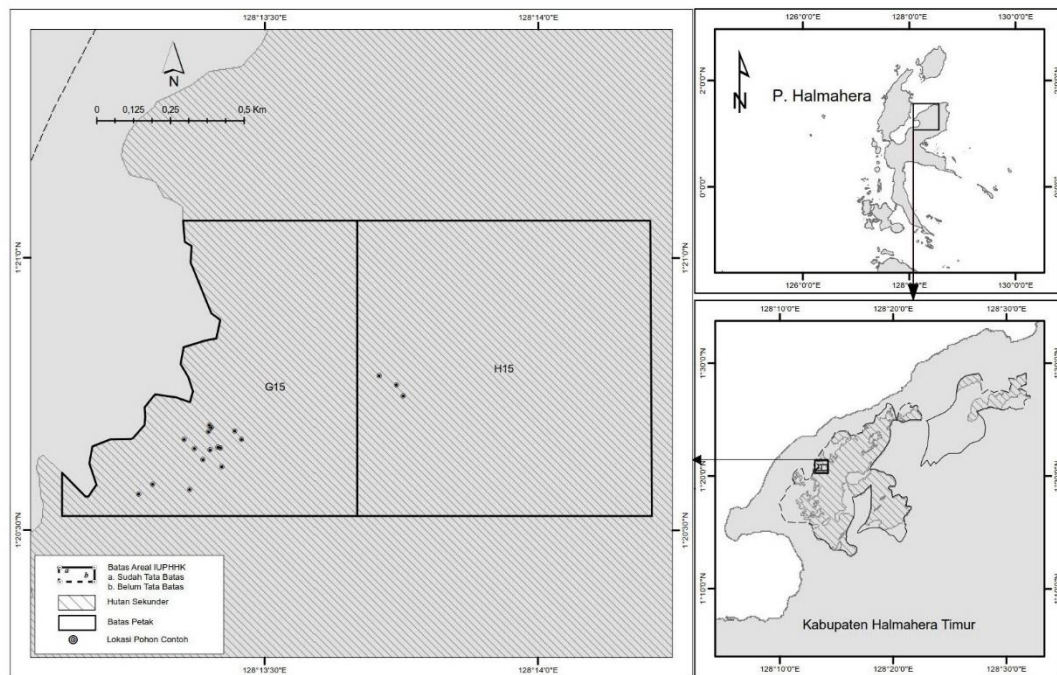
METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di areal hutan lahan kering sekunder di wilayah kerja IUPHHK-HA PT Mahakarya Agra Pesona (PT MAP) pada petak G14, G15, dan H15 (Gambar 1). Secara administrasi, areal perusahaan hutan ini terletak di Kecamatan Wasile Utara, Wasile Tengah dan Wasile Timur, Kabupaten

Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara. Secara geografis areal perusahaan ini terletak pada koordinat bujur antara 128° 09' 54" dan 128° 32' 2,4" BT serta koordinat lintang antara 1° 12' 57,6" dan 1° 29' 9,6" LS. Luas areal kerja PT MAP adalah 36.860 ha dengan topografi lapangan didominasi kelerengan datar seluas 15.551 ha (42,19 %), kelerengan sedang seluas 11.396 ha (30,92 %), kelerengan landai seluas 7.168 ha (19,45 %), kelerengan curam seluas 2.670 ha (7,24 %) dan kelerengan sangat curam seluas 75 ha (0,20 %). Jenis tanah di PT MAP didominasi oleh *Typic*

Eutrudepts dan *Lithic Eutrudepts* yang luasnya mencapai 24.815 ha (67,32 %) dari keseluruhan total areal (MAP, 2018). Tipe penutupan lahan di areal PT MAP adalah hutan bekas tebangan (*logged over area*), yang sebagian besar (67,88 %) merupakan ekosistem hutan alam tropika basah sekunder. Jenis vegetasi dominan di areal PT MAP adalah mersawa (*Anisoptera* sp., 24,5 %), nyatoh (*Palaquium* sp., 11 %), dan bintangor (*Calophyllum inophyllum*, 8,4 %) (MAP, 2018).



Gambar 1. Sebaran lokasi pengukuran pohon-pohon contoh di areal hutan lahan kering sekunder yang dikelola oleh IUPHHK-HA PT Mahakarya Agra Pesona, Halmahera Timur

Prosedur Penelitian

Pemilihan pohon contoh

Pemilihan jenis-jenis pohon contoh didasarkan atas informasi komposisi jenis pohon dari hasil inventarisasi hutan oleh PT MAP, yang terdiri dari 20 jenis pohon dan 19 famili. Penentuan pohon contoh dilakukan dengan metode *purposive sampling* dengan kriteria: keterwakilan kelas diameter, keterwakilan jenis-jenis pohon, kemudahan akses jalan, alokasi tenaga kerja perusahaan, dan ketersediaan biaya.

Jumlah pohon contoh yang digunakan dalam penelitian ini adalah 18 pohon dengan diameter berkisar antara 5,4 dan 36,9 cm yang terdiri dari 14 jenis pohon seperti tercantum pada Tabel 1. Jenis-jenis pohon tersebut mewakili 11 dari 19 famili (58 %) yang ada di PT MAP. Penggunaan jumlah pohon (*n*) yang relatif sedikit dalam penyusunan model-model alometrik juga dilakukan oleh Brown *et al.* (1995) dengan *n*=8, Ketterings *et al.* (2001) dengan *n*=29, Ebuy *et al.* (2011) dengan *n*=12, dan Stas *et al.* (2017) dengan *n*=25.

Tabel 1. Jenis dan jumlah pohon contoh pada setiap kelas diameter

Jenis pohon	Nama lokal	Famili	Kelas diameter (cm)			
			5-9	10-19	20-29	30-40
<i>Anisoptera</i> spp.	Mersawa	Dipterocarpaceae	1			
<i>Anthocephalus</i> spp.	Samama	Rubiaceae				1
<i>Calophyllum inophyllum</i>	Bintangor	Clusiaceae	1		1	
<i>Canarium</i> sp.	Kenari	Burseraceae		1		
<i>Diospyros celebica</i>	Mologotu	Ebenaceae	1			
<i>Dracontomelon</i> spp.	Buarao	Anacardiaceae				1
<i>Eugenia aromaticum</i>	Cengkeh hutan	Myrtaceae			1	
<i>Eugenia</i> sp.	Gosale	Myrtaceae		2		
<i>Koordersiodendron pinnatum</i>	Bugis	Anacardiaceae		1		
<i>Octomeles sumatrana</i>	Binuang	Tetramelaceae				1
<i>Palaquium</i> sp.	Nyatoh	Sapotaceae	1			1
<i>Pometia pinnata</i>	Matoa	Sapindaceae	1		1	
<i>Syzygium</i> sp.	Jambu-jambu	Myrtaceae			1	
<i>Vatica</i> spp.	Hiru	Dipterocarpaceae		1		
Jumlah			5	5	4	4

Penebangan dan pengukuran pohon contoh

Pada setiap pohon contoh dilakukan pengukuran diameter setinggi dada (*D*), yaitu pada ketinggian 1,3 m di atas permukaan tanah. Pohon-pohon contoh tersebut kemudian ditebang pada bagian pangkal sedekat mungkin dengan permukaan tanah. Setelah pohon rebah dilakukan pengukuran panjang pohon untuk memperoleh data tinggi total pohon contoh yang akurat sebagaimana umumnya dilakukan dalam penelitian-penelitian sebelumnya (Ketterings *et al.*, 2001; Stas *et al.*, 2017). Selain itu dilakukan pemisahan fraksi-fraksi batang, cabang, ranting, dan daun, yang kemudian dikumpulkan secara terpisah dan ditimbang berat basahnya menggunakan timbangan gantung yang dipikul oleh dua orang (Gambar 2).

Dari setiap fraksi pohon contoh yang telah ditimbang, kemudian dilakukan pengambilan sampel

fraksi-fraksi pohon untuk analisis biomassa di laboratorium (BSN, 2011). Pada fraksi batang, pengambilan sampel dilakukan pada pangkal batang (25 % dari total panjang), tengah batang (50 % dari total panjang), dan ujung batang (75 % dari total panjang). Pada ketiga bagian batang tersebut dibuat piringan (*disk*) batang setebal 2 – 5 cm (Picard *et al.*, 2012), dan selanjutnya diambil sampel berbentuk kubus (masing-masing berukuran 2 x 2 x 2 cm) sebanyak tiga buah dari setiap piringan sehingga diperoleh sembilan sampel kubus untuk tiap pohon contoh. Sampel-sampel kubus tersebut ditimbang berat basahnya menggunakan timbangan digital. Selain sampel fraksi batang, dilakukan juga pengambilan dan penimbangan sampel-sampel fraksi cabang, ranting, dan daun masing-masing sebanyak 250 gram (BSN, 2011).



Gambar 2. Proses pengukuran pohon contoh di lapangan: (a) penebangan dan pembagian batang, (b) pemisahan sortimen batang, (c) pemisahan fraksi daun, (d) penimbangan fraksi batang, dan (e) penimbangan fraksi cabang dan ranting

Perhitungan biomassa pohon contoh

Sampel-sampel dari setiap fraksi pohon contoh dianalisis di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB, melalui proses pengeringan menggunakan *oven* bersuhu 70 °C untuk sampel daun dan bersuhu 105 °C untuk sampel batang, cabang, dan ranting hingga mencapai berat kering konstan. Sampel-sampel yang sudah dikeringkan kemudian ditimbang untuk memperoleh data berat kering sampel setiap fraksi pohon contoh. Kerapatan kayu (*wood density*) ditentukan melalui pengukuran volume sampel-sampel kubus menggunakan prinsip *archimedes*, dimana volume merupakan perbedaan antara permukaan cairan sebelum dan sesudah pencelupan (Picard *et al.*, 2012; Puc-Kauil *et al.*, 2020).

Berdasarkan data berat basah total (B_{bt} , kg), berat basah sampel (B_{bs} , g), dan berat kering sampel (B_{ks} , g), biomassa (B , kg) suatu pohon contoh dihitung sebagai berikut (Picard *et al.*, 2012):

$$B = \frac{B_{ks} \times B_{bt}}{B_{bs}} \quad (1)$$

Kerapatan kayu (ρ , g/cm³) tiap sampel kubus dari fraksi batang ditentukan berdasarkan data berat kering sampel (B_{ks} , g) dan volume kering sampel (V_{ks} , cm³) dengan rumus (Picard *et al.*, 2012):

$$\rho = \frac{B_{ks}}{V_{ks}} \quad (2)$$

Nilai-nilai ρ dari sembilan sampel kubus (sebagai ulangan) dari tiap pohon contoh dihitung nilai rata-ratanya untuk memperoleh data kerapatan kayu masing-masing pohon contoh, yang digunakan sebagai salah satu peubah penduga dalam model alometrik biomassa.

Penyusunan model alometrik biomassa

Dalam penelitian ini, penyusunan model alometrik dilakukan untuk jenis pohon campuran karena lebih cocok digunakan untuk pendugaan cadangan biomassa hutan alam yang memiliki keragaman jenis tinggi (Chave *et al.*, 2014; Ketterings *et al.*, 2001) dan pendugaan biomassa hutan pada skala luas (He *et al.*, 2018; van Breugel *et al.*, 2011) dibandingkan dengan model alometrik biomassa untuk jenis pohon tertentu. Model alometrik biomassa disusun untuk menduga biomassa pohon (B , kg) berdasarkan peubah-peubah diameter setinggi dada (D , cm), tinggi total (T , m), dan kerapatan kayu (ρ , g/cm³) dari tiap pohon contoh. Adapun model-model alometrik biomassa yang dianalisis adalah (Chave *et al.*, 2014; Huy *et al.*, 2016; Kusmana *et al.*, 2018; Picard *et al.*, 2012):

$$M1: B = aD^b \quad (3a)$$

$$M2: B = a \exp(bD) \quad (3b)$$

$$M3: B = a(D^2T)^b \quad (3c)$$

$$M4: B = aD^bT^c \quad (3d)$$

$$M5: B = a\rho D^b \quad (3e)$$

$$M6: B = a\rho^b D^c \quad (3f)$$

$$M7: B = a(\rho D^2T)^b \quad (3g)$$

$$M8: B = \exp(a + \ln(\rho D^2T)) \quad (3h)$$

Parameter-parameter model regresi (a, b, c) ditentukan melalui analisis regresi non-linier menggunakan metode *Generalized Non-linear Least Square* (GNLS) yang efektif untuk mereduksi heteroskedastisitas ragam sisaan model (Pinheiro *et al.*, 2020). Analisis regresi non-linier dilakukan menggunakan paket program *nlme* (Pinheiro *et al.*, 2020) dalam *software* R versi 3.6.3 (R Core Team, 2020), karena paket program tersebut menerapkan metode GNLS untuk menghitung parameter model alometrik biomassa (Dutcă *et al.*, 2019; Huy *et al.*, 2016; Tiryana *et al.*, 2011).

Berdasarkan hasil analisis regresi model-model non-linier tersebut, selanjutnya dipilih model alometrik terbaik dengan kriteria: signifikansi parameter model ($P\text{-value} < 0.05$), nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) minimum, nilai *Akaike's Information Criterion* (AIC) minimum, nilai *Bayesian Information Criterion* (BIC) minimum, dan nilai koefisien determinasi terkoreksi (R^2_{adj}) maksimum, yang dihitung dengan rumus-rumus berikut ini (Burnham & Anderson, 2002; Chave *et al.*, 2014; Rawlings *et al.*, 1998; Sanquetta *et al.*, 2018; Sileshi, 2014; Tiryana *et al.*, 2011):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}} \quad (4a)$$

$$AIC = -2\log Lik + 2(p + 1) \quad (4b)$$

$$BIC = -2\log Lik + (p + 1)\log(n) \quad (4c)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(n - 1)\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - p)\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4d)$$

Notasi y_i dan \hat{y}_i menyatakan nilai biomassa aktual dan nilai dugaan biomassa, n menyatakan jumlah pohon contoh, p menyatakan jumlah parameter model, dan $\log Lik$ menyatakan nilai kemungkinan maksimum dari tiap model.

Perbandingan model alometrik biomassa

Untuk mengetahui keakuratan model alometrik terbaik dilakukan perbandingan dengan model-model alometrik lain yang telah dikembangkan untuk pendugaan biomassa pohon di hutan alam, yaitu:

$$MK: B = 0,11\rho D^{2,62} \quad (5a)$$

$$MS: B = \exp(-1,927 + 1,837\ln D + 0,905\ln T + 1,164\ln \rho) \quad (5b)$$

$$MC: B = 0,0673(\rho D^2T)^{0,976} \quad (5c)$$

Model MK merupakan model alometrik lokal yang dikembangkan oleh Ketterings *et al.* (2001) untuk hutan sekunder di Jambi, model MS merupakan model alometrik lokal yang dikembangkan oleh Stas *et al.* (2017) untuk hutan karst sekunder di Pulau Seram, dan model MC merupakan model alometrik global yang dikembangkan oleh Chave *et al.* (2014) untuk hutan-hutan tropis.

Perbandingan keakuratan model-model alometrik tersebut dilakukan dengan prosedur validasi silang (*cross-validation*), yaitu dengan membandingkan nilai dugaan biomassa dari model-model alometrik dengan nilai biomassa pohon-pohon contoh hasil pengukuran yang digunakan untuk penyusunan model alometrik dalam penelitian ini. Hal ini lazim dilakukan dalam penelitian biomassa, misalnya oleh Stas *et al.* (2017), karena keterbatasan data pengukuran biomassa pohon contoh (Sileshi, 2014). Tingkat akurasi model-model alometrik diukur dengan nilai rata-rata bias (*Mean Error*, ME), persen bias (*Percentage Error*, PE), dan rata-rata mutlak persen bias (*Mean Absolute Percentage Error*, MAPE) yang dihitung dengan rumus-rumus berikut ini (Huy *et al.*, 2016; Sileshi, 2014; Tiryana *et al.*, 2011):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (6a)$$

$$PE = (100ME) / \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (6b)$$

$$MAPE = (100/n) \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| / y_i \quad (6c)$$

Semakin kecil nilai ME, PE, atau MAPE maka tingkat akurasi suatu model alometrik semakin tinggi.

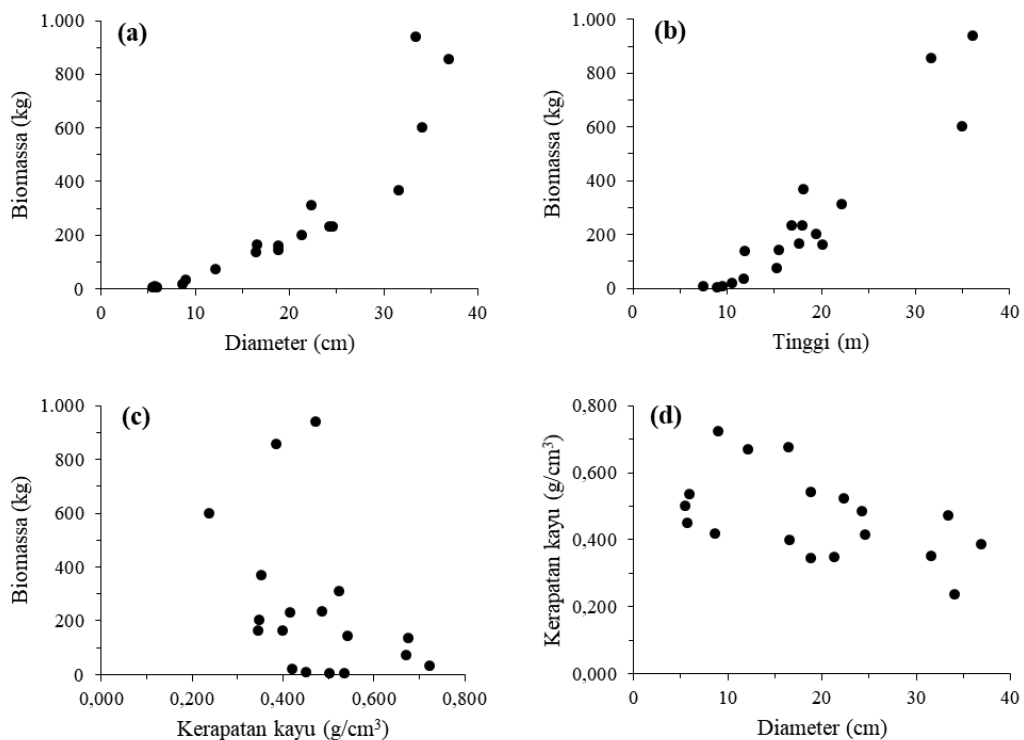
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Biomassa

Biomassa total pohon di atas permukaan tanah (terdiri dari batang, cabang, ranting, dan daun) dari jenis-jenis campuran di hutan sekunder bervariasi menurut diameter dan tinggi pohon dengan kisaran

4,93 – 939,51 kg/pohon (Gambar 3a dan 3b). Biomassa memiliki korelasi positif yang erat dengan diameter ($r = 0,89$) dan tinggi pohon ($r = 0,94$), di mana biomassa pohon semakin meningkat seiring bertambahnya diameter dan/atau tinggi pohon. Bahkan, semakin besar diameter pohon maka nilai-nilai biomasanya pun semakin beragam (Gambar 3a). Hal serupa dilaporkan oleh Feldpausch *et al.* (2012) di mana pohon-pohon besar umumnya memiliki keragaman biomassa yang tinggi dibandingkan dengan pohon-pohon kecil. Namun biomassa berkorelasi negatif ($r = -0,41$) dengan kerapatan kayu, dimana biomassa cenderung menurun jika kerapatan kayu semakin meningkat (Gambar 1c). Korelasi negatif juga terjadi pada hubungan antara diameter dan kerapatan kayu, dimana semakin besar diameter maka kerapatan kayu cenderung semakin menurun (Gambar 1d). Hal tersebut disebabkan nilai-nilai diameter pohon terkecil hingga terbesar berasal dari 14 jenis pohon dengan kerapatan kayu berbeda-beda (Tabel 2). Sebagai contoh, pada kelas diameter terkecil (5 – 9 cm, Tabel 1) terdapat jenis *Diospyros celebica* dengan kerapatan kayu paling tinggi (0,723 g/cm³, Tabel 2), sedangkan pada kelas diameter terbesar (30

– 40 cm, Tabel 1) terdapat jenis *Octomeles sumatrana* dengan kerapatan kayu paling rendah (0,237 g/cm³, Tabel 2). Pola hubungan negatif antara kerapatan kayu dan diameter/biomassa pada jenis-jenis pohon campuran di hutan sekunder juga ditemukan pada data hasil penelitian Stas *et al.* (2017). Untuk jenis-jenis pohon di lokasi penelitian, kerapatan kayu berkisar antara 0,237 – 0,723 g/cm³ dengan rata-rata 0,459 g/cm³ dan simpangan baku 0,132 g/cm³ (Tabel 2). Rata-rata kerapatan kayu tersebut hampir sama dengan rata-rata kerapatan kayu untuk jenis-jenis pohon hutan sekunder di Panama sebesar 0,496 g/cm³ (van Breugel *et al.*, 2011). Walaupun korelasi antara kerapatan kayu dan biomassa tidak terlalu erat dibandingkan dengan korelasi antara diameter/tinggi dan biomassa, tetapi peubah kerapatan kayu tersebut potensial digunakan sebagai salah satu peubah bebas (selain diameter dan tinggi pohon) dalam model alometrik biomassa pohon jenis campuran (Chave *et al.*, 2014). Basuki *et al.* (2009) menunjukkan bahwa peranan peubah kerapatan kayu bersifat nyata pada model-model alometrik untuk kelompok jenis campuran tetapi tidak nyata pada model-model alometrik untuk tingkat genus.



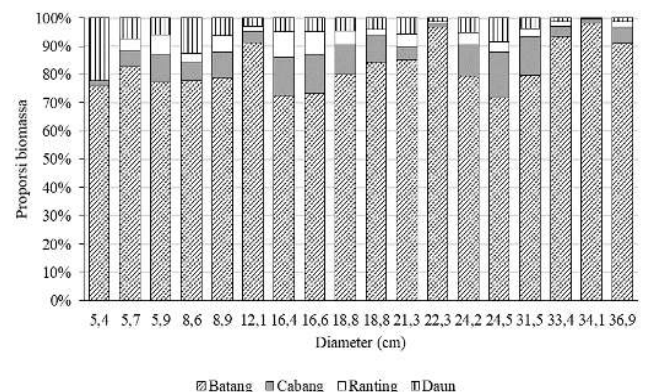
Gambar 3. Pola hubungan antara (a) diameter dan biomassa, (b) tinggi dan biomassa, (c) kerapatan kayu dan biomassa, serta (d) diameter dan kerapatan kayu

Tabel 2. Kerapatan kayu dari jenis-jenis pohon di hutan sekunder

Nama latin	Nama lokal	Kerapatan kayu (g/cm ³)
<i>Anisoptera</i> spp.	Mersawa	0,535
<i>Anthocephalus</i> spp.	Samama	0,386
<i>Calophyllum inophyllum</i>	Bintangor	0,433
<i>Canarium</i> sp.	Kenari	0,400
<i>Diospyros celebica</i>	Mologotu	0,723
<i>Dracontomelon</i> spp.	Buarao	0,353
<i>Eugenia aromaticum</i>	Cengkeh hutan	0,348
<i>Eugenia</i> sp.	Gosale	0,673
<i>Koordersiodendron pinnatum</i>	Bugis	0,345
<i>Octomeles sumatrana</i>	Binuang	0,237
<i>Palaquium</i> sp.	Nyatoh	0,446
<i>Pometia pinnata</i>	Matoa	0,512
<i>Syzygium</i> sp.	Jambu-jambu	0,486
<i>Vatica</i> spp.	Hiru	0,542

Biomassa tersimpan pada bagian-bagian batang, cabang, ranting, dan daun dengan proporsi yang cenderung bervariasi menurut diameter pohonnya (Gambar 4), karena perbedaan karakteristik pertumbuhan tiap jenis pohon. Bagian batang menyimpan paling banyak biomassa, yaitu rata-rata sebesar 82,8 % (71,8 – 98,0 %), sedangkan sisanya tersimpan pada cabang sebesar 7,8 % (1,2 – 16,2 %), ranting sebesar 3,7 % (0 – 9,1 %), dan daun sebesar 5,8 % (0,2 – 22,3 %) (Gambar 4). Proporsi biomassa batang yang lebih tinggi tersebut disebabkan sedikitnya percabangan pada pohon-pohon contoh, sehingga dimensi tajuknya pun relatif kecil. Arsitektur pohon-pohon contoh seperti itu menyebabkan proporsi biomassa batang yang lebih besar daripada komponen lainnya (cabang, ranting, dan daun). Rata-rata proporsi biomassa batang dari penelitian ini (82,8 %) lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata proporsi biomassa batang jenis-jenis pohon di hutan dipterokarpa Kalimantan Timur sebesar 67 % (Basuki *et al.*, 2009). Hal ini dimungkinkan karena perbedaan karakteristik dan arsitektur pohon di lokasi penelitian dan di hutan dipterokarpa. Dalam penelitian ini, pohon-pohon contoh umumnya berukuran kecil (diameter <40 cm) dengan tajuk yang masih berkembang, sedangkan pohon-pohon contoh dalam penelitian Basuki *et al.* (2009) tidak hanya berukuran kecil melainkan juga berukuran besar (diameter >40 cm) dengan dimensi tajuk yang lebih besar. Perbedaan proporsi biomassa batang akibat perbedaan arsitektur pohon juga dilaporkan oleh He *et al.* (2018), dimana jenis-jenis pohon dengan tinggi total lebih besar cenderung memiliki proporsi biomassa batang lebih

besar dibandingkan dengan jenis-jenis pohon dengan tinggi total lebih kecil. Tingginya biomassa pada batang dimungkinkan karena hasil fotosintesis sebagian besar tersimpan pada batang pohon.



Gambar 4. Proporsi biomassa pada batang, cabang, ranting, dan daun pohon jenis campuran

Model Alometrik Biomassa

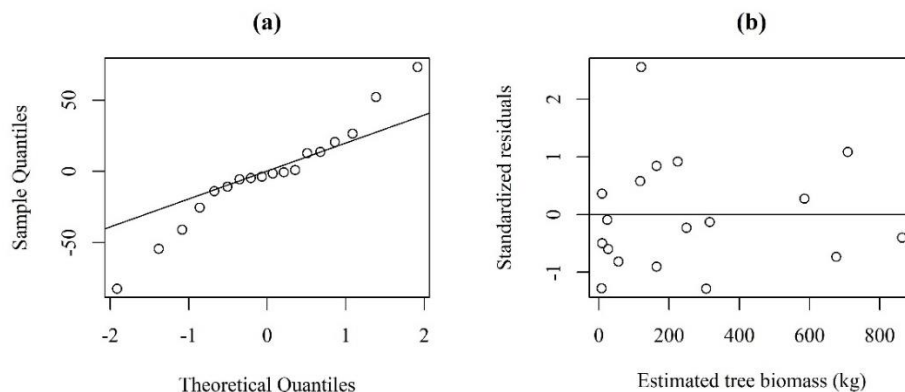
Berdasarkan hasil analisis regresi non-linier diperoleh nilai-nilai koefisien setiap model alometrik beserta nilai-nilai uji statistiknya seperti tercantum pada Tabel 3. Pada setiap model (kecuali model M6), semua koefisien bersifat nyata (*P-value* <0,05) yang berarti bahwa peubah-peubah bebas dalam model (diameter, tinggi, atau kerapatan kayu) mampu menjelaskan keragaman biomassa pohon dengan baik (*R^{2adj}* >85 %). Model alometrik terbaik adalah M7, karena semua koefisien model bersifat nyata (*P-value* <0,05), nilai RMSE terkecil, nilai koefisien determinasi (*R^{2adj}*) tertinggi, serta nilai AIC dan BIC

relatif kecil. Walaupun AIC dan BIC model M7 bukan nilai terkecil, tetapi perbedaan nilainya tidak terlalu jauh (<10) dibandingkan dengan model yang memiliki AIC dan BIC terkecil (model M8). Burnham & Anderson (2002) menyatakan bahwa dua model dikategorikan berbeda secara signifikan apabila memiliki perbedaan nilai AIC dan/atau BIC ≥ 10 . Model M7 memenuhi asumsi kenormalan sisaan

karena nilai-nilai sisaan model sebagian besar berada di sekitar garis lurus (Gambar 5a) dan dipertegas dengan nilai uji Shapiro-Wilk ($P\text{-value} = 0,655$) yang menunjukkan bahwa sisaan menyebar normal. Model M7 juga memenuhi asumsi kehomogenan ragam sisaan karena nilai-nilai sisaan tersebar acak di sekitar nilai nol (Gambar 5b).

Tabel 3. Nilai-nilai parameter, simpangan baku, dan uji-uji statistik dari model-model alometrik

Model	Parameter	SE	P-value	AIC	BIC	RMSE	R ² adj	
M1	A	0,122	0,0363	0,0039	180,11	183,67	95,91	0,883
	B	2,456	0,1030	0,0000				
M2	A	14,971	3,7539	0,0011	201,66	205,23	104,60	0,861
	B	0,115	0,0092	0,0000				
M3	A	0,077	0,0261	0,0090	175,09	178,66	67,15	0,943
	B	0,874	0,0363	0,0000				
M4	A	0,079	0,0301	0,0187	176,59	181,04	70,84	0,936
	B	1,893	0,2104	0,0000				
	C	0,716	0,2632	0,0157				
M5	A	0,147	0,0465	0,0061	181,68	185,24	78,24	0,922
	B	2,672	0,1090	0,0000				
M6	A	0,133	0,0369	0,0026	177,31	181,77	80,56	0,917
	B	0,479	0,2396	0,0636				
	C	2,557	0,1074	0,0000				
M7	A	0,076	0,0211	0,0021	165,99	169,56	37,11	0,982
	B	0,963	0,0322	0,0000				
M8	A	-2,865	0,0412	0,0000	164,94	167,61	49,34	0,969



Gambar 5. Kenormalan sisaan (a) dan kehomogenan ragam sisaan (b) dari model M7

Model M7 merupakan model alometrik yang menggunakan tiga peubah bebas, yaitu diameter, tinggi, dan kerapatan kayu. Hal ini berarti bahwa untuk memperoleh nilai dugaan yang akurat dari biomassa pohon jenis-jenis campuran di hutan sekunder, tidak cukup hanya menggunakan peubah

diameter dan tinggi pohon melainkan juga peubah kerapatan kayu yang bervariasi antar jenis pohon sehingga menyebabkan keragaman biomassa pohonnya (Henry *et al.*, 2010; Ketterings *et al.*, 2001). Penambahan peubah kerapatan kayu (selain diameter dan tinggi pohon) untuk meningkatkan akurasi model

alometrik juga dilakukan oleh Ketterings *et al.* (2001), Basuki *et al.* (2009), Henry *et al.* (2010), Chave *et al.* (2014), Stas *et al.* (2017), dan Kusmana *et al.* (2018). Chave *et al.* (2014) dan Kuyah *et al.* (2012) membuktikan bahwa model alometrik yang menggunakan peubah kerapatan kayu menghasilkan nilai dugaan biomassa yang lebih akurat dibandingkan dengan model alometrik yang tidak menggunakan peubah kerapatan kayu. Temuan serupa dilaporkan oleh van Breugel *et al.* (2011), dimana penambahan peubah kerapatan kayu pada model alometrik dapat meningkatkan akurasi pendugaan biomassa pada level plot contoh di hutan sekunder.

Berbeda dengan model M7 dan M8, model M1 dan M2 hanya menggunakan peubah diameter. Dibandingkan dengan model M7, kedua model tersebut memiliki nilai AIC dan BIC yang lebih besar dengan perbedaan nilai AIC/BIC ≥ 10 , sehingga kedua model tersebut dapat dinyatakan berbeda signifikan dari model M7 (Burnham & Anderson, 2002). Selain itu, nilai RMSE model M1 dan M2 yang cukup tinggi (96 – 105 kg) menunjukkan bahwa penyimpangan nilai dugaan biomasanya cukup besar. Hal ini berarti bahwa pendugaan biomassa pohon jenis campuran yang hanya menggunakan peubah diameter kurang akurat, karena diameter hanya menjelaskan keragaman biomassa pohon sebesar 86 – 88 % (Tabel 3). Rendahnya akurasi model alometrik yang hanya menggunakan peubah diameter juga dilaporkan oleh Puc-Kauil *et al.* (2020) dalam pendugaan biomassa hutan tropis sekunder. Walaupun demikian, model M1 dan M2 tersebut lebih praktis digunakan karena hanya memerlukan data diameter pohon yang relatif mudah diukur di lapangan. Bahkan sebagian besar (82 %) dari model-model alometrik biomassa pohon yang telah dikembangkan di Indonesia hanya menggunakan peubah diameter pohon, sedangkan sisanya menggunakan peubah diameter dan tinggi pohon (Krisnawati *et al.*, 2012).

Sumber keragaman biomassa lainnya disebabkan oleh keragaman tinggi pohon atau kerapatan kayu. Hal ini terlihat dari model-model yang menggunakan dua peubah, yaitu model M3 dan M4 yang menggunakan peubah diameter dan tinggi serta model M5 dan M6 yang menggunakan peubah diameter dan kerapatan kayu. Selain diameter, penambahan peubah tinggi (pada model M3 dan M4) atau kerapatan kayu (pada model M5 dan M6) mampu menjelaskan keragaman biomassa pohon sebesar 92 – 94 % (Tabel 3). Namun penambahan peubah tinggi atau kerapatan kayu menyebabkan model-model alometrik tersebut kurang praktis digunakan, karena tinggi pohon dan kerapatan

kayu relatif sulit diukur di lapangan dibandingkan dengan diameter pohon. Diantara keempat model dengan dua peubah bebas, model M3 memiliki nilai-nilai statistik yang lebih baik (yakni nilai-nilai AIC/BIC dan RMSE terkecil serta R^2_{adj} terbesar) dan tidak berbeda signifikan dari model M7 karena selisih nilai AIC/BIC < 10 (Burnham & Anderson, 2002). Dengan demikian, model M3 dapat digunakan sebagai model alternatif untuk pendugaan biomassa selain model M7. Penggunaan model alometrik yang menggunakan peubah diameter dan tinggi (seperti model M3) juga disarankan oleh Rutishauser *et al.* (2013) untuk mengurangi ketidakpastian dalam pendugaan biomassa hutan.

Perbandingan Model-model Alometrik

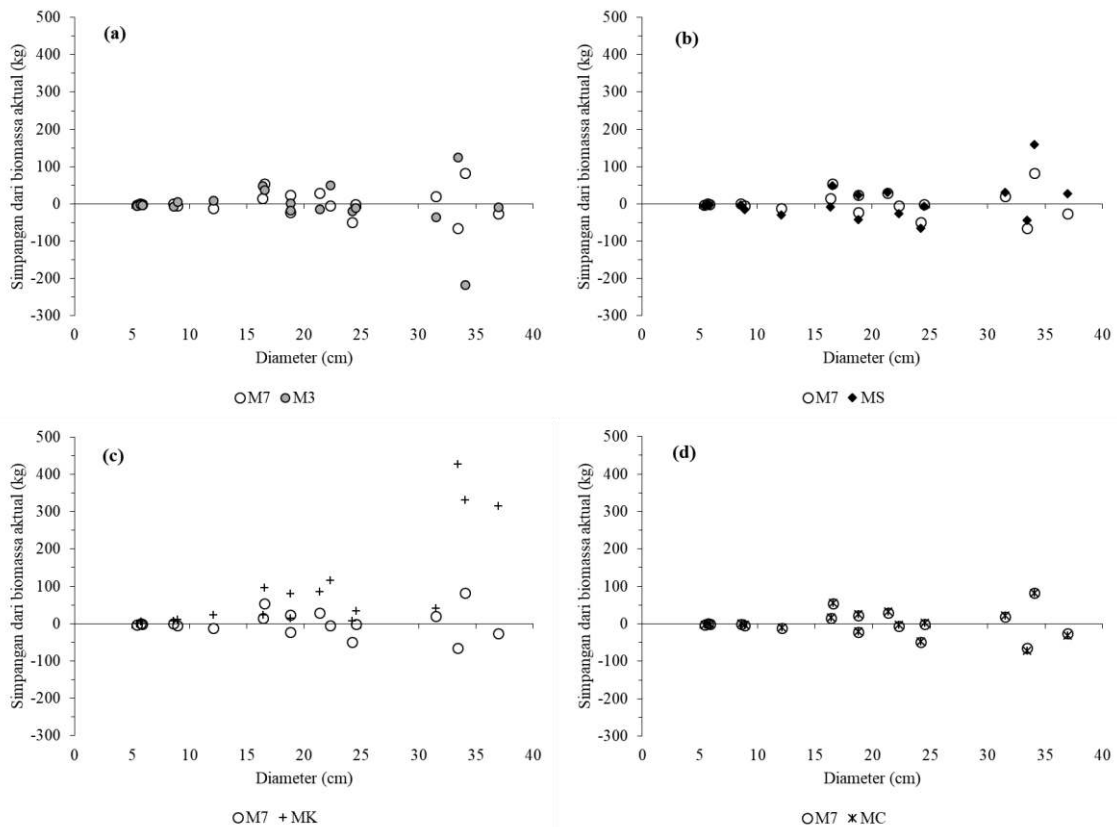
Dibandingkan dengan model-model alometrik lainnya (Tabel 4), model M7 merupakan model alometrik lokal yang paling akurat karena nilai biasanya paling kecil (PE=0,70 % dan MAPE=14,96 %), tetapi model M3 relatif kurang akurat (PE=-1,26 % dan MAPE=20,71 %). Model alometrik lokal lainnya yang cukup akurat adalah model MS (PE=1,44 % dan MAPE=25,10 %), karena model tersebut disusun berdasarkan data pengukuran biomassa hutan sekunder di Pulau Seram (Stas *et al.*, 2017) yang kondisi ekosistemnya tidak jauh berbeda dengan hutan sekunder di Halmahera Timur. Model M7 dan MS memberikan nilai dugaan biomassa yang mendekati nilai biomassa aktual pada berbagai diameter pohon (Gambar 6a dan 6b). Namun model alometrik lokal MK terbukti tidak akurat (PE=35,97 % dan MAPE=30,91 %) dan memberikan nilai dugaan yang lebih besar (*overestimate*) dibandingkan dengan nilai biomassa aktual pada berbagai diameter pohon (Gambar 6c). Hal ini dimungkinkan karena model tersebut disusun untuk hutan sekunder di Pulau Sumatera (Ketterings *et al.*, 2001) yang kondisi ekosistem hutannya berbeda dengan wilayah timur Indonesia. Stas *et al.* (2017) juga membuktikan bahwa model MK tersebut memberikan bias yang tinggi (57,1 %) jika digunakan untuk menduga biomassa hutan sekunder di Pulau Seram.

Tabel 4. Nilai-nilai rata-rata bias (ME) dan persen bias (PE) dari model-model alometrik biomassa pohon

Model alometrik	ME	PE (%)	MAPE (%)
M7 (Model terbaik dari penelitian ini)	1,75	0,70	14,96
M3 (Model alternatif dari penelitian ini)	-3,15	-1,26	20,71
MK (Ketterings <i>et al.</i> , 2001)	90,18	35,97	30,91
MC (Chave <i>et al.</i> , 2014)	2,97	1,18	14,38
MS (Stas <i>et al.</i> , 2017)	3,60	1,44	25,10

Berbeda dengan model-model alometrik lokal tersebut, model MC merupakan model alometrik global yang disusun oleh Chave *et al.* (2014) berdasarkan data pengukuran biomassa pohon pada berbagai lokasi dan kondisi ekosistem hutan tropis. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa model MC lebih akurat (PE=1,18 % dan MAPE=14,38 %) dibandingkan dengan model alometrik lokal MS dan MK, dimana nilai dugaan biomassa dari model MC mendekati nilai biomassa aktual pada berbagai

diameter pohon (Gambar 6d). Stas *et al.*, (2017) juga membuktikan bahwa model MC dapat memberikan akurasi pendugaan yang cukup tinggi (bias 7,7%). Hal ini menunjukkan bahwa model alometrik global yang disusun oleh Chave *et al.* (2014) tersebut mampu memberikan akurasi yang cukup baik untuk pendugaan biomassa hutan sekunder di wilayah timur Indonesia, khususnya di Halmahera Timur dan Pulau Seram.



Gambar 6. Perbandingan simpangan nilai-nilai dugaan biomassa antara model M7 dan (a) model M3, (b) model MS, (c) model MK, dan (d) model MC

Penerapan Model Alometrik

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa model M7 merupakan model alometrik lokal yang paling akurat digunakan untuk pendugaan biomassa hutan sekunder di Halmahera Timur, khususnya di areal konsesi PT MAP. Dalam penerapannya, model M7 memerlukan data hasil pengukuran diameter, tinggi, dan kerapatan kayu. Peubah diameter dan tinggi

pohon lazim diukur dalam kegiatan inventarisasi hutan untuk pendugaan volume tegakan. Namun peubah kerapatan kayu tidak lazim diukur dalam kegiatan inventarisasi hutan karena tidak diperlukan untuk pendugaan volume tegakan. Selain itu, untuk memperoleh data kerapatan kayu diperlukan teknik pengukuran dan analisis sampel kayu di laboratorium yang tidak umum dilakukan oleh perusahaan-

perusahaan kehutanan. Alternatifnya, data kerapatan kayu dapat diperoleh dari hasil-hasil penelitian (seperti Tabel 2) ataupun pangkalan data (*database*) kerapatan kayu seperti *DRYAD Global Wood Density* (GWD) (Zanne *et al.*, 2009). Bahkan, Flores dan Coomes (2011) menyarankan untuk menggunakan nilai-nilai kerapatan kayu dari pangkalan data GWD karena jumlah sampelnya lebih besar daripada pangkalan data lokal yang jumlah sampelnya relatif sedikit. Untuk jenis-jenis pohon di Indonesia, data kerapatan kayu dapat diperoleh dari pangkalan data ICRAF (2020). Akan tetapi, untuk menentukan nilai kerapatan kayu suatu jenis pohon diperlukan identifikasi jenis-jenis pohon selama kegiatan inventarisasi hutan. Hal ini tidak selalu mudah dilakukan karena keterbatasan pengenalan jenis pohon di lapangan (van Breugel *et al.*, 2011), yang seringkali hanya mengetahui nama lokal yang cenderung berbeda-beda antar daerah sehingga menyulitkan dalam penentuan nama ilmiahnya. Ketika tidak semua jenis pohon diketahui nilai kerapatan kayunya, beberapa peneliti (misalnya, Rutishauser *et al.*, 2013; Stas *et al.*, 2017) menggunakan nilai rata-rata kerapatan kayu dari jenis, genus, atau marga pohon-pohon yang diketahui. Penggunaan nilai rata-rata kerapatan kayu yang tidak spesifik untuk jenis pohon tertentu kemungkinan dapat menyebabkan bias pendugaan dari suatu model alometrik yang perlu diteliti lebih lanjut.

Apabila data kerapatan kayu untuk model M7 sulit diperoleh, alternatifnya adalah menggunakan model M3 yang dapat menjelaskan keragaman biomassa pohon sebesar 94 % melalui peubah diameter dan tinggi pohon. Walaupun model M3 kurang akurat dibandingkan dengan model M7, tetapi model M3 lebih praktis digunakan karena tidak memerlukan data kerapatan kayu melainkan hanya data diameter dan tinggi pohon yang dapat diperoleh dari kegiatan inventarisasi hutan. Masalah yang mungkin dihadapi di lapangan adalah pengukuran tinggi total pohon yang lebih sulit dibandingkan dengan pengukuran diameter, terutama di hutan-hutan tropis dengan kanopi tertutup (Réjou-Méchain, Tanguy, Pioniot, Chave, & Hérault, 2017). Basuki *et al.* (2009) melaporkan bahwa tinggi total pohon lebih sulit diukur daripada tinggi bebas cabang karena umumnya pohon-pohon di hutan dipterokarpa bertajuk lebat. Kesulitan utama dalam pengukuran tinggi pohon umumnya adalah menentukan titik pengukuran yang tepat pada bagian atas pohon yang terhalang tajuk (Hunter, Keller, Vitoria, & Morton, 2013). Namun pada hutan sekunder, pengukuran tinggi total pohon

relatif lebih mudah dilakukan karena kondisi tegakan umumnya tidak terlalu rapat, sehingga memungkinkan pengukur dapat menentukan puncak pohon dengan tepat. Walaupun demikian, akurasi pengukuran tinggi pohon sangat tergantung pada keterampilan teknisi dan jenis alat ukurnya. Pengukuran tinggi pohon di hutan tropis seharusnya dilakukan oleh teknisi-teknisi terampil dan berpengalaman agar akurasi datanya tinggi (Larjavaara & Muller-Landau, 2013). Penggunaan alat-alat ukur tinggi pohon berbasis teknologi *laser* juga memungkinkan pengukuran tinggi pohon secara cepat dan akurat (Larjavaara & Muller-Landau, 2013; Rutishauser *et al.*, 2013). Selain melalui pengukuran di lapangan, tinggi total pohon dapat juga diperoleh dari model hubungan tinggi dan diameter pohon yang disusun berdasarkan hasil pengukuran sejumlah pohon contoh yang mewakili keragaman kondisi tegakan (Magnussen, Kleinn, & Fehrmann, 2020; Quentin Molto, Rossi, & Blanc, 2013), seperti yang dikembangkan oleh Feldpausch *et al.* (2011) dan Q Molto *et al.* (2014).

Seperti halnya model-model alometrik lokal pada umumnya, model M7 atau M3 dari penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan dalam penggunaannya. Pertama, model-model alometrik tersebut hanya cocok digunakan untuk menduga biomassa pohon berdiameter 5 – 37 cm sesuai dengan rentang diameter pohon contoh yang digunakan dalam penyusunan modelnya. Oleh karena itu, model-model alometrik tersebut seharusnya tidak digunakan untuk pendugaan biomassa pohon berdiameter >37 cm karena akan menyebabkan bias nilai dugaan biomasanya (Quentin Molto *et al.*, 2013). Kedua, model M7 atau M3 hanya cocok digunakan pada hutan sekunder dengan komposisi jenis pohon seperti di lokasi penelitian (Tabel 1). Model M7 atau M3 juga disusun berdasarkan jumlah pohon contoh yang relatif sedikit, karena keterbatasan sumberdaya (biaya, waktu, dan tenaga) dan ijin penebangan dari perusahaan, sehingga kemungkinan belum dapat mewakili keragaman biomassa pohon pada lokasi lain. Penggunaan model alometrik lokal pada wilayah lain yang berbeda kondisi ekosistem hutannya dapat menyebabkan bias yang tinggi seperti ditunjukkan oleh model MK (Tabel 4).

Selain menghasilkan model alometrik lokal M7 atau M3, penelitian ini membuktikan juga bahwa model alometrik global dari Chave *et al.* (2014) cukup akurat digunakan untuk pendugaan biomassa pohon di hutan sekunder (Tabel 4). Hal ini dimungkinkan karena Chave *et al.* (2014) menggunakan pohon contoh yang banyak ($n=4004$) dan mewakili beragam

kondisi vegetasi hutan primer dan sekunder di daerah tropis, sub-tropis, dan savana. Oleh karena itu, model alometrik global dari Chave *et al.* (2014) dapat menjadi solusi untuk pendugaan biomassa hutan sekunder ketika dihadapkan pada keterbatasan sumberdaya (biaya, waktu, dan tenaga) untuk mengembangkan model-model alometrik lokal. Namun seperti halnya model M7, dalam penerapannya model Chave *et al.* (2014) juga memerlukan data diameter, tinggi, dan kerapatan kayu.

KESIMPULAN

Model-model alometrik lokal yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat digunakan untuk menduga biomassa pohon jenis campuran di hutan sekunder Halmahera Timur. Model M7 dapat digunakan untuk menduga biomassa pohon secara akurat dengan menggunakan peubah diameter, tinggi, dan kerapatan kayu yang bervariasi antar jenis pohon. Jika kerapatan kayu sulit diperoleh, maka model M3 yang hanya menggunakan peubah diameter dan tinggi pohon dapat digunakan walaupun nilai dugaannya kurang akurat. Model-model alometrik lokal lain (MK dan MS) cenderung kurang akurat, terutama jika model alometrik tersebut disusun untuk kondisi ekosistem hutan yang berbeda. Adapun model alometrik global (MC), yang disusun berdasarkan data pengukuran biomassa pohon pada berbagai lokasi dan kondisi ekosistem hutan tropis, mampu memberikan akurasi pendugaan biomassa yang cukup baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT MAP yang telah memberikan ijin penelitian dan bantuan teknis selama proses pengumpulan data di lapangan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada mitra bestari (*reviewer*) yang telah memberikan komentar dan saran berharga untuk perbaikan isi artikel ini.

KONTRIBUSI

Mujahidah Sylviari Zaenal (sebagai penulis pertama) berperan mengumpulkan data dan menulis naskah; Tatang Tiryana (penulis korespondensi) berperan merumuskan ide/topik penelitian, menganalisis data dan menulis naskah; serta Muhdin (penulis anggota) berperan menulis naskah. Ketiga penulis membaca dan menyetujui naskah akhir hasil penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Anitha, K., Verchot, L. V., Joseph, S., Herold, M., Manuri, S., & Avitabile, V. (2015). A review of forest and tree plantation biomass equations in Indonesia. *Annals of*

Forest Science, 72(8), 981–997.

<https://doi.org/10.1007/s13595-015-0507-4>

- Basuki, T. M., van Laake, P. E., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2009). Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257(8), 1684–1694. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>
- Brown, I. F., Martinelli, L. A., Thomas, W. W., Moreira, M. Z., Cid Ferreira, C. A., & Victoria, R. A. (1995). Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: An example from Rondônia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 75(1), 175–189. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03512-U](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03512-U)
- BSN. (2011). *SNI 7725: 2011 Penyusunan Persamaan Alometrik untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan Berdasar Pengukuran Lapangan (Ground Based Forest Carbon Accounting)*. Jakarta: Badan Standarisasi Indonesia (BSN).
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: a Practical Information-Theoretic Approach*. New York: Springer-Verlag.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Duteă, I., McRoberts, R. E., Næsset, E., & Blujdea, V. N. B. (2019). A practical measure for determining if diameter (D) and height (H) should be combined into D2H in allometric biomass models. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 92(5), 627–634. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz041>
- Ebuy, J., Lokombe, J., Ponette, Q., Sonwa, D., & Picard, N. (2011). Allometric equation for predicting aboveground biomass of three tree species. *Journal of Tropical Forest Science*, 23(2), 125–132.
- Feldpausch, T. R., Banin, L., Phillips, O. L., Baker, T. R., Lewis, S. L., Quesada, C. A., & Lloyd, J. (2011). Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences*, 8(5), 1081–1106. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011>
- Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Lewis, S. L., Brienen, R. J. W., Gloor, M., Monteagudo Mendoza, A., & Phillips, O. L. (2012). Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9(8), 3381–3403. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012>
- Flores, O., & Coomes, D. A. (2011). Estimating the wood density of species for carbon stock assessments. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(2), 214–220. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00068.x>
- He, H., Zhang, C., Zhao, X., Foussemi, F., Wang, J., Dai, H., & Zuo, Q. (2018). Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China. *PLOS ONE*, 13(1), e0186226. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186226>
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., & Saint-André, L. (2010). Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260(8), 1375–1388. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040>

- Hunter, M., Keller, M., Vitoria, D., & Morton, D. (2013). Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences*, *10*(12), 8385–8399. <https://doi.org/10.5194/bg-10-8385-2013>
- Huy, B., Kralicek, K., Poudel, K. P., Phuong, V. T., Khoa, P. V., Hung, N. D., & Temesgen, H. (2016). Allometric equations for estimating tree aboveground biomass in evergreen broadleaf forests of Viet Nam. *Forest Ecology and Management*, *382*, 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.021>
- ICRAF. (2020). Tree functional attributes and ecological database: Wood density. Retrieved November 25, 2020, from World Agroforestry (ICRAF) <http://db.worldagroforestry.org/wd>
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, *146*(1), 199–209. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6)
- Krisnawati, H., Adinugroho, W. C., & 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.
- Kusmana, C., Hidayat, T., Tiryan, T., Rusdiana, O., & Istomo. (2018). Allometric models for above- and below-ground biomass of *Sonneratia* spp. *Global Ecology and Conservation*, *15*, e00417. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00417>
- Kuyah, S., Dietz, J., Muthuri, C., Jannadass, R., Mwangi, P., Coe, R., & Neufeldt, H. (2012). Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. Aboveground biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *158*, 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.011>
- Larjavaara, M., & Muller-Landau, H. C. (2013). Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, *4*(9), 793–801. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12071>
- Magnussen, S., Kleinn, C., & Fehrmann, L. (2020). Wood volume errors from measured and predicted heights. *European Journal of Forest Research*, *139*(2), 169–178. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01257-9>
- MAP. (2018). *RKUPHHK-HA dalam Hutan Alam pada Hutan Produksi Berbasis IHMB Periode Tahun 2018–2027*. Jakarta: MAP (PT Mahakarya Agra Pesona).
- Mardiatmoko, G., Kastanya, A., & Hatulesila, J. W. (2016). Persamaan allometrik pala (*Myristica fragrans* Houtt) untuk pendugaan biomassa atas tanah pada lahan agroforestri guna mendukung program REDD+ di Maluku. *Jurnal Makila*, *9*(1), 97–107.
- Maulana, S. I., & Pandu, J. (2011a). Persamaan-persamaan allometrik genera *Instia* sp. untuk pendugaan total biomassa atas tanah pada kawasan hutan tropis Papua. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, *7*(4), 275–284.
- Maulana, S. I., & Pandu, J. (2011b). Persamaan-persamaan allometrik untuk pendugaan total biomassa atas tanah pada genera *Pometia* di kawasan hutan tropis Papua. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, *8*(4), 288–298.
- MoEF. (2018). *The State of Indonesia's Forests 2018*. Jakarta: MoEF (Ministry of Environment and Forestry).
- Molto, Q., Hérault, B., Boreux, J.-J., Daullet, M., Rousteau, A., & Rossi, V. (2014). Predicting tree heights for biomass estimates in tropical forests – a test from French Guiana. *Biogeosciences*, *11*(12), 3121–3130. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3121-2014>
- Molto, Q., Rossi, V., & Blanc, L. (2013). Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, *4*(2), 175–183. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00266.x>
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual for Building Tree Volume and Biomass Allometric Equations: from Field Measurement to Prediction*. Rome: FAO/CIRAD.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., & Sarkar, D. (2020). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models: R package version 3.1-148. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Puc-Kaulil, R., Ángeles-Pérez, G., Valdéz-Lazalde, J., Reyes-Hernández, V., Dupuy-Rada, J., Schneider, L., ... García-Cuevas, X. (2020). Allometric equations to estimate above-ground biomass of small-diameter mixed tree species in secondary tropical forests. [Allometric equations to estimate above-ground biomass of small-diameter mixed tree species in secondary tropical forests]. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, *13*(3), 165–174. <https://doi.org/10.3832/ifor3167-013>
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from URL <https://www.R-project.org/>
- Rawlings, J. O., Pantula, S. G., & Dickey, D. A. (1998). *Applied Regression Analysis: A Research Tool* (Second ed.). New York: Springer.
- Réjou-Méchain, M., Tanguy, A., Piloniot, C., Chave, J., & Hérault, B. (2017). biomass: an r package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, *8*(9), 1163–1167. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12753>
- Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Rufi'ie, Hergoualc'h, K., & Verchot, L. (2013). Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, *307*, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.013>
- Sanquetta, C. R., Dalla Corte, A. P., Behling, A., de Oliveira Piva, L. R., Péllico Netto, S., Rodrigues, A. L., & Sanquetta, M. N. I. (2018). Selection criteria for linear regression models to estimate individual tree biomasses in the Atlantic Rain Forest, Brazil. *Carbon Balance and Management*, *13*(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0112-6>
- Sileshi, G. W. (2014). A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, *329*, 237–254. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.026>
- Stas, S. M., Rutishauser, E., Chave, J., Anten, N. P. R., & 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.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.12.010>
- 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(Special Issue), 177–188.
https://doi.org/10.20659/jfp.16.Special_Issue_177
- van Breugel, M., Ransijn, J., Craven, D., Bongers, F., & Hall, J. S. (2011). Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1648–1657.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.018>
- Zanne, A., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S., & Chave, J. (2009). Global Wood Density Database. Retrieved from
<https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.5061/dryad.234>.