

**MODEL TAPER BATANG TANAMAN *Khaya anthoteca* C.DC. DI HUTAN
PENELITIAN PASIRHANTAP, SUKABUMI, JAWA BARAT
(Stem Taper Model for *Khaya anthoteca* C.DC. Plantation in Pasirhantap Experimental
Forest, Sukabumi, West Java)*)**

Oleh/By:

Harbagung¹ dan/and Haruni Krisnawati²

¹Pusat Litbang Hutan Tanaman

Jl. Gunung Batu No. 5 Po Box 331; Telp. 0251-8631238; Fax 0251-7520005 Bogor 16610

Email: harb_agung@yahoo.com

²Pusat Litbang Hutan dan Konservasi Alam

Jl. Gunung Batu No. 5 Po Box 165; Telp. 0251-8633234, 7520067; Fax 0251-8638111 Bogor

Email: haruni@dephut.go.id

*) Diterima : 05 Maret 2009; Disetujui : 08 Juni 2009

klasifikasi

ABSTRACT

A taper model was developed for african-mahogany (*Khaya anthoteca* C.D.C) grown in Pasirhantap Experimental Forest in Sukabumi, West Java. The taper model can be used to estimate stem volume to any height by integrating the taper equation from the ground to that height. Data from 58 sample trees aged 35-60 years with the range of diameter of between 20 and 90 cm and the range of clearbole height of between 10 and 30 m were used for model development. Eight taper equations were evaluated, six of these equations were taken from the available literature, and the others were developed in the present study. Five performance indicator statistics (i.e. MRES, AMRES, RMSE, MEF_{adj}, and AIC) were used for comparing the models in their ability to estimate tree diameter. Testing by means of independent data indicated that the new model developed in this study, i.e. $dob_h = 1,0236 + 0,8124 Dbh + 0,4960 Hcb - 1,4134 h + 0,0096 h^2$ was found to be better than the other models in term of prediction accuracy (sum of ranks was the least, i.e. 6). This model could be recommended for the estimation of diameter at a specific height of African mahogany stems in the area of study. Integration of this equation resulted in the volume equation:

$$V_{h_1-h_2} = \pi / 40000 \int_{h_1}^{h_2} dob_h^2 dh$$

which could be used to estimate both merchantable volume and total volume of the species.

Keywords: Taper model, stem volume estimation model, *Khaya anthoteca* C.DC.

ABSTRAK

Model *taper* telah disusun untuk jenis kayu mahoni afrika (*Khaya anthoteca* C.D.C) yang tumbuh di Hutan Penelitian Pasirhantap, Sukabumi, Jawa Barat. Model *taper* dapat digunakan untuk menduga volume pohon pada berbagai ketinggian batang dengan cara mengintegrasikan model *taper* tersebut dari atas permukaan tanah sampai pada ketinggian batang tersebut. Data dari 58 pohon contoh berumur 35-60 tahun dengan kisaran diameter antara 20 dan 90 cm dan tinggi batang bebas cabang antara 10 dan 30 m digunakan untuk menyusun model. Delapan persamaan *taper* telah diuji, tujuh persamaan di antaranya diambil dari sumber literatur, dan sisanya adalah persamaan baru yang diujicobakan dalam penelitian ini. Lima indikator statistik (yaitu MRES, AMRES, RMSE, MEF_{adj}, dan AIC) digunakan untuk membandingkan model dalam kemampuannya untuk menduga diameter pohon. Hasil uji dengan menggunakan data independen menunjukkan bahwa model baru yang dicobakan dalam penelitian ini, yaitu $dob_h = 1,0236 + 0,8124 Dbh + 0,4960 Hcb - 1,4134 h + 0,0096 h^2$ menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan model lainnya dalam hal keakuratan prediksi (jumlah skor paling rendah, yaitu 6). Model ini dapat direkomendasikan untuk menduga diameter batang pada ketinggian tertentu pada jenis kayu mahoni afrika di lokasi studi. Integrasi dari persamaan ini menghasilkan persamaan volume:

$$V_{h_1-h_2} = \pi / 40000 \int_{h_1}^{h_2} dob_h^2 dh$$

yang dapat digunakan untuk menduga volume batang sampai pada ketinggian batang tertentu yang diperdagangkan maupun volume batang total.

Kata kunci: Model *taper*, model pendugaan volume batang, *Khaya anthoteca* C.DC.

I. PENDAHULUAN

Khaya anthoteca C.DC. merupakan salah satu jenis pohon dari famili Meliaceae. Ardikusumah dan Dilmy (1956) menerangkan bahwa penyebaran alami *Khaya anthoteca* C.DC. adalah daerah tropis Afrika; dan di daerah tersebut jenis ini merupakan salah satu jenis perdagangan utama, yang dalam khasanah perdagangan kayu internasional dikenal dengan nama *african-mahogany*.

Percobaan introduksi *K. anthoteca* di hutan-hutan penelitian menunjukkan bahwa 1) jenis tersebut telah beraklimatisasi dengan kondisi Indonesia; 2) dapat dikategorikan sebagai jenis tumbuh cepat; dan 3) berprospek baik untuk dikembangkan secara luas (Masano, 1987). Pengembangan *K. anthoteca* dalam bentuk pembangunan hutan tanaman dengan skala perusahaan perlu dibarengi dengan penyediaan berbagai informasi teknik pengusahaannya, yang salah satu di antaranya adalah teknik pendugaan potensi massa tegakan.

Pendugaan potensi massa tegakan pada umumnya dilaksanakan melalui kegiatan inventarisasi hutan yang menuntut tersedianya model pendugaan volume pohon. Pada masa sekarang, model pendugaan volume pohon yang disusun terbatas pada hubungan volume dengan diameter ($V = f(D)$), atau diameter dan tinggi pohon ($V = f(D, H)$), sudah dirasakan kurang menunjang perencanaan kebutuhan industri karena tidak memasukkan faktor sortimen kayu. Sejalan dengan perkembangan teknologi industri per kayu, informasi volume kayu bulat sampai limit diameter dan atau limit panjang batang tertentu merupakan informasi yang sangat diperlukan oleh industri yang bersangkutan.

Demaerschalk (1972), Goulding dan Murray (1975), Clutter (1980), Kozak (1988) dan Newnham (1992) telah memperkenalkan alternatif menduga volume batang pohon berdasar model bentuk batang, yang lazim disebut dengan model *taper*. Clutter *et al.* (1983) memberikan

definisi tentang *taper*, yaitu pengurangan atau semakin mengecilnya diameter batang atau seksi batang pohon dari pangkal hingga ujung; sebagai akibat dari resultante dimensi pohon yang disebabkan oleh pertumbuhan diameter dan tinggi pohon (Husch *et al.*, 2002).

Laasasenaho (1982) menyatakan bahwa bentuk *taper* beragam berdasarkan jenis pohon. Keragaman tersebut disebabkan pengaruh sifat genetik yang dimiliki masing-masing jenis (Oliver dan Larson, 1996), tingkat umur, dan faktor lingkungan (Daniel *et al.*, 1979). Berkaitan dengan semua hal tersebut, sebaiknya model *taper* disusun pada masing-masing jenis di setiap lokasi.

Penelitian ini bertujuan menyusun model *taper* tanaman *K. anthoteca* berumur 35-60 tahun di Hutan Penelitian Pasirhantap, Sukabumi, Jawa Barat. Analisis regresi terhadap 58 pohon sampel dengan mencoba berbagai bentuk persamaan telah menghasilkan model *taper* cukup akurat. Model *taper* tersebut dapat dikembangkan menjadi model pendugaan volume pada berbagai sortimen, baik didasarkan limit diameter maupun limit panjang batang.

II. METODOLOGI

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Data penelitian dikumpulkan dari tegakan hutan tanaman *K. anthoteca* di Hutan Penelitian Pasirhantap. Kawasan hutan ini termasuk dalam wilayah Desa Ginjar, Kecamatan Nagrak, Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat.

Hutan Penelitian Pasirhantap berada pada ketinggian 650 meter di atas permukaan laut dengan konfigurasi lapangan bergelombang hingga berbukit (lereng lebih dari 15%). Tanah termasuk latosol coklat, bahan induk tufvolkan intermedier, fisiografi vulkan. Rata-rata curah hujan di wilayah Kecamatan Nagrak adalah 3.163 mm/tahun, termasuk tipe curah hujan B.

Pengumpulan data dilaksanakan dua tahap, yaitu pada bulan Juni 2008 pengumpulan data untuk penyusunan model *taper*, kemudian data untuk uji kesahihan model (*external validation*) dikumpulkan pada bulan November 2008.

B. Obyek Penelitian

Tanaman *K. anthoteca* yang dijadikan obyek penelitian adalah tegakan di dalam petak no. 13 (tahun tanam 1948), petak no. 16 (tahun tanam 1953), dan petak no. 25 (tahun tanam 1973). Nomor-nomor petak tersebut adalah nomor petak tanaman menurut penataan/pemetaan hutan penelitian.

Pertumbuhan tegakan *K. anthoteca* dalam petak-petak tersebut tampak cukup baik, dengan penutupan tajuk (terhadap areal/petak) rapat secara kelompok-kelompok. Lantai hutan ditumbuhi pakis-pakistan cukup rapat dan lebat (tinggi $\pm 1,5$ m).

C. Pengumpulan Data

1. Pemilihan Pohon Sampel

Agar mewakili kondisi populasi tegakan obyek penelitian, pohon-pohon sampel (untuk diukur diameter seksi-seksi batangnya) dipilih secara sengaja (*purposive*) berdasar sebaran pohon menurut diameter setinggi dada (1,30 m di atas tanah) (*diameter at breast height: Dbh*) dan tinggi batang bebas cabang (*clearbole height: Hcb*). Data *Dbh* dan *Hcb* pohon-pohon *K. anthoteca* di Pasirhantap diperoleh dari pengelola hutan penelitian.

Jumlah sampel yang dikumpulkan untuk menyusun model *taper* 58 pohon, sedangkan untuk keperluan validasi dikumpulkan 25 pohon independen.

2. Pengukuran Pohon Sampel

Pada setiap pohon sampel dilakukan pengukuran tinggi tonggak (perkiraan apabila pohon yang bersangkutan ditebang), diameter setinggi dada (*Dbh*), tinggi batang bebas cabang (*Hcb*), dan

tinggi pohon sampai pucuk (*tree height: Ht*), serta pengukuran diameter seksi-seksi batang (*dh*).

Selain dalam satuan meter (diukur dengan meteran), tinggi tonggak juga diukur dalam bentuk nilai *tangens* (%) dari jarak tertentu menggunakan *spiegel-relascope*. Pengukuran jarak pengukur terhadap pohon dilakukan dengan meteran (diusahakan sejauh lebih kurang sama dengan tinggi pohon (*Ht*)). *Dbh* diukur dengan *phi-band*, sedangkan pengukuran *Hcb* dan *Ht* dilakukan dengan *spiegel-relascope* (%).

Tinggi letak pengukuran diameter seksi-seksi batang adalah setinggi tonggak, serta setinggi 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, dan 5/5 dari selisih persen pengukuran tinggi bebas cabang dikurangi persen pengukuran tinggi tonggak. Diameter batang setinggi tonggak diukur dengan pita keliling, sedangkan diameter seksi-seksi batang lainnya diukur dengan *spiegel-relascope*. Dikarenakan diameter seksi-seksi batang dilakukan dalam kondisi pohon berdiri dengan menggunakan *spiegel-relascope*, maka ukuran diameter yang diperoleh adalah diameter batang dengan kulit (*diameter outside bark: dob_h*); dan oleh karena itu model *taper* dan perhitungan volume yang akan diperoleh adalah untuk batang dengan kulit.

Melalui prosedur pengukuran seperti diuraikan di atas, maka dari setiap pohon sampel diperoleh data pengukuran parameter *Dbh*, *Hcb*, *Ht*, tinggi seksi-seksi batang (*h*), dan diameter seksi-seksi batang (*dob_h*).

3. Pengumpulan Pohon Independen

Uji kesahihan model *taper* dilakukan secara *external validation* sehingga untuk keperluan itu dipilih "pohon-pohon independen" dalam rangka pengumpulan data independen (*independent data*). Kriteria "pohon independen" adalah:

- a. pohon-pohon tidak termasuk pohon yang sudah diukur dalam pengumpulan data yang dipergunakan untuk menyusun model *taper*,

b. sebaran diameter-tinggi pohon mewakili sebaran diameter-tinggi tegakan tanaman *K. anthoteca* di Hutan Penelitian Pasirhantap.

Pengukuran 25 “pohon independen” dilakukan dengan prosedur yang sama dengan pengukuran pohon sampel untuk penyusunan model *taper*.

D. Analisis Data

1. Sebaran Data

Sebaran jumlah pohon menurut kelas diameter dan kelas tinggi bebas cabang dari pohon sampel disusun dalam diagram kumpul (*plotting-diagram*). Diagram ini bermanfaat sebagai bahan pertimbangan keberlakuan model *taper* yang diperoleh.

Selain sebaran *Dbh-Hcb*, disusun pula persamaan regresi hubungan *Hcb-Dbh*. Bentuk model yang disusun adalah:

$$Hcb = b_0 + b_1 \frac{1}{Dbh^2} \dots\dots\dots 1$$

2. Model Taper

Bentuk model *taper* yang dianalisis dalam penelitian ini adalah mengacu pada bentuk-bentuk model yang pernah diajukan oleh Behre (1953), Kozak *et al.* (1969) dalam Loetsch *et al.* (1973), Eadkeo dan Ayudhya (1983), dan Krisnawati dan Wahjono (2003); serta introduksi bentuk model baru. Bentuk-bentuk model tersebut adalah:

a. Behre (1953):

$$\frac{d}{D} = \frac{\left(\frac{h}{H}\right)}{b_0 + b_1 \left(\frac{h}{H}\right)} \text{ dimodifikasi menjadi:}$$

$$\frac{Dbh}{dob_h} = b_0 + b_1 \left(\frac{Hcb}{h}\right) \dots\dots\dots 2$$

b. Kozak *et al.* (1969) dalam Loetsch *et al.* (1973) serta Krisnawati dan Wahjono (2003):

$$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{H}\right) + b_2 \left(\frac{h}{H}\right)^2$$

dimodifikasi menjadi:

$$\left(\frac{dob_h}{Dbh}\right)^2 = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{Hcb}\right) + b_2 \left(\frac{h}{Hcb}\right)^2 \dots\dots\dots 3$$

c. Eadkeo dan Ayudhya (1983):

$Log d = b_0 + b_1 Log D + b_2 Log H + b_3 Log h$
dimodifikasi menjadi:

$$Log dob_h = b_0 + b_1 Log Dbh + b_2 Log Hcb + b_3 Log h \dots\dots\dots 4$$

d. Krisnawati dan Wahjono (2003):

1) $\frac{d}{D} = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{H}\right)$ dimodifikasi menjadi:

$$\frac{dob_h}{Dbh} = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{Hcb}\right) \dots\dots\dots 5$$

2) $\frac{d}{D} = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{H}\right)^2$ dimodifikasi menjadi:

$$\frac{dob_h}{Dbh} = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{Hcb}\right)^2 \dots\dots\dots 6$$

3) $\left(\frac{d}{D}\right)^2 = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{H}\right)^2$

dimodifikasi menjadi:

$$\left(\frac{dob_h}{Dbh}\right)^2 = b_0 + b_1 \left(\frac{h}{Hcb}\right)^2 \dots\dots\dots 7$$

e. Introduksi bentuk persamaan baru:

1) $dob_h = b_0 + b_1 Dbh + b_2 Hcb + b_3 h \dots\dots\dots 8$

2) $dob_h = b_0 + b_1 Dbh + b_2 Hcb + b_3 h + b_4 h^2 \dots\dots 9$

Semua persamaan di muka, dari Persamaan 1 sampai dengan Persamaan 9 disusun dengan analisis regresi linier. Untuk persamaan-persamaan dengan peubah tidak bergantung lebih dari satu diterapkan analisis regresi cara *step-wise*.

3. Tolok Ukur Kesahihan Model

Dalam penelitian ini, model terpilih ditentukan berdasar tingkat kesahihan masing-masing model, yaitu tingkat kompatibilitasnya untuk diterapkan pada pohon bukan pohon sampel atau “data independen” (*independent data*).

Soares *et al.* (1995), Vanclay dan Skovsgaard (1997), serta Huang *et al.* (2003) merekomendasikan empat kriteria perhitungan statistik untuk mengevaluasi kesahihan model, yaitu: 1) nilai rata-rata sisaan (*mean residual: MRES*), 2) nilai rata-rata sisaan absolut (*absolute mean residual: AMRES*), 3) akar rata-rata kuadrat sisaan (*root mean squared error: RMSE*), dan 4) efisiensi model tereduksi (*the adjusted model efficiency: MEF_{adj}*).

$$MRES = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \dots\dots\dots 10$$

$$AMRES = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \dots\dots\dots 11$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \dots\dots\dots 12$$

$$MEF_{adj} = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \dots\dots\dots 13$$

dimana:

- y_i : nilai dob_h dari *independent data* (dob_h value of independent data),
- \hat{y} : nilai dugaan dob_h berdasar model (*estimated dob_h value based on each model*),
- \bar{y} : nilai rata-rata dob_h dari *independent data* (*mean dob_h value of independent data*),
- n : jumlah data dob_h dalam *independent data* (*the number of dob_h data in independent data*),
- p : jumlah peubah tidak bergantung dalam model (*the number of independent variables in each model*).

Selain empat kriteria di atas, penelitian ini juga mengikuti saran Burnham dan Anderson (1998) yang menggunakan “kriteria informasi Akaike” (*Akaike’s information criterion: AIC*) yang merupakan indeks untuk seleksi model terbaik didasarkan “jarak Kullback-Liebler” (*Kullback-Liebler distance*) minimum.

$$AIC = n \ln \hat{\sigma}^2 + 2(p+1) \dots\dots\dots 14$$

Dimana

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

4. Uji Keabsahan Model

Model *taper* terpilih harus memenuhi persyaratan keabsahan persamaan regresi, yaitu bahwa semua peubah bebas harus berperan nyata di dalam model, nilai sisaan menyebar normal dan bersifat aditif, serta sebaiknya mempunyai nilai koefisien determinasi (R^2_{adj}) yang tinggi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sebaran Data

Sebaran pohon sampel menurut diameter (Dbh) dan tinggi batang bebas cabang (Hcb) dapat dilihat dalam Tabel 1. Dalam Tabel 1 tersebut, *cell-cell* di dalam tanda kotak merupakan ukuran keberlakuan model *taper* dalam penelitian ini.

Dari analisis regresi 58 data pohon sampel yang terkumpul, bentuk hubungan antara Hcb dengan Dbh adalah Persamaan 15.

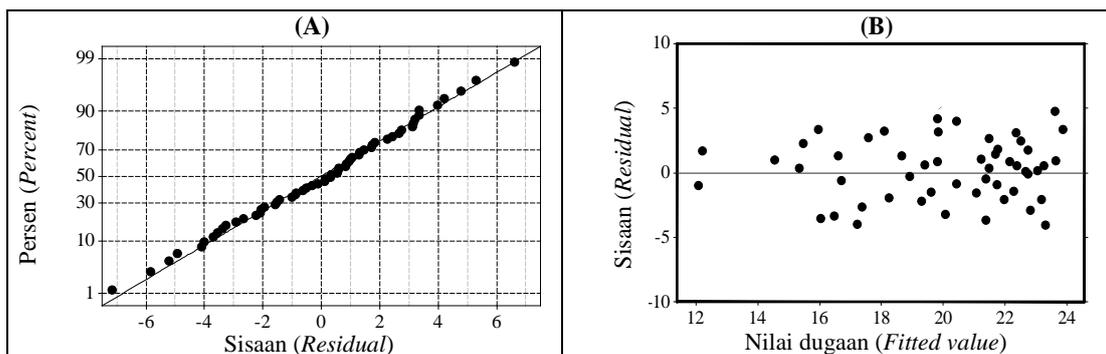
$$Hcb = 24,726 - \frac{6059,470}{Dbh^2} \dots\dots\dots 15$$

Pada pengujian kenormalan sisaan, grafik plot antara sisaan dengan peluang normal (Gambar 1A) cenderung membentuk garis lurus dan melewati titik pusat (0;50%) sehingga Persamaan 15 termasuk kategori memiliki nilai sisaan yang menyebar normal. Pada Gambar 1B, plot antara nilai sisaan menurut nilai dugaan cenderung menyebar berpola pita sejajar sumbu- x sehingga model memiliki ragam sisaan yang homogen dan bersifat aditif. Dengan demikian Persamaan 15 memenuhi syarat sebagai persamaan regresi karena peubah $1/Dbh^2$ berperan dalam persamaan ($t_{hitung} = -12$; $t_{tabel} (.05;56) = 2,00$), nilai sisaan menyebar normal, dan sisaan bersifat aditif.

Meskipun Persamaan 15 merupakan persamaan yang absah sebagai persamaan regresi, namun sebaiknya persamaan tersebut tidak dijadikan model pendugaan (untuk menduga Hcb didasarkan Dbh), karena koefisien determinasinya relatif kecil ($R^2_{adj} = 0,489$). Kecilnya R^2_{adj}

Tabel (Table) 1. Sebaran pohon menurut *Dbh* dan *Hcb* pohon sampel *K. anthoteca* di Hutan Penelitian Pasirhantap (*The Dbh-Hcb distribution of K. anthoteca sample trees in Pasirhantap experimental forest*)

Kelas <i>Dbh</i> (<i>Dbh</i> - <i>class</i>) (cm)	Kelas tinggi batang bebas cabang (<i>Clearbole height class</i>) (meter)							Jumlah (<i>Total</i>)
	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	
20-23	1	1						2
24-27	1	1	4	1				7
28-31		2	2	2				6
32-35	1		2	4	2	2		11
36-39		1	1	1	1			4
40-43			1	2	3			6
44-47			2	2	2			6
48-51				1	2	1		4
52-55		1			2	1		4
56-59				1				1
60-63				1	1			2
64-67			1		1			2
68-71								
72-75						1	1	2
76-79								
80-83								
84-87						1		1
Jumlah (<i>Total</i>)	3	6	13	15	14	6	1	58



Gambar (Fig) 1. (A) Grafik plot peluang normal dari sisaan Persamaan 15 (*Normal probability plot of the residual of Equation 15*); (B) Sisaan dibandingkan nilai dugaan dari Persamaan 15 (*Residual versus the fitted values of Equation 15*)

Persamaan 15 merupakan hal yang wajar karena pohon-pohon sampel dipilih secara sengaja agar mempunyai nilai rentang seluas mungkin, baik pada parameter *Dbh* maupun parameter *Hcb*. Pada Tabel 1 terlihat bahwa dalam satu kelas *Dbh* tercapuk keragaman kelas *Hcb* yang cukup lebar. Hal yang demikian sudah barang tentu akan menyebabkan kecilnya nilai R^2_{adj} .

Dalam bentuk yang sama dengan Persamaan 1, nilai koefisien determinasi dari *Ht-Dbh* adalah $R^2_{adj} = 0,686$; atau $\pm 20\%$ lebih besar dibandingkan koefisien determinasi *Hcb-Dbh*. Tingginya nilai korelasi *Ht-Dbh* mudah dimengerti karena parameter *Hcb* dan *Dbh* berhubungan secara langsung dengan pertumbuhan pohon. Dalam proses pertumbuhan, tinggi dan

diameter pohon berkembang relatif seirama, atau dengan kata lain faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan pohon sangat besar peranannya terhadap hubungan $Ht-Dbh$; sedangkan pada perkembangan Hcb peran faktor pertumbuhan menjadi minor akibat adanya faktor lain yang berpengaruh lebih dominan.

Pada kondisi alam, banyak faktor yang mempengaruhi tinggi batang bebas cabang. Secara teoritis semakin rapat jarak suatu pohon dengan pohon-pohon di sekitarnya akan menyebabkan cabang-cabang rendah dari pohon tersebut lebih mudah mengalami pemangkasan secara alami (*self-pruning*) sehingga batang bebas cabangnya tinggi. Namun demikian, tinggi-rendahnya batang bebas cabang dipengaruhi oleh banyak faktor yang sulit diidentifikasi atau sulit dikuantifikasikan. Sebagai contoh, adanya gangguan atau serangan hama/penyakit pada cabang-cabang rendah dapat menyebabkan Hcb semakin tinggi, tetapi sebaliknya adanya celah atau *gap* pada lapisan tajuk yang menyebabkan sinar matahari dapat menerobos masuk dan diterima suatu cabang yang rendah akan menyebabkan cabang tersebut tetap hidup dan bahkan berkembang menjadi cabang besar sehingga Hcb rendah. Kondisi faktor positif dan negatif terhadap perkembangan Hcb yang hanya mengena pada pohon per pohon (tidak berlaku seragam pada sebagian besar pohon dalam tegakan) mengakibatkan besarnya ragam Hcb dalam tegakan.

B. Model Taper

Hasil perhitungan intersep, koefisien regresi, dan koefisien determinasi model *taper* untuk bentuk-bentuk persamaan yang telah ditentukan (Persamaan 2 sampai dengan Persamaan 9) tercantum dalam Tabel 2.

Didasarkan data 25 “pohon independen” (*independent data*), hasil perhitungan $MRES$ (rata-rata sisaan), $AMRES$ (rata-rata sisaan absolut), $RMSE$ (akar rata-rata kuadrat sisaan), MEF_{adj} (efisiensi model tereduksi), dan AIC (kriteria informasi Akaike) dari masing-masing persamaan yang disusun menurut bentuk-bentuk model yang telah ditentukan secara rinci dirangkum dalam Tabel 3.

Dari delapan persamaan yang telah tersusun (yang koefisien regresinya tercantum dalam Tabel 2) dilakukan pemilihan persamaan yang paling sah (*valid*) berdasarkan pada kecilnya $MRES$, $AMRES$, $RMSE$, AIC , dan besarnya MEF_{adj} . Untuk lebih memudahkan pemilihan, nilai-nilai yang tercantum dalam Tabel 3 diberi nilai skor (*score*) sesuai urutannya seperti terlihat dalam Tabel 4. Dalam penilaian skor ini, semua tolok ukur diperhitungkan mempunyai bobot yang sama, dan diberi nilai penimbang sama dengan satu.

Dalam Tabel 4 terlihat bahwa bentuk Persamaan 9 mempunyai total skor paling kecil, sehingga didasarkan tolok ukur $MRES$, $AMRES$, $RMSE$, AIC , dan MEF_{adj} ,

Tabel (Table) 2. Nilai intersep, koefisien regresi, dan koefisien determinasi masing-masing bentuk model *taper* (The values of intercept, regression coefficients, and determination coefficient of each taper model)

Persamaan (Equation)	Intersep (Intercept)	Koefisien regresi (Regression coefficients)				R^2_{adj}
		b_1	b_2	b_3	b_4	
2	1,5930	-0,0255	-	-	-	0,318
3	1,1771	-1,5090	0,5773	-	-	0,955
4	-0,2370	1,1748	ns	-0,2158	-	0,888
5	1,0648	-0,5959	-	-	-	0,939
6	0,9539	-0,5257	-	-	-	0,846
7	0,9046	-0,7767	-	-	-	0,781
8	-0,2933	0,8130	0,5247	-1,1993	-	0,973
9	1,0236	0,8124	0,4960	-1,4134	0,0096	0,974

Keterangan (Note): ns: tidak nyata (*not significant*)

Tabel (Table) 3. Nilai *MRES*, *AMRES*, *RMSE*, *MEF_{adj}*, dan *AIC* masing-masing bentuk model *taper* (The values of *MRES*, *AMRES*, *RMSE*, *MEF_{adj}*, and *AIC* of each *taper* model)

Persamaan (Equation)	<i>MRES</i>	<i>AMRES</i>	<i>RMSE</i>	<i>MEF_{adj}</i>	<i>AIC</i>
2	1,351	4,988	6,175	0,782	549,152
3	0,177	1,543	2,155	0,973	234,351
4	0,137	3,284	3,997	0,909	419,629
5	0,254	1,568	2,240	0,971	244,903
6	0,256	2,561	3,311	0,937	362,189
7	0,312	3,285	4,238	0,897	436,253
8	0,100	1,457	1,871	0,980	192,916
9	0,110	1,426	1,824	0,981	186,201

Tabel (Table) 4. Nilai skor *MRES*, *AMRES*, *RMSE*, *MEF_{adj}*, dan *AIC* dalam masing-masing bentuk model *taper* (The scoring values of *MRES*, *AMRES*, *RMSE*, *MEF_{adj}*, and *AIC* of each *taper* model)

Persamaan (Equation)	<i>MRES</i>	<i>AMRES</i>	<i>RMSE</i>	<i>MEF_{adj}</i>	<i>AIC</i>	Jumlah (Total)
2	8	8	8	8	8	40
3	4	3	3	3	3	16
4	3	6	6	6	6	27
5	5	4	4	4	4	21
6	6	5	5	5	5	26
7	7	7	7	7	7	35
8	1	2	2	2	2	9
9	2	1	1	1	1	6

persamaan tersebut terpilih sebagai model *taper* batang tanaman *K. anthoteca* di Hutan Penelitian Pasirhantap. Bentuk lengkap model *taper* tersebut adalah Persamaan 16.

$$dob_h = 1,0236 + 0,8124 Dbh + 0,4960 Hcb - 1,4134h + 0,0096h^2 \dots\dots\dots 16$$

Grafik plot antara sisaan dengan peluang normal dan grafik plot antara nilai sisaan dengan nilai dugaan dari Persamaan 16 dapat dilihat pada Gambar 2.

Berdasar grafik dalam Gambar 2 terbukti bahwa nilai sisaan dari Persamaan 16 menyebar normal dan bersifat aditif. Dalam Gambar 2A tampak bahwa sebaran sisaan cenderung membentuk garis lurus pada diagonal melewati titik pusat (0;50%) yang mengindikasikan bahwa nilai sisaan menyebar normal; dan pada Gambar 2B tampak bahwa nilai sisaan menyebar dalam pola bentuk pita mendarat sejajar sumbu-*x* yang menandakan bahwa nilai sisaan tersebut bersifat aditif.

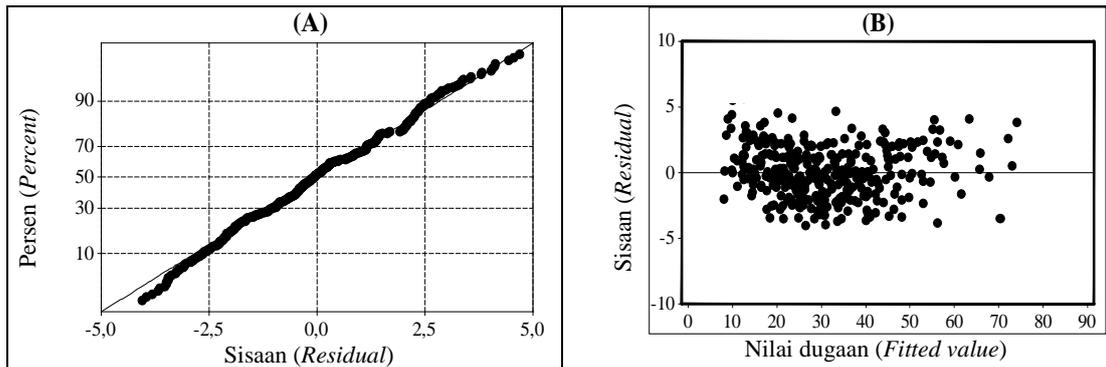
Nilai *t*-hitung Peubah-Peubah *Dbh*, *Hcb*, *h*, dan *h²* dalam Persamaan 16 adalah sebesar 71,00; 12,00; -25,00; dan 3,91. Dibandingkan nilai *t_{tabel}(.05;343)* sebesar 1,97 maka terbukti semua peubah tersebut berperan nyata di dalam persamaan. Dengan berperannya semua peubah di dalam persamaan, nilai sisaan yang menyebar normal dan bersifat aditif, maka Persamaan 16 adalah persamaan regresi yang absah.

C. Model Penduga Volume Batang

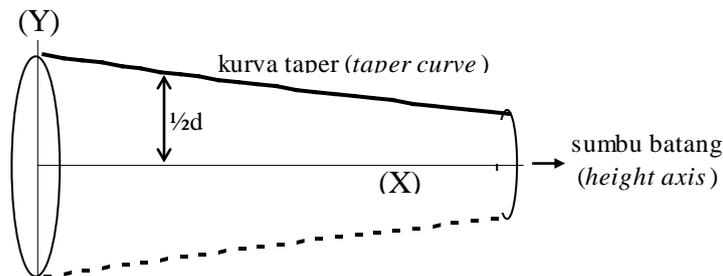
Model *taper* dapat dikembangkan menjadi model penduga volume batang pohon yaitu dengan menerapkan teknik integral (Clutter *et al.*, 1983; Philip, 1994). Teori ini didasarkan pada filosofi bahwa apabila batang pohon dianalogkan sebagai sebuah benda putar pepat, dan sumbu batang ditempatkan berimpit dengan sumbu-*x* dalam sistem sumbu salib, maka integral dari model *taper* adalah

merupakan model pendugaan volume segmen batang (Gambar 3).

Dengan diperolehnya model *taper* dalam bentuk Persamaan-16, maka model



Gambar (Fig) 2. (A) Grafik plot peluang normal dari sisaan Persamaan 16 (*Normal probability plot of the residuals of Equation 16*) (B) Sisaan dibandingkan nilai dugaan dari Persamaan 16 (*Residuals versus the fitted values of Equation 16*)



Gambar (Fig) 3. Logika integrasi kurva *taper* menjadi model pendugaan volume batang (*The logic of taper curve integration into stem volume estimation model*)

penduga volume batang tanaman *K. anthoteca* di Hutan Penelitian Pasirhantap adalah Persamaan-17.

$$V = \pi \int r^2 \delta_h$$

$$V = \pi \int \left(\frac{1}{2}d\right)^2 \delta_h$$

$$V = \frac{\pi}{4} \int d^2 \delta_h$$

$$V_{h_1-h_2} = \frac{\pi}{40000} \int_{h_1}^{h_2} dob_h^2 \delta_h \dots\dots\dots 17$$

dimana:
V : volume benda berbentuk silinder atau mirip silinder (*cylindrical volume*),
r : jari-jari penampang lintang benda berbentuk silinder (*the radius of cross-sectional area*),

d : diameter penampang lintang benda berbentuk silinder (*the diameter of cross-sectional area*),

V_{h₁-h₂} : volume segmen batang *K. anthoteca* di Hutan Penelitian Pasirhantap yang batas bawahnya *h₁* dan batas atasnya *h₂* (*section volume of K. anthoteca stem in the Pasirhantap experimental forest which has a lower limit of h₁ and an upper limit of h₂*),

$$dob_h = 1,0236 + 0,8124 Dbh + 0,4960 Hcb - 1,4134 h + 0,0096 h^2.$$

Persamaan 17 dapat digunakan untuk menduga segmen batang dengan panjang tertentu dimulai suatu batas bawah pada tinggi *h₁* sampai batas atas pada tinggi *h₂*. Sebagai contoh, dari pohon berdiameter (*Dbh*) 44 cm dengan tinggi batang bebas cabang (*Hcb*) 22 m, maka volume segmen batang pohon tersebut dari 4 m sam-pai 8 m di atas tanah adalah:

$$V_{4m-8m} = \frac{\pi}{40000} \int_4^8 \{1,0236 + 0,8124 Dbh + 0,4960 Hcb - 1,4134 h + 0,0096 h^2\}^2 \delta h \quad 21$$

$$V_{4m-8m} = \frac{\pi}{40000} \int_4^8 \{47,6812 - 1,4134h + 0,0096h^2\}^2 \delta h$$

$$V_{4m-8m} = \frac{\pi}{40000} \left[2273,497h - 134,784h^2 + 2,913h^3 - 0,027h^4 + 0,00009h^5 \right]_4^8$$

$$V_{4m-8m} = \frac{\pi}{40000} (14344,85 - 8076,14)$$

$$V_{4m-8m} = 0,492 m^3$$

Contoh perhitungan di muka adalah pendugaan volume segmen batang pohon dengan sortimen (ukuran) panjang tertentu, yaitu h_1-h_2 . Dalam praktek lapangan seringkali pembatasan tidak didasarkan pada sortimen panjang batang saja, tetapi diperlukan sortimen limit diameter ujung tertentu. Untuk keperluan ini perlu disusun model pendugaan tinggi sampai diameter batang tertentu (h_d). Dengan menggunakan data 58 pohon sampel, model hubungan h_d-dob_h adalah Persamaan 18.

$$h_d = 1,1888 + 0,6117 Dbh + 0,5422 Hcb - 0,9336d + 0,0019d^2 \dots\dots\dots 18$$

Persamaan 18 adalah persamaan regresi yang absah yaitu ditandai dengan nilai-t Peubah-Peubah Dbh , Hcb , d , dan d^2 sebesar 40,47; 16,36; -26,19; dan 4,14; serta sebaran sisaan menyebar normal dan ber-

sifat aditif (Gambar 4). Selain itu Persamaan-18 juga merupakan persamaan yang sah dengan indikasi penerapannya pada data independen mempunyai efisiensi (*the adjusted model efficiency: MEF_{adj}*) sebesar 92,3%.

Persamaan 18 dapat digunakan untuk menghitung batas integrasi penghitungan volume pohon (Persamaan 17) apabila diameter ujung batang dijadikan faktor pembatas. Sebagai contoh, dalam perdagangan kayu berlaku ketentuan bahwa diameter ujung dari kayu yang dapat diperjualbelikan adalah minimal 30 cm; maka volume kayu yang dapat dijual dari pohon berdiameter 44 cm dengan tinggi batang bebas cabang 22 m adalah:

1. tinggi diameter ujung 30 cm adalah:

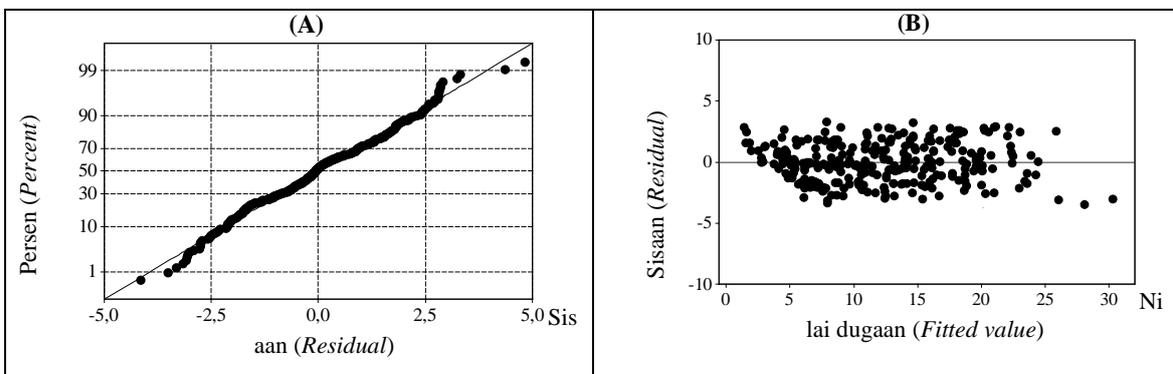
$$h_{30} = 1,1888 + 0,6117 \times 44 + 0,5422 \times 22 - 0,9336 \times 30 + 0,0019 \times 30^2 = 13,8 \text{ m}$$

2. dengan asumsi tinggi tonggak 30 cm, maka volume batang sampai diameter ujung 30 cm adalah:

$$V_{0,3m-13,8m} = \frac{\pi}{40000} \int_{0,3}^{13,8} dob_h^2 \delta h$$

$$V_{0,3m-13,8m} = \frac{\pi}{40000} \left[2273,497h - 134,784h^2 + 2,913h^3 - 0,027h^4 + 0,00009h^5 \right]_{0,3}^{13,8}$$

$$V_{0,3m-13,8m} = 0,923 m^3$$



Gambar (Fig) 4. (A) Grafik plot peluang normal dari sisaan Persamaan 18 (*Normal probability plot of the residuals of Equation 18*); (B) Sisaan dibandingkan nilai dugaan dari Persamaan 18 (*Residuals versus the fitted values of Equation 18*)

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Secara umum bentuk batang pohon hutan tanaman *Khaya anthotoca* C.DC. di Hutan Penelitian Pasirhantap dapat dikuantifikasikan dalam bentuk persamaan *taper* sebagai berikut:

$$dob_h = 1,0236 + 0,8124 Dbh + 0,4960 Hcb - 1,4134 h + 0,0096 h^2$$

dimana dob_h adalah diameter batang dengan kulit setinggi h meter, Dbh adalah diameter batang setinggi dada (1,30 meter di atas tanah), Hcb adalah tinggi batang bebas cabang, dan h adalah tinggi dob_h di atas tanah.

2. Model penduga volume batang pohon hutan tanaman *Khaya anthotoca* C.DC. di Hutan Penelitian Pasirhantap yang diperoleh dari hasil integrasi persamaan *taper* tersebut dalam butir 1 adalah:

$$V_{h_1-h_2} = \frac{\pi}{40000} \int_{h_1}^{h_2} dob_h^2 \delta_h$$

dimana $V_{h_1-h_2}$ adalah volume segmen batang yang batas bawahnya h_1 dan batas atasnya h_2 , dan dob_h adalah persamaan *taper* tersebut pada Butir 1.

3. Pada hutan tanaman *Khaya anthotoca* C.DC. di Hutan Penelitian Pasirhantap, model hubungan tinggi diameter ujung tertentu (h_d) dengan diameter ujung yang bersangkutan (d) adalah:

$$h_d = 1,1888 + 0,6117 Dbh + 0,5422 Hcb - 0,9336 d + 0,0019 d^2$$

4. Persamaan tersebut pada Butir 2 bersama dengan persamaan pada Butir 1 dan Butir 3 dapat digunakan untuk menduga volume batang dengan kulit pada berbagai panjang batang dan berbagai diameter ujung yang diinginkan.

B. Saran

Untuk menghindari bias terlampau besar, sebaiknya penerapan persamaan *taper* dan model penduga volume hasil penelitian ini dibatasi pada pohon-pohon *Khaya anthotoca* C.DC. yang dimensi diameter setinggi dada dan tinggi pangkal tajuk berada dalam selang pohon sampel yang digunakan dalam penelitian ini. Untuk keperluan tersebut, Tabel 1 dalam tulisan ini dapat dijadikan acuan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardikusumah, R. I., dan A. Dilmy. 1956. Tentang Jenis-jenis Kayu Mahoni dan Mahagoni Teristimewa Keluarga Khaya. Pengumuman No. 49. Balai Penyelidikan Kehutanan. Bogor.
- Behre, C. E. 1953. Factors Involved in the Application Form-Class Volume Tables. J. Agr. Res. 51: 669-713.
- Burnham, K. P. and D. J. Anderson. 1998. Model Selection and Inference: a Practical Information – Theoretic Approach. Springer, Berlin.
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. Timber Management: a Quantitative Approach. John Willey and Sons, New York.
- Clutter, J.L. 1980. Development of taper functions from variable top merchantable volume equations. For. Sci. 26: 117-120.
- Daniel, T. W., J. A. Helms, and F. S. Baker. 1979. Principles of Silviculture (2nd edition). Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Demaerschalk, J. 1972. Converting Volume Equations to Compatible Taper Equations. For. Sci. 18: 241-245.
- Eadkeo, K., and S. P. N. Ayudhya. 1983. A Volume Estimation Procedure for Tropical Tree Species. Proceeding

- of Biotrop Symposium: Pengelolaan Hutan Pinus. Kerjasama Pusat Litbang Hasil Hutan dan Perum Perhutani. Jakarta.
- Goulding, C. J., and J. C. Murray. 1976. Polynomial Taper Equations that are Compatible with Tree Volume Equations. *N. Z. J. For. Sci.* 5 (3): 313-322.
- Huang, S., Y. Yang, and Y. Wang. 2003. A Critical Look at Procedures for Validating Growth and Yield Models. *In: Amaro, A., D. Reed, and P. Soares. (Eds.), Modelling Forest Systems.* CAB International, Wallingford, pp. 271-293.
- Husch, B., T. W. Beers, and J. A. Kershaw. 2002. *Forest Mensuration* (4th edition). The Ronald Press Company. New York.
- Kozak, A. 1988. A Variable-exponent Taper Equation. *Can. J. For. Res.* 18: 1363-1368.
- Krisnawati, H., dan D. Wahjono. 2003. Penggunaan Model Taper untuk Menduga Volume Batang Pohon Matoa (*Pometia pinnata* Forst.) di Halmahera, Maluku. *Bul. Pen. Hutan* 637:11-24.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper Curve and Volume Function for Pine, Spruce, and Birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* No. 108. Helsinki.
- Loetsch, F., F. Haller, and K. E. Haller. 1973. *Forest Inventory.* BLV Verlagsgesellschaft. Munchen.
- Masano. 1987. Prospek Pengembangan Kayu Asing di Indonesia. Prosiding Diskusi Pemanfaatan Kayu Kurang Dikenal. Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan. Jakarta.
- Newnham, R. 1992. Variable-form Taper Functions for Four Alberta Tree Species. *Can. J. For. Res.* 22: 210-223.
- Oliver, C. D. and B. C. Larson. 1996. *Forest Stand Dynamics.* John Wiley & Sons, New York.
- Philip, M. 1994. *Measuring Trees and Forests.* CAB international. Wallingford, UK.
- Soares, P., M. Tome, J. P. Skovsgaard, and J. K. Vanclay. 1995. Evaluating a Growth Model for Forest Management Using Continuous Forest Inventory Data. *For. Ecol. Manage.* 71: 251-265.
- Vanclay, J. K. and J. P. Skovsgaard. 1997. Evaluating Forest Growth Models. *Ecol. Model.* 98: 7-42.