

**MODEL PERTUMBUHAN MATRIK TRANSISI UNTUK HUTAN ALAM
BEKAS TEBANGAN DI KALIMANTAN TENGAH**
*(Transition Matrix Growth Models for Logged-Over Natural Forest in
Central Kalimantan)**

Oleh/By:

Haruni Krisnawati^{1*}, Endang Suhendang², dan/and I.B. Putera Parthama³

¹ Pusat Litbang Hutan dan Konservasi Alam

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

*e-mail: haruni@dephut.go.id

² Fakultas Kehutanan IPB

Gd. Fahutan Jl. Lingkar Akademik Kampus IPB Darmaga PO BOX 168 Bogor

³ Balai Besar Penelitian Dipterokarpa

Jl. A. Wahab Syahrani, Sempaja – Samarinda Telp. (0541) 206364 Fax. (0541) 742298

e-mail : bpk-smd@samarinda.org Website : www.bp2k.go.id, Samarinda

*) Diterima : 16 April 2008; Disetujui : 21 Juli 2008

ABSTRACT

Transition matrix growth models were developed based on re-measurement data of permanent sample plots collected from four blocks of logged-over forest areas in Central Kalimantan. Trees in the plots were classified into thirteen 5 cm diameter classes ranging from 10 to 72.5+ cm and three species groups: commercial dipterocarp, commercial non-dipterocarp and non-commercial. In the matrix growth models, number of trees in the stand and number of trees in individual diameter classes of the species groups were modelled as a function of time. The models comprised three components, i.e. ingrowth, upgrowth, and mortality. Results of the model estimation indicated that ingrowth of a species was affected positively by the number of individuals of the same species and influenced negatively by basal area of the stand. The transition (upgrowth) and mortality probabilities of a species were found to be a function of the stand basal area and tree diameter. The predictions of the number of trees in individual diameter classes were then tested against actual data. Comparisons with actual data indicated that the predicted stand structures (diameter distributions) over six years were unbiased.

Key words: Transition matrix, growth model, logged-over natural forest, Central Kalimantan

ABSTRAK

Model-model pertumbuhan matriks transisi telah disusun dari data hasil pengukuran ulang petak ukur permanen yang dikumpulkan dari empat blok kawasan hutan bekas tebangan di Kalimantan Tengah. Pohon-pohon dalam setiap petak dikelompokkan ke dalam 13 kelas diameter dengan lebar kelas lima cm dari 10 sampai 72,5+ cm dan tiga kelompok jenis: komersial Dipterocarpaceae, komersial Non-Dipterocarpaceae, dan non-komersial. Di dalam model pertumbuhan matriks ini, jumlah pohon dalam tegakan dan jumlah pohon pada setiap kelas diameter dari suatu kelompok jenis dimodelkan sebagai fungsi dari waktu. Model-model yang tersusun terdiri atas tiga komponen, yaitu model alih tumbuh, tambah tumbuh, dan kematian. Hasil pendugaan model menunjukkan bahwa alih tumbuh suatu jenis dipengaruhi secara positif oleh jumlah pohon jenis yang bersangkutan dan secara negatif oleh luas bidang dasar tegakannya. Peluang transisi (tambah tumbuh) dan kematian pohon suatu jenis dipengaruhi oleh luas bidang dasar tegakan dan diameter pohon. Dugaan jumlah pohon pada setiap kelas diameter kemudian diuji dengan data aktual. Hasil pengujian dengan data aktual menunjukkan bahwa dugaan struktur tegakan (distribusi diameter) dalam enam tahun tidak berbias.

Kata kunci: Matrik transisi, model pertumbuhan, hutan alam bekas tebangan, Kalimantan Tengah

I. PENDAHULUAN

Salah satu prasyarat dasar dalam pengelolaan hutan lestari adalah informasi yang akurat tentang pertumbuhan dan hasil tegakan hutan pada berbagai rejim pengelolaan dan alternatif silvikultur (Kimmins, 1997). Meskipun demikian, ketersediaan informasi tersebut relatif masih terbatas untuk hutan alam tropis di Indonesia. Beberapa penelitian tentang pertumbuhan dan hasil tegakan di beberapa lokasi penelitian telah dihasilkan, antara lain oleh Wahjono dan Krisnawati (2002), Krisnawati dan Wahjono (2004), dan Wahjono dan Imanuddin (2007), namun hasil-hasil tersebut masih relatif sedikit mengingat sangat bervariasinya kondisi hutan di Indonesia.

Untuk mengetahui informasi yang akurat mengenai pertumbuhan dan hasil tegakan hutan dapat dilakukan melalui pemodelan, di mana parameter-parameter model diduga berdasarkan data hasil pengukuran Petak Ukur Permanen (PUP). Menurut Hao *et al.* (2005), ada beberapa tipe model pertumbuhan dan hasil yang dapat digunakan untuk hutan alam campuran: (1) model-model level tegakan, (2) sistem persamaan diferensial, (3) rantai Markov, (4) tabel proyeksi tegakan *non-linear*, dan (5) model matriks. Di antara kelima tipe model ini, model matriks lebih banyak digunakan untuk mensimulasikan perkembangan dinamika tegakan di hutan campuran (contoh Buongiorno dan Michie, 1980; Buongiorno *et al.*, 1995; Schulte dan Buongiorno, 1998; Mendoza *et al.*, 2000; Orois dan Soalleiro, 2002).

Pada tegakan hutan alam bekas tebangan, pemodelan dinamika pertumbuhan tegakan hutan selain dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan strategi pengaturan hasil seperti penetapan siklus tebang dan jatah tebangan berikutnya, juga sangat diperlukan sebagai dasar dalam menetapkan perlakuan silvikultur atau pembinaan terhadap tegakan tinggal. Dari model yang telah tersusun, simulasi tegakan pada berbagai skenario pene-

bangun juga dapat dihasilkan (Volin dan Buongiorno, 1996).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh model matriks pertumbuhan hutan alam campuran di kawasan hutan bekas tebangan, Kalimantan Tengah. Model matriks yang dihasilkan relatif simpel tetapi cukup akurat dalam menggambarkan dinamika struktur tegakan yang terjadi sehingga mudah digunakan untuk menduga dinamika jumlah pohon dalam kelas-kelas diameter sebagai fungsi dari waktu.

II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Pengumpulan Data

Lokasi pengumpulan data adalah kawasan hutan Sei Kalek-Nahiang, Kalimantan Tengah yang secara geografis terletak di antara 112^{00'}-112^{029'} Bujur Timur dan 1^{023'}-2^{026'} Lintang Selatan. Menurut pembagian wilayah administrasi pemerintahan, lokasi tersebut termasuk dalam Desa Kuala Kuayan, Kecamatan Mentaya Hulu, Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah. Sedangkan menurut pembagian wilayah administrasi kehutanan, termasuk dalam Dinas Kehutanan Kabupaten Kotawaringin Timur, Dinas Kehutanan Provinsi Kalimantan Tengah. Kawasan tersebut merupakan hutan alam tanah kering dengan topografi yang bervariasi dari datar sampai berbukit. Ketinggian tempat antara 190 sampai 225 m di atas permukaan laut.

Iklm setempat menurut klasifikasi Schmidt dan Ferguson (1951) termasuk dalam tipe iklim A dengan nilai Q = 8% dan kelembaban udara berkisar antara 74 sampai 85,6%. Curah hujan rata-rata tahunan 3.520 mm dengan jumlah hari hujan rata-rata 159 hari.

Vegetasi di lokasi penelitian sebagian besar didominasi oleh jenis-jenis dari suku *Dipterocarpaceae*, *Myrtaceae*, *Lauraceae*, *Anacardiaceae*, dan *Myristicaceae*. Jenis penyusun vegetasi bawah yang umum dijumpai adalah jenis-jenis tum-

buhan hias, tumbuhan obat, anggrek, serta berbagai jenis herba dan liana.

B. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data hasil pengukuran 12 PUP yang tidak mendapatkan perlakuan setelah penebangan dengan luas setiap PUP adalah satu hektar (100 m x 100 m). Petak Ukur Permanen tersebut diletakkan secara *purposive* pada blok-blok bekas tebangan (tiga buah pada masing-masing blok/lokasi), dengan umur bekas tebangan bervariasi, yaitu 8, 6, 2, dan 1 tahun. Setiap PUP terbagi menjadi 100 buah sub-petak berukuran 10 m x 10 m dengan tujuan untuk kemudahan dalam pengukuran dan pencarian pohon pada saat pengukuran ulang.

Petak Ukur Permanen yang diamati dibuat pada tahun 1994-1995 dan kemudian diukur ulang setiap 1-2 tahun sekali. Pada setiap kali pengukuran, semua pohon yang memiliki diameter 10 cm ke atas diukur diameter setinggi dada (dbh) sampai ketelitian 0,1 cm (diameter diukur pada ketinggian 1,3 m di atas tanah atau 20 cm di atas banir bagi pohon yang memiliki banir di atas 1,3 m) dan diidentifikasi jenis serta dicatat keterangan-keterangan lain mengenai kondisi pohon, seperti alih tumbuh, mati, tumbang, rusak, tumbuh abnormal, dan sebagainya.

C. Pengelompokan Data

Kegiatan pengelompokan data yang dilakukan meliputi pengelompokan pohon menurut kelas diameter dan kelompok jenis. Diameter pohon digunakan sebagai dasar pengelompokan oleh karena variabel ini selalu diukur dalam kegiatan inventarisasi untuk perencanaan pengelolaan dan memiliki korelasi yang sangat erat terhadap pertumbuhan individu pohon (Favrichon dan Kim, 1998). Dalam penelitian ini, data dikelompokkan menjadi 13 kelas diameter dengan lebar kelas konstan lima cm, yaitu dari kelas diameter 12,5 cm (meliputi pohon-pohon ber-

diameter 10-15 cm) sampai dengan 72,5+ cm (meliputi pohon-pohon berdiameter 70 cm ke atas). Penggunaan lebar kelas lima cm dilakukan atas dasar pertimbangan ketelitian, karena semakin kecil lebar kelas, ketelitian dugaan yang dihasilkan akan semakin tinggi (Vanclay, 1994).

Untuk menyederhanakan keragaman jenis yang ditemukan dalam PUP, dalam penelitian ini dilakukan pengelompokan jenis-jenis pohon menjadi tiga kelompok, yaitu kelompok jenis dari suku Dipterocarpaceae (jenis-jenis komersial yang termasuk dalam suku Dipterocarpaceae), Non Dipterocarpaceae (jenis-jenis komersial yang tidak termasuk dalam suku Dipterocarpaceae), dan Non Komersial (jenis-jenis yang belum dimanfaatkan secara komersial). Pengelompokan jenis menjadi Dipterocarpaceae dan Non Dipterocarpaceae juga telah umum dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, seperti Mendoza *et al.* (2000) dan Favrichon dan Kim (1998).

D. Penyusunan Model Pertumbuhan Tegakan

Model pertumbuhan tegakan yang disusun adalah modifikasi model dari Buongiorno *et al.* (1995), yang kemudian digunakan oleh Volin dan Buongiorno (1996) dan Orois dan Soallerio (2002). Model ini menerapkan salah satu varian dari teknik pemodelan matriks transisi Leslie (Leslie, 1945) yang akan membentuk proyeksi tabel tegakan. Model terdiri atas tiga komponen: (1) *ingrowth* (alih tumbuh), yaitu pohon-pohon yang masuk ke dalam kelas diameter terkecil (dalam penelitian ini 10 cm) selama periode waktu tertentu, (2) *upgrowth* (tambah tumbuh), yaitu pohon-pohon yang tetap hidup tetapi pindah ke kelas diameter berikutnya selama periode waktu tertentu, dan (3) *mortality* (kematian), yaitu pohon-pohon yang mati selama periode waktu tertentu.

Dalam model ini, kondisi tegakan pada waktu t dinyatakan dengan vektor:

$$y_t = [y_{ijt}] \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

y_{ijt} = jumlah pohon tiap hektar dari kelompok jenis i dan kelas diameter j yang hidup pada waktu t (number of trees per hectare of species group i and diameter class j at time t).

Kondisi tegakan pada waktu yang akan datang ($y_{t+\Delta t}$) merupakan produk antara matriks transisi dengan kondisi tegakan awal (y_t) sebagai berikut:

$$y_{t+\Delta t} = G(B_t) y_t + c \dots\dots\dots(2)$$

dimana:

$$G(B_t) = A(B_t) + R \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

$y_{t+\Delta t}$ = tegakan pada waktu $t+\Delta t$ tahun (state of the stand at time $t+\Delta t$),

$G(B_t)$ = matriks transisi pertumbuhan tegakan (growth transition matrix of the stand),

$A(B_t)$ = matriks upgrowth (ugrowth matrix),

R = matriks ingrowth (ingrowth matrix).

Penjabaran dari matriks dan vektor tersebut adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & A_n \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{m1} & \dots & \dots & R_{mm} \end{bmatrix},$$

$$y_t = \begin{bmatrix} y_{1t} \\ y_{2t} \\ \dots \\ y_{mt} \end{bmatrix}, \text{ dan } c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

Masing-masing matriks A_i menyatakan matriks upgrowth pohon dari kelompok jenis i , yaitu:

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{i1} & & & \\ b_{i2} & a_{i2} & & \\ & \dots & \dots & \\ & & b_{in} & a_{in} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

dimana:

a_{ij} = fraksi pohon dari kelompok jenis i kelas diameter j yang hidup dan tetap tinggal pada kelas diameter yang sama setelah selang waktu Δt (proportion of trees staying at the same diameter class for species group i and diameter class j after the period of time Δt),

b_{ij} = fraksi pohon dari kelompok jenis i kelas diameter j yang hidup dan pindah ke kelas diameter berikutnya setelah selang waktu Δt (proportion of trees moving to the next diameter class for species group i and diameter class j after the period of time Δt),

$i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$,

m = jumlah kelompok jenis (number of species groups),

n = jumlah kelas diameter (number of diameter classes).

Peluang upgrowth (b_{ij}) dan mortality (m_{ij}) pohon-pohon pada kelompok jenis i kelas diameter j antara periode t dan $t+\Delta t$ serta peluang individu pohon masuk ke kelas diameter terkecil selama selang waktu Δt diduga dari data pengukuran PUP. Selanjutnya, peluang pohon-pohon yang tetap tinggal dalam kelasnya (a_{ij}) pada kelompok jenis i kelas diameter j antara periode t dan $t+\Delta t$ dapat diperoleh dari perhitungan: $a_{ij} = 1 - b_{ij} - m_{ij}$ untuk $j < n$ dan $a_{ij} = 1 - m_{ij}$ untuk $j = n$.

E. Validasi Model

Validasi sebuah model adalah proses untuk mengoreksi input dan output model yang berhubungan untuk menentukan keakuratan. Tujuan dari validasi adalah untuk menentukan apakah model yang dihasilkan mampu menduga dinamika tegakan hutan secara baik. Dalam penelitian ini validasi model dilakukan dengan cara membandingkan hasil proyeksi tegakan dengan data tegakan sebenarnya yang diperoleh dari hasil pengukuran. Data yang digunakan untuk memvalidasi model adalah data hasil pengukuran terakhir di lapangan.

Pembandingan dilakukan dengan menggunakan statistik uji khi-kuadrat (χ^2) dengan rumus:

$$\chi^2_{hitung} = \sum \frac{(y_{aktual} - y_{model})^2}{y_{model}} \dots\dots\dots(6)$$

dengan hipotesis uji: $H_0 : y_{model} = y_{aktual}$ vs $H_1 : y_{model} \neq y_{aktual}$ dan kriteria uji: $\chi^2_{hitung} \leq \chi^2_{tabel}$: teri-ma H_0 ; $\chi^2_{hitung} > \chi^2_{tabel}$: tolak H_0

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Model Pertumbuhan Tegakan

Dalam penelitian ini tegakan dalam petak penebangan yang sama diasumsikan memiliki kondisi tempat tumbuh dan karakteristik tegakan yang homogen. Dari 12 PUP yang tersedia, telah disusun empat buah model pertumbuhan tegakan yang masing-masing menerangkan model spesifik untuk petak-petak dengan kondisi awal pengukuran yang sama.

Periode pengukuran dan proyeksi yang dipilih dalam pemodelan adalah dua tahun. Selain pertimbangan kepraktisan (untuk data-data hasil pengukuran periodik dua tahun tidak perlu dilakukan interpolasi ke satu tahun), hasil penelitian Suhendang (1997) juga menyatakan bahwa periode pengukuran optimal PUP, yaitu jangka waktu yang diperlukan untuk dua pengukuran yang berurutan pada PUP yang sama adalah dua tahun. Lebih lanjut menurut Suhendang (1997), periode pengukuran dua tahun akan menghasilkan data yang lebih teliti berdasarkan pertimbangan kesalahan minimum yang diharapkan untuk pendugaan pertumbuhan dan riap diameter. Periode pengukuran dua tahun juga telah digunakan oleh para peneliti sebelumnya seperti Rusolono *et al.* (1997) dan Favrichon (1998) dalam penelitiannya tentang model dinamika dan komposisi jenis hutan alam tropika campuran, masing-masing di Pulau Laut dan Brazilia.

Model pertumbuhan tegakan yang dikembangkan memiliki 13 kelas diameter dengan lebar kelas lima cm, mulai dari pohon-pohon berdiameter 10 cm (kelas diameter 12,5 cm) sampai dengan pohon-pohon berdiameter 70 cm ke atas (kelas

diameter 72,5+ cm). Model dipilih menurut kelompok jenis dari suku Dipterocarpaceae (seperti jenis-jenis *Shorea* sp., *Hopea* sp., *Dipterocarpus* sp., *Vatica* sp., *Dryobalanops* sp.), kelompok jenis Non-Dipterocarpaceae (seperti jenis-jenis *Polyalthia* sp., *Xylopia* sp., *Koompassia* sp., *Dillenia* sp., *Mezzettia* sp.), dan kelompok jenis Non-Komersial (seperti jenis-jenis *Garcinia* sp., *Amoora* sp., *Memecylon* sp., *Artocarpus* sp.).

Struktur model pertumbuhan tegakan yang telah disusun untuk empat lokasi blok bekas tebangan (masing-masing mencerminkan kondisi awal tegakan 8, 6, 2, dan 1 tahun setelah tebangan) terdiri atas tiga komponen, yaitu model *ingrowth*, *upgrowth*, dan *mortality*. Hasil selengkapnya diuraikan sebagai berikut.

1. Model *Ingrowth*

Ingrowth dalam penelitian ini didefinisikan sebagai jumlah pohon tiap hektar yang masuk ke dalam kelas diameter 12,5 cm (diameter terkecil 10 cm) selama periode waktu dua tahun. Faktor-faktor yang diduga berpengaruh terhadap *ingrowth* atau alih tumbuh pohon suatu jenis adalah:

- Kelimpahan atau banyaknya pohon dari jenis yang bersangkutan. Menurut Alder (1995), *ingrowth* suatu jenis sangat dipengaruhi oleh kelimpahan pohon dari jenis yang bersangkutan, terutama bagi permudaan jenis dengan penyebaran dan masa dormansi benih yang pendek.
- Tingkat gangguan tegakan. Apabila tegakan hutan terganggu, misalnya akibat penebangan, permudaan umumnya akan meningkat untuk kemudian tumbuh menjadi pohon-pohon *ingrowth*. Parameter yang mengindikasikan adanya gangguan adalah perubahan kerapatan tegakan yang dicirikan oleh bidang dasar tegakannya. *Ingrowth* dalam tegakan yang tidak terganggu (berarti bidang dasar tegakan relatif konstan bahkan cenderung meningkat) cenderung lebih kecil di-

bandingkan dengan tegakan yang sudah terganggu, di mana kerapatan tegakan umumnya lebih rendah.

Didasarkan pada faktor-faktor tersebut, maka *ingrowth* suatu jenis dalam tegakan diduga dipengaruhi secara langsung oleh jumlah pohon dari jenis yang bersangkutan dan bidang dasar tegakannya. Nilai-nilai koefisien parameter, F_{model} , dan koefisien determinasi (R^2) model-model *ingrowth* yang dihasilkan pada masing-masing blok bekas tebangan disajikan pada Tabel 1 dengan bentuk umum model *ingrowth* sebagai berikut:

$$I_t = c + d \sum_{j=1}^n B_j (y_{it}) + e \sum_{j=1}^n (y_{it}) \dots \dots \dots (7)$$

dimana:

I_t = *ingrowth* selama periode dua tahun (*ingrowth in a two year period*),

B_j = bidang dasar rata-rata pohon pada kelas diameter j (*mean basal area of the trees for diameter class j*),

y_{it} = jumlah pohon pada kelas diameter i pada waktu t (*number of trees for diameter class i at time t*),

c , d , dan (*and*) e = koefisien regresi (*regression coefficients*).

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa keempat model *ingrowth* memiliki tanda koefisien regresi yang diharapkan, yaitu *ingrowth* suatu jenis dipengaruhi secara

positif oleh jumlah pohon pada jenis yang bersangkutan dan dipengaruhi secara negatif oleh bidang dasar tegakannya. Hal ini berarti bahwa tegakan yang lebih rapat cenderung memiliki jumlah *ingrowth* yang lebih kecil. *Ingrowth* untuk jenis tertentu (pada bidang dasar tertentu) dalam tegakan cenderung akan lebih tinggi apabila kehadiran jenis tersebut dalam tegakan cukup banyak.

Pengujian model *ingrowth* pada tegakan di empat lokasi bekas tebangan menunjukkan bahwa secara parsial model tersebut cukup valid, yaitu *ingrowth* suatu jenis dipengaruhi secara positif dan signifikan pada taraf nyata 5% oleh jumlah individu pohon pada jenis yang sama. Akan tetapi, bidang dasar tegakan tidak semuanya berpengaruh secara signifikan terhadap *ingrowth* suatu jenis, seperti dapat dilihat dari nilai peluang peubah penduga tersebut (p value) yang lebih besar dari 5% pada blok bekas tebangan C dan D (masing-masing sebesar 17,2% dan 30,6%).

Koefisien-koefisien peubah “*dummy*” pada Tabel 1 menyatakan bahwa apabila kondisi-kondisi yang lain sama, *ingrowth* kelompok jenis dari suku Dipterocarpaceae dan Non-Dipterocarpaceae lebih tinggi dari *ingrowth* kelompok jenis Non-

Tabel (Table) 1. Model-model alih tumbuh pohon dalam periode dua tahun untuk empat blok kawasan bekas tebangan (*Models of ingrowth in a two year period for the four blocks of logged-over area*)

Blok (Block)	Konstanta (Constant)	Peubah bebas (<i>Independent variable</i>)				F_{model}	R^2 (%)
		Jumlah pohon (No. of trees) (N ha ⁻¹)	Bidang dasar (Basal area) (m ² ha ⁻¹)	<i>Dummy</i> <i>Dipt.</i>	<i>Dummy</i> Non- Dipt		
A	4,21 (0,265)	0,0505 (0,029*)	-0,405 (0,019*)	9,88 (0,008**)	3,68 (0,224)	4,77 (0,021*)	65,6
B	5,83 (0,238)	0,0077 (0,047*)	-0,281 (0,041*)	9,06 (0,054*)	3,64 (0,209)	4,18 (0,032*)	60,2
C	1,87 (0,298)	0,0105 (0,042*)	-0,014 (0,172)	2,02 (0,049*)	2,01 (0,240)	4,23 (0,031*)	60,7
D	3,98 (0,358)	0,0269 (0,053*)	-0,33 (0,306)	7,52 (0,053*)	7,53 (0,132)	4,11 (0,034*)	45,5

Keterangan (*Remarks*): * dan (*and*) ** = masing-masing signifikan pada taraf nyata 5% dan 1% (*indicate significance at 5% and 1% level, respectively*); nilai dalam ‘tanda kurung’ (*value in the ‘bracket’*) = p value; R^2 = koefisien determinasi (*coefficient of determination*); A, B, C, D masing-masing menunjukkan kondisi awal tegakan 8, 6, 2, dan 1 tahun setelah tebangan (*indicate initial stand states of 8, 6, 2, and 1 year after logging, respectively*).

Komersial. Hal ini dapat dilihat dari hasil analisis, di mana koefisien peubah “*dummy*” kelompok jenis Non-Komersial ‘di-keluarkan’ (*excluded*) dari model. Dari koefisien-koefisien tersebut juga terlihat bahwa kehadiran jenis-jenis dari suku Dipterocarpaceae berpengaruh secara signifikan (pada taraf 5%) terhadap *ingrowth* pada keempat blok bekas tebangan, sedangkan kelompok jenis Non-Dipterocarpaceae pengaruh signifikannya hanya pada taraf 13,2-24,0%.

Nilai koefisien determinasi model *ingrowth* menunjukkan bahwa lebih dari 60% keragaman *ingrowth* di antara petak-petak pengamatan dalam jangka waktu yang sama setelah penebangan, dapat diterangkan oleh jumlah pohon dan bidang dasar tegakan, kecuali pada blok bekas tebangan D (kondisi awal pengukuran berumur satu tahun setelah penebangan), di mana nilai R^2 hanya mencapai 45,5%. Rendahnya nilai R^2 ini mungkin dikarenakan oleh keterbatasan model (ada faktor-faktor lain selain jumlah pohon dan bidang dasar tegakan yang perlu dipertimbangkan dalam model) atau kenyataan bahwa *ingrowth* dalam suatu tegakan merupakan suatu proses yang random (Buongiorno *et al.*, 1995; Volin dan Biongiorno, 1996). Namun demikian, nilai R^2 yang dihasilkan dari penelitian ini relatif lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian-penelitian serupa lainnya yang hanya menghasilkan nilai R^2 lebih kecil dari 40% (contoh Lin *et al.*, 1996; Hao *et al.*, 2005). Bahkan, karena sulitnya menduga model *ingrowth* yang akurat, beberapa peneliti cenderung menggunakan nilai *ingrowth* yang konstan pada setiap periode waktu (contoh Mendoza dan Setyarso, 1986; Hao *et al.*, 2005).

2. Model *Upgrowth*

Peluang tambah tumbuh (*upgrowth*), yaitu fraksi pohon yang hidup pada kelas diameter pohon tertentu dan pindah ke kelas diameter berikutnya selama selang waktu tertentu, diduga dipengaruhi secara negatif oleh bidang dasar tegakan dan po-

stif oleh ukuran (diameter) pohon (Buongiorno *et al.*, 1995). Dugaan ini dicoba diterapkan terhadap data penelitian ini. Berbagai persamaan telah diuji dengan memasukkan bidang dasar tegakan dan diameter pohon sebagai peubah pendugaannya. Nilai-nilai koefisien parameter, F_{model} , dan koefisien determinasi (R^2) model-model *upgrowth* yang menerangkan peluang transisi (tambah tumbuh) suatu pohon dari ketiga kelompok jenis pada masing-masing lokasi bekas tebangan disajikan pada Tabel 2 dengan bentuk umum model *upgrowth* sebagai berikut:

$$b_{ij} = p_i + q_i \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_j (y_{ijt}) + s_i D_j \dots\dots\dots(8)$$

- dimana:
- b_{ij} = peluang pohon-pohon pada kelompok jenis i kelas diameter j yang tetap hidup tetapi pindah ke kelas diameter berikutnya selama periode dua tahun (*probability of trees moving to the next diameter class for species group i and diameter class j in a two-year period*),
 - B_j = bidang dasar rata-rata pohon pada kelas diameter j (*mean basal area of the trees for diameter class j*),
 - D_j = diameter rata-rata dari kelas diameter j (*mean diameter of diameter class j*),
 - p_i, q_i dan (*and*) s_i = koefisien regresi (*regression coefficients*).

Hasil penyusunan model *upgrowth* pada Tabel 2 menunjukkan bahwa secara umum laju *upgrowth* merupakan fungsi dari bidang dasar tegakan dan diameter pohon. Hal yang menarik adalah model *upgrowth* untuk kelompok jenis Dipterocarpaceae dan Non-Dipterocarpaceae untuk semua lokasi merupakan fungsi kuadratik dari diameter pohon, sedangkan untuk kelompok jenis Non-Komersial tidak demikian. Hasil yang serupa juga ditunjukkan oleh Volin dan Buongiorno (1996) untuk kelompok jenis Spruce di Italia. Pada bidang dasar tegakan tertentu, laju *upgrowth* jenis dari suku Dipterocarpaceae dan Non-Dipterocarpaceae dipengaruhi secara signifikan oleh kerapatan tegakan dan ukuran pohon, sedangkan untuk jenis Non-Komersial pengaruh signifikannya hanya terjadi pada kawasan bekas

Tabel (Table) 2. Model-model peluang transisi suatu pohon dalam periode dua tahun pada empat blok kawasan bekas tebangan (*Models of the transition probability of trees between diameter classes in a two-year period for the four blocks of logged-over area*)

Kelompok jenis (<i>Species group</i>)	Konstanta (<i>Constant</i>)	Peubah bebas (<i>Independent variable</i>)			F model	R ² (%)
		Bidang dasar (<i>Basal area</i>) (m ² ha ⁻¹)	Diameter (cm)	Diameter ² (cm ²)		
Blok (Block) A						
Dipterocarp	0,214 (0,169)	-0,00235 (0,051 [*])	0,00925 (0,128)	-0,00012 (0,050 [*])	2,61 (0,046 [*])	29,6
Non-Dipterocarp	0,084 (0,152)	-0,00387 (0,048 [*])	0,0118 (0,035 [*])	-0,000124 (0,028 [*])	3,04 (0,035 [*])	31,2
Non-Commercial	0,18 (0,049 [*])	-0,00063 (0,311)	0,00022 (0,307)		2,18 (0,098)	20,1
Blok (Block) B						
Dipterocarp	0,731 (0,002 ^{**})	-0,0192 (0,003 ^{**})	0,00493 (0,204)	-0,000073 (0,052 [*])	4,31 (0,008 ^{**})	36,6
Non-Dipterocarp	-0,015 (0,298)	0,0031 (0,053 [*])	0,00679 (0,123)	-0,000092 (0,043 [*])	2,78 (0,038 [*])	28,7
Non-Commercial	0,275 (0,021 [*])	-0,00338 (0,249)	-0,00202 (0,289)		3,17 (0,051 [*])	24,9
Blok (Block) C						
Dipterocarp	0,266 (0,045 [*])	-0,0058 (0,048 [*])	0,00445 (0,193)	-0,000059 (0,033 [*])	2,56 (0,047 [*])	26,2
Non-Dipterocarp	0,188 (0,038 [*])	-0,0014 (0,049 [*])	-0,00081 (0,381)	-0,00001 (0,001 ^{**})	4,10 (0,009 ^{**})	31,7
Non-Commercial	0,265 (0,036 [*])	-0,00461 (0,261)	-0,00092 (0,109)		2,68 (0,044 [*])	22,5
Blok (Block) D						
Dipterocarp	-0,095 (0,259)	0,0004 (0,048 [*])	0,018 (0,005 ^{**})	-0,000177 (0,007 ^{**})	2,77 (0,048 [*])	31,2
Non-Dipterocarp	-0,305 (0,283)	0,018 (0,052 [*])	0,00925 (0,105)	-0,000095 (0,049 [*])	2,75 (0,051 [*])	26,3
Non-Commercial	-0,087 (0,203)	0,0188 (0,050 [*])	-0,00293 (0,009 ^{**})		5,35 (0,008 ^{**})	37,6

Keterangan (*Remarks*): * dan (and) ** = signifikan pada taraf nyata 5% dan 1% (*indicate significance at 5% and 1% level*); nilai dalam ‘tanda kurung’ (*value in the ‘bracket’*) = *p* value; R² = koefisien determinasi (*coefficient of determination*); A, B, C, D masing-masing menunjukkan kondisi awal tegakan 8, 6, 2, dan 1 tahun setelah tebangan (*indicate initial stand states of 8, 6, 2, and 1 year after logging, respectively*)

tebangan satu tahun (Blok D). Apabila dilihat dari tanda koefisien regresi, model umum *upgrowth* yang dihasilkan ternyata tidak dapat digeneralisasikan untuk semua kelompok jenis pada masing-masing kawasan hutan bekas tebangan. Hal ini menunjukkan bahwa model bersifat spesifik untuk setiap kelompok jenis dan lokasi.

Koefisien determinasi yang dihasilkan oleh model *upgrowth* dari setiap kelompok jenis pada keempat lokasi terlihat lebih rendah bila dibandingkan dengan model *ingrowth*, yaitu berkisar antara

20,1% sampai 37,6%. Hal ini mengindikasikan bahwa peubah-peubah penduga hanya menerangkan sebagian kecil dari proses *upgrowth* yang terjadi dalam tegakan. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh Buongiorno *et al.* (1995) dan Volin dan Buongiorno (1996), di mana model *upgrowth* yang dihasilkan oleh masing-masing penelitian hanya memiliki nilai R² berkisar antara 13% dan 40% dan antara 6% dan 14%. Untuk data yang berasal dari alam, Suhendang (1998) mengemukakan bahwa rendahnya nilai R² mungkin dipengaruhi oleh akibat tidak terkendalinya

pengaruh berbagai faktor lingkungan, baik yang bersifat hayati (pohon dari jenis lain dan tumbuhan selain pohon-pohonan) maupun non hayati (aspek, kemiringan lapangan, sifat fisik dan kimia tanah, dan lain-lain) serta interaksi di antara faktor-faktor tersebut. Akibat dari rendahnya nilai R^2 dan bahkan tidak adanya hubungan yang signifikan antara peubah-peubah penduga dengan peubah responnya, sebagian peneliti cenderung menggunakan rata-rata proporsi untuk menghitung peluang *upgrowth* suatu jenis (contoh Hao *et al.*, 2005).

3. Model Mortality

Vanclay (1994) mengklasifikasikan kematian pohon menjadi kematian *regular* (non-catastrophic) dan kematian *irregular* (catastrophic). Kematian *regular* dapat diduga dari berbagai faktor seperti kepadatan tegakan, ukuran pohon, dampak penebangan, dan sebagainya; sedangkan kematian *catastrophic* pada umumnya berhubungan dengan kejadian-kejadian abnormal dan relatif jarang terjadi, seperti kematian akibat bencana atau kebakaran hutan. Dalam penelitian ini, tidak dilakukan pemisahan antara dua penyebab kematian ini. Semua pohon dalam PUP yang dilaporkan mati, baik karena penyakit, umur, tertekan, tumbang karena angin, dampak dari penebangan, dan sebagainya digunakan dalam pemodelan.

Seperti halnya dengan model *up-growth*, hasil pemodelan *mortality* menunjukkan bahwa peluang pohon untuk mati dalam periode waktu dua tahun juga dipengaruhi oleh bidang dasar tegakan dan ukuran diameter pohon. Hasil model terpilih dari setiap kelompok jenis pada masing-masing kawasan hutan bekas tebangan disajikan pada Tabel 3 dengan bentuk umum model *mortality* sebagai berikut:

$$m_{ij} = u_i + v_i \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_j (y_{ijt}) + w_i D_j \dots\dots(9)$$

dimana:

m_{ij} = peluang pohon-pohon pada kelompok jenis i kelas diameter j yang mati selama periode

dua tahun (*probability of trees dying for species group i and diameter class j in a two year period*),

B_j = bidang dasar rata-rata pohon pada kelas diameter j (*mean basal area of the trees for diameter class j*),

D_j = diameter rata-rata dari kelas diameter j (*mean diameter of diameter class i*),

u_i, v_i dan (*and*) w_i = koefisien regresi (*regression coefficients*).

Hasil penyusunan model *mortality* (Tabel 3) menunjukkan bahwa peluang kematian suatu pohon merupakan fungsi linier dari kepadatan tegakan yang dicirikan oleh bidang dasar tegakan dan diameter pohon. Akan tetapi, pengaruh signifikan tersebut tidak berlaku sama untuk semua kelompok jenis di setiap kawasan hutan bekas tebangan. Dari model-model yang dihasilkan pada Tabel 3, terlihat bahwa pengaruh signifikan dari kedua peubah penduga hanya terjadi pada kelompok jenis Non-Dipterocarpaceae di semua kawasan hutan bekas tebangan. Pada jenis kelompok Dipterocarpaceae, peluang kematian hanya dipengaruhi secara signifikan oleh bidang dasar tegakan pada kawasan hutan bekas tebangan delapan tahun (Blok A) dan enam tahun (Blok B), sedangkan pada kawasan hutan bekas tebangan dua dan satu tahun (Blok C dan D) hanya dipengaruhi secara signifikan oleh diameter pohon. Untuk jenis-jenis Non-Komersial pengaruh signifikan hanya terjadi pada Blok D (dipengaruhi oleh ukuran pohon) dan pada Blok C (dipengaruhi oleh bidang dasar tegakan). Tidak adanya hubungan yang signifikan antara diameter dengan kematian pohon di hutan campuran juga telah dilaporkan oleh Carey *et al.* (1994) dan Lieberman dan Lieberman (1987) dalam Favrichon (1998).

Seperti halnya dengan model *up-growth*, tanda koefisien regresi yang dihasilkan oleh model *mortality* juga tidak dapat digeneralisasikan. Nilai koefisien determinasi yang dihasilkan juga cukup rendah, berkisar antara 11,8% sampai dengan 29,3%. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh keragaman data *mortality* yang

Tabel (Table) 3. Model-model peluang kematian pohon dalam periode dua tahun pada empat blok areal bekas tebangan (*Models of the probability of tree dying in a two-year period for the four blocks of logged-over area*)

Kelompok jenis (<i>Species group</i>)	Konstanta (<i>Constant</i>)	Peubah bebas (<i>Independent variable</i>)			<i>F</i> model	<i>R</i> ² (%)
		Bidang dasar (<i>Basal area</i>) (m ² ha ⁻¹)	Diameter (cm)	Diameter ² (cm ²)		
Blok (Block) A						
Dipterocarp	0,0249 (0,297)	-0,00069 (0,047*)	0,000672 (0,139)		2,50 (0,052*)	11,8
Non-Dipterocarp	0,111 (0,048*)	-0,00248 (0,045*)	0,000743 (0,052*)		2,62 (0,047*)	14,7
Non-Commercial	0,095 (0,049*)	-0,0001 (0,243)	-0,00115 (0,257)		1,82 (0,170)	22,4
Blok (Block) B						
Dipterocarp	0,0372 (0,128)	-0,000197 (0,029*)	0,00008 (0,277)		2,55 (0,049*)	17,1
Non-Dipterocarp	0,0609 (0,121)	-0,00305 (0,041*)	0,00144 (0,037*)		2,68 (0,041*)	16,6
Non-Commercial	0,0237 (0,301)	0,000317 (0,218)	-0,000568 (0,133)		1,97 (0,193)	14,9
Blok (Block) C						
Dipterocarp	0,0685 (0,030*)		-0,00217 (0,062)	0,000026 (0,042*)	2,58 (0,47*)	13,9
Non-Dipterocarp	0,218 (0,102)	-0,00408 (0,053*)		0,000033 (0,000**)	11,27 (0,000**)	29,3
Non-Commercial	0,226 (0,043*)	-0,00698 (0,040*)	0,00111 (0,121)		2,60 (0,046*)	15,4
Blok (Block) D						
Dipterocarp	0,219 (0,103)	-0,0086 (0,270)	-0,00014 (0,048*)		2,52 (0,051*)	11,9
Non-Dipterocarp	0,305 (0,001**)	-0,0129 (0,016*)	-0,00089 (0,042*)		5,10 (0,009**)	24,5
Non-Commercial	0,073 (0,254)	-,0074 (0,283)	0,00457 (0,004**)		4,59 (0,015*)	25,5

Keterangan (*Remarks*): * dan (and) ** = signifikan pada taraf nyata 5% dan 1% (*indicate significance at 5% and 1% level*); nilai dalam ‘tanda kurung’ (*value in the ‘bracket’*) = *p* value; *R*² = koefisien determinasi (*coefficient of determination*); A, B, C, D masing-masing menunjukkan kondisi awal tegakan 8, 6, 2, dan 1 tahun setelah tebangan (*indicate initial stand states of 8, 6, 2, and 1 year after logging, respectively*)

sangat tinggi. Keragaman yang tinggi bisa terjadi karena pohon-pohon besar hanya menempati proporsi yang kecil dari total jumlah pohon dalam tegakan, sehingga sulit untuk memberikan pendugaan yang baik terhadap parameter-parameter dinamika tegakan, terutama laju kematian. Tetapi, pohon-pohon dengan diameter besar sangat menentukan dalam perhitungan bidang dasar tegakan total, suatu peubah yang sering digunakan dalam model dinamika tegakan hutan. Oleh karena itu, prediksi yang kurang baik

terhadap laju kematian pohon-pohon besar akan sangat berpengaruh terhadap perilaku model. Permasalahan seperti ini juga telah dialami oleh Clark dan Clark (1996) dalam penelitiannya di hutan hujan tropis dataran rendah di Costa Rica. Keragaman *mortality* yang tinggi mungkin juga tidak terlepas dari kenyataan bahwa kematian pohon dalam suatu tegakan merupakan suatu proses yang kompleks dan relatif sulit diprediksi karena banyaknya faktor yang saling berinteraksi (Waring, 1987).

B. Matriks Transisi Pertumbuhan Tegakan

Model *ingrowth*, *upgrowth*, dan *mortality* yang dihasilkan (Tabel 1-3) selanjutnya digunakan untuk menyusun matriks transisi pertumbuhan [G(Bt)] (Persamaan 2) seperti disajikan pada Tabel 4-7. Matriks transisi pertumbuhan [G(Bt)] diperoleh dari penjumlahan antara matriks *upgrowth* [A(Bt)] dan *ingrowth* [R] (Persamaan 3). Struktur matriks *upgrowth* terdiri atas komponen-komponen a_i (peluang pohon-pohon yang tetap dalam kelas diameternya selama periode waktu dua tahun) dan b_i (peluang pohon-pohon yang pindah ke kelas diameter berikutnya selama periode waktu dua tahun). Nilai b_i diperoleh dengan memasukkan parameter-parameter dari model *upgrowth* (Tabel 2), sedangkan nilai a_i diperoleh dari hasil perhitungan: $1-b_i-m_i$. Nilai m_i (peluang pohon-pohon yang mati pada kelas diameternya selama periode waktu dua tahun) diperoleh dengan memasukkan parameter-parameter dari model *mortality* (Tabel 3). Bidang dasar rata-rata tegakan yang digunakan dalam perhitungan matriks transisi adalah

bidang dasar rata-rata pada periode awal proyeksi (kondisi awal pengukuran) di setiap kawasan hutan be-kas tebangan.

Struktur matriks *ingrowth* diperoleh dengan memasukkan parameter-parameter matriks yang spesifik dari model *ingrowth* (Tabel 1), sedangkan struktur vektor c dalam Persamaan (2) diperoleh dengan memasukkan nilai konstanta dari masing-masing model *ingrowth*. Nilai konstanta c menunjukkan besarnya pohon *ingrowth* yang mungkin terjadi secara bebas, tidak tergantung dari kondisi tegakan; oleh karena adanya penyebaran anakan yang dapat terjadi secara random dari tegakan di sekitarnya. Menurut Favrichon (1998), benih dorman untuk jenis-jenis tertentu (seperti jenis pionir) dapat dijumpai di dalam tanah, dan *ingrowth* mungkin saja dapat terjadi tanpa kehadiran pohon-pohon induk dalam tegakan yang bersangkutan.

Dari keempat matriks transisi tersebut (Tabel 4-7) dapat dibuat contoh interpretasi nilai-nilai yang tercantum dalam tabel seperti berikut ini. Baris pertama dari matriks transisi pada blok bekas tebangan A (Tabel 4) menunjukkan bahwa pengaruh

Tabel (Table) 4. Matrik transisi pertumbuhan untuk blok bekas tebangan A (*Growth transition matrix for the logged-over block A*)

D (cm)	Dipterocarp				Non-Dipterocarp				Non-Commercial				Konst (Const)
	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	
Dipterocarp													
12.5	0,79	0,04	..	-0,12	0,00	0,01	..	-0,17	0,00	-0,01	..	-0,17	14,09
17,5	0,25	0,71	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0,28	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0,94	0	0	..	0	0	0	..	0	
Non-Dipterocarp													
12,5	0,00	-0,01	..	-0,17	0,89	0,04	..	-0,12	0,00	-0,01	..	-0,17	7,89
17,5	0	0	..	0	0,11	0,79	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0,15	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0,90	0	0	..	0	
Non-Commercial													
12,5	0,00	-0,01	..	-0,17	0,00	-0,01	..	-0,17	0,81	0,04	..	-0,12	4,21
17,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0,17	0,76	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0,17	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0,99	

Keterangan (Remarks): bidang dasar tegakan rata-rata (*mean stand basal area*) = 26,7 m² ha⁻¹

jenis pohon-pohon dari suku Dipterocarpaceae dari kelas diameter 72,5+ cm terhadap penambahan satu pohon dari suku Dipterocarpaceae pada kelas diameter terkecil (*ingrowth*) adalah 0,12 lebih kecil dibandingkan dengan *ingrowth* oleh jenis pohon-pohon dari suku Dipterocar-

paceae pada kelas diameter 12,5 cm. Sedangkan pengaruh jenis-jenis Non-Dipterocarpaceae terhadap terjadinya *ingrowth* jenis kelompok Dipterocarpaceae dari kelas diameter 72,5+ cm lebih kecil 0,17 dibandingkan dengan *ingrowth* oleh jenis pohon-pohon dari suku Dipterocarpaceae

Tabel (Table) 5. Matrik transisi pertumbuhan untuk blok bekas tebangan B (*Growth transition matrix for the logged-over block B*)

D (cm)	Dipterocarp				Non-Dipterocarp				Non-Commercial				Konst (Const)
	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	
Dipterocarp													
12,5	0,61	0,00	..	-0,11	0,00	-0,01	..	-0,12	0,00	-0,01	..	-0,12	14,89
17,5	0,35	0,60	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0,37	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0,96	0	0	..	0	0	0	..	0	
Non-Dipterocarp													
12,5	0,00	-0,01	..	-0,12	0,86	0,00	..	-0,11	0,00	-0,01	..	-0,12	9,47
17,5	0	0	..	0	0,12	0,84	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0,15	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0,90	0	0	..	0	
Non-Commercial													
12,5	0,00	-0,01	..	-0,12	0,00	-0,01	..	-0,17	0,80	0,00	..	-0,11	5,83
17,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0,17	0,82	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0,16	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0	..	1,00	

Keterangan (Remarks): bidang dasar tegakan rata-rata (*mean stand basal area*) = 22,4 m² ha⁻¹

Tabel (Table) 6. Matrik transisi pertumbuhan untuk blok bekas tebangan C (*Growth transition matrix for the logged-over block C*)

D (cm)	Dipterocarp				Non-Dipterocarp				Non-Commercial				Konst (Const)
	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	
Dipterocarp													
12,5	0,81	0,01	..	0,00	0,00	0,00	..	-0,01	0,00	0,00	..	-0,01	3,89
17,5	0,16	0,79	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0,17	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0,95	0	0	..	0	0	0	..	0	
Non-Dipterocarp													
12,5	0,00	0,00	..	-0,01	0,85	0,01	..	0,00	0,00	0,00	..	-0,01	3,88
17,5	0	0	..	0	0,14	0,84	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0,13	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0,81	0	0	..	0	
Non-Commercial													
12,5	0,00	0,00	..	-0,01	0,00	0,00	..	-0,01	0,82	0,01	..	0,00	1,87
17,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0,13	0,81	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0,13	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0,88	

Keterangan (Remarks): bidang dasar tegakan rata-rata (*mean stand basal area*) = 26,6 m² ha⁻¹

Tabel (Table) 7. Matrik transisi pertumbuhan untuk blok bekas tebangan D (*Growth transition matrix for the logged-over block D*)

D (cm)	Dipterocarp				Non-Dipterocarp				Non-Commercial				Konst (Const)
	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	12,5	17,5	..	72,5+	
Dipterocarp													
12,5	0,83	0,02	..	-0,11	0,00	-0,01	..	-0,14	0,00	-0,01	..	-0,14	11,5
17,5	0,11	0,75	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0,17	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0,93	0	0	..	0	0	0	..	0	
Non-Dipterocarp													
12,5	0,00	-0,01	..	-0,14	0,85	0,02	..	-0,11	0,00	-0,01	..	-0,14	11,51
17,5	0	0	..	0	0,09	0,80	..	0	0	0	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0,12	..	0	0	0	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0,97	0	0	..	0	
Non-Commercial													
12,5	0,00	-0,01	..	-0,14	0,00	-0,01	..	-0,14	0,83	0,02	..	-0,11	3,98
17,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0,18	0,80	..	0	
22,5	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0,17	..	0	
..	
72,5+	0	0	..	0	0	0	..	0	0	0	..	0,72	

Keterangan (Remarks): bidang dasar tegakan rata-rata (*mean stand basal area*) = 16,4 m² ha⁻¹.

pada kelas diameter 12,5 cm. Begitu pula dengan jenis-jenis Non-Komersial, pengaruhnya terhadap *ingrowth* jenis pohon dari suku Dipterocarpaceae sama dengan jenis-jenis Non-Dipterocarpaceae. Berikutnya, nilai konstanta sebesar 14,09 menunjukkan bahwa *ingrowth* jenis pohon dari suku Dipterocarpaceae yang mungkin terjadi secara bebas (tidak tergantung pada kondisi tegakan) adalah 14,09 pohon per hektar tiap periode dua tahun, atau sekitar tujuh pohon per hektar per tahun.

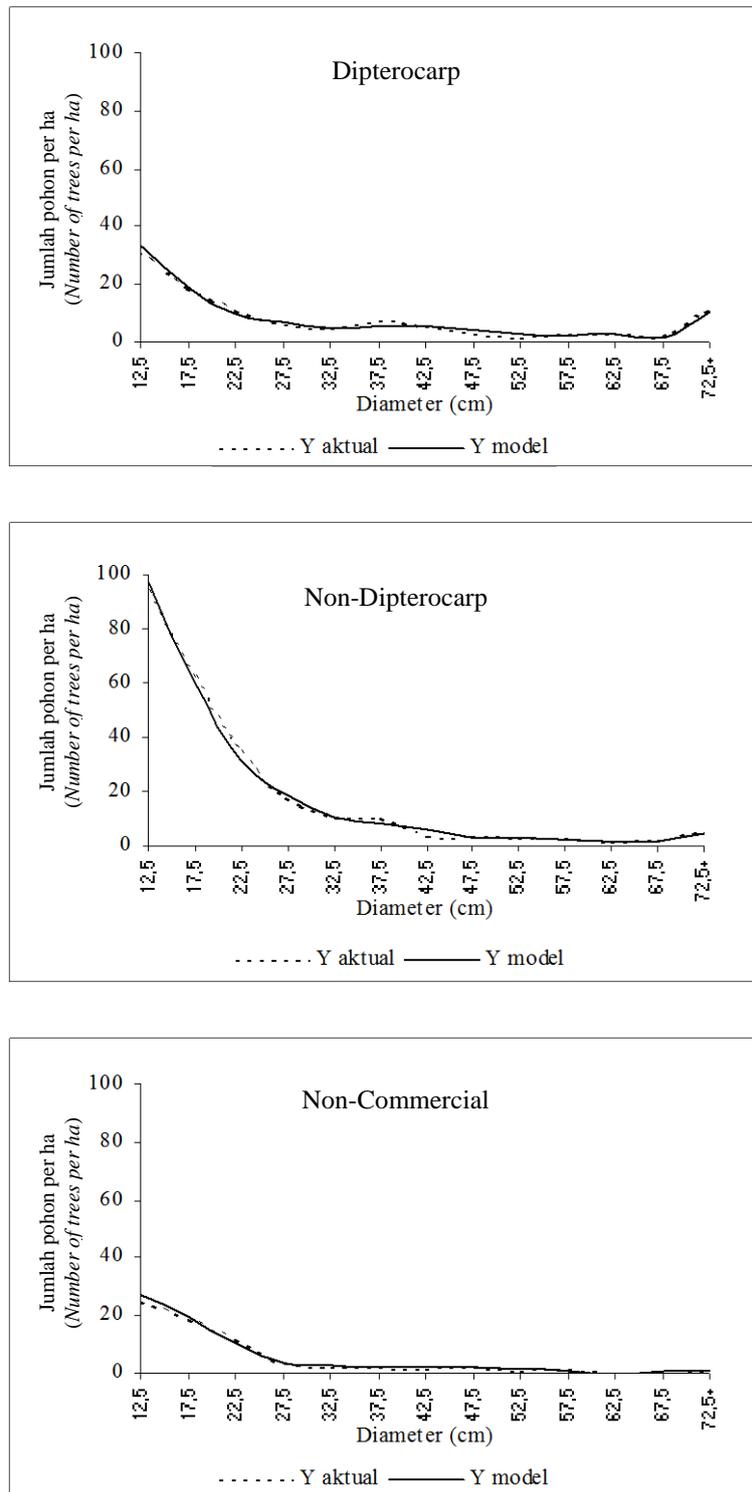
Baris kedua dari matriks transisi dalam Tabel 4 menunjukkan bahwa peluang sebuah pohon dari suku Dipterocarpaceae pada kawasan hutan bekas tebangan delapan tahun pada kelas diameter 17,5 cm yang pindah ke kelas diameter 22,5 cm selama periode waktu dua tahun adalah 0,28, sedangkan peluang bahwa sebuah pohon jenis Dipterocarpaceae pada kelas diameter 17,5 cm yang tetap tinggal pada kelas diameter yang sama selama periode waktu 2 tahun adalah 0,71. Dengan demikian, peluang pohon jenis Dipterocarpaceae untuk mati pada kelas diameter 17,5 cm adalah $1-0,28-0,71 = 0,01$, yaitu

sekitar 0,5% per tahun. Interpretasi hasil pada ketiga matriks transisi pertumbuhan yang lain (Tabel 5, 6, dan 7) juga dapat dilakukan dengan cara yang sama seperti yang sudah diuraikan untuk Tabel 4.

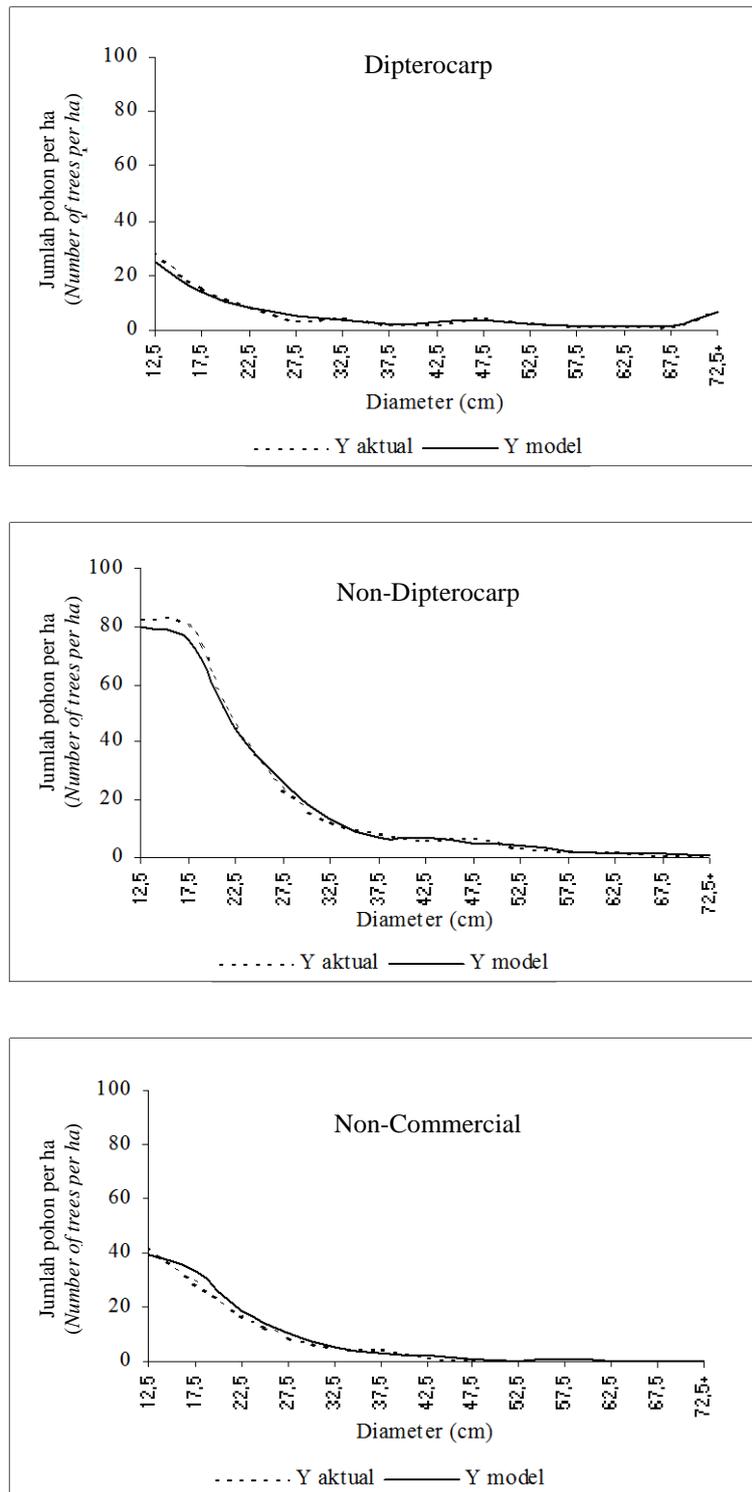
C. Validasi Model

Untuk tujuan validasi, model dinamika struktur tegakan yang dihasilkan dengan parameter-parameter yang disajikan pada Tabel 1-3 digunakan untuk menduga kondisi setiap tegakan pada saat inventarisasi terakhir di lapangan (yaitu pada tahun ke-6 sejak dilakukan pengukuran awal PUP). Hasil pendugaan selanjutnya dibandingkan dengan kondisi aktual di lapangan. Gambar 1-4 menunjukkan perbandingan antara rata-rata jumlah pohon yang diamati pada setiap kelas diameter menurut kelompok jenis dalam setiap tegakan sampel (kawasan hutan bekas tebangan) dan hasil pendugaan menurut model.

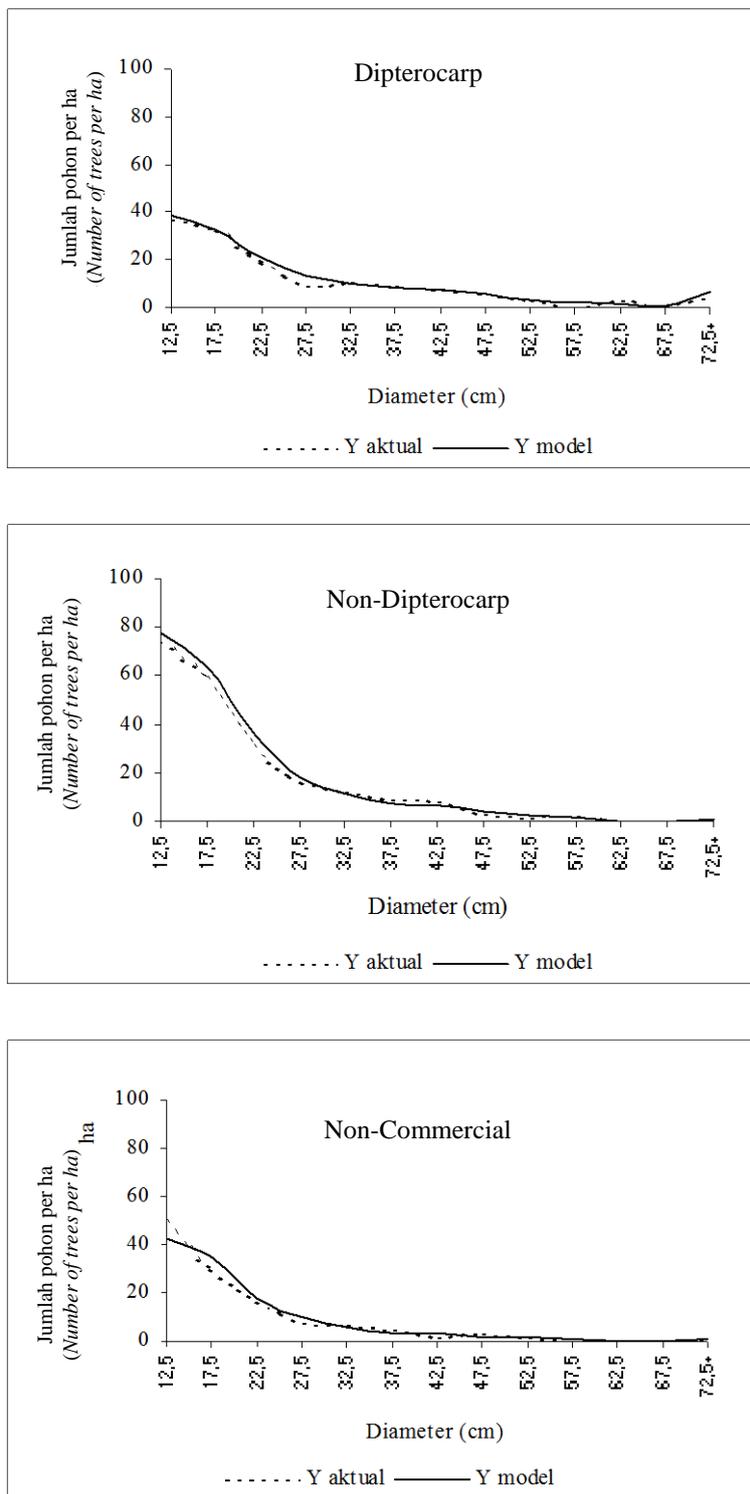
Dari Gambar 1-4 terlihat bahwa secara umum hasil pendugaan struktur tegakan dengan menggunakan model-model pertumbuhan matrik transisi cukup mendekati hasil pengamatan struktur tegakan



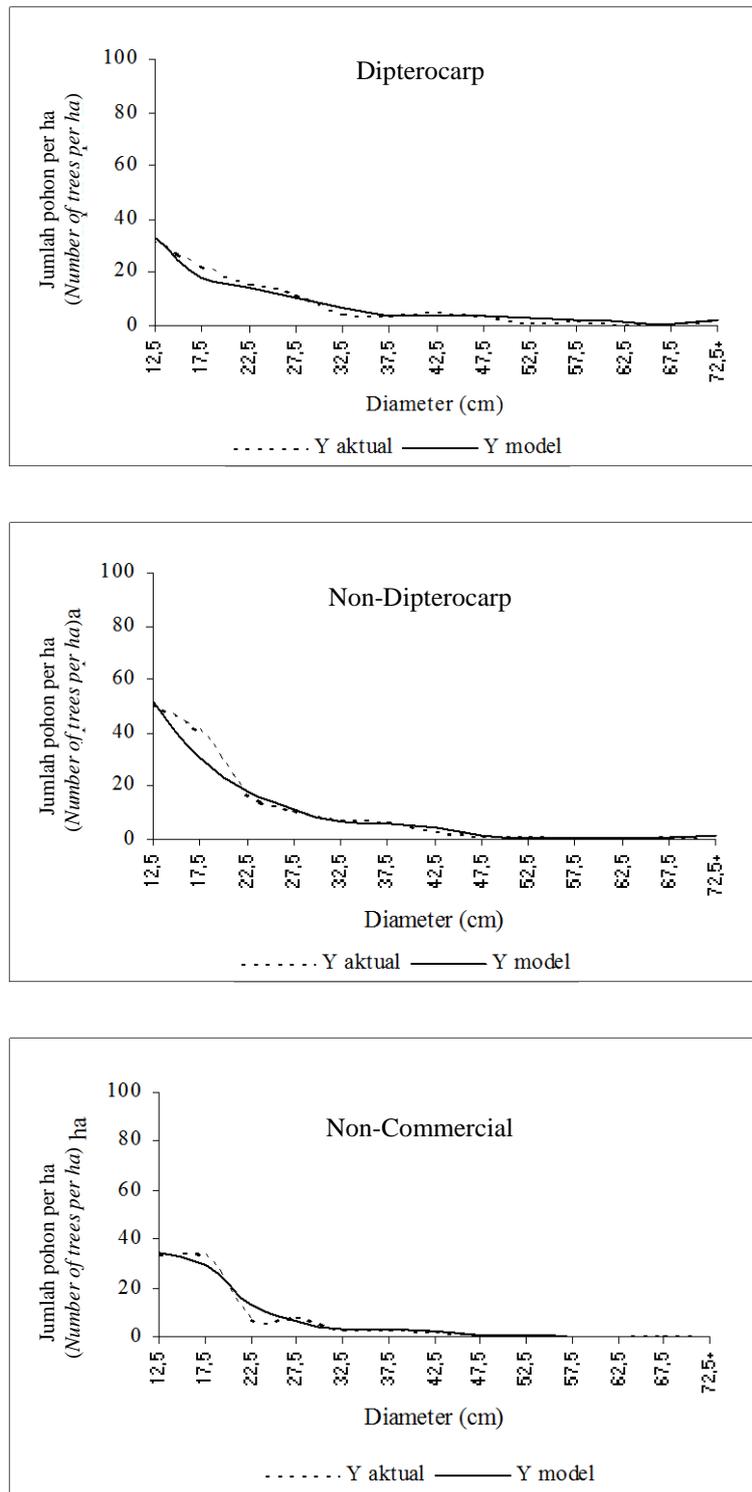
Gambar (Figure) 1. Perbandingan struktur tegakan aktual dengan hasil dugaan model menurut kelompok jenis untuk blok bekas tebangan A (Comparisons of the actual and expected stand structures by species group for the logged-over block A)



Gambar (Figure) 2. Perbandingan struktur tegakan aktual dengan hasil dugaan model menurut kelompok jenis untuk blok bekas tebangan B (*Comparisons of the actual and expected stand structures by species group for the logged-over block B*)



Gambar (Figure) 3. Perbandingan struktur tegakan aktual dengan hasil dugaan model menurut kelompok jenis untuk blok bekas tebangan C (*Comparisons of the actual and expected stand structures by species group for the logged-over block C*)



Gambar (Figure) 4. Perbandingan struktur tegakan aktual dengan hasil dugaan model menurut kelompok jenis untuk blok bekas tebangan D (*Comparison of the actual and expected stand structures by species group for the logged-over block D*)

di lapangan, meskipun pada beberapa petak cenderung *underestimate*, terutama untuk jenis kelompok Dipterocarpa-

ceae dan Non-Dipterocarpaceae pada kelas diameter kecil. Namun demikian, hasil uji statistik khi-kuadrat (Lampiran

1-4) menunjukkan bahwa semua hasil pendugaan struktur tegakan dengan menggunakan model matriks transisi pertumbuhan tegakan pada keempat blok bekas tebangan tidak berbeda secara nyata dengan kondisi aktualnya pada selang kepercayaan 99%, di mana nilai χ^2 hitung berada pada kisaran 0,90 sampai 7,77, jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan nilai χ^2 tabel, yaitu sebesar 26,22 pada derajat bebas 12 dan taraf nyata 1%. Hal ini berarti bahwa penggunaan model matriks transisi pertumbuhan tegakan yang dihasilkan cukup terandalkan (akurat) dalam menerangkan dinamika tegakan yang terjadi, paling tidak sampai enam tahun sejak dilakukan pengukuran awal.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Berdasarkan data petak ukur permanen telah dihasilkan model-model dinamika struktur tegakan untuk hutan alam bekas tebangan di Kalimantan Tengah. Model berupa matrik transisi, yang mengintegrasikan fungsi-fungsi *ingrowth*, *upgrowth*, dan *mortality*. Karakteristik tegakan dijadikan sebagai dasar penyusunan model, yang dicirikan oleh kerapatan bidang dasar, jumlah pohon ataupun ukuran (diameter) pohon.
2. Hasil validasi model menunjukkan bahwa model yang dihasilkan cukup handal dalam menggambarkan dinamika tegakan hutan alam bekas tebangan di lokasi penelitian (paling tidak selama enam tahun), di mana hasil pendugaan dengan model tidak berbeda secara nyata dengan kondisi aktualnya.

B. Saran

1. Dalam penelitian ini telah disusun model-model pertumbuhan matrik

transisi untuk jenis pohon dari kelompok Dipterocarpaceae, Non-Dipterocarpaceae, dan Non-Komersial. Penyusunan model sampai ke tingkat kelompok jenis yang lebih spesifik berdasarkan karakteristik ekologis atau pola pertumbuhan (riap diameter) perlu dilakukan.

2. Validasi model perlu dilanjutkan untuk melihat dinamika/perubahan struktur tegakan jangka panjang sehingga data pengukuran periodik PUP yang cukup banyak sangat diperlukan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Data untuk penelitian ini dikumpulkan dari areal hutan alam bekas tebangan yang dikelola oleh PT. Sarmiento Parakantja Timber di Kalimantan Tengah. Ucapan terimakasih kepada semua pihak yang telah ikut membuat, mengukur, dan mengelola *database* PUP yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alder, D. 1995. Growth Modelling for Mixed Tropical Forests. Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences, University of Oxford. Tropical Forestry Paper No. 30.
- Buongiorno, J. and B.R. Michie. 1980. A Matrix Model for Uneven-aged Forest Management. *Forest Science* 26: 609-625.
- Buongiorno, J., J. Peyron, F. Houllier, and M. Bruciamacchie. 1995. Growth and Management of Mixed-species, Uneven-aged Forests in the French Jura: Implications for Economic Returns and Tree Diversity. *Forest Science* 41: 397-429.
- Carey, E.V., S. Brown, and A.J.R. Gillepsie. 1994. Tree Mortality in

- Mature Lowland Tropical Moist and Tropical Lower Montane Moist Forests of Venezuela. *Biotropica* 26: 255-265.
- Clark, D.B. and D.A. Clark. 1996. Abundance, Growth and Mortality of Very Large Trees in Neotropical Lowland Rain Forest. *Forest Ecology and Management* 80: 235-244.
- Favrignon, V. 1998. Modelling the Dynamics and Species Composition of A Tropical Mixed-species Uneven-aged Natural Forest: Effects of Alternative Cutting Regimes. *Forest Science* 44: 113-124.
- Favrignon, V. and Y.C. Kim. 1998. Modelling the Dynamics of A Lowland Mixed Dipterocarp Forest Stand: Application of A Density-Dependent Matrix Model. *In: Bertault, J-G and K. Kadir (Editors). 1998. Silvicultural Research in A Lowland Mixed Dipterocarp Forest of East Kalimantan, The Contribution of STREK Project, CIRAD-Forêt, FORDA, and PT. INHUTANI I. CIRAD-Forêt Publication: 229-245.*
- Hao, Q., F.R. Meng, Y. Zhou, and J. Wang. 2005. A Transition Matrix Growth Model for Uneven-aged Mixed-species Forests in Changbai Mountains, Northeastern China. *New Forests* 29: 221-231.
- Kimmins, J.P. 1997. *Forest Ecology: A Foundation for Sustainable Management*. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey.
- Krisnawati, H. dan D. Wahjono. 2004. Riap Diameter Tegakan Hutan Alam Rawa Bekas Tebangan di Provinsi Jambi. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam* 1: 156-166.
- Leslie, P.H. 1945. On the Use of Matrices in Certain Population Growth Mathematics. *Biometrika* 33: 183-212.
- Lin, C.R., J. Buongiorno, and M. Vasievich. 1996. A Multi-species, Density-dependent Matrix Growth Model to Predict Tree Diversity and Income in Northern Hardwood Stands. *Ecological Modelling* 91: 193-211.
- Mendoza, G.A., H. Önal, and W. Soetjpto. 2000. Optimising Tree Diversity and Economic Returns from Managed Mixed Forests in Kalimantan, Indonesia. *Journal of Tropical Forest Science* 12: 298-319.
- Mendoza, G.A. and A. Setyarso. 1986. A Transition Matrix Forest Growth Model for Evaluating Alternative Harvesting Schemes in Indonesia. *Forest Ecology and Management* 15: 219-228.
- Orois, S.S. and R.R. Soalleiro. 2002. Modelling the Growth and Management of Mixed Uneven-aged Maritime Pine - Broadleaved Species Forests in Galicia, Northwestern Spain. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 538-347.
- Rusolono, T., I.B.P. Parthama, and M. Rosmantika. 1997. Growth Model and Dynamics of Logged-over Forest Stand: Case Study in The Natural Forest of Pulau Laut, South Kalimantan. *BIOTROP Special Publication* 60:125-137.
- Schmidt, F.H. and J.H.A. Fergusson. 1951. Rainfall Types Based on Wet and Dry Period Ratios for Indonesia and Western New Guinea. *Verhand No. 42. Kementrian Perhubungan, Djawatan Meteorologi dan Geofisika, Jakarta.*
- Schulte, B.J. and J. Buongiorno. 1998. Effects of Uneven-aged Silviculture on The Stand Structure, Species Composition, and Economic

- Returns of Loblolly Pine Stands. *Forest Ecology and Management* 111: 83-101.
- Suhendang, E. 1997. Penentuan Periode Pengukuran Optimal untuk Petak Ukur Permanen di Hutan Alam Tanah Kering. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika* 3: 1-14.
- Suhendang, E. 1998. Pengukuran Riap Diameter Pohon Meranti (*Shorea* spp.) pada Hutan Alam Bekas Tebangan. Makalah disampaikan dalam Diskusi Sehari: Pertumbuhan dan Hasil Tegakan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Hutan dan Konservasi Alam. Bogor, 8 April 1998.
- Vanclay, J.K. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*. CAB International, Wallingford.
- Volin, V.C. and J. Buongiorno. 1996. Effects of Alternative Management Regimes on Forest Stand Structure, Species Composition, and Income: A Model for The Italian Dolomites. *Forest Ecology and Management* 87: 107-125.
- Wahjono, D. dan H. Krisnawati. 2002. Penyusunan Model Dinamika Struktur Tegakan untuk Pendugaan Hasil di Hutan Alam Rawa Bekas Tebangan di Provinsi Jambi. *Buletin Penelitian Hutan* 632: 1-16.
- Wahjono, D. dan R. Imanuddin. 2007. Model Dinamika Struktur Tegakan untuk Pendugaan Hasil di PT Intracawood Manufacturing, Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam* 4: 419-428.
- Waring, R.H. 1987. Characteristics of Trees Predisposed to Die. *BioScience* 37: 569-574.

Lampiran (Appendix) 1. Hasil uji khi-kuadrat (χ^2) antara data hasil pengamatan dan hasil dugaan untuk blok bekas tebangan A (Results of the chi-square test between the observed and expected values for the logged-over block A)

Kelas diameter (Diameter class)	Kelompok jenis (Species group)		
	Dipterocarp	Non-Dipterocarp	Non-Commercial
12,5	0,13	0,11	0,08
17,5	0,01	0,09	0,06
22,5	0,15	0,30	0,16
27,5	0,04	0,01	0,03
32,5	0,00	0,00	0,01
37,5	0,49	0,85	0,00
42,5	0,00	0,63	0,05
47,5	0,38	0,33	0,00
52,5	0,33	0,00	0,02
57,5	0,23	0,23	0,13
62,5	0,01	0,05	0,18
67,5	0,28	0,18	0,08
72,5+	0,01	0,03	0,11
Nilai (Value) χ^2	2,06*	2,81*	0,90*

Keterangan (Remarks): * Tidak berbeda nyata pada taraf 1% dengan derajat bebas 12 (Not significantly different at 1% level and the degree of freedom of 12)

Lampiran (Appendix) 2. Hasil uji khi-kuadrat (χ^2) antara data hasil pengamatan dan hasil dugaan untuk blok bekas tebangan B (Results of the chi-square test between the observed and expected values for the logged-over block B)

Kelas diameter (Diameter class)	Kelompok jenis (Species group)		
	Dipterocarp	Non-Dipterocarp	Non-Commercial
12,5	0,61	0,10	0,15
17,5	0,10	0,37	0,57
22,5	0,16	0,03	0,08
27,5	0,59	0,15	0,27
32,5	0,11	0,02	0,05
37,5	0,13	0,31	0,41
42,5	0,23	0,13	0,05
47,5	0,28	0,41	0,06
52,5	0,01	0,18	0,14
57,5	0,04	0,00	0,10
62,5	0,01	0,77	0,52
67,5	0,04	0,22	0,00
72,5+	0,03	0,01	0,04
Nilai (Value) χ^2	2,34*	2,71*	2,44*

Keterangan (Remarks): * Tidak berbeda nyata pada taraf 1% dengan derajat bebas 12 (Not significantly different at 1% level and the degree of freedom of 12)

Lampiran (Appendix) 3. Hasil uji khi-kuadrat (χ^2) antara data hasil pengamatan dan hasil dugaan untuk blok bekas tebangan C (Results of the chi-square test between the observed and expected values for the logged-over block C)

Kelas diameter (Diameter class)	Kelompok jenis (Species group)		
	Dipterocarp	Non-Dipterocarp	Non-Commercial
12,5	0,09	0,13	0,89
17,5	0,00	0,39	0,70
22,5	0,20	1,09	0,06
27,5	1,13	0,23	0,56
32,5	0,16	0,04	0,15
37,5	0,07	0,55	0,40
42,5	0,00	0,49	0,37
47,5	0,04	0,01	0,81
52,5	0,03	0,03	0,19
57,5	1,88	0,12	0,58
62,5	1,84	0,40	0,10
67,5	0,02	0,03	0,01
72,5+	0,20	0,05	0,00
Nilai (Value) χ^2	5,65*	3,56*	4,82*

Keterangan (Remarks): * Tidak berbeda nyata pada taraf 1% dengan derajat bebas 12 (Not significantly different at 1% level and the degree of freedom of 12)

Lampiran (Appendix) 4. Hasil uji khi-kuadrat (χ^2) antara data hasil pengamatan dan hasil dugaan untuk blok bekas tebangan D (Results of the chi-square test between the observed and expected values for the logged-over block D)

Kelas diameter (Diameter class)	Kelompok jenis (Species group)		
	Dipterocarp	Non-Dipterocarp	Non-Commercial
12,5	0,00	0,00	0,01
17,5	1,36	3,20	0,40
22,5	0,20	0,01	2,65
27,5	0,19	0,00	0,62
32,5	0,62	0,04	0,03
37,5	0,01	0,17	0,04
42,5	0,54	0,62	0,02
47,5	0,01	0,08	0,01
52,5	0,77	0,10	0,04
57,5	0,09	0,04	1,00
62,5	0,04	0,32	0,00
67,5	0,00	2,37	0,31
72,5+	0,01	0,81	0,36
Nilai (Value) χ^2	3,84*	7,77*	5,49*

Keterangan (Remarks): * Tidak berbeda nyata pada taraf 1% dengan derajat bebas 12 (Not significantly different at 1% level and the degree of freedom of 12)