

Dinamika Pertumbuhan Hutan Pasca Penebangan Pada Areal Pt Wijaya Sentosa Kabupaten Teluk Wondama Provinsi Papua Barat

Ade Fachrianto Raipatty Tuharea^{1*}, Agustinus Murdjoko^{2*}, Obed Nedjo.Lense^{2*}

Universitas Papua.

*Penulis Korespondensi: E-mail: fachryleo81@gmail.com; agustinus.murdjoko.papua@gmail.com;
o.lense@unipa.ac.id

ABSTRACT:

This study examines the dynamics of forest stand structure and growth in a post-logging landscape within the concession area of PT Wijaya Sentosa, located in the karst-dominated highlands of West Papua Province, Indonesia. The research focused on changes in tree diameter class distribution over a seven-year monitoring period. Findings revealed a marked structural transition in the tree population, characterized by a gradual shift from smaller to larger diameter classes. Despite previous logging activities, the forest exhibited strong ecological resilience. Mortality rates remained low (<1%), while recruitment contributed to 32% of the total tree population, indicating robust natural regeneration. Spatial distribution analysis, using the Kolmogorov–Smirnov test, revealed a shift from normal to non-normal patterns after 2018—likely reflecting structural adjustments and increasing environmental pressures. These findings highlight the critical value of continuous, long-term ecological monitoring to inform sustainable forest management. Adaptive strategies—such as lengthening harvest cycles, applying enrichment planting, and conserving high-value species—are recommended to support forest recovery and biodiversity. Overall, the observed structural changes affirm that selectively logged tropical forests can retain high ecological functionality when managed with strategic care and precision.

Keywords: forest succession, stand growth. diameter distribution. natural regeneration. secondary tropical forest. sustainable forest management

Abstrak

Studi ini mengkaji dinamika struktur dan pertumbuhan tegakan hutan di lanskap pasca-penebangan di wilayah konsesi PT Wijaya Sentosa, yang terletak di dataran tinggi yang didominasi karst di Provinsi Papua Barat, Indonesia. Penelitian ini berfokus pada perubahan distribusi kelas diameter pohon selama periode pemantauan tujuh tahun. Temuan menunjukkan adanya transisi struktural yang nyata pada populasi pohon, yang ditandai dengan pergeseran bertahap dari kelas diameter yang lebih kecil ke yang lebih besar. Meskipun sebelumnya telah terjadi penebangan, hutan menunjukkan ketahanan ekologis yang kuat. Tingkat mortalitas tetap rendah (<1%), sementara rekrutmen berkontribusi terhadap 32% dari total populasi pohon, yang menunjukkan regenerasi alami yang kuat. Analisis distribusi spasial, menggunakan uji Kolmogorov–Smirnov, menunjukkan pergeseran dari pola normal ke non-normal setelah tahun 2018 kemungkinan mencerminkan penyesuaian struktural dan meningkatnya tekanan lingkungan. Temuan ini menyoroti nilai penting pemantauan ekologi jangka panjang yang berkelanjutan untuk menginformasikan pengelolaan hutan lestari. Strategi adaptif—seperti memperpanjang siklus panen, menerapkan penanaman pengayaan, dan melestarikan spesies bernilai tinggi—direkomendasikan untuk mendukung pemulihan hutan dan keanekaragaman hayati. Secara keseluruhan, perubahan struktural yang diamati menegaskan bahwa hutan tropis yang ditebang secara selektif dapat mempertahankan fungsionalitas ekologis yang tinggi bila dikelola dengan perawatan dan ketepatan yang strategis.

Kata Kunci: suksesi hutan, pertumbuhan tegakan, distribusi diameter, regenerasi alami, hutan tropis sekunder papua, pengelolaan hutan berkelanjutan

PENDAHULUAN

Hutan hujan tropis Indonesia, khususnya di wilayah Papua, merupakan salah satu ekosistem paling kaya akan keanekaragaman hayati di dunia. Selain berperan penting dalam menjaga stabilitas iklim global, hutan-hutan ini juga menyediakan berbagai jasa ekosistem vital, seperti penyimpanan karbon, perlindungan tanah, dan konservasi keanekaragaman hayati. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, keberadaan hutan alam tropis semakin terancam akibat aktivitas penebangan, baik legal maupun ilegal, yang menyebabkan perubahan signifikan pada struktur, komposisi, dan fungsi ekosistem hutan.

Salah satu bentuk tekanan utama terhadap hutan tropis adalah praktik penebangan selektif yang menghasilkan kawasan hutan bekas tebangan (*logged-over forest*). Kawasan ini mengalami degradasi ekologis yang kompleks, mulai dari perubahan struktur tegakan dan komposisi spesies hingga terganggunya proses regeneratif alami. Di kawasan Kepala Burung, Papua, dinamika perubahan ini telah dilaporkan oleh sejumlah penelitian sebelumnya (Kuswandi & Murdjoko, 2015; Kuswandi, 2014; Murdjoko, 2013), menunjukkan dampak nyata penebangan terhadap struktur vegetasi dan pertumbuhan pohon (de Avila et al., 2015; Sandor & Chazdon, 2014).

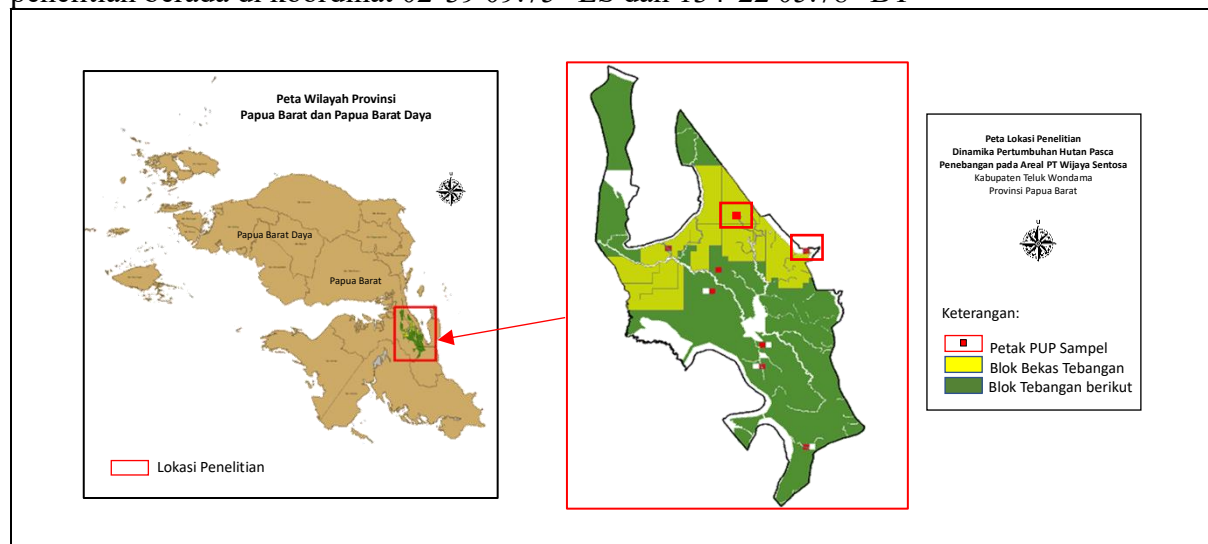
Umumnya, tegakan hutan bekas tebangan didominasi oleh pohon berdiameter kecil dengan kerusakan fisik yang tinggi, rendahnya keanekaragaman jenis, serta keterbatasan dalam proses regenerasi alami (Muhdin et al., 2011; Wijaya et al., 2015; Marjenah et al., 2023). Kondisi ini menghambat proses pemulihan hutan dari segi produktivitas, keanekaragaman hayati, serta fungsi ekologisnya. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai dinamika pertumbuhan tegakan menjadi sangat penting dalam upaya pengelolaan dan pemulihan hutan secara berkelanjutan.

Dinamika tegakan mencakup proses rekrutmen (*ingrowth*), alih tumbuh (*upgrowth*), dan kematian (*mortality*) pohon yang berlangsung secara simultan dan saling memengaruhi dalam kurun waktu tertentu (Muhdin et al., 2011; Kuswandi, 2015). Salah satu pendekatan yang efektif dalam mengkaji dinamika ini adalah model matriks transisi, yang memproyeksikan perubahan struktur tegakan berdasarkan probabilitas pohon bertahan hidup, tumbuh ke kelas diameter yang lebih besar, mati, atau masuk ke dalam kelas diameter awal (Husni et al., 1997; Krisnawati et al., 2008; Kuswandi, 2015). Sayangnya, informasi berbasis data jangka panjang dari petak ukur permanen mengenai dinamika pertumbuhan di hutan bekas tebangan Papua masih sangat terbatas. Variasi dalam kondisi ekologis, intensitas penebangan, dan perlakuan silvikultur pasca-tebang memperbesar kompleksitas pemulihan hutan di wilayah ini.

Berangkat dari permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis dinamika pertumbuhan tegakan hutan alam bekas tebangan, terutama pada proses rekrutmen, alih tumbuh, dan kematian pohon; (2) mengevaluasi potensi penggunaan model matriks transisi dalam memproyeksikan perubahan struktur tegakan dan mendukung pengelolaan hutan secara berkelanjutan; serta (3) mengkaji pengaruh siklus tebang dan variasi jenis pohon terhadap tingkat pertumbuhan dan mortalitas di berbagai lokasi, termasuk faktor-faktor yang memengaruhi kecepatan pemulihan tegakan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan basis data ilmiah dalam pengelolaan hutan tropis Indonesia secara berkelanjutan, khususnya di kawasan dataran rendah Papua.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Perizinan Berusaha Pemanfaatan Hutan pada Hutan Alam (PBPH) PT Wijaya Sentosa, berdasarkan SK Menteri Kehutanan Nomor 33/Menhut-II/2013 tanggal 15 Januari 2013. Areal konsesi seluas ±130.755 ha ini berada di dalam KPHP Unit XIV Papua Barat, tepatnya di Distrik Kuri Wamesa, Kabupaten Teluk Wondama, Provinsi Papua Barat. Wilayah ini beriklim tropis basah (monsun tropik), dengan suhu tahunan berkisar antara 20–38°C di musim kemarau dan 21–30°C saat musim hujan. Kelembapan rata-rata mencapai 84,7% dengan penyinaran matahari 54,3%. Rata-rata kecepatan angin sekitar 8 m/detik, dengan frekuensi kejadian <2%. Tanah di lokasi didominasi oleh tipe Eutropepts (ordo Inceptisol) yang berkembang di atas batuan kapur (karst). Karakteristik tanah ini mencakup tingkat kesuburan rendah, kandungan fosfor terbatas, dan keasaman tinggi akibat senyawa Al, Fe, dan Mn terlarut. Struktur tanah umumnya liat dengan agregat remah (Soil Survey Staff, 1994; Sudirja, 2007). Tipe hutan yang diteliti termasuk hutan karst yang tumbuh di atas morfologi khas hasil pelarutan batuan gamping. Tegakan yang dikaji meliputi spesies bernilai ekonomi seperti *Intsia bijuga* (merbau), *Agathis sp.*, *Shorea spp.*, *Pometia pinnata* (matoa), *Octomeles sumatrana* (binuang), serta spesies lainnya. Lokasi penelitian berada di koordinat 02°39'09.75" LS dan 134°22'05.78" BT



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Pendekatan penelitian bersifat kuantitatif-deskriptif, dengan tujuan menganalisis dinamika struktur tegakan hutan alam bekas tebangan. Estimasi perubahan struktur diameter dilakukan melalui penerapan **model matriks transisi**, yang memetakan probabilitas pergerakan pohon antarkelas diameter dalam proses pertumbuhan (upgrowth), kematian (mortality), dan rekrutmen pohon baru (ingrowth).

Model Ingrowth

Ingrowth didefinisikan sebagai jumlah pohon baru yang masuk ke kelas diameter terkecil (10–14,9 cm) dalam satu periode pengamatan. Nilainya dihitung berdasarkan formula 1 sebagai berikut:

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

Keterangan:

I_t : ingrowth selama periode dua tahun

B_j : bidang dasar rata-rata pohon pada kelas diameter j

n : Jumlah kelas diameter yang diamati.

y_{it} : Jumlah pohon pada kelas diameter i pada waktu t ,

c , d , dan (and) e : koefisien regresi

Nilai ingrowth digunakan untuk membentuk vektor rekrutmen c dalam matriks transisi.

Model Upgrowth

Upgrowth mencerminkan proporsi pohon yang naik ke kelas diameter berikutnya selama interval waktu tertentu. Rumus umum regresinya adalah sebagai berikut:

$$\text{Upgrowth} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Diameter} + \beta_2 \times \text{LBDS} + e \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- *Upgrowth* : proporsi pohon yang naik kelas
- *Diameter* : rerata diameter pohon per kelas (cm)
- *LBDS* : luas bidang dasar (m^2/ha)
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: koefisien hasil regresi

Nilai ini mengisi diagonal atas matriks transisi sebagai peluang perpindahan antarkelas.

Model Mortality

Mortality mengukur proporsi kematian pohon per kelas diameter dalam suatu periode. Formula dasar:

$$a_i = 1 - b_i - m_i \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

a_i : peluang pohon tetap di kelas diameter ke- i

b_i : peluang pohon naik kelas diameter

m_i : peluang pohon mati pada kelas diameter ke- i

Data diperoleh dari enam Petak Ukur Permanen (PUP) berukuran 1 ha ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$) yang diletakkan secara *purposive* pada areal bekas tebangan berumur 8 dan 10 tahun. Setiap PUP dibagi menjadi 100 sub-petak ($10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$) untuk efisiensi pengamatan.

Pengukuran dilakukan berulang dari tahun 2014 hingga 2023, dengan interval 1-2 tahun. Semua pohon dengan diameter ≥ 10 cm diukur parameter berikut: diameter setinggi dada (DBH), tinggi bebas cabang, tinggi total, kondisi pohon (hidup, mati, alih tumbuh, tumbang, rusak, abnormal), serta identifikasi jenis. Setiap individu pohon diberi kode identitas permanen.

Pengelompokan Diameter

Diameter diklasifikasikan ke dalam 11 kelas berinterval 5 cm (kecuali kelas >60 cm) untuk mempermudah analisis distribusi.

Model Matriks Transisi

Matriks disusun untuk setiap interval dua tahun, dengan 11 kelas diameter dan 1 kelas mortalitas. Model didasarkan pada pendekatan Buongiorno et al. (1995), Volin & Buongiorno (1996), dan Orois & Soallerio (2002):

$$Y_{t+\Delta t} = G(Bt) \cdot y_t + c \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- $Y_{t+\Delta t}$: vektor struktur tegakan proyeksi
- $G(Bt)$: matriks transisi pertumbuhan
- y_t : struktur diameter pada waktu t
- c : vektor rekrutmen (ingrowth)

Persamaan Matriks transisi G terdiri dari:

$$G(Bt) = A(Bt) + R \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

- $A(Bt)$: perpindahan pohon (upgrowth)
- R : penambahan pohon baru (ingrowth)

Struktur matriks G :

$$G = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_1 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & \alpha_3 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \beta_i & \alpha_{i+1} \end{bmatrix}$$

Keterangan:

a_i = proporsi pohon yang tetap berada pada kelas diameter (KD) ke- i , dengan

$$a_i = 1 - m_i - b_i$$

m_i = proporsi pohon yang mati pada KD ke- i

b_i = proporsi pohon pada KD ke- i yang pindah ke KD berikutnya (alih tumbuh)

Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil proyeksi matriks terhadap data aktual menggunakan uji Kolmogorov–Smirnov (K–S) non-parametrik ($P > 0,05$) sebagaimana dijelaskan oleh Austregésilo et al. (2004) dan Sokal & Rohlf (1995). Nilai D_{maks} mencerminkan perbedaan maksimum antara distribusi kumulatif hasil proyeksi dan pengamatan. Interpretasi uji:

- $P > 0,05$: tidak terdapat perbedaan signifikan, model valid.
- $P \leq 0,05$: terdapat perbedaan signifikan, model perlu evaluasi ulang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kekayaan dan Struktur Tegakan Awal

Struktur tegakan pada hutan bekas tebangan merupakan aspek fundamental dalam pengelolaan hutan berkelanjutan. Kondisi awal tegakan setelah penebangan memberikan gambaran penting mengenai potensi regenerasi dan pemulihan ekosistem hutan. Pemahaman yang mendalam tentang karakteristik struktur tegakan sangat diperlukan untuk merumuskan strategi silvikultur yang tepat demi mendukung kelestarian hutan tropis Papua. Berdasarkan hasil penelitian, model transisi dikembangkan untuk beberapa kelompok jenis utama, yaitu Meranti (*Shorea* spp., *Hopea* spp., *Alstonia* spp., *Vatica* spp., *Celtis latifolia*, *Anisoptera* spp., *Palaquium* spp., *Intsia* spp., *Pometia pinnata*), Rimba Campuran (*Syzygium* spp., *Cananga odorata*, *Camponosperma brevipetiolatum*, *Myristica* spp., *Mastixiodendron pachyclados*, *Pterygota horsfieldii*, *Anthocephalus chinensis*, *Ficus* spp., *Mangifera* spp., *Spondias dulcis*, *Xanthostemon* spp., *Octomeles sumatrana*), Kayu Indah (*Dracontomelon dao*, *Diospyros* spp., *Podocarpus amarus*), dan jenis dilindungi (*Cinnamomum* spp., *Gnetum gnemon*, *Aquilaria filaria*). Struktur model pertumbuhan tegakan bekas tebangan (dengan kondisi awal 8 dan 10 tahun pasca tebangan) terdiri atas tiga komponen utama: model ingrowth, upgrowth, dan mortality.

Penelitian ini mendeskripsikan dinamika struktur tegakan awal berdasarkan kelompok jenis pada periode 2014–2016, meliputi kekayaan jenis (spesies/ha), jumlah individu, kepadatan, luas bidang dasar (BA), mortalitas (%/tahun), rekrutmen (%/tahun), laju pertumbuhan diameter (cm/tahun), dan standar deviasi pertumbuhan diameter. Tabel berikut merangkum hasil pengamatan tersebut

Tabel. 1. Rekapitulasi Kekayaan Jenis, Kepadatan, Bidang Dasar, Pertumbuhan Diameter, Mortalitas, dan Rekrutmen pada areal penelitian

Periode (tahun)	Kelompok Jenis	Spesies (Sp/Ha)	Jumlah Individu (n/thn)	Kepadatan (N/ha)	Bidang Dasar (m ² /ha)	Periode (tahun)	Mortalitas (%/thn)	Rekrutmen (%/thn)	Laju Pertumbuhan (cm/thn)	St. dev (cm/thn)
2014	Meranti	22.00	468	9.36	4.13	2014-2015	2.14	0.04	0.79	1.274
2015	Meranti	22.00	474	9.48	24.93					
2016	Meranti	22.00	470	9.40	25.37	2015-2016	2.95	0.10	0.92	1.977
2014	Rimba Campuran	58.00	810	16.20	32.57	2014-2015	1.73	0.86	0.38	2.090
2015	Rimba Campuran	58.00	805	16.10	33.82					
2016	Rimba Campuran	54.00	866	17.32	34.87	2015-2016	3.23	8.94	1.07	5.052
2014	Kayu Indah	4.00	22	0.44	1.22	2014-2015	4.55	-	0.52	0.37
2015	Kayu Indah	4.00	22	0.44	1.31					
2016	Kayu Indah	4.00	25	0.50	1.34	2015-2016	-	13.64	2.37	3.76
2014	Jenis Dilindungi	6.00	27	0.54	1.06	2014-2015	7.41	-	0.73	0.49
2015	Jenis Dilindungi	6.00	22	0.44	0.42					
2016	Jenis Dilindungi	6.00	27	0.54	0.46	2015-2016	-	9.09	1.48	2.60

Variasi kekayaan jenis antar kelompok. Rimba Campuran memiliki kekayaan jenis tertinggi (58 spesies/ha), menandakan tingkat keanekaragaman yang sangat tinggi pada awal periode. Kelompok Meranti memiliki 22 spesies/ha, sedangkan Kayu Indah dan Jenis Dilindungi memiliki kekayaan jenis terendah (masing-masing 4 dan 6 spesies/ha). Kekayaan spesies yang tinggi pada Rimba Campuran berpotensi menciptakan struktur tegakan yang lebih stabil dan tangguh terhadap gangguan, sebagaimana dikemukakan oleh Krisnawati et al. (2008), yang menemukan bahwa keanekaragaman jenis memperkuat daya lenting ekosistem hutan bekas tebangan. Sebaliknya, kelompok dengan kekayaan jenis rendah cenderung lebih rentan terhadap perubahan lingkungan dan kompetisi antar individu.

Struktur tegakan awal juga menunjukkan bahwa jumlah individu, kepadatan, dan luas bidang dasar tertinggi terdapat pada kelompok Rimba Campuran. Kelompok Meranti memiliki jumlah individu dan BA yang cukup tinggi, sedangkan Kayu Indah dan Jenis Dilindungi jauh lebih rendah, baik dari sisi jumlah individu maupun BA. Suhendang (2011) menegaskan bahwa kelompok jenis dengan luas bidang dasar dan kepadatan tinggi pada awal pengamatan sangat berperan dalam menentukan dinamika pertumbuhan dan laju pemulihan ekosistem hutan bekas tebangan. Penelitian Krisnawati et al. (2008) di Kalimantan Tengah juga menekankan pentingnya kekayaan spesies yang tinggi untuk mendukung proses pemulihan dan stabilitas struktur tegakan.

3.2. Model *Ingrowth*

Ingrowth dalam penelitian ini didefinisikan sebagai jumlah pohon per hektar yang masuk ke kelas diameter 10–14,9 cm selama periode dua tahun. Faktor utama yang memengaruhi ingrowth adalah kelimpahan atau kerapatan pohon dari jenis yang bersangkutan. Krisnawati et al. (2008) menunjukkan bahwa ingrowth sangat dipengaruhi oleh struktur tegakan, terutama jumlah pohon dan bidang dasar; semakin tinggi kerapatan dan LBDS, nilai ingrowth cenderung menurun akibat kompetisi yang meningkat.

Model ingrowth yang dihasilkan untuk masing-masing kelompok jenis pada blok bekas tebangan di rangkum dalam tabel 2.

Tabel. 2. Model alih tumbuh pohon dalam periode dua tahun untuk masing-masing jenis pada areal bekas tebang PT. Wijaya Sentosa

Kelompok Jenis	Konstanta	Peubah bebas			F _{model}	R ² (%)
		Kelas diameter	Jumlah Pohon (N/ha)	Bidang Dasar (m ² /ha)		
Meranti	0.072	-0.015	0.0010	0.049	2.96	65.19
	(0.151)	(0.050)	(0.202)	(0.120)	0.11	
Rimba Campuran	0.044	0.013	0.003	-0.085	52.10	97.83
	(0.827)	(0.406)	(0.000)	(0.057)	(0.000)	
Kayu Indah	-0.011	0.001	0.004	-0.013	3.141	75.75
	(0.404)	(0.403)	(0.095)	(0.469)	(0.096)	
Jenis Dilindungi	-0.003	0.000	0.001	-0.011	20.799	94.82
	(0.185)	(0.207)	(0.001)	(0.207)	(0.001)	

Keterangan: Signifikan pada taraf nyata 5%. nilai 'dalam kurung' =P-value, R²=koefisien determinasi

Model menunjukkan bahwa jumlah pohon sangat berpengaruh terhadap ingrowth (rekrutmen pohon baru), sedangkan bidang dasar berpengaruh negatif. Tegakan yang lebih rapat cenderung memiliki ingrowth lebih kecil. Krisnawati et al. (2008) juga menegaskan bahwa kerapatan pohon yang optimal mendukung regenerasi, namun pada kerapatan sangat tinggi, kompetisi dapat menurunkan laju ingrowth. Koefisien determinasi menunjukkan bahwa model ini mampu menjelaskan lebih dari 90% variasi ingrowth pada data yang dianalisis.

3.2. Model Upgrowth

Peluang pohon untuk naik kelas diameter selama periode tertentu. Buongiorno et al. (1995) menegaskan bahwa upgrowth dipengaruhi secara negatif oleh bidang dasar tegakan dan secara positif oleh diameter pohon. Model upgrowth yang dihasilkan untuk empat kelompok jenis dalam tabel 3.

Tabel. 3. Model peluang pohon naik kelas dalam periode dua tahun untuk masing-masing jenis pada areal bekas tebang PT. Wijaya Sentosa

Kelompok Jenis	Konstanta	Peubah bebas			F model	R ²
		Kelas diameter	Jumlah Pohon (N/ha)	Bidang Dasar (m ² /ha)		
Meranti	0,710	-0,040	-0,004	0,039	13,126	87,55
	(0,000)	(0,015)	(0,016)	(0,310)	(0,003)	
Rimba Campuran	-0,164	0,013	-0,001	0,241	52,100	74,75
	(0,421)	(0,406)	(0,378)	(0,013)	(0,000)	
Kayu Indah	-0,089	0,008	0,047	-0,208	3,589	83,98
	(0,669)	(0,695)	(0,142)	(0,549)	(0,080)	
Jenis Dilindungi	-0,042	0,005	0,008	-0,067	16,748	95,80
	(0,130)	(0,119)	(0,001)	(0,182)	(0,002)	

Keterangan: Signifikan pada taraf nyata 5%. nilai 'dalam kurung' =P-value, R²=koefisien determinasi

Model menunjukkan bahwa jumlah pohon dalam tegakan berpengaruh positif terhadap upgrowth, sedangkan bidang dasar berpengaruh negatif. Semakin besar bidang dasar, upgrowth menurun karena kompetisi meningkat. Diameter pohon tidak berpengaruh signifikan. Model

ini dapat digunakan untuk memproyeksikan peluang pertumbuhan pohon ke kelas diameter lebih besar dan membantu perencanaan pengelolaan hutan secara berkelanjutan. Temuan ini konsisten dengan Roitman & Vanclay (2015) yang menekankan pentingnya keseimbangan antara kerapatan pohon dan ruang tumbuh dalam dinamika pertumbuhan dan pemulihan hutan bekas tebangan.

3.2. Model *Mortality*

Kematian dapat diduga dari berbagai faktor seperti kerapatan 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. Faktor penyebab kematian yang telah dikonfirmasi oleh berbagai penelitian. Vanclay (1994) dalam publikasi komprehensifnya "Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests" mengklasifikasikan kematian pohon menjadi dua kategori utama: kematian regular (non-catastrophic) dan kematian irregular (catastrophic). Dalam penelitian ini, penyebab kematian seperti penyakit, umur, tertekan, tumbang karena angin, dampak dari penebangan, dan sebagainya tidak digunakan dalam pemodelan. Seperti halnya dengan model upgrowth, 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 4 model *Mortality*.

Tabel 4. Model peluang pohon mati dalam periode dua tahun untuk masing-masing jenis pada areal bekas tebang PT. Wijaya Sentosa

Kelompok Jenis	Konstanta	Peubah bebas			F model	R ² (%)
		Kelas diameter	Jumlah Pohon (N/ha)	Bidang Dasar (m ² /ha)		
Meranti	0,321	-0,022	-0,003	0,039	3,375	76,894
	(0,013)	(0,133)	(0,054)	(0,310)	(0,084)	
Rimba Campuran	-0,070	-0,030	-0,001	0,035	10,601	73,542
	(0,072)	(0,228)	(0,378)	(0,010)	(0,010)	
Kayu Indah	0,000	0,002	0,000	-0,008	13,436	92,306
	(0,786)	(0,695)	(0,142)	(0,463)	(0,003)	
Jenis Dilindungi	-0,004	0,000	0,000	0,054	37,200	98,043
	(0,254)	(0,207)	(0,037)	(0,000)	(0,000)	

Keterangan: Signifikan pada taraf nyata 5%. nilai 'dalam kurung' = P-value, R² = koefisien determinasi

Model ini menunjukkan bahwa jumlah pohon dan bidang dasar berpengaruh positif terhadap mortality. Semakin padat tegakan, semakin tinggi risiko kematian pohon akibat kompetisi. Diameter pohon tidak signifikan. Krisnawati et al. (2008) juga menemukan bahwa mortalitas di hutan tropis bekas tebangan sangat dipengaruhi oleh kerapatan pohon dan bidang dasar. Mortalitas tinggi pada tegakan padat menandakan perlunya pengaturan ruang tumbuh dan penjarangan agar kompetisi tidak memicu kematian massal pohon.

3.3. Matriks Transisi Pertumbuhan Hutan

Model *ingrowth*, *upgrowth*, dan *mortality* yang telah diperoleh digunakan untuk menyusun matriks transisi pertumbuhan, yang mencerminkan dinamika perpindahan pohon

antar kelas diameter dalam satu periode pengamatan. Komponen utama matriks adalah probabilitas pohon tetap di kelas diameter yang sama (a_1), berpindah ke kelas berikutnya (b_1), dan mati (m_i). Nilai-nilai ini dihitung berdasarkan parameter model *upgrowth* dan *mortality*.

Perbedaan pola transisi antar kelompok jenis Meranti, Rimba Campuran, Kayu Indah, dan Jenis Dilindungi menunjukkan bahwa setiap kelompok memiliki dinamika pertumbuhan dan pola perpindahan kelas diameter yang khas, penting untuk proyeksi dan pengelolaan struktur tegakan hutan bekas tebangan, sebagaimana di sajikan dalam tabel masing-masing kelompok jenis dalam tabel 5-7.

Tabel 5. Matrik transisi pertumbuhan untuk jenis kelompok Meranti

	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.2	57.5	60+
G_{meranti}											
0.572											
0.492		0.297									
		0.595	0.845								
			0.109	0.104							
				0.324	0.729						
					0.109	0.125					
						0.169	0.500				
							0.357	0.867			
								0.867	0.989		
									0.050	0.840	
	0.186	0.108	0.571	0.047	0.102	0.250	0.143	0.083	0.00	0.011	1.000

Nilai diagonal utama (misal: 0,845 pada kelas 22,5 cm, 0,729 pada 32,5 cm, dst.) menunjukkan sebagian besar pohon Meranti cenderung tetap di kelas diameter yang sama tiap periode. Nilai diagonal atas yang cukup besar (misal: 0,324 pada 27,5 cm, 0,357 pada 47,5 cm) menandakan adanya pertumbuhan aktif, dengan sebagian pohon naik ke kelas diameter berikutnya. Nilai pada kelas diameter terkecil (12,5 cm) sebesar 0,572 menunjukkan peluang rekrutmen atau ingrowth yang cukup baik. sedangkan nilai rendah atau nol di luar diagonal utama dan atas menandakan mortalitas rendah pada sebagian besar kelas diameter.

Tabel 6. Matrik transisi pertumbuhan untuk jenis kelompok Rimba Campuran

	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.2	57.5	60+
G_{rimba campuran}											
0.780											
0.060		0.835									
		0.095	0.872								
			0.048	0.932							
				0.028	0.896						
					0.084	0.854					
						0.136	0.921				
							0.069	0.920			
								0.080	0.889		
									0.111	0.990	
	0.160	0.070	0.080	0.020	0.010	0.010	0.00	0.00	0.010	0.00	1.000

Nilai diagonal utama sangat tinggi (misal: 0,835 pada kelas 17,5 cm, 0,932 pada 27,5 cm, 0,990 pada 57,5 cm), menandakan pohon-pohon di kelompok ini sangat stabil dan jarang berpindah kelas diameter. Nilai upgrowth (diagonal bawa) relatif kecil, menunjukkan

pertumbuhan ke kelas diameter lebih besar terjadi pada proporsi pohon yang lebih sedikit dibanding Meranti. Nilai ingrowth pada kelas diameter terkecil (0,780) juga tinggi, menunjukkan proses regenerasi alami berjalan baik.

Tabel 7. Matrik transisi pertumbuhan untuk jenis kelompok Kayu Indah

	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.2	57.5	60+
G_{kayuindah}											
0.615											
0.231		0.600									
		1.000	0.250								
			1.000	0.500							
				1.000	1.00						
					1.00	1.000					
						1.000	0.00				
							0.00	1.000			
								0.00	0.00		
									0.00	0.00	
										0.00	0
	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

Diagonal kelas Diameter kecil (12,5–22,5 cm) menunjukkan peluang tetap di kelas yang sama dengan nilai diagonal utama pada kelas 12,5 cm adalah 0,615, artinya sekitar 61,5% pohon Kayu Indah tetap di kelas diameter ini pada satu periode. Upgrowth pada kelas 17,5 cm, peluang naik ke kelas berikutnya adalah 0,600, dan pada 22,5 cm sebesar 0,250. Nilai-nilai ini menunjukkan sebagian pohon tumbuh cukup cepat untuk naik kelas diameter. Nilai di atas 1: Pada kelas 22,5 cm (1,000) dan 27,5 cm (1,250). sedangkan pada kelas Diameter menengah dan besar (27,5–60+ cm), Stabilitas tinggi dengan nilai diagonal utama pada kelas-kelas diameter menengah hingga besar (misal, 1,000 pada 27,5 cm, 1,000 pada 32,5 cm, 1,000 pada 42,5 cm, dan 1,000 pada 52,2 cm) menunjukkan bahwa pohon yang sudah masuk kelas diameter ini cenderung bertahan di kelas yang sama. Upgrowth terbatas Nilai upgrowth pada kelas besar (misal, 0,500 pada 37,5 cm, 1,000 pada 47,5 cm) juga tinggi, namun nilai-nilai ini tetap perlu dicermati karena bisa jadi hasil dari data yang sangat terbatas. Kelas diameter terbesar (60+ cm): Nilai 0 pada kelas ini menandakan tidak ada pohon yang naik ke kelas lebih besar atau semua pohon tetap di kelas ini. Ingrowth untuk kelas diameter terkecil (12,5 cm) adalah 0,01, sangat kecil dibandingkan kelompok lain. Ini menandakan regenerasi alami Kayu Indah sangat terbatas, sehingga kelompok ini berpotensi menurun jika tidak ada intervensi silvikultur atau perlindungan khusus.

Kelompok jenis dilindungi seperti jenis Gaharu, Ganemo Nilai diagonal pada kelompok jenis dilindungi seperti jenis Cinnamomum spp., Gnetum gnemon. dan Aquilaria filaria. dengan nilai diagonal dalam tabel 8.

Tabel 8. Matrik transisi pertumbuhan untuk jenis kelompok Kayu Indah

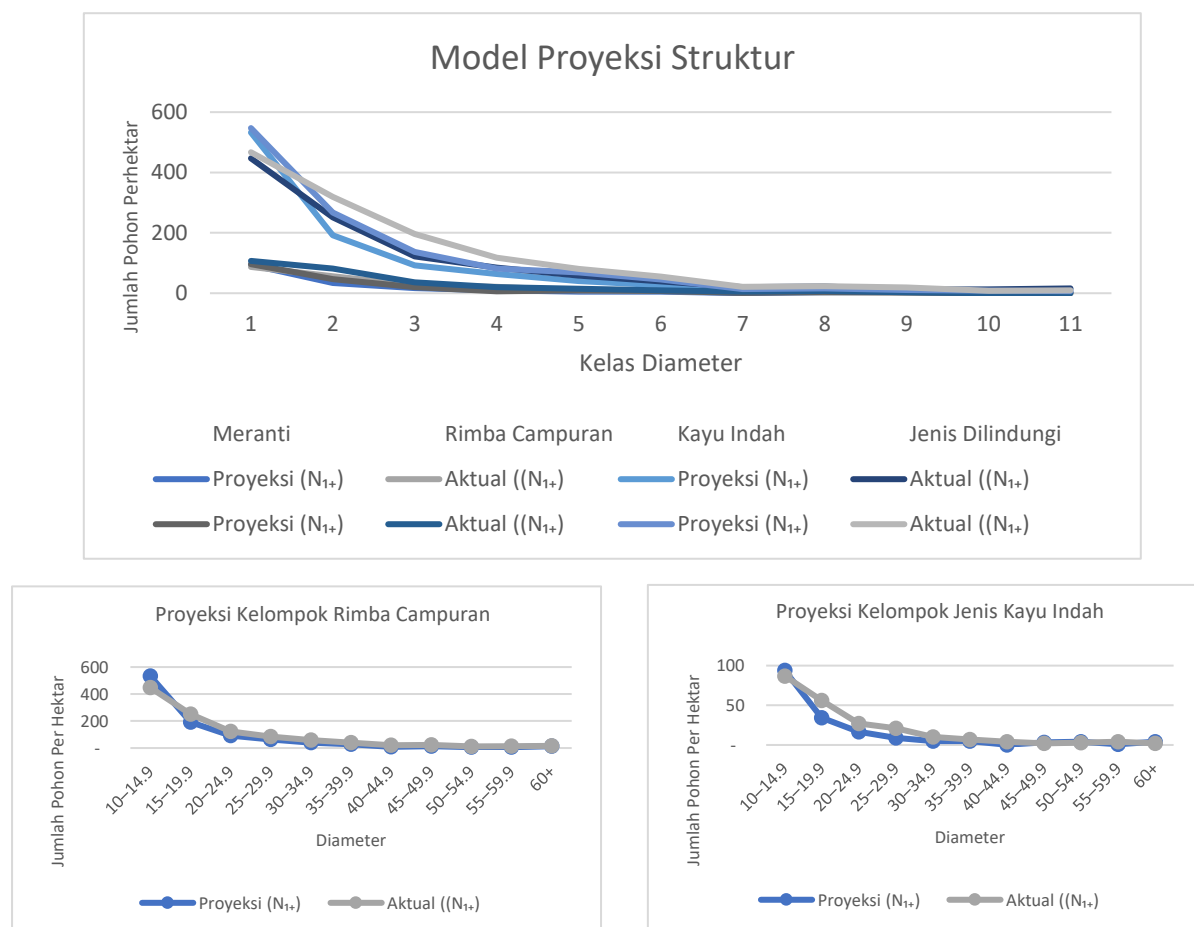
	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.2	57.5	60+
G_{jenis dilindungi}											
0.889											
0.111		0.857									
		-	0.00								
			0.00	1.00							
					0.00						
					0.00	0.00					
						0.00	0.00				
							0.00	0.00			

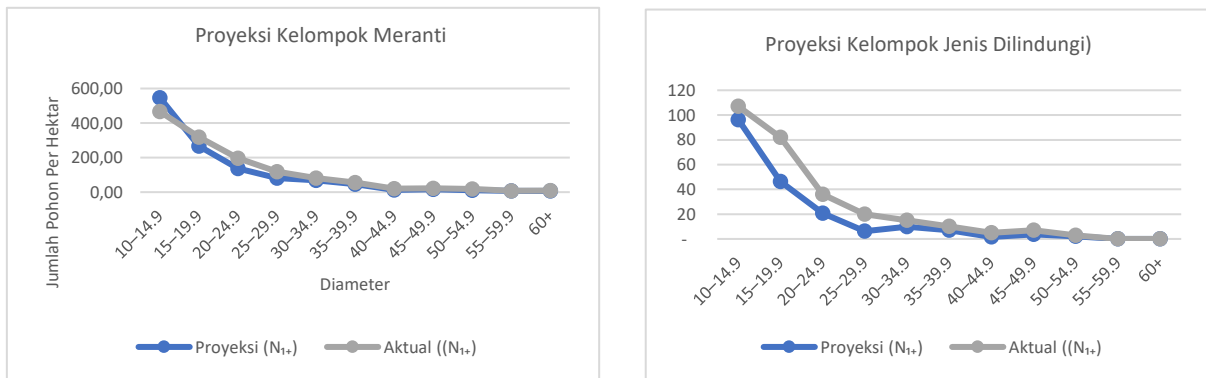
								0.00	0.00		
									0.00	0.00	
										0.00	0.00
0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

Nilai diagonal utama sangat tinggi (0,889 pada 12,5 cm, 0,857 pada 17,5 cm) dan hampir semua nilai di luar diagonal utama adalah nol, menandakan pohon kelompok ini sangat jarang berpindah kelas diameter atau mati. Nilai ingrowth sangat kecil (0,02), menunjukkan regenerasi alami sangat terbatas. Pertumbuhan dari jenis-jenis ini sangat lambat hampir tidak ada pohon yang naik kelas diameter atau mati, sehingga kelompok ini sangat stabil namun kurang dinamis

3.4. Proyeksi dan Validasi Model

Validasi model dinamika struktur tegakan dilakukan dengan memproyeksikan kondisi tegakan pada saat inventarisasi lapangan terakhir (tiga tahun setelah pengukuran awal PUP) dan membandingkannya dengan data aktual hasil pengamatan. Visualisasi perbandingan antara rata-rata jumlah pohon per kelas diameter menurut kelompok jenis pada setiap lokasi sampel menunjukkan bahwa prediksi struktur tegakan yang dihasilkan oleh model matriks transisi sangat sejalan dengan hasil pengamatan nyata di lapangan. Hal ini menandakan bahwa model tersebut cukup andal dalam merepresentasikan dinamika struktur tegakan pada periode evaluasi.





Gambar 4. Perbandingan struktur tegakan aktual dengan hasil dugaan model menurut kelompok jenis

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa keanekaragaman dan struktur tegakan awal hutan bekas tebangan di PT Wijaya Sentosa sangat bervariasi antar kelompok jenis. Kelompok Rimba Campuran memiliki keanekaragaman dan kepadatan tegakan tertinggi, diikuti oleh kelompok Meranti yang menunjukkan struktur relatif stabil. Sebaliknya, kelompok Kayu Indah dan Jenis Dilindungi menunjukkan kekayaan jenis dan biomassa yang rendah, sehingga kontribusi ekologisnya relatif kecil. Kompleksitas struktur tegakan dan keanekaragaman jenis sangat berperan dalam mendukung proses pemulihan dan kestabilan ekosistem hutan tropis bekas tebangan.

Model matriks transisi yang dikembangkan menggambarkan dinamika pertumbuhan tegakan melalui tiga parameter utama: ingrowth (rekrutmen pohon baru), upgrowth (alih tumbuh pohon ke kelas diameter lebih tinggi), dan mortality (kematian pohon). Proses ingrowth dipengaruhi terutama oleh kerapatan dan luas bidang dasar; semakin rapat suatu tegakan, semakin rendah laju rekrutmennya akibat kompetisi ruang tumbuh. Sebaliknya, upgrowth cenderung meningkat pada tegakan dengan jumlah pohon tinggi namun kepadatan rendah. Sementara itu, mortalitas meningkat pada tegakan yang sangat padat, menandakan pentingnya pengaturan ruang tumbuh dalam pengelolaan hutan.

Matriks transisi yang dibangun terbukti mampu memetakan perubahan struktur diameter pohon secara akurat. Proyeksi dua tahunan yang dihasilkan sangat mendekati data lapangan, sehingga model ini layak digunakan sebagai dasar dalam perencanaan pengelolaan hutan bekas tebangan yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Austregésilo, SL, Ferreira, RLC, da Silva, JAA, Souza, AL, Meunier, IMJ, Santos, ES, 2004. Perbandingan metode prognosis dari diameter bunga Floresta estacional semidecidual secundária. *Revista Árv.* 28 (2), 227–232.
- Alicia B. Lawrence, Francisco J. Escobedo, Christina L. Staudhammer, Wayne Zipperer (2012). Analyzing growth and mortality in a subtropical urban forest ecosystem. *Landscape and Urban Planning*, 104, 85-94
- Aubry-Kientz, M., Hérault, B., Ayotte-Trépanier, C., Baraloto, C., Rossi, V. (2013). A trait-based approach to modeling tree mortality in a tropical rain forest. *PLoS ONE*, 8(5), e63678

- Buongiorno, J., & Michie, B. (1980). A matrix model of uneven-aged forest management. *Forest Science*, 26(4), 609-625.
- Bunyan, M., Bardhan, S., Singh, A., & Jose, S. (2015). Effect of Topography on The Distribution Of Tropical Montane Forest Fragments : A Pre dictive Modelling Approach. *Journal of Tropical Forest Science*, 27(1), 30–38.
- Bollandsås, O.M., Buongiorno, J., & Gobakken, T. (2008). Predicting the long-term yield and structure of uneven-aged forests with a distance-independent tree model. *Forest Ecology and Management*, 256(3), 468–477.
- Castro-Luna, A., Castillo-Campos, G., & Sosa, V. (2011). Effects Of Selective Logging And Shifting Cultivation On The Structure And Diversity Of A Tropical Evergreen Forest In South-Eastern Mexico. *Journal of Tropical Forest Science*, 23(1), 17–34.
- Corlett, R. T. (2016). The Impacts of Droughts in Tropical Forests. *Trends in Plant Science*, Xx, (In Press).
- De Avila, A. L., Ruschel, A. R., De Carvalho, J. O. P., Mazzei, L., Silva, J. N. M., Lopes, J. Do C., ... Bauhus, J. (2015). Medium Term Dynamics of Tree Species Composition in Response to Silvicultural Intervention Intensities in A Tropical Rain Forest. *Biological Conservation*, 191, 577–586.
- Clark, J. S., Macklin, E., & Wood, L. (1999). Interpreting recruitment limitation in forests. *American Journal of Botany*, 86(1), 1–16.
- Chazdon, R. L., Redondo Brenes, A., Vilchez Alvarado, B. (2005). Effects of climate and stand age on annual tree dynamics in tropical second-growth rain forests. *Ecology*, 86(7), 1808–1815
- de Avila, A.L., Ruschel, A.R., de Carvalho, J.O.P., Mazzei, L., Silva, J.N.M., do Carmo Lopes, J., Araujo, M.M., Dormann, C.F. and Bauhus, J. (2015). Medium-term dynamics of tree species composition in response to silvicultural intervention intensities in a tropical rain forest. *Biological Conservation*, 191, pp.577-586.
- Esquivel-Muelbert, A., Phillips, O. L., Brien, R. J., et al. (2020). Tree mode of death and mortality risk factors across Amazon forests. *Nature Communications*, 11, 5515.
- Fortin, M., Power, H., Van Couwenberghe, R. N. I. Eskelson, B. (2024). The effect of climate on the occurrence and abundance of tree recruitment in the province of Quebec, Canada. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 97(1), 147–161.
- Gandini, M.L.T., & Queiroz, P.I.B. (2024). Compilation of methodology for the application of the Kolmogorov-Smirnov test and calculation of the p-value without the use of tables. *Proceedings of I Brazilian Event on Hydro-informatics*
- Hakim, I. (2009). Kajian kelembagaan dan kebijakan hutan tanaman rakyat: sebuah terobosan dalam menata kembali konsep pengelolaan hutan lestari. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*, 6(1).
- Husni, J., Rusolono, T., & Parthama, I.B.P. (1997). Studi Dinamika Pertumbuhan Hutan Alam Bekas Tebangan di HPH PT. Asialog Propinsi Jambi dan Menyusun Model Proyeksinya. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/145240>
- Jhariya, M. K., Banerjee, A., Meena, R. S., & Yadav, D. K. (Eds.). (2019). *Sustainable agriculture, forest and environmental management*. Springer.
- Iriyono, S., Withaningsih, S., Gunawan, B., & Iskandar, J. (2023). Autopoetic Dynamics of the Illegal Logging System in Papua Forest. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 29(1), 56-56.
- Krisnawati, H., Wahjono, D., & Kallio, M. (2008). Model Pertumbuhan Tegakan Hutan Alam Bekas Tebangan dengan Sistem Tebang Pilih di Papua. *Balai Besar Penelitian Dipterokarpa*
- Krisnawati, H. (2003). Struktur tegakan dan komposisi jenis hutan alam bekas tebangan di Kalimantan Tengah. *Buletin Penelitian Hutan*, 639(2003), 1-9.
- Kuswandi, R. (2014). The Effect of Silvicultural Treatment on Stand Growth of Logged-Over Forest in South Papua. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 1(2), 117–126.
- Kuswandi, R. (2017). Model pertumbuhan tegakan hutan alam bekas tebangan dengan sistem tebang pilih di Papua. *Jurnal Pemuliaan Tanaman Hutan*, 11(1), 45-56.
- Kuswandi, R. (2015). Model Pertumbuhan Tegakan Hutan Alam Bekas Tebangan dengan Sistem Tebang Pilih di Papua.

<https://media.neliti.com/media/publications/229184-model-pertumbuhan-tegakan-hutan-alam-bek-59988bef.pdf>

- Kuswandi, R., & Murdjoko, A. (2015). Population Structures of Four Tree Species in Logged-Over Tropical Forest in South Papua, Indonesia : An Integral Projection Model Approach. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 2(2), 93–101.
- Kuswandi, R & Nugroho. (2019). Riap diameter tegakan hutan alam bekas tebangan di Papua. *WASIAN*, 6 (2): 125-133.
- Kuswandi, R. (2023). Stand Structure Dynamic of Logged Over Forest after Selective Timber Harvesting in Boven Digoel, Papua. *Academia.edu*.
https://www.academia.edu/123877094/Stand_Structure_Dynamic_of_Logged_Over_Forest_after_Selective_Timber_Harvesting_in_Boven_Digoel_Papua
- Kempes, C.P., Choi, S., Dooris, W., & West, G.B. (2015). Predicting whole forest structure, primary productivity, and biomass density from maximum tree size and resource limitations. *arXiv preprint arXiv:1506.01691*
- Lu, X., Zang, R., & Huang, J. (2015). Relationships between community level functional traits of trees and seedlings during secondary succession in a tropical lowland rainforest. *PloS one*, 10(7), e0132849.
- Liang, J., & Picard, N. (2013). Model Matriks Dinamika Hutan: Tinjauan dan Prospek. *Ilmu Kehutanan*, 59(3), 359–378
- Lamprecht, H. (1989). *Silviculture in the Tropics: Tropical Forest Ecosystems and Their Tree Species—Possibilities and Methods for Their Long-Term Utilization*. GTZ.
- Lawrence, A. B., Escobedo, F. J., Staudhammer, C. L., Zipperer, W. (2012). Analyzing growth and mortality in a subtropical urban forest ecosystem. *Landscape and Urban Planning*, 104, 85-94
- Latouche, G., & Ramaswami, V. (1999). *Introduction to Matrix Analytic Methods in Stochastic Modeling*. ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability.
- Lootens, JR, Larsen, DR, & Loewenstein, EF (2000). Model transisi matriks untuk hutan ek-hikari yang tidak merata umurnya di Missouri Ozark Highlands
- Husni, J., Rusolono, T., & Parthama, I. B. P. (1997). Studi dinamika pertumbuhan hutan alam bekas tebangan di HPH PT. Asialog Jambi. Institut Pertanian Bogor
- Hamilton, J.D. (1989). "A New Approach to the Economic Analysis of Nonstationary Time Series and the Business Cycle." *Econometrica*, 57(2), 357–384
- Mendoza, G.A., & Setyarso, A. (1986). Matrix models for uneven-aged forest management: A review. *Forest Ecology and Management*, 15(4), 279–292
- Muhdin, R., Rusolono, T., & Parthama, I.B.P. (2011). Pendugaan Dinamika Struktur Tegakan Hutan Alam Bekas Tebangan. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 17(1), 1–9.
<https://journal.ipb.ac.id/index.php/jmht/article/download/3260/2194>
- Matsuo, A., et al. (2024). Height growth and biomass partitioning during secondary succession differ among forest light strata and successional guilds in a tropical rainforest. *Oikos*.
<https://nsojournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/oik.10486>
- Murdjoko, A. (2013). Recuperation of Non-Commercial Trees In Logged Forest in Southern Papua, Indonesia. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 19(2), 94–102.
- Nugroho, W., & Eko Prasetyo, M. S. (2019). Forest Management and Environmental Law Enforcement Policy against Illegal Logging in Indonesia. *International Journal of Management*, 10(6).
- Puterman, M.L. (1994). *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. Wiley
- Rusolono, T., Tiryan, T., & Suhendang, E. (2019). Model dinamika tegakan merbau (Intsia bijuga) di hutan alam Papua. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 25(1), 1-11
- Rahmadanty, A., Handayani, I. G. A. K. R., & Najicha, F. U. (2021). Kebijakan pembangunan kesatuan pengelolaan hutan di Indonesia: suatu terobosan dalam menciptakan pengelolaan hutan lestari. *Al-Adl: Jurnal Hukum*, 13(2), 264-283.
- Sandor, M. E., & Chazdon, R. L. (2014). Remnant Trees Affect Species Composition But Not Structure Of Tropical Second-Growth Forest. *Plos One*, 9(1), e83284.
- Sist, P., Mazzei, L., Blanc, L., & Rutishauser, E. (2003). Sustainable management of mixed dipterocarp forests in Borneo: A review of ecological constraints and implications for silvicultural practices and forest certification. *Annals of Forest Science*, 60(7), 627–639

- Sokal, R.S., Rohlf, F.J., 1995. Biometry, fourth ed W.H. Freeman Co., New York. Solomon, D.C., Hosmer, R.A., Hayslett, J.R.H.T., 1986. A two-stage matrix model for predicting growth of forest stands in Northeast. Can. J. For. Res. 16, 521–528.
- Vanclay, J.K. (1994). Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests. CAB International, Wallingford, UK.
- Vázquez-Veloso, A., Pando, V., Ordóñez, C., & Bravo, F. (2023). Evaluation and validation of forest models: Insight from Mediterranean and scots pine models in Spain. Ecological Informatics, 76, 102134
- Volin, J.C., & Buongiorno, J. (1996). A matrix growth model for uneven-aged northern hardwood stands. Canadian Journal of Forest Research, 26(12), 2187–2195
- Whitmore, T.C. (1998). An Introduction to Tropical Rain Forests (2nd ed.). Oxford University Press.
- Zell, J., Rohner, B., Thürig, E., & Stadelmann, G. (2019). Modeling ingrowth for empirical forest prediction systems. Forest Ecology and Management, 433, 729–740.
- Zeide, B. (2005). Stand dynamics: Growth and mortality. In: Thirteenth Biennial Southern Silvicultural Research Conference.