

**DINAMIKA KARBON HUTAN ALAM DIPTEROKARPA DATARAN RENDAH DALAM
SISTEM SILVIKULTUR TPTI BARU DI KALIMANTAN TENGAH**
*Forest Carbon Dynamics in Lowland Dipterocarp Forests under New TPTI System
in Central Kalimantan*

Yonky Indrajaya

Balai Penelitian Teknologi Agroforestry

dapat ditebang yang berarti meningkatnya degradasi hutan. Beberapa penelitian di hutan alam sekunder menyebutkan bahwa jumlah pohon yang dipanen dalam satu hektar sangat menentukan kelestarian produksi hutan (Bertault and Sist, 1997; Sist, 1998; Sist, 2003b), walaupun telah dilakukan teknik pemanenan yang berdampak rendah (

) yang dipercaya dapat mengurangi kerusakan tegakan tinggal (Putz, 2008b; Sasaki *et al.*, 2012)(Putz, 2008a; Putz, 2008b; Sasaki, 2012).

Selain itu, daur tebangan juga diperpendek dari 35 tahun menjadi 30 tahun, yang berarti dapat diasumsikan bahwa tegakan tinggal yang sama akan menghasilkan tegakan yang kurang lebih sama pada saat sebelum penebangan. Beberapa penelitian justru menganjurkan diperpanjangnya daur penebangan di hutan alam untuk dapat tercapainya kelestarian hutan (Sist, 2003a; Priyadi, 2007), karena kondisi hutan sebelum penebangan bisa dicapai kembali setelah 90 tahun (Sist, 2003a) dalam hal karakteristik populasinya. Penelitian yang dilakukan oleh Pinard and Cropper (2000) menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan oleh hutan setelah penebangan untuk mencapai kondisi ekosistem karbon seperti hutan sebelum penebangan (hutan perawan) adalah hingga 500 tahun. Penelitian yang dilakukan oleh Samsuudin (2009) dan Dharmawan and Samsuudin (2012) di Kalimantan Timur juga menunjukkan bahwa apabila hutan dikelola dengan baik maka setelah 30 tahun penebangan, potensi biomassa karbonnya telah mendekati hutan alam. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan oleh suatu hutan yang dikelola dengan tebang pilih kembali kepada kondisi semula adalah kurang lebih 45 tahun di French Guiana (Blanc, 2009), 80 - 100 tahun di Malaysia (Huth and Ditzer, 2001). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika cadangan karbon yang terjadi pada hutan alam produksi apabila dilakukan kegiatan pembalakan dengan sistem silvikultur Tebang Pilih Tanam Indonesia berdasarkan Permenhut No 11/2009

(Kementerian Kehutanan, 2009).

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Model Pertumbuhan Hutan Alam

Untuk mengetahui perubahan cadangan karbon dalam hutan alam, diperlukan model pertumbuhan yang dapat menggambarkan perubahan yang terjadi. Salah satu model pertumbuhan yang banyak digunakan di hutan alam produksi adalah matriks transisi (Mendoza and Setyarso, 1986; Sianturi, 1990; Ingram and Buongiorno, 1996; Boscolo and Buongiorno, 1997; Mendoza, 2000; Sist, 2003a; Krisnawati, 2008). Model pertumbuhan yang digunakan dalam penelitian ini adalah model pertumbuhan matriks transisi yang dibangun oleh Krisnawati (2008) berdasarkan pengamatan pada beberapa petak ukur permanen di sebuah perusahaan pemegang konsesi hutan (IUPHHK/Ijin Usaha Pemanfaatan Hasil Hutan Kayu) di Kalimantan Tengah. Spesifikasi model pertumbuhan matriks transisi yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada paragraf berikut.

Pada waktu t suatu tegakan hutan direpresentasikan oleh vector kolom $\mathbf{y}_t = \begin{bmatrix} y_{ijt} \end{bmatrix}$, dimana y_{ijt} merupakan jumlah pohon per ha dari kelompok jenis $i \in \{1, \dots, m\}$ dan kelas diameter $j \in \{1, \dots, n\}$. Jumlah pohon yang ditebang direpresentasikan oleh vector $\mathbf{h}_t = \begin{bmatrix} h_{ijt} \end{bmatrix}$. Sebuah pohon yang hidup pada kelompok jenis i dan kelas diameter j pada waktu t akan (pada waktu $t + \theta$): (1) mati, dengan probabilitas a_{ij} atau (2) tetap hidup dan pindah dari ke kelas diameter j ke kelas diameter k , dengan probabilitas b_{ijk} atau (3) tetap hidup dan tetap pada kelas diameter j , dengan probabilitas $c_{ij} = 1 - a_{ij} - \sum_k b_{ijk}$. Parameter θ merepresentasikan interval pertumbuhan, yaitu lamanya periode tumbuh (tahun).

Marilah kita notasikan y_{ijt} sebagai yaitu jumlah pohon yang memasuki kelas diameter terkecil dari kelompok jenis i selama kurun waktu θ . Tegakan hutan pada waktu $t + \theta$ ditentukan oleh kondisi keseluruhan tegakan pada waktu t , jumlah pohon yang ditebang pada waktu

dan selama kurun waktu θ . Keadaan ini dapat direpresentasikan dalam persamaan-persamaan berikut:

$$i_{i,t+\theta} = i_{i,t} + i_{i,1} (i_{i,1,t} - i_{i,1,t})$$

...

$$i_{i,n,t+\theta} = i_{i,n-1,t} (i_{i,n-1,t} - i_{i,n-1,t}) + i_{i,n} (i_{i,n,t} - i_{i,n,t})$$

di dipengaruhi oleh kondisi tegakan (yaitu basal area dan jumlah pohon). Fungsi merupakan fungsi dari luas bidang dasar B_{ij} , kondisi tegakan awal dan jumlah pohon yang dipanen:

$$i_t = \beta_{0i} + \beta_{1i} \sum_{j=1}^n (ij - ij_t) + \beta_{2i} \sum_{j=1}^n (ij_t - ij_t) \quad (2)$$

Mensubstitusikan persamaan (2) ke dalam persamaan (1) akan dihasilkan:

$$i_{i,t+\theta} = \beta_{0i} + i_{i,1} (i_{i,1,t} - i_{i,1,t}) + \dots + i_{i,n} (i_{i,n,t} - i_{i,n,t}) \quad (3)$$

dimana:

$$e_{i1} = a_{i1} + \beta_{1i} B_{i1} + \beta_{2i} \quad (4)$$

$$e_{ij} = \beta_{1i} B_{ij} + \beta_{2i} \text{ for } j > 1 \quad (5)$$

Kondisi tegakan setelah pemanenan akan menjadi:

$$y_{t+\theta} = G(y_t - h_t) + c \quad (6)$$

$$G = A + R \quad (7)$$

dimana:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A \end{bmatrix}; A_i = \begin{bmatrix} a_{i1} & & & 0 \\ b_{i2} & a_{i2} & & \\ & \ddots & \ddots & \\ 0 & & b & a \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_1 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_1 & R_2 & \dots & R \end{bmatrix}; R_{ii} = \begin{bmatrix} e_{i1} & e_{i2} & \dots & e_{in} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c \end{bmatrix}; c_i = \begin{bmatrix} \beta_{i0} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Matriks G merupakan matriks pertumbuhan, A adalah matriks x yang terdiri dari matriks A_i untuk jenis i . Matriks ini merepresentasikan probabilitas dari suatu pohon untuk tetap hidup pada kelas diameter yang sama j , atau pindah ke kelas diameter j . Matriks R merupakan matriks yang merepresentasikan pengaruh dari struktur tegakan pada probabilitas suatu pohon memasuki kelas diameter terkecil pada satu periode pertumbuhan. Vektor c terdiri dari konstanta yang merepresentasikan jumlah pohon yang masuk dalam kelas diameter terkecil j pada tiap kelompok jenis tanpa terpengaruh oleh kondisi tegakan.

B. Perhitungan Cadangan Karbon dalam Biomassa

Estimasi berat biomassa di atas permukaan tanah menggunakan persamaan alometrik yang dibangun oleh Chave (2005), yaitu:

$$= \rho \times \exp(-1.499 + 2.148 \ln(\rho) + 0.207(\ln(\rho))^2 - 0.028(\ln(\rho))^3) \quad (11)$$

dimana AGB merupakan berat biomassa di atas permukaan tanah (kg/pohon), ρ merupakan berat jenis kayu (gr/cm³), dan d merupakan diameter setinggi dada (cm). Berat jenis kayu yang digunakan adalah 0,6 (Rahayu, 2006). Jumlah karbon tersimpan dalam biomassa adalah sebesar 0,47 dari berat biomassanya (IPCC, 2006). Berat karbon pada tiap kelompok jenis i dan kelas diameter j disajikan dalam vektor e .

C. Skenario Pengelolaan Hutan

Skenario pengelolaan hutan dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengelolaan hutan akan berpengaruh terhadap cadangan karbon pada tegakan tinggal. Dalam penelitian ini, diasumsikan semua kayu yang ditebang dan rusak akan teroksidasi ke atmosfer pada saat terjadi kegiatan penebangan. Sistem penebangan yang dilakukan adalah sistem konvensional tanpa mempertimbangkan besarnya kerusakan tegakan tinggal yang terjadi. Daur yang digunakan adalah 30 dan 36 tahun dan batas diameter yang ditebang adalah 40 dan 50 cm. Intensitas tebang atau

jumlah pohon yang ditebang yang ditebang adalah 4, 8, dan 12 pohon per ha.

D. Parameterisasi Model Pertumbuhan

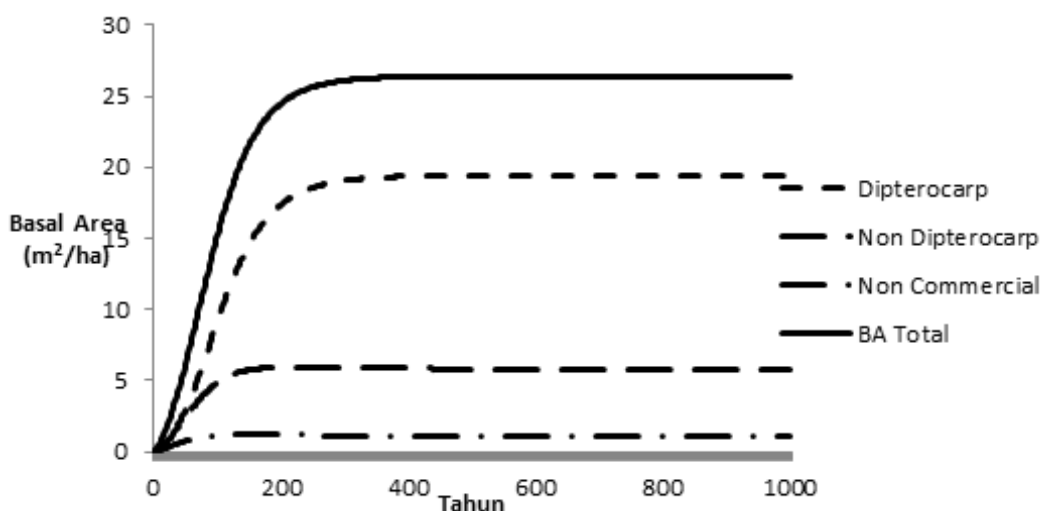
Penelitian ini menggunakan model pertumbuhan matriks transisi yang dibangun oleh Krisnawati (2008) yang dilakukan di hutan alam produksi Dipterokarpa dataran rendah di Kalimantan Tengah dengan ketinggian 190-225 mdpl. Jenis tanah di lokasi penelitian adalah podzolik. Curah hujan rata-rata adalah 3.520 mm dengan rentang suhu 24.3-27,4°C. Spesifikasi model pertumbuhan matriks transisi dapat dijelaskan secara rinci pada bagian berikutnya.

Periode pertumbuhan θ yang digunakan adalah 2 tahun. Jenis pohon dikelompokkan menjadi tiga kelompok jenis i dimana $i=1$ untuk kelompok jenis komersial Dipterokarpa, $i=2$ untuk kelompok jenis komersial non-Dipterokarpa, dan $i=3$ untuk jenis non komersial. Tiap kelompok jenis terdiri dari 13 kelas diameter

j dengan rentang 5 cm, dimana $j=1$ untuk kelas diameter 10-15cm, seterusnya hingga $j=13$ untuk kelas diameter > 70 cm.

Validasi model pertumbuhan matriks transisi jangka pendek telah dilakukan oleh Krisnawati (2008) yaitu dengan membandingkan frekuensi pohon yang ada pada tiap kelompok jenis dan tiap kelas diameter yang dihasilkan oleh model dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Hasilnya adalah tidak ada perbedaan yang nyata antara estimasi model dengan kondisi sebenarnya. Karena model ini hanya divalidasi jangka pendek, maka perlu dilakukan validasi jangka panjang.

Mengikuti Bollandas (2008) dan Sist (2003a), validasi jangka panjang dilakukan dengan menjalankan model pada tanah kosong (tanpa tegakan awal) untuk jangka waktu yang cukup lama, misalnya 1000 tahun. Hasilnya seperti disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Prediksi Luas Bidang Dasar Jenis Komersial dan Non Komersial

Sumber: Krisnawati (2008)

Gambar 1 menunjukkan bahwa hutan klimaks dicapai pada umur kurang lebih 300 tahun dan stabil hingga umur 1000 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa model pertumbuhan matriks transisi dapat diandalkan untuk memprediksi tegakan hutan alam produksi dalam jangka panjang.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Komposisi dan Struktur Tegakan Hutan Klimaks

Pada tegakan hutan alam bekas tebangan, komposisi tegakan didominasi oleh jenis Dipterokarpa (Gambar 2). Hal ini diduga karena karena pertumbuhan jenis Dipterokarpa

yang lebih cepat dibandingkan dengan yang jenis lain (Vanclay, 1994; Priyadi, 2007) akan berakibat pada tingginya populasi jenis Dipterokarpa di hutan bekas tebangan. Pada kondisi hutan klimaks setelah pemanenan apabila

tidak dilakukan penebangan, total basal area adalah sebesar 26,4 m²/ha dan jumlah karbon tersimpan dalam biomassa adalah sebanyak 180 ton/ha.

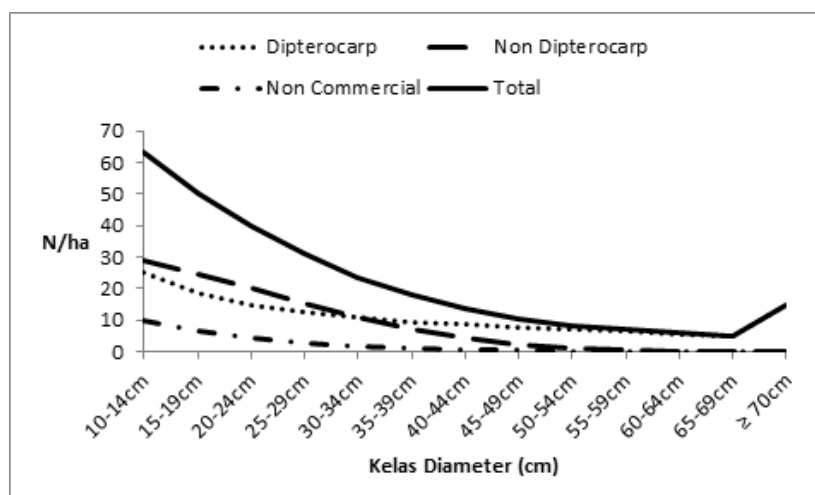
Tabel 1. Karakteristik Tegakan Hutan Klimaks Tanpa Penebangan

	Dipterokarpa	Non-Dipterokarpa	Non komersial	Total
Populasi (N/ha)	146.4	115.8	28.3	290.5
Basal Area (m ² /ha)	19.4	5.8	1.1	26.4
Volume (m ³ /ha)	270	51	9	330
Karbon Tersimpan Dalam Biomasa di Atas Permukaan (Mg C ha ⁻¹)	142	32	6	180

Sumber: diolah dari data primer

Tabel 1 menunjukkan karakteristik tegakan di hutan alam bekas tebangan didominasi oleh tegakan dengan kelas diameter rendah, semakin menurun dengan meningkatnya kelas diameter mengikuti bentuk huruf J terbalik. Hal ini

menunjukkan bahwa hutan alam bekas tebangan dalam kondisi normal. Struktur tegakan hutan berdasarkan matriks transisi dapat disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Tegakan Hutan Klimaks Berdasarkan Matriks Transisi

Sumber: diolah dari data primer

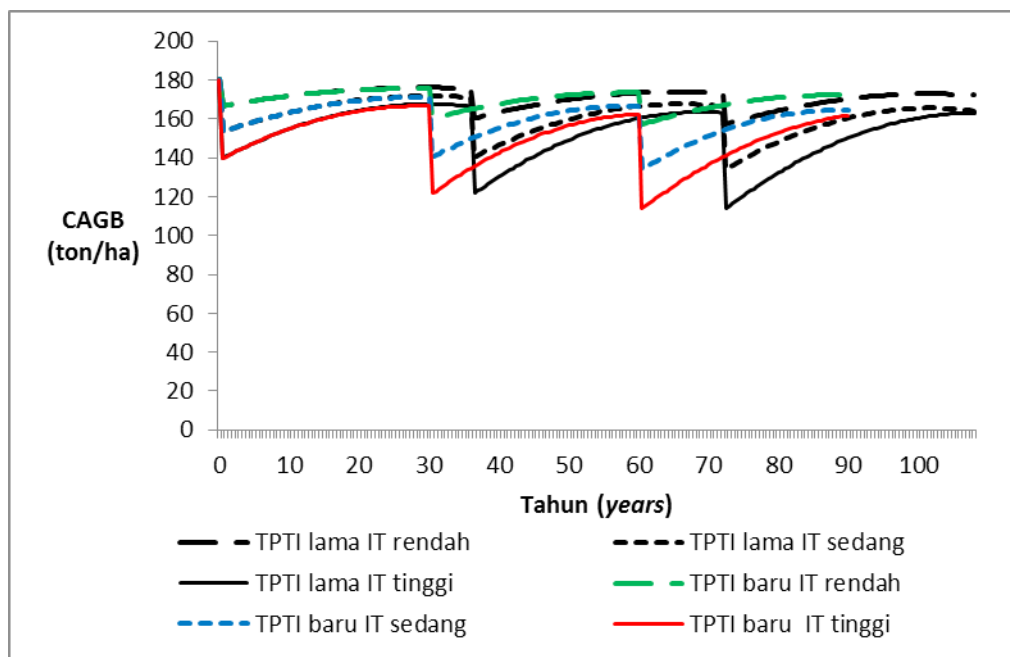
B. Dinamika Cadangan Karbon dalam Sistem Silvikultur TPTI Tanpa Adanya Kerusakan pada Tegakan Tinggal

Intensitas tebangan atau jumlah pohon yang dipanen per ha berpengaruh terhadap tegakan tinggal (Bertault and Sist, 1997; Sist, 1998;

Priyadi, 2007). Intensitas tebangan yang disimulasikan dalam penelitian ini mengikuti Priyadi (2007) yaitu intensitas tebangan rendah, sedang, dan tinggi dengan jumlah pohon ditebang berturut-turut sebanyak 4, 8, dan 12 pohon. Karena keterbatasan matriks transisi yang

dimiliki, dimana waktu pertumbuhan diukur tiap 2 tahun, maka daur TPTI lama diasumsikan selama 36 tahun. Sementara itu, dalam sistem TPTI baru, daur tebangan yang digunakan adalah

30 tahun. Dinamika cadangan karbon hutan dengan sistem TPTI lama dan baru disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Dinamika Karbon Tersimpan Dalam Biomassa Hutan Produksi Dipterokarpa pada Beberapa Intensitas Penebangan Dengan Sistem TPTI Lama dan Baru

Sumber: diolah dari data primer

Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin tinggi intensitas penebangan, semakin rendah pula karbon tersimpan dalam biomassa hutan. Pada sistem TPTI lama dengan intensitas tebangan tinggi, sedang dan rendah (yaitu 12, 8 dan 4 pohon per ha), jumlah karbon tersimpan dalam biomassa hutan rata-rata selama 3 daur berturut-turut adalah sebanyak 143, 155, dan 168 ton per ha. Sementara itu, pada sistem TPTI baru, karbon tersimpan di atas permukaan tanah rata-rata pada intensitas tebangan tinggi, sedang dan rendah berturut-turut adalah sebesar 140, 153, dan 167 ton per ha. Jumlah karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah rata-rata 3 daur antara TPTI lama dan TPTI baru tidak banyak berbeda.

Apabila dibandingkan dengan karbon tersimpan dalam biomassa hutan tak terganggu e.g. Indrajaya (2013) atau Samsuedin (2009), maka rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa

hutan dengan berbagai intensitas tebangan relatif lebih rendah. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Samsuedin (2009), pada siklus tebangan 30 tahun, pada penelitian ini terlihat bahwa jumlah karbon tersimpan dalam biomassa hutan belum mencapai kondisi awal hutan sebelum penebangan, yaitu sebesar 180 ton per ha. Pada tahun penebangan, cadangan karbon hutan pada hutan bekas tebangan dengan intensitas tebangan tinggi, sedang, dan rendah berturut-turut adalah sebanyak 141, 154, dan 167 ton per ha. Sedangankan, pada tahun ke-30 setelah penebangan pertama, atau sesaat sebelum penebangan berikutnya, cadangan karbon dalam hutan dengan intensitas tebangan tinggi, sedang, dan rendah berturut-turut adalah sebanyak 160, 167, dan 174 ton per ha.

Apabila dibandingkan, rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah dalam satu daur (36 tahun untuk TPTI lama

vs 30 tahun untuk TPTI baru) pada hutan dengan sistem TPTI lama dan baru kurang lebih sama. Nilai rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah disajikan dalam Tabel 2. Walaupun TPTI lama memiliki daur yang relatif lebih panjang, namun demikian tingkat pertumbuhan hutan Dipterokarpa yang relatif lambat tidak memberikan penambahan cadangan

karbon yang signifikan. Pada intensitas tebangan yang lebih rendah, penambahan waktu selama 6 tahun hanya akan menambah cadangan karbon sebanyak $\pm 0,6 - 1$ ton/ha. Sementara itu, pada intensitas tebangan tinggi, penambahan waktu daur selama 6 tahun akan menambah cadangan karbon sebanyak $\pm 1,8 - 2,9$ ton/ha.

Tabel 2. Rata-Rata Karbon Tersimpan Dalam Biomassa di Atas Permukaan Tanah (Dalam Ton/Ha)

TPTI	Daur (<i>Rotation</i>)	Intensitas Tebangan ()		
		Rendah ()	Sedang ()	Tinggi ()
Lama ()	1	171.2	162.3	153.3
	2	166.9	153.7	140.6
	3	164.9	149.5	134.4
Baru ()	1	170.6	161.1	151.5
	2	166.1	151.9	138
	3	163.9	147.5	131.5

Sumber: diolah dari data primer

Berdasarkan uji t terhadap dua rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa hutan yang dikelola dengan TPTI lama dan baru, dapat ditarik kesimpulan bahwa karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah hutan yang dikelola dengan TPTI lama dan baru tidak berbeda nyata secara statistik. Hasil uji t disajikan dalam Lampiran 3.

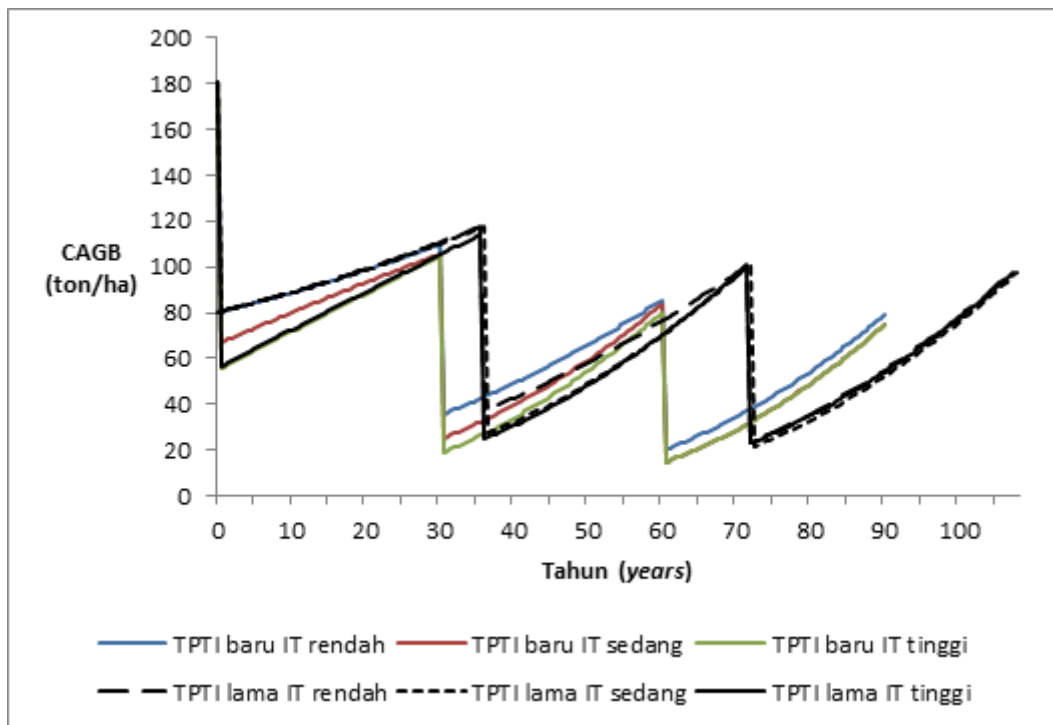
C. Dinamika Cadangan Karbon dalam Sistem Silvikultur TPTI dengan Adanya Kerusakan pada Tegakan Tinggal

Kegiatan pembalakan di hutan alam juga dapat berdampak pada kerusakan yang terjadi di tegakan tinggal. Oleh karena itu, simulasi dinamika cadangan karbon juga dilakukan dengan memperhatikan adanya kerusakan tegakan tinggal. Dalam penelitian ini kerusakan tegakan tinggal diasumsikan sebesar 48% (Bertault and Sist, 1997; Sist, 1998; Sist, 2003b), yaitu kerusakan tegakan tinggal dengan menggunakan teknik penebangan konvensional.

Pada penebangan dengan teknik konvensional, tingkat kerusakan tegakan yang terjadi berakibat pada menurunnya jumlah karbon tersimpan

dalam biomassa dalam satu daur tebangan. Dinamika karbon tersimpan dalam biomassa hutan akibat kegiatan pembalakan dengan memperhatikan kerusakan pada tegakan tinggal pada sistem TPTI lama dan baru dapat disajikan dalam Gambar 4.

Gambar 4 menunjukkan adanya penurunan karbon tersimpan dalam biomassa hutan setelah adanya kegiatan penebangan. Dengan memperhatikan adanya kerusakan yang terjadi, rata-rata jumlah karbon tersimpan dalam biomassa hutan menjadi berkurang cukup signifikan dibandingkan dengan tanpa memperhatikan adanya kerusakan pada tegakan tinggal. Asumsi tingkat kerusakan yang cukup tinggi yaitu sebesar 48% menyebabkan rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa hutan menjadi berkurang cukup besar (Tabel 3). Namun secara statistik rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa hutan yang dikelola dengan sistem TPTI lama dan baru tidak berbeda secara nyata pada taraf 5% (Lampiran 4).



Gambar 4. Dinamika Karbon Tersimpan Dalam Biomassa Hutan Produksi Dipterokarpa pada Beberapa Intensitas Penebangan Dengan Sistem TPTI Lama dan Baru Dengan Kerusakan Pada Tegakan Tinggal

Sumber: diolah dari data primer

Tabel 3. Rata-Rata Karbon Tersimpan Dalam Biomassa di Atas Permukaan Tanah Per Daur pada Sistem TPTI Lama dan Baru Dengan Beberapa Intensitas Penebangan dan Kerusakan Tegakan Tinggal (Dalam Ton/Ha)

TPTI	Intensitas Tebangan ()	Daur (<i>Rotation</i>)		
		1	2	3
Lama ()	Rendah ()	68.48	31.03	25.97
	Sedang ()	77.31	36.76	25.99
	Tinggi ()	86.85	46.45	31.60
Baru ()	Rendah ()	70.95	39.63	37.41
	Sedang ()	79.34	41.61	36.20
	Tinggi ()	88.30	50.70	38.09

Sumber: diolah dari data primer

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas, dapat ditarik kesimpulan:

1. Karbon tersimpan dalam biomassa hutan yang dikelola dengan sistem TPTI baru dengan daur 30 tahun lebih rendah dibandingkan karbon tersimpan dalam biomassa hutan yang dikelola dengan sistem TPTI lama dengan

daur 36 tahun

2. Peningkatan intensitas tebangan menyebabkan perbedaan karbon tersimpan dalam biomassa yang semakin tinggi antara sistem TPTI lama dan baru

B. Saran

Simulasi dinamika cadangan karbon yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode model pertumbuhan matriks transisi

yang dibangun di Kalimantan Tengah. Cadangan karbon yang tersimpan dalam biomassa hutan yang digunakan dalam penelitian ini hanya karbon tersimpan dalam biomassa di atas permukaan tanah. Penelitian lebih lanjut dengan beberapa alternatif pengelolaan hutan alam termasuk perbedaan daur, intensitas tebangan, diameter minimal yang boleh ditebang, dan teknologi pemanenan yang digunakan akan menarik untuk dilakukan terkait dengan cadangan karbon hutannya. Selain itu, perhitungan cadangan karbon dalam kayu yang dipanen dan kerusakan hutan juga menarik untuk dilakukan untuk memperkaya informasi dinamika karbon hutan alam Dipterokarpa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dr. Haruni Krisnawati atas model matriks transisi yang diberikan dan diskusi tentang pertumbuhan hutan alam Dipterokarpa yang sangat bermanfaat. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Harry Priyadi dan Dr. Plinio Sist atas bimbingan mereka dalam memahami teknik pemanenan kayu di hutan alam produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bertault, J.G., Sist, P. (1997). An experimental comparison of different harvesting intensities with reduced-impact and conventional logging in East Kalimantan, Indonesia. 94, 209-218.
- Blanc, L., Echard, M., Herault, B., Bonal, D., Marcon, E., Chave, J., Baraloto, C. (2009). Dynamics of aboveground carbon stocks in a selectively logged tropical forest. 19, 1397-1404.
- Bollandsas, O.M., Buongiorno, J., Gobakken, T., (2008). Predicting the growth of stands of trees of mixed species and size: A matrix model for Norway. *Research* 23, 167-178.
- Boscolo, M., Buongiorno, J. (1997). Managing a tropical rainforest for timber, carbon storage and tree diversity. 76, 246-254.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. 145, 87-99.
- Dharmawan, I.W.S., Samsuudin, I. (2012). Dinamika Potensi Biomassa Karbon Pada Lanskap Hutan Bekas Tebangan Di Hutan Penelitian Malinau. 9.
- Huth, A., Ditzer, T. (2001). Long-term impacts of logging in a tropical rain forest—a simulation study. 142, 33-51.
- Indrajaya, Y. (2013). Cadangan karbon Hutan Lindung Long Ketrok di Kabupaten Malinau, Kalimantan Timur, untuk mendukung mekanisme REDD+. 10, 99-199.
- Ingram, C.D., Buongiorno, J. (1996). Income and diversity tradeoffs from management mixed lowland dipterocarps in Malaysia. 9, 242-270.
- IPCC. (2006). IPCC Guideline 2006: Guidelines for national green house gas inventories. In: IPCC.
- Kementerian Kehutanan. (2009). Peraturan Menteri Kehutanan Nomor: P.11/Menhut-II/2009 tentang Sistem silvikultur dalam areal izin usaha pemanfaatan hasil hutan kayu pada hutan produksi. In: Kementerian Kehutanan, Jakarta.
- Krisnawati, H., Suhendang, E. Parthama, I.P. (2008). Transition matrix growth models for logged over natural forest in Central Kalimantan. 5, 107-128.
- Mendoza, G.A., Onal, H., Soetjpto, W. (2000). Optimizing tree diversity and economic returns from managed mixed forests in Kalimantan, Indonesia. 12, 298-319.
- Mendoza, G.A., Setyarso, A., (1986). A Transition Matrix Forest Growth-Model for Evaluating Alternative Harvesting Schemes in Indonesia. 15, 219-228.
- Murdiyarso, D., Skutsh, M., Guariguata, M., Kanninen, M., Luttrell, C., Verweij, P., Martins, O.S. (2008). How do we measure and monitor forest degradation. In: Angelsen, A. (Ed.),

- Moving ahead with REDD: Issues, options, and implications. CIFOR, Bogor Indonesia.
- Pinard, M.A. & Cropper, W.P. (2000). Simulated effects of logging on carbon storage in dipterocarp forest. *37*, 267-283.
- Priyadi, H., Sist, P., Gunarso, P., Kanninen, M., Kartawinata, K., Sheil, D., Setyawati, T., Dwiprabowo, H., Siswoyo, H., Silooy, G., Siregar, C.A., Dharmawan, W.S. (2007). Reduced Impact Logging: Benefits and Constraints. In: Gunarso, P., Setyawati, T., Sunderland, T., Shackleton, C. (Eds.), *Managing Forest Resources in A Decentralized Environment: Lessons learnt from the Malinau Forest, East Kalimantan, Indonesia*. CIFOR, Bogor Indonesia.
- Putz, F.E., Sist, P., Fredericksen, T., Dykstra, D., (2008a). Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. *256*, 1427-1433.
- Putz, F.E., Zuidema, P.A., Pinard, M.A., Boot, R.G.A., Sayer, J.A., Sheil, D., Sist, P., Elias, Vanclay, J.K., (2008b). Improved tropical forest management for carbon retention. *6*, 1368-1369.
- Rahayu, S., Lusiana, B., Noordwijk, M.v., (2006). Pendugaan cadangan karbon di atas permukaan tanah pada berbagai sistem penggunaan lahan di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Timur. In: Lusiana, B., Noordwijk, M.v., Rahayu, S. (Eds.), *Cadangan karbon di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Timur: monitoring secara spasial dan pemodelan*. Laporan tim proyek pengelolaan sumberdaya alam untuk penyimpanan karbon (formacs). World Agroforestry Center, Bogor Indonesia.
- Samsedin, I., Dharmawan, I.W.S., Siregar, C.A., (2009). Potensi biomasa karbon hutan alam dan hutan bekas tebangan setelah 30 tahun di Hutan Penelitian Malinau, Kalimantan Timur. *6*, 47-56.
- Sasaki, N., Chheng, K., Ty, S., (2012). Managing production forests for timber production and carbon emission reductions under the REDD+ scheme. *23*, 35-44.
- Sianturi, A., (1990). In, University of Washington. University of Washington, Washington. p.154.
- Sist, P., Nolan, T., Bertault, J.G., Dykstra, D., (1998). Harvesting intensity versus sustainability in Indonesia. *108*, 251-260.
- Sist, P., Picard, N., Gourlet-Fleury, S., (2003a). Sustainable cutting cycle and yields in a lowland mixed dipterocarp forest of Borneo. *60*, 803-814.
- Sist, P., Sheil, D., Kartawinata, K., Priyadi, H., (2003b). Reduced-impact logging in Indonesian Borneo: some results confirming the need for new silvicultural prescriptions. *179*, 415-427.
- Vanclay, J.K., (1994). *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. CAB International.

Lampiran 1. Prediksi Biomassa di Atas Permukaan Tanah dan Karbon Tersimpan Dalam Biomassa Jenis Dipterokarpa, Non Dipterokarpa dan Non Komersial

Diameter (cm)	Dipterokarpa		Non Dipterokarpa		Non Komersial	
	Biomassa di atas permukaan tanah (ton / pohon)	Karbon biomassa di atas permukaan tanah (ton / pohon)	Biomassa di atas permukaan tanah (ton / pohon)	Karbon biomassa di atas permukaan tanah (ton / pohon)	Biomassa di atas permukaan tanah (ton / pohon)	Karbon biomassa di atas permukaan tanah (ton / pohon)
10-14	0.082	0.039	0.082	0.039	0.082	0.039
15-19	0.200	0.094	0.200	0.094	0.200	0.094
20-24	0.388	0.183	0.388	0.183	0.388	0.183
25-29	0.655	0.308	0.655	0.308	0.655	0.308
30-34	1.009	0.474	1.009	0.474	1.009	0.474
35-39	1.454	0.683	1.454	0.683	1.454	0.683
40-44	1.995	0.938	1.995	0.938	1.995	0.938
45-49	2.636	1.239	2.636	1.239	2.636	1.239
50-54	3.378	1.587	3.378	1.587	3.378	1.587
55-59	4.222	1.984	4.222	1.984	4.222	1.984
60-64	5.171	2.430	5.171	2.430	5.171	2.430
65-69	6.223	2.925	6.223	2.925	6.223	2.925
≥ 70	7.380	3.469	7.380	3.469	7.380	3.469

Lampiran 2. Estimasi Volume Pohon Dan Basal Area Jenis Dipterokarpa, Non Dipterokarpa Dan Non Komersial

Diameter (cm)	Dipterokarpa		Non Dipterokarpa		Non Komersial	
	Volume (m ³ /pohon)	Basal Area (m ² /pohon)	Volume (m ³ /pohon)	Basal Area (m ² /pohon)	Volume (m ³ /pohon)	Basal Area (m ² /pohon)
10-14	0.17	0.012	0.06	0.012	0.06	0.012
15-19	0.25	0.024	0.13	0.024	0.13	0.024
20-24	0.41	0.040	0.28	0.040	0.28	0.040
25-29	0.64	0.059	0.49	0.059	0.49	0.059
30-34	0.96	0.083	0.76	0.083	0.76	0.083
35-39	1.35	0.110	1.11	0.110	1.11	0.110
40-44	1.82	0.142	1.51	0.142	1.51	0.142
45-49	2.37	0.177	1.99	0.177	1.99	0.177
50-54	3.00	0.217	2.53	0.217	2.53	0.217
55-59	3.70	0.260	3.13	0.260	3.13	0.260
60-64	4.49	0.307	3.81	0.307	3.81	0.307
65-69	5.35	0.358	4.54	0.358	4.54	0.358
≥ 70	6.29	0.413	5.35	0.413	5.35	0.413

Lampiran 3. Uji t Perbedaan Rata-Rata Karbon Tersimpan Dalam Biomassa Antara TPTI Lama dan Baru Tanpa Ada Kerusakan Tegakan Tinggal

F	Sig.	t	df					
.043	.836	.982	97	.328	.82441	.83940	-.84157	2.49040
		.985	94.877	.327	.82441	.83672	-.83671	2.48553
.043	.835	.980	97	.329	1.64774	1.68095	-1.68849	4.98397
		.983	94.884	.328	1.64774	1.67553	-1.67866	4.97414
.070	.792	.993	97	.323	2.41319	2.43048	-2.41064	7.23703
		.996	94.987	.322	2.41319	2.42181	-2.39471	7.22109

Lampiran 4. Uji t Perbedaan Rata-Rata Karbon Tersimpan Dalam Biomassa Antara TPTI Lama dan Baru Dengan Adanya Kerusakan Tegakan Tinggal

F	Sig.	t	df					
2.181	.143	1.949	97	.054	7.49259	3.84439	-.13745	15.12264
		1.924	87.970	.058	7.49259	3.89349	-.24493	15.23012
1.145	.287	1.268	97	.208	5.67037	4.47335	-3.20798	14.54872
		1.256	89.869	.212	5.67037	4.51399	-3.29763	14.63837
.463	.498	.861	97	.391	4.08148	4.74135	-5.32879	13.49175
		.856	91.287	.394	4.08148	4.77033	-5.39380	13.55676