

**STUDI PENERAPAN FORMULA FAUSTMANN DALAM PENGELOLAAN HUTAN ALAM
PRODUKSI LESTARI DI INDONESIA**

***THE STUDY OF FAUSTMANN FORMULA APPLICATION IN SUSTAINABLE NATURAL
FOREST MANAGEMENT IN INDONESIA***

Yonky Indrajaya

Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Agroforestry

Jl. Raya Ciamis-Banjar km 4, Ciamis 46201

Telp. (0265)771352, fax. (0265)775866, email: yonky_indrajaya@yahoo.com

Diterima: 12 September 2017; direvisi: 19 Januari 2018; disetujui: 23 Mei 2018

ABSTRAK

Dalam literatur tentang ekonomi kehutanan, formula Faustmann banyak digunakan dalam menyelesaikan masalah maksimasi keuntungan dalam manajemen hutan, terutama di hutan tanaman. Modifikasi model dari formula Faustmann untuk dapat diaplikasikan dalam sistem silvikultur tebang pilih telah diteliti secara luas pada multi spesies dan multi kelas umur. Pada umumnya pengelola hutan alam di Indonesia belum mengadopsi formula Faustmann dalam pengelolaan hutannya. Aspek kelestarian dalam pengelolaan hutan alam umumnya diaplikasikan berdasarkan pada pertimbangan silvikultur, yaitu menghitung potensi tegakan tinggal yang dapat dipanen pada daur berikutnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan formula Faustmann dalam sistem silvikultur hutan alam di Indonesia (i.e. Tebang Pilih Tanam Indonesia) sehingga pengelola hutan alam dapat memperoleh keuntungan yang maksimal dan berkelanjutan. Penelitian ini merupakan penelitian kualitatif yang berdasarkan studi pustaka. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan model pertumbuhan tegakan deterministik (i.e. model matriks transisi) dan model kerusakan tegakan tinggal yang baik (i.e. matriks transisi dengan perbedaan proporsi kerusakan tiap jenis dan kelas diameter pohon), formula Faustmann dapat digunakan dalam sistem silvikultur Tebang Pilih Tanam Indonesia. Kata kunci: Formula Faustmann, tebang pilih, hutan alam, Indonesia

ABSTRACT

In the forest economics literature, Faustmann formula is highly adopted for profit maximization problem in forest management, mostly in plantation forest. Stylized models of Faustmann formula to be applied in selective logging regime have also been studied extensively in multi-age and multi-species forest. In general, natural forest managers in Indonesia have not adopted the Faustmann formula in their management decisions. Sustainability aspect in natural forest management is applied based on silvicultural consideration, i.e. measuring residual stand that is able to be harvested in the next cutting cycle. This study aims to analyze the application of Faustmann formula in the current selective logging regime in Indonesia (i.e. TPTI), so that the natural forest managers may gain maximum profit and sustainable. This study is a qualitative research based on literature review. The results of this study show that under deterministic growth model (i.e. matrix transition model) and robust damage model (i.e. transition matrix with different damage proportions on each species and diameter class), the Faustmann formula can be applied for selective Logging regime in Indonesia. Keywords: Faustmann formula, selective logging, natural forest, Indonesia

PENDAHULUAN

Pengelolaan hutan alam di Indonesia memiliki karakteristik multi-spesies dan multi-umur yang memerlukan berbagai pertimbangan termasuk pertimbangan ekonomi agar keuntungan yang diperoleh dari kegiatan tersebut dapat maksimal. Sistem silvikultur hutan alam yang berlaku di

Indonesia adalah sistem tebang pilih (Tebang Pilih Tanam Indonesia/TPTI), yaitu hanya memanen jenis-jenis komersial yang memiliki diameter lebih besar dari yang ditentukan. Penentuan limit diameter yang boleh ditebang ini adalah dalam rangka menjamin kelestarian hutan, yaitu diasumsikan setelah siklus tebang berikutnya, potensi hutan (kubikasi kayu

komersial) masih layak untuk diusahakan secara ekonomi. Selain itu, siklus tebangan dihitung berdasarkan pertumbuhan tegakan bekas tebangan sedemikian sehingga pada siklus tebangan berikutnya hutan masih layak untuk diusahakan secara ekonomi.

Penentuan siklus tebangan (daur) merupakan keputusan yang penting bagi pengelola hutan untuk dapat memperoleh keuntungan yang maksimal. Pada umumnya penentuan waktu tebang di hutan tanaman yang dilakukan oleh para rimbawan adalah dengan menggunakan daur volume maksimum atau daur biologis, yaitu ketika riap volume rata-rata tahunan (*MAI/ Mean Annual Increment*) sama dengan riap volume tahun berjalan (*CAI/ Current Annual Increment*) (Amacher, Ollikainen, & Koskela, 2009). Namun, penentuan daur tebang ini belum tentu memberikan keuntungan yang maksimal bagi pengelola hutan. Para ekonom menganjurkan untuk menggunakan daur finansial (i.e. Faustmann) dalam penentuan waktu tebangan karena dapat memberikan keuntungan yang maksimal (Samuelson, 2012). Formula Faustmann merupakan model maksimasi keuntungan dalam kehutanan yang pertama kali diperkenalkan oleh Martin Faustmann, seorang ekonom Jerman, yang secara implisit, model ini menentukan daur optimal pada model infinit pada harga dan biaya yang konstan (Perman, Ma, McGilvray, & Common, 2003). Formula Faustmann terus didiskusikan dalam ranah teori ekonomi kehutanan hingga kini (Cairns, 2017; Chang, 2018a, 2018b; Sinha, Rämö, Malo, Kallio, & Tahvonen, 2017). Formula Faustmann dapat pula dimodifikasi dan cukup banyak digunakan dalam optimasi ekonomi pengelolaan tegakan hutan dalam konteks perubahan iklim (misalnya Diaz-Balteiro & Rodriguez, 2017; Galinato & Uchida, 2011; Hoel, Holtsmark, & Holtsmark, 2014; Susaeta et al., 2014; Olschewski & Benitez, 2010; Zhou & Gao, 2016). Formula Faustmann dapat digunakan pada tegakan seumur dan tak seumur dengan satu spesies maupun banyak spesies.

Pada mulanya, penentuan daur tebang Faustmann hanya diaplikasikan pada hutan tanaman monokultur dengan sistem silvikultur tebang habis, dan penentuan daur Faustmann ini telah banyak diaplikasikan hutan tanaman di Amerika dan Eropa. Hingga kini, formula Faustmann masih digunakan sebagai metode untuk menentukan daur optimal suatu tegakan hutan di Amerika misalnya Lee, McKenney, Pedlar, and Arain (2017) dan Navarrete (2012), di Eropa misalnya Hurratala, Cao, and Valsta (2017), dan Jepang misalnya Nakajima, Shiraishi, Kanomata, and Matsumoto (2017). Penelitian tentang daur

Faustmann di Indonesia juga telah mulai dilakukan di hutan tanaman monokultur (misalnya Indrajaya, 2013; Indrajaya & Siarudin, 2013; Indrajaya & Siarudin, 2015; Indrajaya, 2016), dan agroforestri (misalnya Indrajaya & Siarudin, 2015b; Indrajaya & Sudomo, 2015).

Formula Faustmann telah pula diaplikasi untuk hutan tak seumur di Eropa (Joseph Buongiorno, Holvorsen, Bollandas, Gobakken, & Hofstad, 2012; Xabadia & Goetz, 2010). Beberapa penelitian telah pula dilakukan di hutan alam tropis yang multi-spesies dan multi-umur menggunakan formula Faustmann seperti di hutan alam Dipterokarpa di Kalimantan (Ingram & Buongiorno, 1996; G.A. Mendoza, Onal, & Soetjpto, 2000). Namun, hasil penelitian ini relatif belum diterapkan di lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi penerapan metode Faustmann pada hutan alam produksi yang dikelola dengan sistem tebang pilih di Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan tambahan referensi bagi pengelola hutan alam produksi di Indonesia terutama dalam penentuan daur tebang yang dimungkinkan untuk berbeda dengan Peraturan Menteri Kehutanan No P.11/2009 (Kementerian Kehutanan, 2009), sehingga keuntungan yang diperoleh dari perusahaan hutan alam produksi menjadi maksimal dan hutan hutan alam produksi dapat terjamin kelestariannya.

PENENTUAN DAUR DALAM SISTEM TEBANG HABIS DI HUTAN TANAMAN

Daur Tebang Biologis

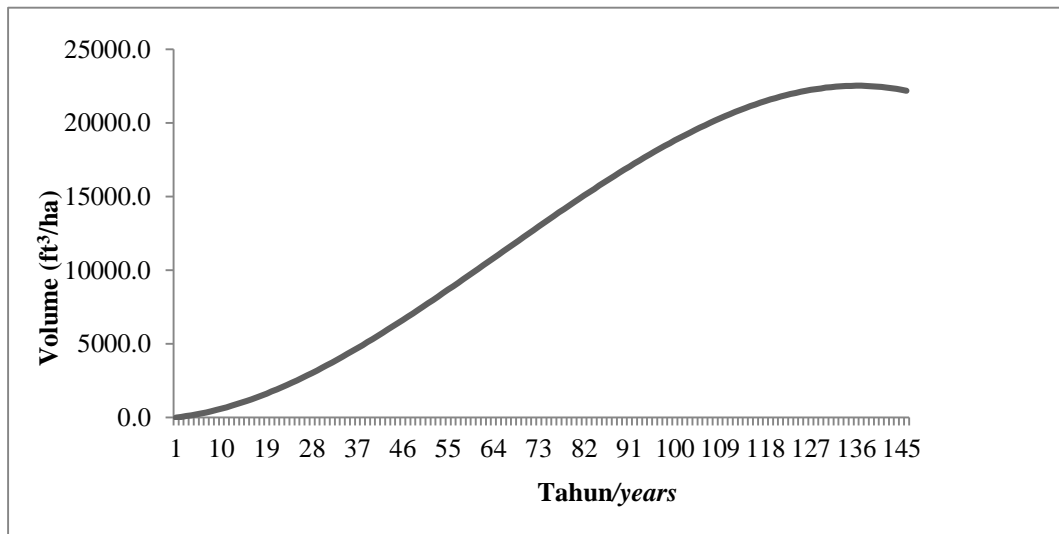
Daur tebang biologis atau daur volume maksimum banyak digunakan oleh para ahli kehutanan dalam menentukan daur optimal hutan tanaman. Prinsip dari penentuan daur biologis ini adalah tegakan akan ditebang ketika riap rata-rata volume tahunan (*Mean Annual Increment/MAI*) sama dengan riap tahun berjalan (*Current Annual Increment/CAI*) (Bettinger, Boston, Siry, & Grebner, 2017), atau secara matematis diformulasikan sebagai berikut:

$$\frac{S(T)}{T} = S'(T) \quad (1)$$

Dimana $S(T)$ merupakan stok volume kayu berdiri pada tahun ke T dan $S'(T)$ merupakan riap volume tahun berjalan $S(t) - S(t - 1)$. Sebagai contoh, perhitungan penentuan daur biologis pada tegakan *Douglas firs* di Amerika Serikat digunakan untuk memberikan gambaran bagaimana daur tebang biologis ditentukan. Data pertumbuhan tegakan ini

berdasarkan Perman *et al.* (2003), yaitu: $S = 40t + 3,1t^2 - 0,016t^3$. Pertumbuhan tegakan *Douglas firs*

seperti halnya tegakan hutan tanaman pada umumnya mengikuti pola huruf S seperti pada Gambar 1.

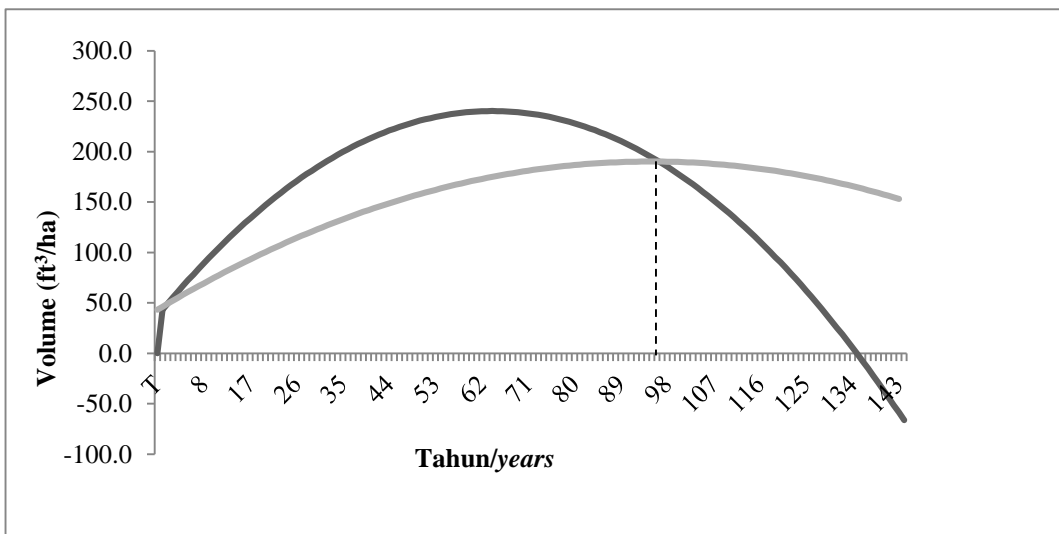


Sumber: Perman *et al.* (2003)

Gambar 1. Pertumbuhan volume kayu pada tegakan *Douglas firs*

Kurva MAI dan CAI apabila disajikan bersama, maka garis perpotongan tersebut merupakan titik di mana tegakan ditebang berdasarkan daur biologis. Daur

biologis tegakan *Douglas firs* berdasarkan data Perman *et al.* (2003) adalah ± 98 tahun (Gambar 2).



Sumber: Perman *et al.* (2003)

Gambar 2. Perpotongan MAI dan CAI di tegakan *Douglas firs*

Model Faustmann untuk Menentukan Daur Finansial

Setelah dibuktikan secara meyakinkan oleh Samuelson (2012), sebagian besar ahli ekonomi kehutanan sepakat bahwa daur Faustmann merupakan metode yang tepat dalam menentukan daur optimal suatu tegakan hutan tanaman dalam rangka mendapatkan keuntungan yang maksimal. Apabila kita notasikan p sebagai harga kayu per ft^3 net biaya

tebang, S sebagai stok volume kayu (ft^3/ha) dan K sebagai biaya pembangunan hutan tanaman, maka NPV (*Net Present Value*) suatu tegakan hutan tanaman dalam satu daur adalah: $\Pi = \frac{pS(T) - K(1+i)^T}{(1+i)^T}$, dimana $(1+i)^T$ adalah faktor diskonto. Apabila pendapatan dan biaya dalam tiap daur diperhitungkan semua hingga daur ke tak hingga, maka

$$\Pi = \frac{pS(T)-K(1+i)^T}{(1+i)^T} + \frac{(pS(T)-K(1+i)^T)}{(1+i)^{2T}} + \dots \frac{(pS(T)-K(1+i)^T)}{(1+i)^{nT}} \quad (2)$$

Ekspresi di atas merupakan deret geometri yang dapat disederhanakan menjadi:

$$\Pi = \frac{pS(T)-K(1+i)^T}{(1+i)^T} + \frac{1}{(1+i)^T} \left\{ \frac{pS(T)-K(1+i)^T}{(1+i)^T} + \frac{(pS(T)-K(1+i)^T)}{(1+i)^{2T}} + \dots \frac{(pS(T)-K(1+i)^T)}{(1+i)^{nT}} \right\} \quad (3)$$

Karena ekspresi dalam kurung kurawal merupakan Π , maka persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi

$$\max_T \Pi = \frac{pS(T)-K(1+i)^T}{(1+i)^T} + \frac{\Pi}{(1+i)^T} \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{pS(T)-K(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (5)$$

Persamaan (5) menunjukkan bahwa semua pendapatan dan biaya dari seluruh daur diperhitungkan dalam penentuan daur optimal. Persamaan (5) sering pula disebut dengan nilai harapan lahan atau *Land Expectation Value (LEV)*. Untuk membandingkan dengan daur biologis, data yang sama digunakan dalam perhitungan ini yaitu data pertumbuhan *Douglas firs* oleh Perman *et al.* (2003). Diasumsikan harga kayu p adalah 10 £ per ft³ dengan biaya pemanenan sebesar 10 £ per ft³ dan biaya tanam sebesar 5000 £. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (5), maka pada suku bunga 4 %, daur optimal Faustmann adalah 33 tahun (Perman *et al.*, 2003). Mempercepat pemanenan dari 98 tahun menjadi 33 tahun akan memaksimalkan keuntungan yang diperoleh oleh pengelola hutan tanaman *Douglas firs*. Pada hutan tanaman, sistem silvikultur yang digunakan adalah tebang habis, yaitu semua pohon akan ditebang pada daur tertentu dan digantikan dengan tanaman baru segera setelah kegiatan pemanenan.

MODEL FAUSTMANN DALAM SISTEM TEBANG PILIH DI HUTAN ALAM

Model Faustmann di Hutan Alam

Pada hutan tanaman, kegiatan pertama yang dilakukan adalah penanaman, dan setelah tumbuh selama kurun waktu (daur) tertentu kemudian tegakan ditebang habis dan ditanami kembali, berulang kali hingga waktu tak hingga. Dalam pengelolaan hutan alam, yang multi-spesies dan multi-umur, biaya tetap dikeluarkan pada saat kegiatan pembalakan (pemanenan) dilakukan. Beberapa variabel penting yang perlu dipertimbangkan dalam memaksimalkan pendapatan dan memenuhi asal kelestarian adalah: 1) Teknik pembalakan yang dilakukan, misalnya

konvensional atau RIL (*Reduced Impact Logging*), 2) Lamanya daur tebangan, dan 3) Intensitas tebangan yang dilakukan. Teknik pembalakan dapat mempengaruhi kerusakan tegakan tinggal dan berpengaruh terhadap nilai tegakan tinggal dan pertumbuhan hutannya. Data yang diperlukan dalam maksimasi keuntungan di hutan alam ini antara lain: data pertumbuhan volume kayu, asumsi kerusakan tegakan tinggal, dan data ekonomi (meliputi seluruh biaya dan pendapatan dalam pengusahaan hutan alam). Model maksimasi keuntungan dengan formula Faustmann pada rejim tebang pilih di hutan alam di Indonesia mengikuti Indrajaya, van der Werf, van Ierland, Mohren, and Weikard (2016).

Vektor \mathbf{v}_s merupakan vektor nilai dari kayu pada kelompok jenis i dan kelas diameter j pada teknik pembalakan s . Penentuan nilai kayu ini berdasarkan volume pohon dan nilai jual kayu net (setelah dikurangi dengan biaya variabel, misalnya biaya pemanenan dan pajak per m³ kayu seperti Provisi Sumber Daya Hutan/PSDH). Untuk melakukan kegiatan pembalakan, maka terdapat biaya tetap F_s yang tidak bergantung pada jumlah kayu yang dipanen tetapi bergantung pada luasan hutan, misalnya pembelian mesin, peralatan, dan pajak seperti Iuran Hasil Hutan/IHH). Apabila jumlah pohon kelompok jenis i dan kelas diameter j yang ditebang direpresentasikan dengan vektor \mathbf{h}_T , maka pada satu daur, *Net Present Value*/NPV dari suatu kegiatan pembalakan hutan alam pada tingkat suku bunga r adalah $\Pi = \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^T} - \mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T$. Apabila kita memperhitungkan semua biaya dan pendapatan yang diperoleh dari semua daur hingga daur tak hingga, maka:

$$\Pi = \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^T} - \mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T + \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^{2T}} - \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T}{(1+r)^T} + \dots + \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^{nT}} - \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T}{(1+r)^{(n-1)T}} \quad (8)$$

Persamaan (8) merupakan deret geometri yang dapat disederhanakan menjadi:

$$\Pi = \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^T} - \mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T + (1+r)^T \left\{ \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^T} - \mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T + \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^{2T}} - \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T}{(1+r)^T} + \dots + \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^{nT}} - \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T}{(1+r)^{(n-1)T}} \right\} \quad (9)$$

$$\Pi = \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^T} - \mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T + \frac{\Pi}{(1+r)^T} \quad (10)$$

$$\Pi = \frac{\mathbf{v}_s' \mathbf{h}_T - F_s}{(1+r)^T - 1} - \mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T \quad (11)$$

Dengan kendala

$$\mathbf{z}_T = (\mathbf{y}_T - \mathbf{h}_T - \mathbf{d}_{sT}) \quad (12)$$

$$\mathbf{d}_{sT} = f_s(h_{ijT}, y_{ijT}) \quad (13)$$

$$\mathbf{y}_{t+\theta} = \mathbf{G}\mathbf{z}_t + \mathbf{c} \quad (14)$$

$$\mathbf{y}_{t+2\theta} = \mathbf{G}(\mathbf{y}_{t+\theta}) + \mathbf{c} \quad (15)$$

...

$$\mathbf{y}_{t+\gamma\theta} = \mathbf{G}(\mathbf{y}_{t+\theta(\gamma-1)}) + \mathbf{c} \quad (16)$$

$$\mathbf{y}_T \geq \mathbf{h}_T + \mathbf{d}_{sT} \quad (17)$$

$$\mathbf{h}_T, \mathbf{y}_T, \mathbf{z}_T \geq 0 \quad (18)$$

$$h_{ij} = 0 \text{ untuk semua } j < \eta \quad (19)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{y}_{t+\gamma\theta} \text{ untuk semua } t = 1, \dots, \infty \quad (20)$$

Dimana \mathbf{z}_T merupakan vektor tegakan tinggal (jumlah pohon setelah pembalakan tahun ke T tiap jenis i dan kelas diameter j) dan \mathbf{d}_{sT} merupakan vektor kerusakan tegakan tinggal (jumlah pohon yang rusak akibat kegiatan pembalakan tiap jenis i dan kelas diameter j) yang terjadi akibat kegiatan pembalakan s yang merupakan fungsi dari pohon dipanen dan tegakan awal sebelum pembalakan \mathbf{y}_T . Bagian pertama dari sisi kanan persamaan (11) sama dengan persamaan (5), yaitu total biaya dan pendapatan dari kegiatan pemanenan kayu dari semua rotasi tak hingga. Namun, pada persamaan (11) nilai tersebut dikurangi dengan $\mathbf{v}_s' \mathbf{z}_T$ yang merupakan nilai dari tegakan tinggal. Persamaan (14) – (16) menjelaskan bagaimana pertumbuhan tegakan terjadi, yaitu jumlah pohon pada tahun ke $t + \gamma\theta$ merupakan perkalian antara vektor jumlah pohon pada tahun ke $t + \theta(\gamma - 1)$ dan matriks transisi \mathbf{G} dengan penambahan vektor \mathbf{c} , dimana θ merupakan durasi pertumbuhan dan γ merupakan banyaknya pertumbuhan yang terjadi. Penjelasan tentang model pertumbuhan matriks transisi dapat dilihat pada Indrajaya *et al.* (2016). Persamaan (17) menunjukkan bahwa total pohon ditebang dan rusak tidak mungkin lebih dari jumlah pohon sebelum dipanen, persamaan 18 menunjukkan kendala non negatif. Persamaan (19) menunjukkan limit diameter minimal yang boleh ditebang. Persamaan (20) menunjukkan azas kelestarian dimana kondisi tegakan sebelum dipanen selalu sama pada semua daur.

Model Pertumbuhan Matriks Transisi

Salah satu data yang diperlukan dalam penentuan daur Faustmann adalah estimasi volume dari suatu tegakan hutan dari tahun ke tahun. Pada hutan alam yang multi-umur dan multi-species, estimasi pertumbuhan dapat dilakukan dengan pendekatan matriks transisi (Roitman & Vanclay, 2015). Model ini merupakan model pertumbuhan deterministik, dimana hasil estimasi model bersifat pasti. Model ini pada mulanya dibangun oleh J. Buongiorno & Michie (1980) untuk mendapatkan alternatif manajemen optimal hutan di hutan tak seumur, yang kemudian dikembangkan selain tak seumur juga beberapa species (Joseph Buongiorno *et al.*, 2012). Beberapa penelitian tentang matriks transisi pertumbuhan di hutan alam Indonesia telah dilakukan, antara lain oleh G. A. Mendoza & Setyarso (1986) dan Krisnawati, Suhendang & Parthama (2008) di Kalimantan Tengah dan Sist, Picard & Gourlet-Fleury (2003) di Kalimantan Timur. Penelitian lainnya adalah di Malaysia yang dilakukan oleh Ingram & Buongiorno (1996) dan Boscolo & Buongiorno (1997).

Model matriks transisi pertumbuhan di hutan alam berisi probabilitas dari suatu jenis pohon dalam satu kelompok jenis i untuk tetap dalam kelas diameter j dengan probabilitas a , atau pindah ke kelas diameter $j + 1$ dengan probabilitas b atau mati dengan probabilitas o pada satu periode pertumbuhan θ . Selain itu, jumlah pohon yang dapat masuk ke dalam

kelas diameter terkecil j dari tiap jenis i berbanding lurus dengan jumlah pohon dari kelompok jenis i dan berbanding terbalik terhadap kerapatan tegakannya (basal area). Secara lebih rinci, model matriks transisi dapat dilihat pada tulisan dari Krisnawati *et al.* (2008). Estimasi volume kayu dari kelompok jenis tertentu dilakukan dengan menggunakan persamaan estimasi yang volume berdasar diameter setinggi dada (DBH) seperti persamaan yang dibuat oleh Enggelina (1998). Nilai DBH yang digunakan adalah nilai tengah DBH dari rentang tiap kelompok DBH yang kemudian dikalikan dengan jumlah pohon dalam tiap kelas DBH dari tiap jenis. Dengan perhitungan ini, maka volume kayu dapat diestimasi dari tahun ke tahun berdasarkan matriks transisi pertumbuhan.

Kerusakan Tegakan Tinggal

Beberapa model kerusakan tegakan tinggal akibat kegiatan pembalakan telah dikaji oleh Indrajaya (2015) dalam konteks karbon tersimpan dalam biomassa tegakan. Menurut Indrajaya (2015), beberapa model yang ada kerusakan tegakan tinggal di hutan alam adalah:

1. Kerusakan tetap dan sama untuk semua kelas diameter $\mathbf{d}_{sT} = d_s \mathbf{y}_t$ (misalnya Sasaki, Chheng, and Ty (2012)). Vektor \mathbf{d}_{sT} merupakan vektor kerusakan tegakan tinggal yaitu jumlah pohon yang rusak akibat kegiatan pembalakan tiap jenis i dan kelas diameter j dengan teknik pembalakan s diperoleh dengan mengalikan proporsi kerusakan d_s dengan vektor jumlah pohon sebelum penebangan \mathbf{y}_t .
2. Kerusakan tergantung dari intensitas penebangan, namun tingkat kerusakan sama untuk semua jenis dan kelas diameter: $\mathbf{d}_{sT} = d_s \mathbf{y}_t$, dimana $d_s = f(h_T)$ (misalnya da Silva, Piazza, Fantini & Vibrans (2018); Martin, Newton, Pfeifer, Khoo & Bullock (2015)). Seperti halnya model i, kerusakan tegakan tinggal sama untuk semua jenis dan kelas diameter namun proporsi kerusakan d_s dipengaruhi oleh intensitas tebangan h_T .
3. Kerusakan tergantung dari intensitas penebangan dan tingkat kerusakan berbeda untuk tiap kelas diameter $\mathbf{d}_{sT} = (\sum_i \sum_j h_{ijt}) \mathbf{D}_s \mathbf{y}_t$ (misalnya Macpherson, Schulze, Carter, & Vidal (2010)), dimana \mathbf{D}_s merupakan matriks kerusakan tegakan tinggal pada teknik pembalakan s .

Perbedaan asumsi tegakan tinggal yang digunakan dapat mempengaruhi hasil dari maksimasi keuntungan seperti pada persamaan (6). Pendekatan paling realistis yang digunakan dalam perhitungan jumlah tegakan tinggal adalah model iii (model

matriks) karena mencerminkan perbedaan tingkat kerusakan tiap kelas diameter dan bergantung pada jumlah pohon yang ditebang. Model ini awalnya dibangun oleh dan digunakan oleh Indrajaya *et al.* (2016) dalam penelitiannya di Kalimantan. Dengan model kerusakan tegakan tinggal yang lebih realistis, maka estimasi keuntungan yang diperoleh dari kegiatan pembalakan hutan menjadi semakin akurat.

Contoh Aplikasi Faustmann di Kalimantan

Beberapa penelitian telah menerapkan formula Faustmann dalam perhitungan manajemen optimal tegakan hutan alam yang dikelola dengan sistem silvikultur TPTI, antara lain G.A. Mendoza *et al.* (2000) di Kalimantan, Ingram & Buongiorno (1996) dan Boscolo & Buongiorno (1997) di Kalimantan Malaysia. Studi lain yang menggunakan metode Faustmann dalam menentukan manajemen optimal hutan alam dengan sistem tebang pilih adalah Indrajaya *et al.* (2016), yang hasilnya disajikan dalam Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan bahwa dengan menggunakan formula Faustmann, daur tebang optimal pada teknik pembalakan konvensional (*Conventional Logging/CL*) dan pembalakan berdampak rendah (*Reduced Impact Logging/RIL*) di Kalimantan berturut-turut adalah 26 dan 30 tahun, dengan volume tebangan berturut-turut sebesar 16 dan 21 m³/ha. Tabel 1 juga menunjukkan bahwa teknik tebangan RIL memberikan nilai harapan lahan/*Land Expectation Value (LEV)* yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknik tebangan konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa pada tingkat harga dan biaya seperti diterangkan dalam Indrajaya *et al.* (2016), teknik pembalakan RIL lebih menguntungkan untuk dilakukan. Jumlah pohon dan basal area tegakan dengan menggunakan RIL relatif lebih tinggi dibandingkan pada CL karena jumlah kerusakan tegakan tinggal yang lebih rendah dan siklus tebangan yang lebih panjang pada RIL. Volume tebangan pada RIL relatif lebih tinggi dibandingkan pada CL, sehingga pendapatan dari pemanenan relatif lebih tinggi pada RIL dibandingkan pada CL. Walaupun volume kayu yang rusak relatif lebih tinggi pada RIL, namun pada kondisi *steady state* dimana jumlah pohon dan basal area tegakan sebelum panen pada RIL relatif lebih tinggi dibanding CL, proporsi kerusakan tegakan tinggal tetap lebih tinggi pada CL.

Dengan menggunakan formula Faustmann dalam sistem tebang pilih di hutan alam, maka pengusaha dapat mengestimasi keuntungan maksimal yang dapat diperoleh dari kegiatan pengusaha hutan dengan memperhatikan asas kelestarian hutan. Penerapan formula Faustmann di hutan alam produksi

dapat digunakan dalam menentukan daur tebang dan teknik pembalakan serta batas minimal diameter yang dipanen yang terbaik sehingga keuntungan yang diperoleh dapat maksimal. Selain itu, dengan adanya pasar karbon yang memungkinkan kegiatan perbaikan manajemen pembalakan/*improved forest management*

menjadi salah satu proyek yang dapat memperoleh manfaat, maka formula Faustmann dapat memberikan gambaran bagaimana perbaikan manajemen pembalakan ini dapat memberikan keuntungan yang maksimal. Hal ini telah pula dilaporkan oleh Indrajaya *et al.* (2016) pada proyek karbon sukarela.

Table 1. Manajemen optimal pada pembalakan konvensional dan berdampak rendah di Kalimantan

	Pembalakan konvensional	Pembalakan berdampak rendah
Nilai harapan lahan (USD/ha)	239,1	248,1
Daur tebang (tahun/year)	26	30
Jumlah pohon sebelum panen (phn/tree per ha)	185	193
Jumlah pohon setelah panen (phn/tree per ha)	119	120
Basal Area sebelum panen (m ² /ha)	8,2	9,0
Basal Area setelah panen (m ² /ha)	4,3	4,4
Volume tebangan (m ³ /ha)	16,4	20,8
Pendapatan dari pemanenan (USD/ha)	720,7	945,4
Volume kayu rusak (m ³ /ha)	26,7	30,2

Sumber : Indrajaya *et al.* (2016)

KESIMPULAN

Model Faustmann dapat diaplikasikan di hutan alam yang terdiri dari berbagai macam jenis dan umur/ukuran dimensi pohon yang karakteristik pertumbuhannya diketahui. Karena sifatnya yang deterministik, model Faustmann mensyaratkan input data yang valid dan paling mendekati kenyataan, sehingga akan menghasilkan perhitungan yang paling mendekati kenyataan. Model matriks transisi yang bersifat deterministik dapat digunakan sebagai pendekatan untuk mengukur pertumbuhan tegakan di hutan alam. Selain itu, model kerusakan tegakan matriks dapat memberikan gambaran paling mendekati kenyataan dalam mengestimasi kerusakan tegakan tinggal.

SARAN

Tingginya variasi jenis dalam suatu tegakan hutan Dipterokarpa membutuhkan jumlah data yang cukup banyak dalam membangun model matriks transisi yang *robust*, sehingga dapat memberikan gambaran yang cukup baik dalam menentukan daur optimal Faustmann di hutan alam. Pembangunan Petak Ukur Permanen (PUP) yang dilakukan oleh para pemegang konsesi IUPHHK merupakan langkah awal yang penting dalam pengelolaan hutan produksi lestari karena dapat digunakan sebagai acuan dalam mengestimasi pertumbuhan tegakan pada suatu unit pengelolaan hutan alam.

DAFTAR PUSTAKA

Amacher, G. S., Ollikainen, M., & Koskela, E. (2009). *Economics of forest resources*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2017). *Forest management and planning. Second Edition*. Burlington USA: Academic Press.
- Boscolo, M., & Buongiorno, J. (1997). Managing a tropical rainforest for timber, carbon storage and tree diversity. *Commonwealth Forestry Review*, 76(4), 246-254.
- Buongiorno, J., Holvorsen, E. A., Bollandsas, O. M., Gobakken, T., & Hofstad, O. (2012). Optimizing management regimes for carbon storage and other benefits in uneven-aged stands dominated by Norway spruce, with a derivation of the economic supply of carbon storage. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(5), 1-14.
- Buongiorno, J., & Michie, B. R. (1980). A Matrix model of uneven-aged forest management. *Forest Science*, 26(4), 609-625.
- Cairns, R. D. (2017). Faustmann's formulas for forests. *Natural Resource Modeling*, 30(1), 52-73.
- Chang, S. J. (2018a). Forest property taxation under the generalized Faustmann formula. *Forest Policy and Economics*, 88, 38-45.
- Chang, S. J. (2018b). Forest valuation under the generalized Faustmann formula with taxation. *Forest Policy and Economics*, 88, 46-51.
- da Silva, D. A., Piazza, G., Fantini, A. C., & Vibrans, A. C. (2018). Forest management in a secondary Atlantic Rainforest: assessing the harvest damage. *Advances in Forestry Science*, 4(4), 187-193.
- Diaz-Balteiro, L., & Rodríguez, L. C. E. (2017). Influence of carbon sequestration in an optimal set of coppice rotations for eucalyptus plantations. In F. Bravo, V. LeMay, & R. Jandl (Eds.), *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (pp. 187-204). Cham: Springer International Publishing.
- Enggelina, A. (1998). Volume equation. In J.-G. Bertault & K. Kadir (Eds.), *Silvicultural research in a lowland mixed dipterocarp forest of East Kalimantan: the contribution of STREK project*: CIRAD-forêt.

- Galinato, G. I., & Uchida, S. (2011). The Effect of temporary certified emission reductions on forest rotations and carbon supply. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, 59(1), 145-164. doi:10.1111/j.1744-7976.2010.01203.x
- Hoel, M., Holtsmark, B., & Holtsmark, K. (2014). Faustmann and the climate. *Journal of Forest Economics*, 20(2), 192-210.
- Hurtala, H., Cao, T., & Valsta, L. (2017). Optimization of scots pine (*Pinus sylvestris*) management with the total net return from the value chain. *Journal of Forest Economics*, 28, 1-11. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2017.04.001>
- Indrajaya, Y. (2013). Penentuan daur optimal hutan tanaman sengon (*Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen) dengan metode Faustmann. *Jurnal Penelitian Agroforestry*, 1(1), 31-40.
- Indrajaya, Y. (2015). Perbandingan model kerusakan tegakan tinggal di hutan alam dipterocarp untuk mendukung mekanisme REDD+. *Jurnal Penelitian Ekosistem Dipterokarpa*, 1(1).
- Indrajaya, Y. (2016). Daur optimal hutan rakyat manglid di Kecamatan Kawalu, Tasikmalaya, Jawa Barat. dalam M. Siarudin, A. Sudomo, Y. Indrajaya, T. Puspitojati, & N. Mindawati (Eds.), *Hutan rakyat manglid: Status riset dan pengembangan*. Bogor, Indonesia: FORDA PRESS.
- Indrajaya, Y., & Siarudin, M. (2013). Daur finansial hutan rakyat jabon di Kecamatan Pakenjeng, Kabupaten Garut, Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 10(4).
- Indrajaya, Y., & Siarudin, M. (2015a). Daur tebang optimal hutan rakyat gmelina (*Gmelina arborea* Roxb.) di Tasikmalaya dan Banjar, Jawa Barat, Indonesia. *Jurnal Penelitian Sosial Ekonomi Kehutanan*, 12(2), 109-116.
- Indrajaya, Y., & Siarudin, M. (2015b). Pengaturan hasil agroforestry jabon (*Neolamarckia cadamba* Miq.) dan kapulaga di Kecamatan Pakenjeng, Garut, Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Sosial Ekonomi Kehutanan*, 12(2), 117-125.
- Indrajaya, Y., & Sudomo, A. (2013). Analisis finansial agroforestry sengon dan kapulaga di Desa Payungagung, Kecamatan Panumbangan, Ciamis. *Jurnal Penelitian Agroforestry*, 1(2), 123-132.
- Indrajaya, Y., van der Werf, E., van Ierland, E., Mohren, F., & Weikard, H.-P. (2016). The Potential of REDD+ for carbon sequestration in tropical forests: Supply Curves for carbon storage for East-Kalimantan. *Forest Policy and Economics*, 71, 1-10.
- Ingram, C. D., & Buongiorno, J. (1996). Income and diversity tradeoffs from management mixed lowland dipterocarps in Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 9(2), 242-270.
- 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, Nomor:P.11/Menhut-II/2009 C.F.R. (2009).
- Krisnawati, H., Suhendang, E., & Parthama, I. P. (2008). Transition matrix growth models for logged over natural forest in Central Kalimantan. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 5(2), 107-128.
- Lee, J., McKenney, D., Pedlar, J., & Arain, M. (2017). Biophysical and economic analysis of black spruce regeneration in Eastern Canada using global climate model productivity outputs. *Forests*, 8(4), 106.
- Macpherson, A. J., Schulze, M. D., Carter, D. R., & Vidal, E. (2010). A Model for comparing reduced impact logging with conventional logging for an Eastern Amazonian Forest. *Forest Ecology and Management*, 260(11), 2002-2011. doi:DOI 10.1016/j.foreco.2010.08.050
- Martin, P. A., Newton, A. C., Pfeifer, M., Khoo, M., & Bullock, J. M. (2015). Impacts of tropical selective logging on carbon storage and tree species richness: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 356, 224-233.
- Mendoza, G. A., Onal, H., & Soetjpto, W. (2000). Optimising tree diversity and economic returns from managed mixed forest in Kalimantan, Indonesia. *Journal of Tropical Forest Science*, 12(2), 298-319.
- Mendoza, G. A., & Setyarso, A. (1986). A transition matrix forest growth-model for evaluating alternative harvesting schemes in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 15(3), 219-228. doi:Doi 10.1016/0378-1127(86)90068-X
- Nakajima, T., Shiraishi, N., Kanomata, H., & Matsumoto, M. (2017). A method to maximise forest profitability through optimal rotation period selection under various economic, site and silvicultural conditions. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 47(1), 4. doi:10.1186/s40490-016-0079-6
- Navarrete, E. (2012). Modeling optimal pine stands harvest under stochastic wood stock and price in Chile. *Forest policy and economics*, 15, 54-59.
- Olschewski, R., & Benitez, P. C. (2010). Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics*, 16(1), 1-10. doi:DOI 10.1016/j.jfe.2009.03.002
- Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., & Common, M. (2003). *Natural Resource and Environmental Economics. Third Edition*. England: Pearson Education Limited.
- Roitman, I., & Vanclay, J. K. (2015). Assessing size-class dynamics of a neotropical gallery forest with stationary models. *Ecological Modelling*, 297, 118-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.11.009>
- Samuelson, P. A. (2012). Economics of forestry in an evolving society. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 4(3), 173-195.
- Sasaki, N., Chheng, K., & Ty, S. (2012). Managing production forests for timber production and carbon emission reductions under the REDD+ scheme. *Environmental Science & Policy*, 23, 35-44.
- Sinha, A., Rämö, J., Malo, P., Kallio, M., & Tahvonen, O. (2017). Optimal management of naturally regenerating uneven-aged forests. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 886-900.
- Sist, P., Picard, N., & Gourlet-Fleury, S. (2003). Sustainable cutting cycle and yields in a lowland mixed dipterocarp forest of Borneo. *Annals of Forest Science*, 60(8), 803-814. doi:DOI 10.1051/forest:2003075

- Susaeta, A., Chang, S. J., Carter, D. R., & Lal, P. (2014). Economics of carbon sequestration under fluctuating economic environment, forest management and technological changes: An application to forest stands in the southern United States. *Journal of Forest Economics*, 20(1), 47-64.
- Xabadia, A., & Goetz, R. U. (2010). The optimal selective logging regime and the Faustmann formula. *Journal of Forest Economics*, 16(1), 63-82. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2009.06.002>
- Zhou, W., & Gao, L. (2016). The impact of carbon trade on the management of short-rotation forest plantations. *Forest Policy and Economics*, 62, 30-35. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2015.10.008>