

This file has been cleaned of potential threats.

If you confirm that the file is coming from a trusted source, you can send the following SHA-256 hash value to your admin for the original file.

c27ae882b9a1e43854365d24a9152732d08849938543e9541e8ddaac5675bfd

To view the reconstructed contents, please SCROLL DOWN to next page.

KARBON TERSIMPAN DALAM PRODUK KAYU SENGON MENGUNAKAN BEBERAPA MODEL OKSIDASI

(Carbon stored in sengon wood products using different oxidation models)

Yonky Indrajaya

Balai Penelitian dan Pengembangan Teknologi Agroforestry
Jl. Raya Ciamis-Banjar km 4, Ciamis 46201, email: yonky_indrajaya@yahoo.com

Diterima 15 Oktober 2019, direvisi 30 Desember 2019, disetujui 30 Desember 2019

ABSTRACT

Harvested wood product is one of the carbon pools that must be considered in calculating carbon emission from forestry sector. There are several models of wood product retirement : linear, logistic, and exponential. The type of model applied in the calculation of wood product pool influence the estimated amount of carbon stored in wood product, and hence also influence the recommended management regime of a plantation forest. This study analyzed how different models of wood product oxidation produced different estimates of carbon stored in sengon wood product and caused different management recommendation of sengon plantation. The models used in this paper include linear (VCS model), exponential (IPCC, 2006), and logistic (Miner model). The focus of the study is to evaluate only long term wood product that is oxidized up to 100 years. The study showed that the lowest carbon stored from sengon wood product are those estimated by linear, logistic, and exponential respectively. VCS model with 20 years linear decay is conservative.

Keywords: Oxidation models, wood product, sengon

ABSTRAK

Produk kayu merupakan salah satu pool karbon yang perlu dipertimbangkan dalam menghitung emisi karbon terkait dengan sektor kehutanan. Beberapa model pembusukan produk kayu berdasarkan eksperimen adalah: linier, logistic dan eksponensial. Pengaplikasian model-model tersebut dalam perhitungan carbon tersimpan dalam pool produk kayu dapat menghasilkan jumlah karbon tersimpan dalam produk kayu yang berbeda, sehingga dapat berakibat pada rejim pengelolaan hutan tanaman yang berbeda pula. Tulisan ini menganalisis bagaimana model oksidasi yang berbeda dapat menghasilkan jumlah karbon tersimpan dalam produk kayu yang berbeda dan pengaruhnya terhadap manajemen optimal hutan tanaman sengon. Model oksidasi produk kayu yang digunakan dalam termasuk linier (model VCS), eksponensial (IPCC, 2006), dan logistik (model Miner et al. 2006). Fokus dari tulisan ini adalah produk kayu yang teroksidasi hingga 100 tahun. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa jumlah karbon tersimpan dalam produk kayu pada beberapa model oksidasi produk kayu mulai dari yang terendah berturut-turut adalah model linier, logistic, dan eksponensial. Model VCS dengan waktu pembusukan 20 tahun dianggap cukup konservatif.

Kata kunci: model oksidasi, produk kayu, sengon

I. PENDAHULUAN

Produk kayu merupakan salah satu *pool* karbon yang perlu dipertimbangkan dalam menghitung emisi karbon terkait dengan sektor kehutanan, seperti misalnya dalam standar VCS (*Verified Carbon Standard*) dan *American Carbon Registry* (ACR) (Sharma, Telfer, & Phua, 2013). Produk kayu,

tergantung dari jenis penggunaannya, akan melepaskan karbon ke udara melalui proses oksidasi. Produk kayu sebagian akan menjadi limbah yang dapat langsung teroksidasi, dan sebagian dapat pula tersimpan dalam produk kayu.

Kayu sengon merupakan salah satu jenis kayu yang banyak dibudidayakan oleh masyarakat terutama di wilayah Pulau Jawa.

Keunggulan sengon yang cepat tumbuh (Riyanto & Pamungkas, 2010) dengan pasar yang luas dan memiliki nilai ekonomi yang tinggi (Irawanti, Suka, & Ekawati, 2012; Sari, Hairiah, & Suyanto, 2018) membuat masyarakat memilih jenis sengon untuk hutan tanamannya (Irawanti, Race, Stewart, Parlinah, & Suka, 2017). Pengelolaan optimal tegakan hutan tanaman dapat didekati dengan perhitungan rotasi optimal tegakan hutan tanaman yang dapat memberikan keuntungan yang maksimal, misalnya pada tegakan gmelina (Indrajaya & Siarudin, 2015), tegakan manglid (Indrajaya, 2016), dan tegakan jabon (Indrajaya & Siarudin, 2013). Daur optimal sengon apabila hanya mempertimbangkan kayu sebagai satu-satunya sumber pendapatan adalah 5,6, dan 7 tahun pada bonita 2, 3, dan 4 (Indrajaya, 2013). Tambahan pendapatan yang diperoleh dari penjualan jasa lingkungan karbon tersimpan dalam biomassa pohon dapat memperpanjang daur optimal sengon tergantung dari tingkat harga karbon yang ada (Indrajaya, 2017).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa selain *pool* karbon biomassa tegakan pohon, *pool* karbon lain seperti material organik mati (*dead organic matter*) dapat pula menyimpan karbon dalam jumlah yang cukup besar dan dapat berpengaruh terhadap daur optimal suatu tegakan hutan (Asante & Armstrong, 2012). Namun, proyek karbon di hutan tanaman umumnya hanya memperhitungkan jumlah karbon di dalam biomassa pohon dan produk kayu. Beberapa model pembusukan/oksidasi kayu telah digunakan dalam perhitungan karbon tersimpan dalam *pool* produk kayu, antara lain linier (VCS, 2013), eksponensial (IPCC, 2006), dan logistik (Miner, 2006). Pada penelitian Indrajaya (2017) *pool* karbon produk kayu telah diperhitungkan, namun hanya pada produk kayu penjarangan dengan hanya menggunakan metode eksponensial dengan nilai Winjum. Sedangkan produk kayu akhir daur belum diperhitungkan dalam *pool* karbon produk kayu yang dapat pula menambah jumlah simpanan karbon.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karbon tersimpan dalam produk kayu sengon menggunakan beberapa model pembusukan (yaitu linier, eksponensial, dan logistik). Fokus penelitian ini adalah produk kayu sengon yang teroksidasi hingga 100 tahun.

II. METODE

Untuk mengestimasi jumlah volume kayu sengon digunakan tabel normal volume tegakan sengon yang telah dibuat oleh Suharlan, Sumarna, dan Sudiono (1975) yang relatif masih relevan untuk digunakan sebagai pendekatan estimasi volume sengon di Jawa. Model ini telah banyak digunakan sebagai pendekatan perhitungan volume sengon (Indrajaya, 2013, 2017). Estimasi berat biomassa pohon sengon dilakukan mengikuti persamaan dari Brown (1997) adalah sebagai berikut:

$$AGB_T = V_T \rho \theta \quad (1)$$

Di mana AGB_T merupakan berat biomassa di atas permukaan tanah tegakan sengon (hanya kayu komersial) pada akhir daur T (dalam ton/ha), $V(T)$ merepresentasikan volume tegakan sengon pada akhir daur (dalam m^3/ha), ρ merupakan kerapatan kayu, dan θ merupakan *Biomass Expansion Factor*, yaitu rasio dari total biomassa kering pohon terhadap biomassa kering kayu komersial. Kerapatan kayu sengon yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0.26 (Zanne et al., 2009), sedangkan nilai θ yang digunakan adalah 1,34 (Krisnawati, Adinugroho, & Imanuddin, 2012). Jumlah karbon tersimpan dalam biomassa tegakan sengon pada akhir daur adalah:

$$C_{AGB,T} = AGB_T \delta \quad (2)$$

dan karbon hasil penjarangan pada tahun t , adalah:

$$C_{AGB,t} = AGB_t \delta \quad (3)$$

dimana δ merupakan fraksi karbon dari biomassa yaitu sebesar 0.47 (IPCC, 2006). Daur sengon yang digunakan mengikuti Indrajaya (2013), yaitu pada bonita II, III, dan IV berturut-turut adalah 7, 6, dan 5 tahun (Lampiran 1), dimana daur biologis sama dengan daur finansialnya. Selain produk kayu pada akhir daur, tegakan sengon juga menghasilkan produk kayu hasil dari kegiatan penjarangan yang dimulai pada tahun ke-2 atau 3 tergantung dari bonitanya hingga akhir daur.

Tidak semua bagian dari kayu sengon akan menjadi produk kayu sengon, namun sebagian akan menjadi limbah kayu. Untuk mengetahui volume kayu sengon yang menjadi produk kayu akhir sengon dihitung menggunakan rendemen kayu sengon yang dinotasikan dengan ε . Nilai ε yang digunakan dalam penelitian yaitu 0.5 (Kementerian Kehutanan RI, 2009), dengan asumsi bahwa produk kayu sengon akan digunakan sebagai veneer (Awaludin, Shahidan, Basuki, Zuki, & Nazri, 2018).

Model pembusukkan kayu yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

a. Linier 20 tahun (metode VCS)

Metode ini mengasumsikan bahwa produk kayu akan teroksidasi dengan tingkat oksidasi 5% selama kurun waktu 20 tahun (VCS, 2013), sehingga pada tahun ke-20 semua produk kayu telah teroksidasi. Karbon tersimpan dalam produk kayu yang dipanen pada akhir daur yaitu:

$$C_{HWP_T} = \sum_{\tau}^T C_{AGB,T} - C_{AGB,T} \left(\frac{\tau}{20} C_{AGB_T} \varepsilon \delta \mu \right) \quad (4)$$

Dimana C_{HWP_T} merupakan karbon tersimpan dalam produk kayu pada tahun T , μ merupakan fraksi dari produk kayu yang teroksidasi dari tahun ke-3 hingga tahun ke 20. Sedangkan karbon tersimpan dalam produk kayu hasil penjarangan yaitu merupakan akumulasi kayu yang dijarangi mulai tahun ke- t hingga akhir daur T :

$$C_{HWP,t} = \sum_{\tau}^T C_{HWP,t} \quad (5)$$

Dimana produk kayu penjarangan juga akan teroksidasi sebesar 5% per tahun selama kurun waktu 20 tahun.

b. Eksponensial (IPCC)

Persamaan eksponensial yang digunakan adalah berdasarkan rekomendasi dari (IPCC, 2006) untuk Tier 1, yaitu:

$$C_{HWP,T} = \sum_{\tau}^T C_{AGB,T} - C_{AGB,T} \{1 - e^{-(K)t}\}, \text{ dimana } K = \frac{\ln(2)}{HF} \quad (7)$$

dimana HF merupakan waktu yang diperlukan oleh suatu produk kayu menjadi separuh dari berat awalnya. Kayu sengon dalam penelitian ini diasumsikan digunakan sebagai bahan *veneer* yang memiliki nilai HF sebesar 30 tahun (Mearns et al., 2003).

c. Logistik

Persamaan logistik ini merupakan model pembusukkan yang digunakan di negara-negara Eropa. Penelitian ini menggunakan model ini sebagai pembanding model linier dan eksponensial yang dapat diterapkan di Indonesia. Model ini dapat digunakan untuk produk kayu dengan HF antara 4-50 tahun (Miner, 2006). Karena nilai HF kayu adalah 30 tahun, maka persamaan ini dapat digunakan sebagai pembanding.

$$C_{HWP,T} = \sum_{\tau}^T C_{AGB_T} - C_{AGB_T} \left(1 - \left[1,2 - \left\{ \frac{1,2}{(1+5e^{(-2t/HF)})} \right\} \right] \right) \quad (6)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tegakan sengon dapat menyimpan karbon dalam biomasanya karena proses alami fotosintesis. Rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa tegakan sengon ditampilkan

dalam Tabel 1. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan 4, 5, dan 6 dan volume tegakan sengon Suharlan et al (1975)

pada Lampiran 2, rata-rata karbon tersimpan dalam produk kayu sengon ditampilkan dalam Tabel 2, 3 dan 4 untuk bonita II, III, dan IV.

Tabel 1. Rata-rata karbon tersimpan dalam tegakan kayu sengon
Table 1. The average of carbon stored in stand biomass of sengon

| Tahun (Year) | Rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa tegakan sengon dalam ton per ha (The average of carbon stored in sengon stand biomass in ton per ha) | | |
|-----------------|---|-------------------------|------------------------|
| | Bonita (Site class) II | Bonita (Site class) III | Bonita (Site class) IV |
| 2 | 1,15 | 2,13 | 3,36 |
| 3 | 2,07 | 3,11 | 4,53 |
| 4 | 2,58 | 3,68 | 4,91 |
| 5 | 2,85 | 4,00 | 4,91 |
| 6 | 2,97 | 3,98 | 4,69 |
| 7 | 2,99 | 3,74 | 4,35 |
| 8 | 2,91 | 3,48 | 4,01 |
| 9 | 2,80 | 3,24 | 3,68 |
| 10 | 2,69 | 2,98 | 3,37 |
| 11 | 2,56 | 2,77 | 3,11 |
| 12 | 2,46 | 2,62 | 2,89 |

Tabel 2. Rata-rata tahunan karbon tersimpan dalam produk kayu sengon bonita II
Table 2. Yearly average carbon stored in sengon wood product on site quality II

| Tahun (Year) | Volume akhir daur (End rotation volume) (m ³ /ha) | Volume penjarangan (Thinning volume) (m ³ /ha) | Akumulasi karbon dalam produk kayu dalam ton per ha (Carbon accumulation in end use wood product of sengon in ton per ha) | | | | | |
|-----------------|--|---|--|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | VCS | | Eksponensial (IPCC) | | Logistik | |
| | | | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) |
| 2 | 14 | 0 | 0,11 | 0,00 | 0,46 | 0,00 | 0,38 | 0,00 |
| 3 | 38 | 7 | 0,33 | 0,06 | 1,25 | 0,23 | 1,04 | 0,19 |
| 4 | 63 | 16 | 0,56 | 0,14 | 2,08 | 0,53 | 1,73 | 0,44 |
| 5 | 87 | 28 | 0,78 | 0,25 | 2,90 | 0,93 | 2,42 | 0,78 |
| 6 | 109 | 40 | 0,99 | 0,36 | 3,65 | 1,34 | 3,06 | 1,12 |
| 7 | 128 | 50 | 1,17 | 0,46 | 4,32 | 1,69 | 3,63 | 1,42 |
| 8 | 142 | 54 | 1,31 | 0,50 | 4,84 | 1,84 | 4,07 | 1,55 |
| 9 | 154 | 54 | 1,44 | 0,50 | 5,28 | 1,85 | 4,46 | 1,56 |
| 10 | 164 | 53 | 1,55 | 0,50 | 5,67 | 1,83 | 4,80 | 1,55 |
| 11 | 172 | 51 | 1,64 | 0,49 | 5,99 | 1,78 | 5,09 | 1,51 |
| 12 | 180 | 50 | 1,74 | 0,48 | 6,32 | 1,76 | 5,38 | 1,50 |

Tabel 2 menunjukkan karbon rata-rata tersimpan dalam biomassa produk kayu sengon menggunakan beberapa metode oksidasi. Rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa produk kayu sengon bonita II tertinggi diestimasi menggunakan metode eksponensial (Miner, 2006) yang merupakan adopsi dari metode yang digunakan oleh *European Forest Institute* (EFI) yang banyak diterapkan di eropa. Sementara itu, metode logistik menghasilkan estimasi yang relatif *underestimate* dengan hasil yang relatif kecil dibandingkan dengan metode lainnya.

Pada daur optimal sengon bonita II, yaitu 7 tahun, rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa produk kayu yang dipanen pada akhir daur menggunakan metode VCS, eksponensial dan logistik berturut-turut adalah sebesar 1,17; 4,32; dan 3,63 ton C/ha/tahun atau sebesar 4,29; 15,86; dan 13,13 ton CO₂/ha/tahun. Proporsi karbon tersimpan dalam produk kayu terhadap karbon tersimpan dalam tegakan sengon adalah kurang lebih 40% (lihat Tabel 2 dan 1). Perhitungan rata-rata tahunan ini dilakukan hingga 100 tahun untuk dapat

diperbandingkan antar metode, walaupun pada metode linier produk kayu telah habis teroksidasi pada tahun ke-20. Sebagai contoh, pada tahun ke-7 (akhir daur), jumlah kayu sengon yang dipanen adalah sebesar 128 m³/ha, dimana total karbon tersimpan dalam biomassa produk kayunya adalah sebanyak 10,5 ton/ha (Lampiran 3). Pada tahun ke-28 atau 21 tahun setelah panen, produk kayu telah teroksidasi seluruhnya (nol).

Rata-rata karbon tersimpan dalam produk kayu sengon bonita III dan IV relatif lebih tinggi dibandingkan rata-rata karbon tersimpan dalam produk kayu pada bonita II seiring dengan jumlah volume yang lebih tinggi (Tabel 3 dan 4). Pada daur optimalnya (6 tahun), rata-rata karbon tersimpan dalam produk kayu sengon bonita III yang dipanen pada akhir daur dengan metode linier, eksponensial dan logistik berturut-turut adalah sebesar 1,32; 4,90; dan 4,10 ton C/ha/tahun. Sementara itu, rata-rata karbon tersimpan dalam produk kayu sengon hasil penjarangan bonita III dengan metode linier, eksponensial dan logistik berturut turut adalah sebesar 0,49; 1,81; dan 1,52 ton C/ha/tahun.

Tabel 3. Rata-rata tahunan karbon tersimpan dalam produk kayu sengon bonita III
 Table 3. Yearly average carbon stored in sengon wood product on site quality III

| Tahun (Year) | Volume akhir daur (End rotation volume) (m ³ /ha) | Volume penjarangan (Thinning volume) (m ³ /ha) | Akumulasi karbon dalam produk kayu dalam ton per ha (Carbon accumulation in end use wood product of sengon in ton per ha) | | | | | |
|-----------------|--|---|--|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | | VCS | | Eksponensial (IPCC) | | Logistik | |
| | | | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) |
| 2 | 26 | 4 | 0,21 | 0,03 | 0,85 | 0,13 | 0,71 | 0,11 |
| 3 | 57 | 14 | 0,50 | 0,12 | 1,87 | 0,46 | 1,55 | 0,38 |
| 4 | 90 | 29 | 0,80 | 0,26 | 2,97 | 0,96 | 2,48 | 0,80 |
| 5 | 122 | 46 | 1,09 | 0,41 | 4,06 | 1,53 | 3,39 | 1,28 |
| 6 | 146 | 54 | 1,32 | 0,49 | 4,90 | 1,81 | 4,10 | 1,52 |
| 7 | 160 | 54 | 1,46 | 0,49 | 5,41 | 1,82 | 4,54 | 1,53 |
| 8 | 170 | 52 | 1,57 | 0,48 | 5,79 | 1,77 | 4,87 | 1,49 |
| 9 | 178 | 50 | 1,66 | 0,47 | 6,11 | 1,72 | 5,16 | 1,45 |
| 10 | 182 | 48 | 1,72 | 0,45 | 6,29 | 1,66 | 5,33 | 1,41 |
| 11 | 186 | 47 | 1,78 | 0,45 | 6,48 | 1,64 | 5,50 | 1,39 |
| 12 | 192 | 45 | 1,85 | 0,43 | 6,74 | 1,58 | 5,74 | 1,35 |

Pada bonita IV dimana tegakan sengon menghasilkan volume yang tertinggi dibandingkan pada bonita II dan III. Walaupun daur optimalnya hanya 5 tahun (lebih pendek dibandingkan daur optimal bonita II dan III), rata-rata karbon tersimpan dalam produk kayu sengon hasil tebangan akhir daur merupakan yang tertinggi dibandingkan pada bonita II dan

III. Namun demikian, rata-rata karbon tersimpan dalam produk kayu sengon hasil tebangan penjarangan pada bonita IV relatif lebih rendah dibandingkan pada bonita III, karena akumulasi volume tebangan penjarangan pada bonita IV relatif lebih rendah dibandingkan pada bonita III.

Tabel 4. Rata-rata tahunan karbon tersimpan dalam produk kayu sengon bonita IV
 Table 4. Yearly average carbon stored in sengon wood product on site quality IV

| Tahun (Year) | Volume akhir daur (End rotation volume) (m ³ /ha) | Volume penjarangan (Thinning volume) (m ³ /ha) | Akumulasi karbon dalam produk kayu dalam ton per ha (Carbon accumulation in end use wood product of sengon in ton per ha) | | | | | |
|-----------------|--|---|--|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | | | VCS | | Ekspensial (IPCC) | | Logistik | |
| | | | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) | Akhir daur (Rotation) | Penjarangan (Thinning) |
| 2 | 41 | 6 | 0,33 | 0,05 | 1,34 | 0,20 | 1,12 | 0,16 |
| 3 | 83 | 25 | 0,73 | 0,22 | 2,72 | 0,82 | 2,26 | 0,68 |
| 4 | 120 | 46 | 1,06 | 0,41 | 3,96 | 1,52 | 3,30 | 1,27 |
| 5 | 150 | 54 | 1,34 | 0,48 | 4,99 | 1,80 | 4,17 | 1,50 |
| 6 | 172 | 52 | 1,56 | 0,47 | 5,77 | 1,74 | 4,83 | 1,46 |
| 7 | 186 | 47 | 1,70 | 0,43 | 6,28 | 1,59 | 5,28 | 1,33 |
| 8 | 196 | 43 | 1,81 | 0,40 | 6,67 | 1,46 | 5,62 | 1,23 |
| 9 | 202 | 41 | 1,89 | 0,38 | 6,93 | 1,41 | 5,85 | 1,19 |
| 10 | 206 | 39 | 1,95 | 0,37 | 7,12 | 1,35 | 6,03 | 1,14 |
| 11 | 209 | 37 | 2,00 | 0,35 | 7,28 | 1,29 | 6,18 | 1,09 |
| 12 | 212 | 36 | 2,05 | 0,35 | 7,45 | 1,26 | 6,34 | 1,08 |

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa jumlah emisi karbon terendah pada beberapa model oksidasi produk kayu berturut-turut adalah model linier, logistik, dan ekspensial. Jumlah karbon tersimpan dalam produk kayu dapat berkontribusi 40% dari jumlah karbon tersimpan dalam biomassa tegakan sengon. Rata-rata karbon tersimpan dalam biomassa kayu sengon yang dipanen pada akhir daur menggunakan metode VCS pada bonita II, III, dan IV berturut turut adalah 1,17; 1,32; dan 1,34 ton C/ha.

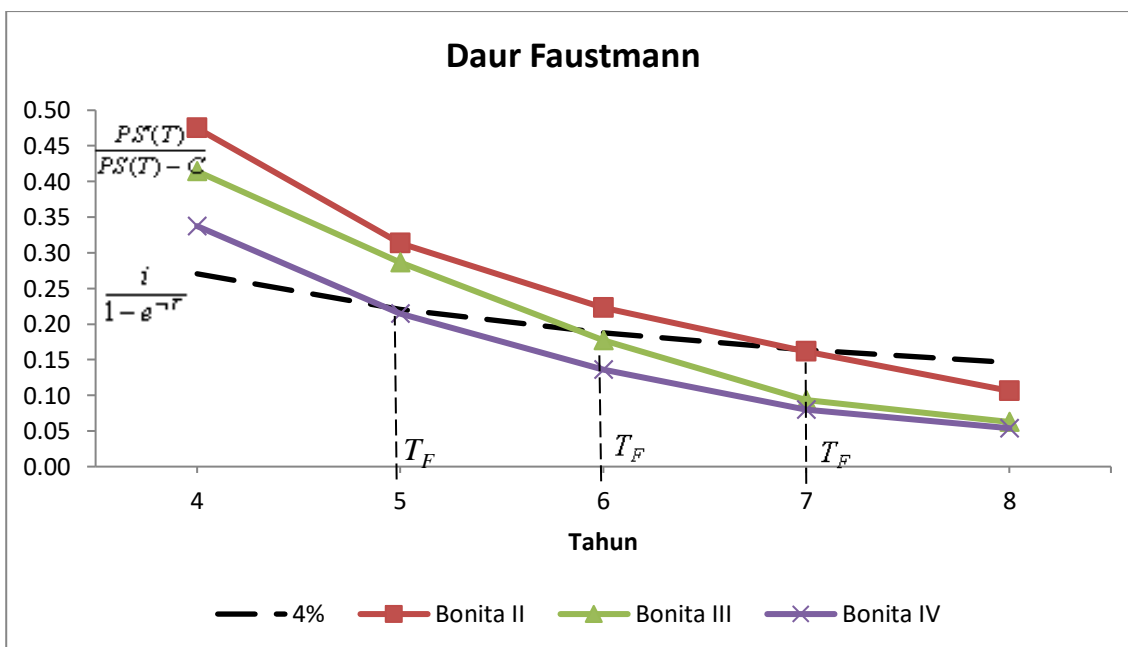
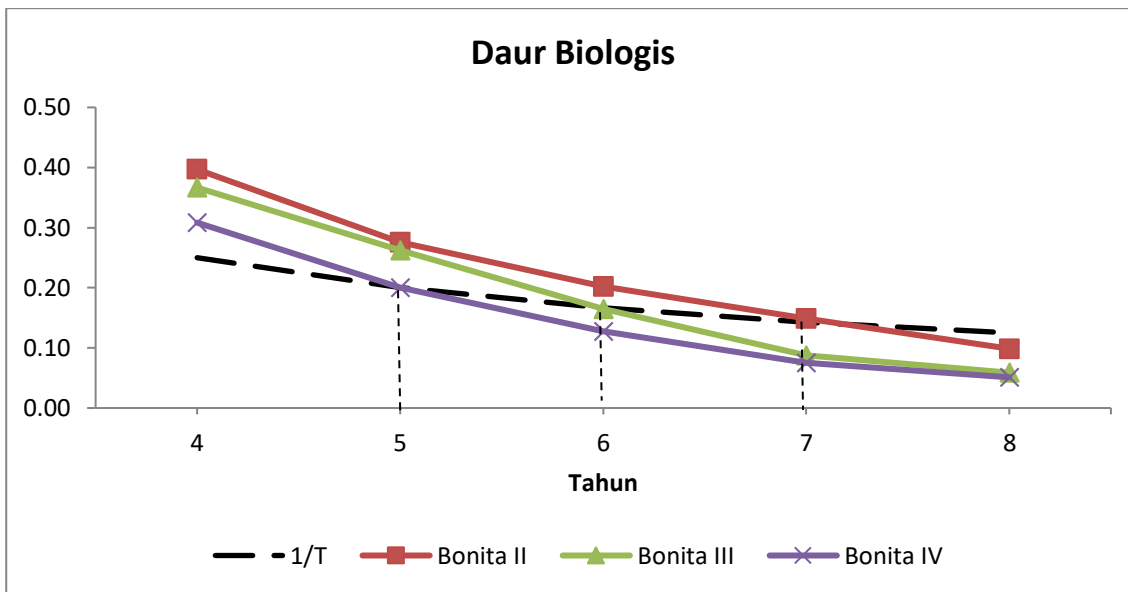
B. Saran

Perhitungan menggunakan metode linier relatif konservatif dan mudah untuk digunakan. Pada kondisi saat ini dimana potensi pasar karbon yang ada untuk hutan tanaman adalah pasar karbon sukarela dimana VCS merupakan salah satu metode yang banyak digunakan, memasukkan *pool* karbon produk akhir kayu dapat meningkatkan jumlah karbon tersimpan. Penambahan *pool* karbon produk kayu ini dapat meningkatkan pendapatan dari penjualan jasa lingkungan serapan karbon.

DAFTAR PUSTAKA

- Asante, P., & Armstrong, G. W. (2012). Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: A comparative statics analysis. *Journal of Forest Economics*, 18(2), 145-156.
- Awaludin, A., Shahidan, S., Basuki, A., Zuki, S. S. M., & Nazri, F. M. (2018). Laminated Veneer Lumber (LVL) Sengon: An Innovative Sustainable Building Material in Indonesia. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(1).
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer* (Vol. 134): Food & Agriculture Org.
- 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. (2016). Daur optimal hutan rakyat manglid di Kecamatan Kawalu, Tasikmalaya, Jawa Barat. In M. Siarudin, A. Sudomo, Y. Indrajaya, T. Puspitojati, & N. Mindawati (Eds.), *Hutan rakyat manglid: Status riset dan pengembangan*. Bogor, Indonesia: FORDA PRESS.
- Indrajaya, Y. (2017). Daur optimal hutan tanaman sengon dalam proyek aforestasi: Review penelitian Suharlan et al. (1975). *Jurnal Wallacea*, 6(2).
- 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. (2015). 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.
- IPCC. (2006). IPCC Guideline 2006 Guidelines for national green house gas inventories.
- Irawanti, S., Race, D., Stewart, H., Parlinah, N., & Suka, A. P. (2017). Understanding the timber value chain in community-based forestry in Indonesia: Analysis of sengon in central Java. *Journal of Sustainable Forestry*, 36(8), 847-862. doi:10.1080/10549811.2017.1381029
- Irawanti, S., Suka, A. P., & Ekawati, S. J. J. P. S. d. E. K. (2012). Manfaat ekonomi dan peluang pengembangan hutan rakyat sengon di Kabupaten Pati. 9(3).
- Peraturan Dirjen Bina Produksi Kehutanan No P.13/VI-BPPHH/2009, tentang Rendemen Kayu Olah Industri Primer Hasil Hutan Kayu (IPHHK), (2009).
- Krisnawati, H., Adinugroho, W. C., & Imanuddin, R. (2012). *Model-Model Alometrik untuk Pendugaan Biomassa Pohon pada Berbagai Tipe Ekosistem Hutan di Indonesia (Indonesia versions): wahyu catur adinugroho*.
- Mearns, L., Giorgi, F., Whetton, P., Pabon, D., Hulme, M., & Lal, M. (2003). Guidelines for use of climate scenarios developed from regional climate model experiments.
- Miner, R. (2006). The 100-Year Method for Forecasting Carbon Sequestration in Forest Products in Use. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. doi:10.1007/s11027-006-4496-3
- Riyanto, H. D., & Pamungkas, B. J. T. H. T. (2010). Model pertumbuhan tegakan hutan tanaman sengon untuk pengelolaan hutan. 3(3), 113-120.
- Sari, R. R., Hairiah, K., & Suyanto, S. J. J. E. P. d. A. (2018). Karakteristik Hutan Rakyat Jati dan Sengon serta Manfaat Ekonominya di Kabupaten Malang. 2(2), 129-137.
- Sharma, S. K., Telfer, M., & Phua, S. T. (2013). Comparison of approaches and functions for estimating greenhouse gas emissions from long-term harvested wood products in carbon abatement projects. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 3(1-2), 64-80.
- Suharlan, A., Sumarna, K., & Sudiono, J. (1975). *Tabel Tegakan Sepuluh Jenis Kayu Industri*. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Hutan.
- VCS. (2013). *Methodology for improved forest management through extension of rotation age (IFM ERA)*: Ecotrust.
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G.*, C., D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., Miller, R. B., . . . Chave, J. (2009). Global wood density database.

Lampiran 1. Daur biologis dan finansial tegakan sengon bonita II, III, dan IV
 Appendix 1. Biological and financial rotation of sengon on site class II, III, and IV



Sumber (Source): Indrajaya (2013)

Lampiran 2. Volume tegakan dan penjarangan sengon pada bonita II, III, dan IV
Appendix 2. Stumpage and thinning volume of sengon on site class II, III, and IV

| Umur (Age) | Volume tegakan (<i>Stumpage volume</i>) | | | Volume Penjarangan (<i>Thinning volume</i>) | | | Jumlah volume (<i>Total volume</i>) | | |
|---------------|--|-----|-----|--|-----|----|--|-----|-----|
| | II | III | IV | II | III | IV | II | III | IV |
| 2 | 14 | 26 | 41 | | 4 | 6 | 14 | 30 | 47 |
| 3 | 38 | 57 | 83 | 7 | 14 | 25 | 45 | 75 | 114 |
| 4 | 63 | 90 | 120 | 16 | 29 | 46 | 86 | 137 | 197 |
| 5 | 87 | 122 | 150 | 28 | 46 | 54 | 138 | 215 | 281 |
| 6 | 109 | 146 | 172 | 40 | 54 | 52 | 200 | 293 | 355 |
| 7 | 128 | 160 | 186 | 50 | 54 | 47 | 269 | 361 | 416 |
| 8 | 142 | 170 | 196 | 54 | 52 | 43 | 337 | 423 | 469 |
| 9 | 154 | 178 | 202 | 54 | 50 | 41 | 403 | 481 | 516 |
| 10 | 164 | 182 | 206 | 53 | 48 | 39 | 466 | 533 | 559 |
| 11 | 172 | 186 | 209 | 51 | 47 | 37 | 525 | 584 | 599 |
| 12 | 180 | 192 | 212 | 50 | 45 | 36 | 583 | 635 | 638 |

Keterangan: Diolah dari Suharlan *et al.* (1975)

Lampiran 3. Oksidasi kayu yang dipanen pada akhir daur menggunakan metode VCS bonita II
Appendix. Oxidation of wood harvested on rotation time with VCS method on site class II

| Tahun | HWP | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| 3 | 3,1 | 3,1 | | | | | | | | | |
| 4 | 5,2 | 3,0 | 5,2 | | | | | | | | |
| 5 | 7,1 | 2,8 | 4,9 | 7,1 | | | | | | | |
| 6 | 8,9 | 2,6 | 4,6 | 6,8 | 8,9 | | | | | | |
| 7 | 10,5 | 2,5 | 4,4 | 6,4 | 8,5 | 10,5 | | | | | |
| 8 | 11,6 | 2,3 | 4,1 | 6,1 | 8,0 | 10,0 | 11,6 | | | | |
| 9 | 12,6 | 2,2 | 3,9 | 5,7 | 7,6 | 9,4 | 11,0 | 12,6 | | | |
| 10 | 13,4 | 2,0 | 3,6 | 5,3 | 7,1 | 8,9 | 10,5 | 12,0 | 13,4 | | |
| 11 | 14,1 | 1,9 | 3,4 | 5,0 | 6,7 | 8,4 | 9,9 | 11,3 | 12,8 | 14,1 | |
| 12 | 14,7 | 1,7 | 3,1 | 4,6 | 6,2 | 7,9 | 9,3 | 10,7 | 12,1 | 13,4 | 14,7 |
| 13 | | 1,6 | 2,8 | 4,3 | 5,8 | 7,3 | 8,7 | 10,1 | 11,4 | 12,7 | 14,0 |
| 14 | | 1,4 | 2,6 | 3,9 | 5,4 | 6,8 | 8,1 | 9,5 | 10,7 | 12,0 | 13,3 |
| 15 | | 1,2 | 2,3 | 3,6 | 4,9 | 6,3 | 7,6 | 8,8 | 10,1 | 11,3 | 12,5 |
| 16 | | 1,1 | 2,1 | 3,2 | 4,5 | 5,8 | 7,0 | 8,2 | 9,4 | 10,6 | 11,8 |
| 17 | | 0,9 | 1,8 | 2,8 | 4,0 | 5,2 | 6,4 | 7,6 | 8,7 | 9,9 | 11,1 |
| 18 | | 0,8 | 1,5 | 2,5 | 3,6 | 4,7 | 5,8 | 6,9 | 8,1 | 9,2 | 10,3 |
| 20 | | 0,6 | 1,3 | 2,1 | 3,1 | 4,2 | 5,2 | 6,3 | 7,4 | 8,4 | 9,6 |
| 21 | | 0,5 | 1,0 | 1,8 | 2,7 | 3,7 | 4,7 | 5,7 | 6,7 | 7,7 | 8,8 |
| 22 | | 0,3 | 0,8 | 1,4 | 2,2 | 3,1 | 4,1 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,1 |
| 23 | | 0,2 | 0,5 | 1,1 | 1,8 | 2,6 | 3,5 | 4,4 | 5,4 | 6,3 | 7,4 |
| 24 | | 0,0 | 0,3 | 0,7 | 1,3 | 2,1 | 2,9 | 3,8 | 4,7 | 5,6 | 6,6 |
| 25 | | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0,9 | 1,6 | 2,3 | 3,2 | 4,0 | 4,9 | 5,9 |
| 26 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 1,0 | 1,7 | 2,5 | 3,4 | 4,2 | 5,2 |
| 27 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 1,2 | 1,9 | 2,7 | 3,5 | 4,4 |
| 28 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,6 | 1,3 | 2,0 | 2,8 | 3,7 |
| 29 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,6 | 1,3 | 2,1 | 2,9 |
| 30 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 1,4 | 2,2 |
| 31 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,7 | 1,5 |
| 32 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,7 |
| 33 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Keterangan: Kolom menunjukkan daur, dan baris menunjukkan berat karbon dalam produk kayu sengon setelah pemanenan.

Lampiran 4. Oksidasi kayu yang dipanen pada saat penjarangan menggunakan metode VCS bonita II

Appendix. Oxidation of wood harvested for thinning with VCS method on site class II

| Tahun | HWP | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3 | 0,6 | 0,6 | | | | | | | | | |
| 4 | 1,3 | 0,5 | 1,3 | | | | | | | | |
| 5 | 2,3 | 0,5 | 1,2 | 2,3 | | | | | | | |
| 6 | 3,3 | 0,5 | 1,2 | 2,2 | 3,3 | | | | | | |
| 7 | 4,1 | 0,5 | 1,1 | 2,1 | 3,1 | 4,1 | | | | | |
| 8 | 4,4 | 0,4 | 1,0 | 1,9 | 2,9 | 3,9 | 4,4 | | | | |
| 9 | 4,4 | 0,4 | 1,0 | 1,8 | 2,8 | 3,7 | 4,2 | 4,4 | | | |
| 10 | 4,3 | 0,4 | 0,9 | 1,7 | 2,6 | 3,5 | 4,0 | 4,2 | 4,3 | | |
| 11 | 4,2 | 0,3 | 0,9 | 1,6 | 2,5 | 3,3 | 3,8 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | |
| 12 | 4,1 | 0,3 | 0,8 | 1,5 | 2,3 | 3,1 | 3,5 | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,1 |
| 13 | | 0,3 | 0,7 | 1,4 | 2,1 | 2,9 | 3,3 | 3,5 | 3,7 | 3,8 | 3,9 |
| 14 | | 0,3 | 0,7 | 1,3 | 2,0 | 2,7 | 3,1 | 3,3 | 3,5 | 3,5 | 3,7 |
| 15 | | 0,2 | 0,6 | 1,1 | 1,8 | 2,5 | 2,9 | 3,1 | 3,3 | 3,3 | 3,5 |
| 16 | | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,6 | 2,3 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,3 |
| 17 | | 0,2 | 0,5 | 0,9 | 1,5 | 2,0 | 2,4 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,1 |
| 18 | | 0,1 | 0,4 | 0,8 | 1,3 | 1,8 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,7 | 2,9 |
| 20 | | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1,1 | 1,6 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 2,7 |
| 21 | | 0,1 | 0,3 | 0,6 | 1,0 | 1,4 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,3 | 2,5 |
| 22 | | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 2,3 |
| 23 | | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,0 |
| 24 | | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,8 |
| 25 | | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,6 |
| 26 | | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 1,4 |
| 27 | | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 1,2 |
| 28 | | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 1,0 |
| 29 | | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| 30 | | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 |
| 31 | | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 |
| 32 | | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,2 |
| 33 | | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |

Keterangan: Kolom menunjukkan daur, dan baris menunjukkan berat karbon dalam produk kayu sengon setelah penjarangan.