

POTENSI SIMPANAN KARBON DAN EMISI CO₂ AKIBAT PENEBAANGAN DI HUTAN ALAM PAPUA

(Potential Carbon Storage and CO₂ Emissions Due to Felling in Papua Natural Forest)

Yuniawati, Dulsalam, & Sarah Andini

Pusat Riset Biomassa dan Bioproduk, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Km 46 Cibinong 16911, Telp.: 081119333603

E-mail: yunia_las@yahoo.co.id

Diterima 16 April 2022, direvisi 10 Mei 2022, disetujui 4 Juni 2022

ABSTRACT

Forests as a place for carbon sequestration will be a source of emissions if there are no more photosynthetic plants to store carbon dioxide (CO₂) gas. CO₂ gases that spreads in atmosphere can affect global climate change. Uncontrolled timber harvesting in natural forests has a negative impact on the potential for carbon absorption and CO₂ emissions. This study aimed to analyze the potential for carbon storage and emission due to felling in natural forests. The research method was carried out destructively and non-destructively using data on potential stands before felling and the potential for trees to be felled on three logging compartments by making nine sample observation plots (PCP) in three selected felling plots within the natural forest concession area, namely plots numbered CC 47, K47, and L 47. Each PCP was a rectangular plot measuring 2 ha (200 × 100 m²). The results showed that the natural forest stand structure in the study location formed an inverted J letter, where the stands with a diameter class of 60 cm and above had a lower stand volume than other diameter classes. Carbon storage in the stand before felling was 21.07 ton C/ha. The potential for carbon storage decreased when 144 trees were felled, resulting the reduction was 18.49 ton C/ha, causing a potential carbon emission of 67.86 tons CO₂-eq. After felling, the potential for carbon storage was decreased or remained by 2.57 ton C/ha so that the potential for emission in the post-felling area was 9.43 tons CO₂-eq.

Keywords: Carbon storage, CO₂ emission, decrease, felling

ABSTRAK

Hutan sebagai tempat penyerapan karbon akan menjadi sumber emisi jika tidak ada lagi tumbuhan yang berfotosintesis sebagai penyimpan karbon dioksida (CO₂). Keberadaan gas CO₂ yang berlebihan dan tersebar di permukaan bumi dapat memengaruhi perubahan iklim global. Pemanenan kayu yang tidak terkendali di hutan alam berdampak negatif terhadap potensi penyerapan karbon dan emisi CO₂. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi simpanan dan emisi karbon akibat penebangan kayu di hutan alam Papua. Metode penelitian dilaksanakan secara destruktif dan non-destruktif dengan menggunakan data potensi tegakan sebelum penebangan dan potensi pohon yang akan ditebang dengan membuat sembilan petak contoh pengamatan (PCP) di tiga petak penebangan yang terpilih di dalam kawasan konsesi hutan alam, yaitu petak nomor CC47, K47, dan L47. Masing-masing PCP berupa petak persegi panjang dengan ukuran 2 ha (200 x 100 m²). Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur tegakan hutan alam di lokasi penelitian membentuk huruf J terbalik. Tegakan dengan kelas diameter 60 cm ke atas memiliki volume tegakan yang lebih rendah dibandingkan kelas diameter lainnya. Cadangan karbon pada tegakan sebelum penebangan adalah 21,07 ton C/ha. Potensi simpanan karbon berkurang ketika sebanyak 144 pohon ditebang, pengurangannya sebesar 18,49 ton C/ha, atau setara dengan emisi karbon sebesar 67,86 ton CO₂-ekuivalen. Setelah penebangan, potensi simpanan karbon berkurang sebesar 2,57 ton C/ha sehingga potensi emisi di areal setelah penebangan setara dengan 9,43 ton CO₂-ekuivalen.

Kata kunci: Simpanan karbon, emisi CO₂, berkurang, penebangan

I. PENDAHULUAN

Kegiatan pemanenan kayu meliputi kegiatan penebangan, penyaradan, dan muat bongkar. Kegiatan ini bertujuan untuk produksi kayu dan mengeluarkan kayu dari hutan menuju industri kayu yang kemudian diolah menjadi suatu produk.

Peningkatan produksi kayu melalui pemanenan kayu diperlukan untuk meningkatkan penjualan. Meskipun demikian, kegiatan pemanenan kayu tersebut juga tidak terlepas dari gangguan lingkungan, salah satunya adalah berkurangnya penyerapan karbon dan potensi emisi.

Berkurangnya stok karbon dan bertambahnya emisi karbon dari hutan berasal dari berbagai komponen kegiatan dalam pemanenan kayu. Irawan & Purwanto (2020) menyatakan bahwa penebangan merupakan salah satu penyebab peningkatan konsentrasi gas rumah kaca. Meskipun hanya pohon yang memiliki nilai komersial yang ditebang, kurangnya perhatian terhadap pengelolaan praktik tebang pilih yang efisien mengakibatkan terjadinya degradasi hutan, sehingga mengurangi pasokan produk hutan dan meningkatkan emisi karbon hutan (Irland, 2011; Pearson, Brown, & Casarim, 2014; Shearman, Bryan, & Laurance, 2012). Pearson et al., (2014) berfokus pada penyebab utama degradasi hutan, yaitu pemanenan kayu dan infrastruktur terkait (jalan sarad dan jalan penebangan). Mereka menyatakan bahwa untuk sembilan negara utama penghasil kayu tropis, emisi dari penebangan rata-rata sekitar 12% dari deforestasi tersebut. Hutan dan produk kayu yang dipanen menyerap setara dengan lebih dari 14% emisi CO₂ ekonomi di Amerika Serikat setiap tahun, dan ada potensi untuk meningkatkan kapasitas penyerapan karbon mencapai ~20% (-187,7 juta metrik ton [MMT] CO₂ ± 9,1 MMT CO₂) per tahun dengan menimbun sepenuhnya semua lahan hutan produktif yang kekurangan stok (Domke, Oswalt, Walters, & Morin, 2020).

Karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu gas rumah kaca yang berpengaruh besar terhadap peningkatan suhu permukaan bumi. Berkaitan dengan fenomena perubahan iklim ini, tumbuhan memiliki peran penting karena dapat menyerap dan menyimpan karbon sebagai biomassa melalui sekuestrasi atau mekanisme jangka panjang (Irundu, Beddu, & Najmawati, 2020). Secara umum, laju penyerapan karbon tergantung pada karakteristik pertumbuhan tanaman dari spesies pohon tertentu, kepadatan kayu pohon, dan kondisi tempat tumbuh dan tahap tanaman artinya tahap penyerapan terbesar adalah pada tahap pertumbuhan pohon yang lebih muda, antara 20 sampai 50 tahun (Tooichi, 2018). Kondisi tersebut biasanya digunakan dalam perhitungan kasar dan perkiraan jumlah CO₂ yang diserap oleh jenis pohon tertentu.

Pemanenan kayu di hutan alam dengan sistem tebang pilih memengaruhi potensi simpanan karbon hutan melalui kegiatan penebangan serta kematian pohon yang mengalami kerusakan. Simpanan karbon yang hilang akan terdekomposisi berpotensi menghasilkan emisi karbon. Pemanenan kayu yang dilakukan saat ini masih belum memperhatikan prinsip-prinsip kelestarian hutan, masih banyak potensi limbah dari kegiatan tersebut yang masih

harus dimanfaatkan untuk produk industri kayu lainnya seperti papan partikel, pellet kayu, arang aktif, dan lain-lain. Tingginya limbah yang dihasilkan dari pemanenan kayu dapat mengakibatkan emisi karbon dari dekomposisi limbah kayu. (Gagnon, Clark, Downing, Fisher, Frey, & Worrell, 2015) menyatakan bahwa setelah penebangan kayu, biasanya ada cukup banyak kayu sisa yang dianggap tidak dapat dimanfaatkan (tajuk, cabang, dan batang) tertinggal di lokasi. O'Dwyer, Walshe, & Byrne, (2018) menyatakan bahwa untuk produk kayu, pelepasan karbon berbanding lurus dengan dekomposisi fraksi karbon organik yang dapat terdegradasi dari produk, yang bertujuan untuk menganalisis potensi simpanan karbon dan emisi akibat penebangan kayu di hutan alam. Berdasarkan hal tersebut, maka penelitian ini sangat penting untuk dilakukan terutama pada areal hutan alam Papua. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi simpanan dan emisi karbon akibat penebangan kayu di hutan alam Papua.

II. BAHAN DAN METODE

A. Lokasi Penelitian

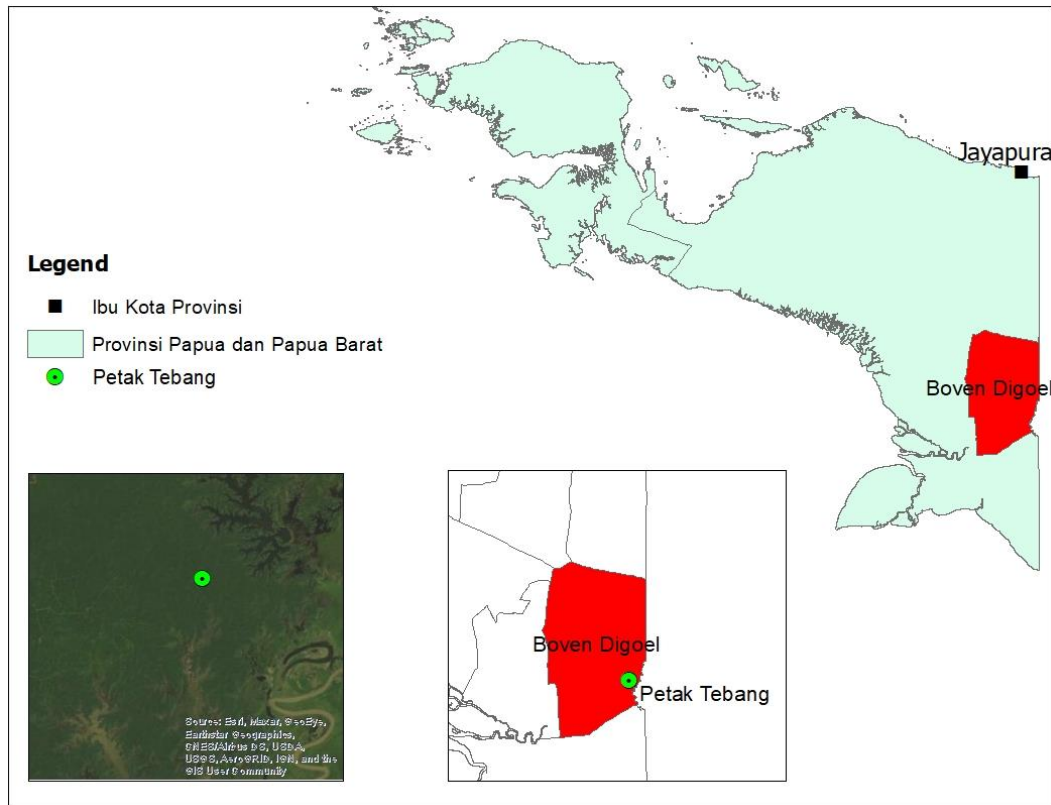
Penelitian dilakukan pada awal tahun 2019 di areal ijin usaha pemanfaatan hasil hutan kayu hutan alam PT Tunas Timber Lestari, blok tebang dari rencana kerja tahunan tahun 2019 (Gambar 1). Kawasan ini termasuk dalam wilayah Kabupaten Boven Digul, Provinsi Papua.

B. Bahan dan Alat

Peralatan yang digunakan adalah *phi-band* untuk mengukur diameter setinggi dada (dbh) dan pita ukur untuk mengukur panjang pohon yang ditebang, *tally sheet*, klinometer untuk mengukur kemiringan lereng, kompas, kamera digital untuk dokumentasi, dan alat tulis. Bahan yang digunakan adalah pohon, inventaris tegakan sebelum penebangan untuk semua jenis pohon, laporan hasil *cruising*, peta sebaran pohon, kapur, dan cat.

C. Metode Sampling

Membuat sembilan petak contoh pengamatan (PCP) di tiga petak penebangan yang terpilih di dalam kawasan konsesi hutan alam, yaitu petak nomor CC47, K47, dan L47. Masing-masing PCP berupa petak persegi panjang dengan ukuran 2 ha (200 m² x 100 m²). Penempatan PCP dirancang dengan *systematic sampling with purposive start*, artinya PCP pertama ditentukan secara *purposive* pada petak logging yang dipilih, dan PCP berikutnya diposisikan secara sistematis dengan jarak antar PCP sebesar 100 m.



Gambar 1. Lokasi penelitian di PT Tunas Timber Lestari, Boven Digoel, Papua
Figure 1. The study area in PT Tunas Timber Lestari, Boven Digoel, Papua

Metode untuk menduga simpanan karbon yang digunakan adalah : Metode *non-destructive* (metode tidak langsung, tanpa merusak sampel pohon) dan *destructive* (metode langsung penebangan).

1. Mengukur seluruh potensi tegakan sebelum penebangan yaitu volume tegakan dengan mengukur diameter setinggi dada dan tinggi pohon di sembilan PCP. Semua data tegakan jenis pohon pada petak penebangan diperoleh dari inventarisasi tegakan sebelum penebangan (ITSP).
2. Mengukur biomassa pohon sebelum penebangan, saat penebangan dan setelah penebangan dengan persamaan Chave et al (2005).
3. Mengukur potensi tegakan yang akan ditebang baik diameter setinggi dada, tinggi pohon dan volume kemudian menebang pohon komersial.
4. Menghitung potensi tegakan setelah penebangan dengan selisih jumlah volume tegakan sebelum tebangan dan saat penebangan. Demikian untuk penghitungan biomassa setelah penebangan dan estimasi penurunan simpanan karbon diperoleh dari selisih penurunan simpanan karbon sebelum dan setelah penebangan. Selanjutnya, estimasi serapan CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer merupakan hasil perkalian antara jumlah karbon yang hilang dengan

faktor konversi dari karbon (C) menjadi karbon dioksida (CO₂) sebesar 3,67 (IPCC, 2008).

D. Pengolahan Data

Perhitungan biomassa diprediksi menggunakan persamaan alometrik dari Chave et al., (2005) yang diterapkan untuk daerah dengan curah hujan lembab/lembab (1500–4000):

$$AGB = 0,0509 \times \rho D^2 H \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan (*Remarks*): AGB = Biomassa di atas tanah (kg); ρ = berat jenis kayu (g/cm³). Nilai berat jenis kayu yang digunakan dalam penelitian ini menurut Hairiah et al. (2011) yaitu 0,0509 g/cm³ untuk areal bekas tebangan; D = diameter setinggi dada (cm); H = total tinggi pohon (m).

Selanjutnya simpanan karbon dihitung menggunakan persamaan IPCC (2008):

$$Cs = B \times 0,47 \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan (*Remarks*): Cs = stok karbon (ton/ha); B = biomassa (ton/ha); 0,47 = nilai konversi kandungan karbon sebesar 0,47

Selanjutnya CO₂ yang diserap dihitung menggunakan persamaan di bawah ini (Ministry of Forestry, 2013):

$$\text{CO}_2\text{-ekuivalen} = 44/12 \times \text{Cs} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan (*Remarks*): CO_2 -ekuivalen digunakan untuk standarisasi efek iklim dari berbagai gas rumah kaca (ton $\text{CO}_2\text{-eq}$); nilai 44/12 adalah perbandingan berat molekul CO_2 dengan berat molekul dan Cs adalah stok karbon (ton C/ha).

E. Analisis Data

Untuk menganalisis pengaruh diameter setinggi dada terhadap volume kayu dianalisis menggunakan analisis statistik regresi linear sederhana dengan software SPSS 25. Analisis/uji regresi merupakan suatu kajian dari hubungan antara satu variabel, yaitu variabel yang diterangkan (*the explained variabel*) dengan satu atau lebih variabel, yaitu variabel yang menerangkan (*the explanatory*). Apabila variabel bebasnya hanya satu, maka analisis regresinya disebut dengan regresi sederhana. Persamaan regresi linier sederhana secara matematik adalah (Yuliara, 2016).

$$Y = a + bX \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan (*Remarks*): Y = diameter setinggi dada/*diameter at breast height*, a = konstanta (*intersep*), perpotongan dengan sumbu vertikal, dan b = konstanta regresi (*slope*)
X = volume kayu/*log volume*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Inventarisasi Tegakan Sebelum Penebangan

Inventarisasi tegakan sebelum penebangan (ITSP) merupakan kegiatan pencatatan, pengukuran, dan penandaan pohon pada areal blok kerja tahunan (Ministry of Education and Culture, 2013). Kegiatan ini bertujuan untuk mengetahui potensi tegakan di areal tebangan. Hasil ITSP alam konsesi PT Tunas Timber Lestari disajikan pada Tabel 1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa potensi Jenis Komersial I dan Jenis Komersial II sebanyak 68.421 pohon dengan volume 133.818,70 m³. Jenis pohon ditebang yang paling dominan oleh pohon Resak (*Vatica sp.*) untuk Jenis Komersial Kelas I/Kayu Meranti dan pohon jambu-jambu (*Eugenia sp.*) dari Jenis Komersial Kelas II/Rimba Kelompok Campuran. Potensi kedua jenis tersebut masing-masing adalah 19.927 pohon atau 32.881,39 m³ dan 24.635 pohon atau 46.738,88 m³.

Selanjutnya, distribusi volume tegakan berdasarkan kelas diameter disajikan pada Gambar 2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pohon pada kelas diameter 60 cm ke atas memiliki volume tegakan

lebih rendah dibandingkan dengan kelas diameter lainnya. Hal ini dikarenakan jumlah pohon pada kelas diameter tersebut lebih sedikit. Semakin tinggi diameter pohon, maka semakin sedikit jumlah pohon sehingga mempengaruhi volume tegakan. Bentuk yang digambarkan pada grafik memiliki huruf "J" terbalik. Kurva terbentuk karena proses pertumbuhan memerlukan waktu yang lama, sering terjadi persaingan antar individu terutama air, unsur hara, ruang tumbuh, dan sinar matahari. Semakin besar kelas diameter maka semakin sedikit jumlah pohon (Istomo & Dwisutono, 2016). Dengan bentuk kurva tersebut maka kondisi tegakan di daerah penelitian memiliki struktur yang normal.

Ketersediaan tegakan pada hutan tipe normal sangat tinggi sehingga dapat memperbaiki struktur dan komposisi hutan serta dapat menjamin kelestarian tegakan di masa yang akan datang sehingga hilangnya pohon berdiameter besar di kemudian hari karena rusak atau mati akan diganti (Suwardi, Mukhtar, & Syamsuardi, 2013). Menurut Whitmore (1990), pembentukan struktur tegakan hutan tropis alam berbentuk J terbalik tidak terlepas dari berbagai jenis tumbuhan yang menyusunnya. Pada hutan alam primer dan hutan bekas tebangan dengan kondisi tegakan yang baik, jenis pohon yang paling dominan adalah dari jenis klimaks. Jika jenis klimaks ini berkumpul dalam suatu tapak dan membentuk komunitas, maka terbentuklah hutan alam dengan struktur tegakan berbentuk J terbalik.

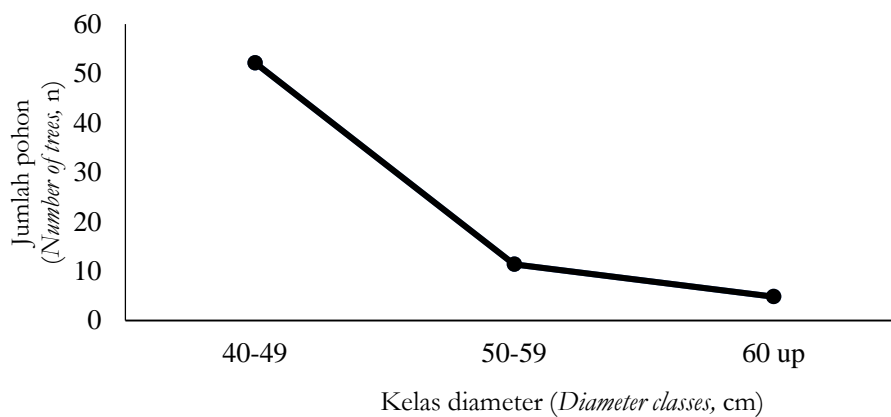
B. Potensi Simpanan Karbon Sebelum Penebangan

Karbon dioksida (CO_2) merupakan salah satu gas rumah kaca (GRK) utama di atmosfer, dan peningkatan kadar CO_2 di atmosfer merupakan faktor penting dalam perubahan iklim global (Friedlingstein et al., 2014). Cadangan karbon hutan merupakan hasil dari keduanya, penangkapan karbon oleh pertumbuhan biomassa dan durasi karbon dalam biomassa. Körner (2017) menyatakan bahwa umur panjang pohon mengendalikan modal karbon hutan daripada laju pertumbuhan pohon. Ukuran *carbon pool* dari sebuah ekosistem dan pergantian karbon umumnya tidak terkait dan mendalilkan bahwa waktu tinggal karbon dalam suatu sistem harus diperpanjang untuk mengawetkan fluks karbon dari atmosfer ke biomassa hutan. Penyerapan karbon terjadi pada biomassa yang tumbuh di atas dan di bawah tanah, misalnya dari biomassa dan dekomposisi tanah (IPCC 2014).

Tabel 1. Rekapitulasi hasil Inventarisasi Tegakan Sebelum Penebangan di petak tebang
Table 1. The recapitulation of stand inventory before felling in logging compartment

Spesies (<i>Species</i>)	Kelas Diameter (<i>Diameter Classes</i> , cm)						Total	
	40–49		50–59		≥ 60			
	Jumlah Pohon (<i>Number of Tree</i>)	Volume (m³) (<i>Volume</i>)	Jumlah Pohon (<i>Number of Tree</i>)	Volume (m³) (<i>Volume</i>)	Jumlah Pohon (<i>Number of Tree</i>)	Volume (m³) (<i>Volume</i>)	Jumlah Pohon (<i>Number of Tree</i>)	Volume (m³) (<i>Volume</i>)
A. Jenis dilindungi (<i>Protected species</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-
B. Jenis pohon ditebang (<i>Harvested species</i>)								
1. Komerisal I/ Kelompok kayu meranti (<i>Commercial I/ Meranti wood group</i>)								
Matoa (<i>Pometia pinnata</i>)	1.575	2.518,61	545	1.320,50	175	626,04	2.295	4.465,15
Merawan (<i>Hopea cernua</i>)	2.412	3.856,09	477	1.203,74	436	2.041,45	3.325	7.101,28
Mersawa (<i>Anisoptera</i> spp.),	1.879	3.333,89	1.233	3.543,35	1.139	6.231,22	4.251	13.108,46
Nyatoh (<i>Palaquium</i> sp.)	635	1.107,41	161	448,35	61	267,09	857	1.822,85
Resak (<i>Vatica</i> spp.)	17.910	27.764,06	1.834	4.442,00	183	675,33	19.927	32.881,39
Total Komersial I (<i>Comercial I total</i>)	24.411	38.580,06	4.250	10.957,94	1.994	9.841,13	30.655	59.379,13
2. Komersial II/ Kelompok rimba campuran (<i>Commercial II/ mixed group</i>)								
Bintangur (<i>Calophyllum</i> sp.)	3.498	5.893,46	819	2.239,52	416	2.046,37	4.733	10.179,35
Jambu-jambu (<i>Eugenia</i> sp.)	18.276	28.778,37	4.630	11.270,81	1.729	6.689,70	24.635	46.738,88
Ketapang (<i>Terminalia catappa</i>)	12	20,57	1	3,09	-	-	13	23,66
Medang (<i>Alseodaphne insignis</i>)	2.848	4.737,07	608	1.619,76	257	1.122,01	3.713	7.478,84
Mendarahan (<i>Myristica</i> sp.)	2.952	4.979,77	994	2.629,47	395	1.648,05	4.341	9.257,29
Terentang (<i>Campnosperma auriculatum</i>)	194	329,30	90	226,46	47	205,79	331	761,55
Total Rimba campuran (<i>Mixed group total</i>)	27.780	44.738,54	7.142	17.989,11	2.844	11.711,92	37.766	74.439,57
Total B	52.191	83.318,60	11.392	28.947,05	4.838	21.553,05	68.421	133.818,70
Total A + B	52.191	83.318,60	11.392	28.947,05	4.838	21.553,05	68.421	133.818,70

Sumber (*Source*): PT Tunas Timber Lestari (2019)



Gambar 2. Distribusi potensi tegakan sebelum penebangan berdasarkan kelas diameter dan jumlah pohon

Figure 2. Stands distribution before felling according to diameter classes and number of trees

Potensi simpanan karbon biomassa dari hutan tanaman maupun hutan alam merupakan *carbon pool* penting bagi suatu negara. Zhang et al. (2015) melaporkan bahwa serapan karbon biomassa nasional di Cina meningkat dari 25,0 menjadi 166,5 Tg C/tahun antara tahun 1973 dan 2008, dan kemudian menurun menjadi 130,9 Tg C/tahun antara 2009 dan 2013. Hutan di Cina berfungsi sebagai penyerap karbon biomassa rata-rata 80,6 Tg C/tahun selama empat dekade terakhir. Sekitar 63% dan 37% peningkatan serapan karbon disumbang oleh hutan tanaman dan hutan alam, terutama didorong oleh

perluasan wilayah dan pertumbuhan hutan. Kondisi ini menunjukkan pentingnya peran perluasan hutan dan peningkatan pertumbuhan hutan jika suatu negara perlu meningkatkan serapan karbon nasionalnya.

Potensi simpanan karbon rata-rata tegakan sebelum penebangan dapat dihitung berdasarkan diameter pohon dan volume tegakan. Di antara semua parameter biofisik pohon, diameter setinggi dada merupakan salah satu variabel penting untuk menilai biomassa dan karbon karena menjelaskan lebih

Tabel 2. Potensi simpanan karbon sebelum penebangan

Table 2. Carbon storage potency before felling

Petak Tebang (Logging Compartment)	Biomassa (Biomass, kg/pohon)	Biomassa (Biomass, ton/ha)	Simpanan Karbon (Carbon Storage, ton C/ha)
CC47	1214,41	13,58	6,14
	1214,63	13,69	6,77
	1216,31	12,59	5,83
Rata-rata (Average)	1215,17	13,29	6,25
K47	1162,20	16,50	9,07
	1160,18	15,29	6,13
	1161,05	16,06	7,30
Rata-rata (Average)	1161,14	15,95	7,50
L47	1147,70	15,10	7,17
	1151,39	15,64	7,28
	1164,76	15,97	7,52
Rata-rata (Average)	1153,41	15,57	7,32
Jumlah (Total)	3529,72	44,81	21,07
Jumlah rata-rata (Total of the average)	1176,57	14,94	7,02

dari 95% variasi biomassa (Gibbs, Brown, Niles, & Foley, 2007). Tabel 2 menunjukkan bahwa potensi simpanan karbon ketiga petak tebang berbeda meskipun memiliki luasan yang sama yaitu 100 hektar. Serapan CO₂ erat kaitannya dengan biomassa tegakan (Siregar & Heriyanto, 2010). Petak tebang K47 memiliki potensi simpanan karbon yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh jumlah pohon pada petak tersebut 1449 lebih banyak dibandingkan dengan dua petak pembalakan lainnya. Dengan demikian, kondisi tersebut memengaruhi rata-rata volume tegakan menjadi lebih tinggi sehingga memiliki biomassa rata-rata (ton/ha) yang lebih tinggi di petak penebangan.

Secara keseluruhan, total potensi simpanan karbon di wilayah studi adalah 21,07 ton C/ha. Namun, hasil penelitian ini lebih rendah dibandingkan hasil penelitian (Samsoedin, Dharmawan, & Siregar, 2009). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa kandungan karbon di atas permukaan tanah di hutan alam dan bekas tebangan setelah 30 tahun berturut-turut adalah 264,70 ton C/ha dan 249,10 ton C/ha. Tingginya potensi simpanan karbon pada penelitian ini disebabkan oleh banyaknya sampel yang digunakan sehingga mempengaruhi jumlah biomassa. Oleh karena itu, kondisi tersebut memengaruhi estimasi perhitungan karbon.

Sebagai gambaran, berikut merupakan beberapa hasil penelitian tentang potensi simpanan karbon di beberapa tipe hutan di berbagai negara, antara lain : 1) Ullah & Al-Amin (2012) melaporkan bahwa total stok karbon hutan alam perbukitan di Bangladesh sebesar 283,80 ton/ha padahal pohon menghasilkan 110,94 ton/ha, tumbuhan bawah (semak, herba, dan rumput) 0,50 ton/ha, serasah 4,21 ton/ha, dan tanah 168,15 t/ha (sampai kedalaman 1 m); 2) Besar et al. (2020) menunjukkan bahwa hutan di Sabah, Malaysia memiliki total stok karbon pada tiga *land system* yaitu agroforestri, monokultur kelapa sawit, dan hutan alam masing-masing adalah 80,94 Mg C/ha; 68,37 Mg C/ha, dan 287,29 Mg C/ha. Total stok karbon di hutan alam tropis adalah yang tertinggi, diikuti oleh sistem agroforestri dan monokultur; 3) Dong, Tap, Mai, & Lien (2020) menunjukkan bahwa cadangan karbon pada tiga tipe hutan Taman Nasional Ba Be Vietnam adalah *rich forest* mencapai 273,17 ton/ha, *medium forest* mencapai 136,23 ton/ha, dan *poor forest* yang direhabilitasi mencapai 42,06 ton/ha; 4) Pragasan (2020) menyatakan bahwa total perkiraan cadangan karbon di hutan perbukitan tropis Pachaimalai, Tamil Nadu India berkisar antara 4,79 hingga 119,00 ton/ha; dan 5) Gebeyehu, Soromessa, Bekele, & Teketay (2019) melaporkan bahwa rata-rata

stok karbon di hutan pegunungan tropis Ethiopia memiliki biomassa di atas permukaan tanah dan stok karbon organik tanah masing-masing adalah $191,6 \pm 19,7$ dan $149,32 \pm 6,8$ Mg C/ha.

Beberapa hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa setiap kondisi dan bentuk hutan memiliki simpanan karbon yang berbeda. Banyak faktor yang menyebabkan perbedaan ini. Faktor-faktor tersebut antara lain adalah kekayaan spesies, kepadatan, dan ketinggian memengaruhi total penyimpanan karbon di hutan selain suhu, curah hujan, topografi, karakter edafik, dan praktik pengelolaan yang diterapkan (Khan et al., 2019; Pragasan, 2020; Reyna-Bowen, Lasota, Vera-Montenegro, Vera-Montenegro, & Blońska, 2019; Sharma, Mishra, Krishan, Tiwari, & Rana, 2016; Zhou et al., 2018). Selain itu, keputusan pengelolaan hutan, seperti intensitas pemanenan, konversi tipe hutan yang rentan, regenerasi hutan, dan promosi spesies pohon terpilih, memiliki pengaruh penting pada penyimpanan karbon di hutan (Alvarez, Ortiz, Díaz-Pinés, & Rubio, 2016).

C. Emisi Karbon dari Pohon yang Ditebang

Tabel 3 menyajikan volume kayu yang ditebang. Tabel tersebut menunjukkan bahwa volume kayu yang ditebang di ketiga petak tebang rata-rata sebesar 2,69 m³. Petak tebangan K47 memiliki volume tebangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan dua petak penebangan lainnya. Hal ini disebabkan oleh potensi tegakan yang memiliki rata-rata dbh lebih tinggi dibandingkan dengan dua petak tebang lainnya. Meskipun penggunaan biomassa dan kepadatan meningkat, volume merupakan ukuran yang paling banyak digunakan untuk kuantitas pohon. Dalam pengelolaan hutan, tinggi dan diameter setinggi dada (dbh) pohon digunakan untuk memperkirakan jumlah total dan volume pohon yang dapat dimanfaatkan. Parameter ini lebih disukai karena kemudahan dalam perolehan data dan akurasi relatif yang diberikan bagi pengguna metode ini. Tinggi pohon dalam persamaan volume ini dihitung dari persamaan diameter-tinggi yang dipilih untuk memprediksi tinggi pohon (Koirala, Kizha, & Baral, 2017; Mugasha et al., 2016).

Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai R adalah 0,711 atau koefisien korelasi untuk nilai *R-square* adalah 0,505 (koefisien determinasi). Dalam hal ini, variasi variabel terikat (diameter setinggi dada) dapat dijelaskan oleh variabel bebas (volume kayu) sebesar 50,5%, sedangkan sisanya sebesar 49,5% dipengaruhi oleh faktor lain. Selanjutnya, Tabel 4 juga menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang kuat antara diameter setinggi dada dengan volume kayu. Tingkat hubungan

Tabel 3. Volume pohon yang ditebang
Table 3. Volume of felled tree

Petak Tebang (<i>Logging compartment</i>)	Jumlah Pohon Ditebang (n) (<i>Number of Felled Tree</i>)	dbh (cm)	Panjang Kayu (m) (<i>Log Length</i>)	Volume Kayu (m ³) (<i>Log Volume</i>)
CC47	19	62,94	16,02	3,04
	19	50,64	14,74	2,35
	20	52,13	14,54	2,83
Rata-rata (<i>Average</i>)	19	55,23	15,1	2,74
K47	19	62,94	16,02	3,04
	17	50,84	14,12	2,35
	11	52,68	16,44	2,90
Rata-rata (<i>Average</i>)	16	55,49	15,53	2,76
L47	10	64,00	16,40	2,91
	14	48,70	15,20	2,07
	15	52,95	16,27	2,69
Rata-rata (<i>Average</i>)	13	55,22	15,96	2,56
Jumlah (<i>Total</i>)	48	165,94	46,59	8,06
Jumlah rata-rata (<i>Total of average</i>)	16	55,31	15,53	2,69

Tabel 4. Model pengaruh diameter setinggi dada pada volume kayu
Table 4. Model of the diameter at breast height (dbh) influence on log volume

Model	R	Koefisien Determinasi (R ²)	R ² yang disesuaikan (<i>Adjusted R²</i>)	Standar kesalahan perhitungan (<i>Std. error of the estimate</i>)
1	0,711 ^a	0,505	0,502	0,609772

^aPredictors: (Constant), Diameter

kedua variabel tersebut dapat dilihat pada Tabel 7. Standar error estimasi adalah 0,609 yang berarti volume kayu yang digunakan dari variabel terikat adalah 0,609 m³.

Sementara itu dari Tabel 5, uji ANOVA menunjukkan nilai probabilitas (signifikan) lebih kecil dari 0,05. Karena nilai probabilitas lebih kecil dari 0,05, maka model regresi ini dapat digunakan untuk memprediksi volume kayu. Hasil prediksi persamaan

regresi adalah $Y = 0,720 + 0,059X$ (Tabel 6). Persamaan dapat diperoleh nilai konstanta sebesar 0,720, artinya jika tidak ada variabel diameter setinggi dada (X) maka volume kayu tetap sebesar 0,720 m³. Koefisien regresi 0,059 menunjukkan bahwa setiap kali terjadi penambahan satu satuan diameter setinggi dada, maka volume kayu mengalami peningkatan sebesar 0,059 m³.

Tabel 5. ANOVA dari efek diameter setinggi dada pada volume kayu
Table 5. ANOVA diameter at breast height effect on log volume

Model	Jumlah kuadrat (<i>Sum of Squares</i>)	Derajat bebas (<i>Degree of freedom</i>)	Rata-rata kuadrat (<i>Mean square</i>)	F	Peluang (<i>Probability</i>)
1 Regression	53,927	1	53,927	145,034	0,000 ^b
Residual	52,799	142	0,372		
Total	106,726	143			

^aDependent variable: Volume of wood

^bPredictors: (Constant), Diameter

Tabel 6. Koefisien pengaruh diameter setinggi dada pada volume kayu
Table 6. Coefficient of diameter at breast height influence on log diameter

Model	Koefisien tidak standarisasi (Unstandardized Coefficients)		Koefisien standarisasi (Standardized Coefficients)	T hitung	Peluang (Probability)
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	0,720	0,276		-2,612	0,000
Diameter	0,059	0,005	0,711	12,043	0,000

^aDependent variable: Volume of wood

Tabel 7. Kekuatan hubungan menurut koefisien korelasi
Table 7. The relationship strength according to correlation coefficient

Koefisien Korelasi (Correlation Coefficient)	Kekuatan Hubungan (Relationship Strength)
0,00	Tidak ada korelasi (<i>no correlation</i>)
0,01-0,09	Kurang signifikan (<i>less significant</i>)
0,10-0,29	Lemah (<i>weak</i>)
0,30-0,49	Menengah (<i>medium</i>)
0,50-0,69	Kuat (<i>strong</i>)
0,70-0,89	Sangat kuat (<i>very strong</i>)
>0,90	Mendekati sempurna (<i>close to perfect</i>)

(Sugiyono, 2009)

Adanya gangguan berupa kegiatan penebangan mempengaruhi stok karbon yang tersedia di hutan alam. Gangguan hutan memberikan pengaruh besar pada cadangan dan penyerapan karbon hutan (Williams, Gu, MacLean, Masek, & Collatz, 2016), sehingga mengurangi risiko kehilangan karbon dari gangguan alam sangat penting untuk mempertahankan atau meningkatkan penyimpanan karbon di hutan dalam waktu yang lama. Biomassa merupakan tempat penyimpanan CO₂, selama biomassa berupa tegakan pohon masih utuh maka karbon CO₂ tersimpan di dalamnya, namun jika biomassa ditebang maka CO₂ yang tersimpan akan dilepaskan sebagai emisi. Pearson et al. (2014) menyatakan bahwa dalam semua kasus, emisi didominasi oleh kerusakan pada vegetasi dan infrastruktur di sekitarnya daripada kayu gelondongan itu sendiri, dan total emisi mewakili sekitar 3–15% dari stok karbon biomassa dari hutan terkait yang tidak ditebang. Hilangnya biomassa hidup disebabkan oleh kerusakan langsung yang terjadi akibat penebangan pohon-pohon terpilih, kerusakan insidental pada pohon-pohon di sekitarnya yang disebabkan oleh pohon-pohon yang ditebang, dan infrastruktur yang dibangun untuk mengeluarkan kayu dari hutan.

Rata-rata volume kayu yang disajikan pada Tabel 3 juga dapat digunakan untuk menghitung potensi simpanan karbon dan emisi CO₂. Dari kayu gelondongan yang telah ditebang, dapat dihitung

emisi yang terjadi seperti disajikan pada Tabel 8. Tabel tersebut menunjukkan bahwa dengan volume tebangan yang mencapai 8,06 m³ akan menghasilkan emisi sekitar 67,86 CO₂ -ekuivalen Sementara itu, petak tebang CC 47 memiliki rata-rata emisi karbon paling tinggi jika dibandingkan dengan dua petak tebang lainnya. Hal ini disebabkan oleh rata-rata CO₂ yang terserap dalam biomassa pada petak tersebut cukup tinggi yaitu mencapai 14,57 ton/ha sehingga memiliki potensi simpanan karbon rata-rata sebesar 6,85 ton C/ha.

Sebagai perbandingan, berikut merupakan beberapa hasil penelitian tentang stok karbon pada hutan yang mengalami gangguan akibat kegiatan pemanenan dan kebijakan pengelolaannya: 1) Rojas-García, Fredericksen, Lozada, & Agramont (2019) menunjukkan bahwa pemanenan menciptakan keseimbangan C negatif dalam ekosistem sebagai akibat dari ekstraksi 42,701 Mg C yang tidak diatur selama setahun; 2) Suberi et al. (2018) total karbon kayu di atas tanah lebih tinggi di hutan yang tidak dipanen (220±154 ton/ha) dibandingkan di hutan yang dipanen (128,6±86,1 ton/ha). Stok karbon rata-rata keseluruhan lebih tinggi di hutan yang tidak dipanen (357±179) daripada di hutan yang dipanen (257,4±93,1) yang secara statistik signifikan ($p=0,031 > 0,05$); 3) Jevšenak, Klopčič, & Mali (2020) melaporkan bahwa hutan Slovenia dapat diharapkan menjadi penyerap karbon sampai panen melebihi sekitar 9 juta m³ per tahun, yang mendekati total

Tabel 8. Emisi karbon dari kayu yang ditebang
Table 8. Carbon emission from felled tree

Petak Tebang (<i>Logging Compartment</i>)	Volume Kayu yang Ditebang (<i>Volume of Felled Tree, m³</i>)	Biomassa (<i>Biomass, ton/ha</i>)	Simpanan Karbon (<i>Carbon Storage, ton C/ha</i>)	Emisi Karbon (<i>Carbon emission</i>) (CO ₂ -ekuivalen)
CC47	3,04	15,14	7,11	26,11
	2,35	12,71	5,98	21,94
	2,83	15,85	7,45	27,35
Rata-rata (<i>Average</i>)	2,74	14,57	6,85	25,13
K47	3,04	13,59	6,39	23,44
	2,35	10,46	4,92	18,05
	2,90	14,23	6,69	24,54
Rata-rata (<i>Average</i>)	2,76	12,76	6,00	22,01
L47	2,91	16,62	7,81	28,67
	2,07	8,18	3,84	14,11
	2,69	11,19	5,26	19,30
Rata-rata (<i>Average</i>)	2,56	11,99	5,64	20,69
Jumlah (<i>Total</i>)	8,06	39,32	18,49	67,86
Jumlah rata-rata (<i>Total of the average</i>)	2,69	13,11	6,16	22,61

peningkatan volume tahunan yang dihitung. Hasil tersebut juga penting untuk Tingkat Referensi Hutan (*Forest Reference Level/FRL*) yang akan berlangsung di negara-negara anggota Uni Eropa pada periode 2021–2025. Untuk Slovenia, FRL telah ditetapkan ke 3270,2 Gg CO₂-ekuivalen per tahun yang berarti bahwa total kayu yang dipanen tidak boleh melebihi 6 juta m³ per tahun; dan 4) Yuniawati & Tampubolon (2021) pemanenan kayu dapat mengurangi stok karbon sebesar 2,42 ton/ha atau menurun sebesar 68,07% sebelum pemanenan.

Hasil berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemanenan kayu dapat mengurangi potensi penyimpanan karbon CO₂ sehingga menghasilkan emisi yang cukup tinggi. Teknik pemanenan kayu yang tepat dan ramah lingkungan tidak hanya di atas kertas tetapi dapat diterapkan di lapangan. Azian et al. (2019) menyatakan bahwa di antara komponen emisi, yaitu jalan sarad, jalan angkutan, dan *logging deck*, menghasilkan emisi yang secara signifikan lebih rendah sebesar 37% pada *low impact logging* (LIL) dibandingkan dengan *reduced impact logging* (RIL). Fitri (2013) menunjukkan bahwa pengelolaan hutan alam produksi lestari mampu mengurangi kehilangan karbon sebesar 90,521 ton C/tahun. Pengelolaan hutan alam produksi lestari yang menerapkan teknik RIL mampu mereduksi emisi CO₂ akibat kerusakan tegakan tinggal sebesar 39%/tahun dibandingkan dengan pengelolaan hutan alam produksi tidak lestari;

Kesimpulannya, perbaikan teknik penebangan untuk meminimalkan kerusakan pada tegakan hutan adalah salah satu tindakan mitigasi yang dilakukan untuk mengurangi emisi karbon dalam penebangan kayu di hutan. LIL tampaknya memberikan solusi strategi dalam pengelolaan hutan tropis yang meminimalkan potensi risiko terhadap iklim, terutama terkait dengan perubahan besar dalam emisi karbon ke atmosfer.

Setelah penebangan, jumlah biomassa yang tersisa di area penelitian berkurang sehingga memengaruhi potensi penyimpanan karbon CO₂ berkurang. Kondisi simpanan karbon sebelum, selama, dan setelah penebangan disajikan pada Tabel 9. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terjadi penurunan jumlah pohon setelah penebangan dengan sisa tegakan sebanyak 4.287 pohon atau terjadi penurunan sebesar 3,36%. Biomassa yang tersisa mengalami penurunan sebesar 5,5 ton/ha (berkurang 12,27% dari jumlah biomassa sebelum penebangan) dan sisa karbon yang tersimpan menjadi 2,57 ton C/ha (berkurang 12,20% dari total simpanan karbon sebelum penebangan). Dengan demikian, emisi keseluruhan selama dan setelah penebangan mencapai 77,29 CO₂-ekuivalen.

Ganguly, Pierobon, & Hall (2020) menyatakan bahwa simpanan karbon menghasilkan manfaat dalam mitigasi dampak pemanasan global yang mencapai 4,3 juta ton CO₂-ekuivalen. Setelah memperhitungkan emisi GRK, terkait dengan

Tabel 9. Kondisi simpanan karbon sebelum, selama, dan setelah penebangan
Table 9. Condition of carbon storage before, during and after felling

Kondisi (Condition)	Jumlah Tegakan (pohon) (Number of Stands)	Biomassa (ton/ha) (Biomass)	Simpanan Karbon (ton C/ha) (Carbon Storage)	Emisi Karbon (Carbon Emission) (CO ₂ -ekuivalen)
Sebelum penebangan (Before felling)	4.431	44,82	21,07	0
Selama penebangan (During felling)	144	39,32	18,49	67,86
Setelah penebangan (After felling)	4.287	5,5	2,57	9,43

pemanenan dan manufaktur, dalam model temporal yang diusulkan, hasilnya menunjukkan dampak menguntungkan bersih sekitar 1,7 juta ton CO₂-ekuivalen, menjadikan industri manufaktur produk kayu di Amerika sebagai mitigasi pemanasan global bersih. Aspek permanen lain adalah penggunaan produk kayu yang dipanen. Penyerapan karbon berlangsung untuk periode yang lebih lama ketika hasil hutan digunakan untuk membangun rumah, bukan sebagai bioenergi. Tantangan kebijakan untuk proyek *carbon sink* ini sebagian dapat diatasi dengan meningkatkan biaya transaksi melalui pemantauan dan verifikasi proyek peningkatan penyerap karbon (Cacho, Lipper, & Moss, 2013), tetapi juga melalui desain kebijakan yang cerdas, serta mengurangi biaya transaksi yang tinggi.

IV. KESIMPULAN

Cadangan karbon pada tegakan sebelum penebangan adalah 21,07 ton C/ha. Potensi simpanan karbon berkurang ketika sebanyak 144 pohon ditebang, pengurangannya sebesar 18,49 ton C/ha, atau setara dengan emisi karbon sebesar 67,86 ton CO₂-ekuivalen. Setelah penebangan, potensi simpanan karbon berkurang sebesar 2,57 ton C/ha sehingga potensi emisi di areal setelah penebangan setara dengan 9,43 ton CO₂-ekuivalen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran pengambilan data lapangan, khususnya untuk Bapak Isok. Penelitian ini merupakan kegiatan kerjasama antara Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan dengan PT Tunas Timber Lestari.

KONTRIBUSI PENULIS

Ide, desain, dan rancangan percobaan dilakukan oleh YN dan DS; percobaan dan perlakuan pengujian dilakukan oleh YN dan DS; pengumpulan data dan

analisis data dilakukan oleh YN dan DS; penulisan manuskrip oleh YN dan SA; perbaikan dan finalisasi manuskrip dilakukan oleh YN dan SA.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvarez, S., Ortiz, C., Díaz-Pinés, E., & Rubio, A. (2016). Influence of tree species composition, thinning intensity and climate change on carbon sequestration in Mediterranean mountain forests: A case study using the CO₂ Fix model. *Mitig. Adapt. Strategy. Global Change*, 21, 1045–1058. doi: 10.1007/s11027-014-9565-4.
- Azian, M., Nizam, M. S., Samsudin, M., Ismail, P., Nur-Hajar, Z. S., Lim, K. L., & Yusoff, M. (2019). Carbon emission assessment from different logging activities in production forest of Pahang, Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 31(3), 304–311. doi: 10.26525/jtfs2019.31.3.304.
- Besar, N. A., Suardi, H., Phua, M. H., James, D., Mokhtar, M. Bin, & Ahmed, M. F. (2020). Carbon stock and sequestration potential of an agroforestry system in Sabah, Malaysia. *Forests*, 11(2), 1–16. doi: 10.3390/f11020210.
- Cacho, O. J., Lipper, L., & Moss, J. (2013). Transaction costs of carbon offset projects: A comparative study. *Ecological Economics*, 88 (February 2018), 232–243. doi: 10.1016/j.ecolecon.2012.12.008.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x.
- Domke, G. M., Oswalt, S. N., Walters, B. F., & Morin, R. S. (2020). Tree planting has the potential to increase carbon sequestration capacity of forests in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(40), 24649–24651. doi: 10.1073/

- pnas.2010840117.
- Dong, N. T., Tap, V. H., Mai, N. T. P., & Lien, N. T. H. (2020). Estimation of forest carbon stocks in Ba Be National Park, Bac Kan province, Vietnam. *Forest and Society*, 4(1), 195–208. doi: 10.24259/fs.v4i1.7848.
- Friedlingstein, P., Andrew, R. M., Rogelj, J., Peters, G. P., Canadell, J. G., Knutti, R., ... Le Quéré, C. (2014). Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets. *Nature Geoscience*, 7(10), 709–715. doi: 10.1038/NGEO2248.
- Gagnon, J. L., Clark, N. A., Downing, A. K., Fisher, K. J., Frey, G. E., & Worrell, W. C. (2015). *A Guide for New Virginia Woodland Owners Virginia Cooperative Extension*. Virginia: Virginia State University, Petersburg.
- Ganguly, I., Pierobon, F., & Hall, E. S. (2020). Global warming mitigating role of wood products from Washington state's private forests. *Forests*, 11(2), 1–20. doi: 10.3390/f11020194.
- Gebeyehu, G., Soromessa, T., Bekele, T., & Teketay, D. (2019). Carbon stocks and factors affecting their storage in dry Afromontane forests of Awi Zone, northwestern Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*, 43(1), 1–18. doi: 10.1186/s41610-019-0105-8.
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4). doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045023.
- IPCC. (2008). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories – A primer, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Miwa K., Srivastava N. and Tanabe K. (H. . Eggleston, K. Miwa, N. Srivastava, & K. Tanabe, Eds.)*. Hayama: IGES, Japan.
- Irawan, U. S., & Purwanto, E. (2020). *Pengukuran dan Pendugaan Cadangan Karbon pada Ekosistem Hutan Gambut dan Mineral, Studi Kasus di Hutan Rawa Gambut Pematang Gadung dan Hutan Lindung Sungai Lesan, Kalimantan*. Bogor, Indonesia: Yayasan Tropenbos Indonesia.
- Irland, L. C. (2011). Timber productivity research gaps for extensive forest management. *Small-Scale Forestry*, 10, 389–400. doi: 10.1007/s11842-011-9155-1.
- Irundu, D., Beddu, M. A., & Najmawati, N. (2020). Potensi Biomassa dan Karbon Tersimpan Tegakan di Ruang Terbuka Hijau Kota Polewali, Sulawesi Barat. *Jurnal Hutan Dan Masyarakat*, 12(1), 49. doi: 10.24259/jhm.v12i1.9675.
- Istomo, & Dwisutono, A. N. (2016). Struktur dan komposisi tegakan serta sistem perakaran tumbuhan pada kawasan KARST di taman nasional Bantimurung-Bulusaraung, Resort Pattunuang-Karaenta. *Jurnal Silvitektur Tropika*, 07(1), 58–67.
- Jevšenak, J., Klopčič, M., & Mali, B. (2020). The effect of harvesting on national forest carbon sinks up to 2050 simulated by the CBM-CFS3 model: A case study from Slovenia. *Forests*, 11(10), 1–16. doi: 10.3390/f11101090.
- Khan, D., Muneer, M. A., Nisa, Z. U., Shah, S., Amir, M., Saeed, S., ... Huang, H. (2019). Effect of climatic factors on stem biomass and carbon stock of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in Daxing'anling Mountain of Inner Mongolia, China. *Advances in Meteorology*, 2019. doi: 10.1155/2019/5692574.
- Koirala, A., Kizha, A. R., & Roth, B. E. (2017). Perceiving major problems in forest products transportation by trucks and trailers: A cross-sectional survey. *Eur J Forest Eng*, 3(1), 23–34.
- Körner, C. (2017). A matter of tree longevity. *Science*, 355(6321), 130–131.
- Ministry of Education and Culture. (2013). *Inventarisasi Hutan*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Ministry of Forestry. (2013). *Monograph model-model alometrik untuk pendugaan biomassa dan stok karbon hutan di Indonesia*. Bogor, Indonesia: Badan Litbang Kehutanan.
- Mugasha, W. A., Mwakalukwa, E. E., Luoga, E., Malimbwi, R. E., Zahabu, E., Silayo, D. S., ... Kashindye, A. (2016). Allometric models for estimating tree volume and aboveground biomass in lowland forests of Tanzania. *International Journal of Forestry Research*, 2016.
- O'Dwyer, J., Walshe, D., & Byrne, K. A. (2018). Wood waste decomposition in landfills: An assessment of current knowledge and implications for emissions reporting. *Waste Management*, 73, 181–188. doi: 10.1016/j.wasman.2017.12.002.
- Pearson, T. R. H., Brown, S., & Casarim, F. M. (2014). Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging. *Environment Research Letter*, 9, 1–11. doi: 10.1088/1748-9326/9/3/034017.
- Pragasari, L. A. (2020). Tree carbon stock and its relationship to key factors from a tropical hill forest of Tamil Nadu, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1–8. doi: 10.1080/24749508.2020.1742510.
- Reyna-Bowen, L., Lasota, J., Vera-Montenegro, L.,

- Vera-Montenegro, B., & Blońska, E. (2019). Distribution and factors influencing organic carbon stock in mountain soils in Babia Góra National Park, Poland. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(15). doi: 10.3390/app9153070.
- Rojas-García, F., Fredericksen, T. S., Vazquez Lozada, S., & Endara Agramont, A. R. (2019). Impact of timber harvesting on carbon storage in montane forests of central Mexico. *New Forests*, 50(6), 1043–1061. doi: 10.1007/s11056-019-09714-z.
- Samsodin, 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. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 6(1), 47–56. doi: 10.20886/jphka.2009.6.1.47-56.
- Sharma, C. M., Mishra, A. K., Krishan, R., Tiwari, O. P., & Rana, Y. S. (2016). Variation in vegetation composition, biomass production, and carbon storage in ridge top forests of high mountains of Garhwal Himalaya. *Journal of Sustainable Forestry*, 35(2), 119–132. doi: 10.1080/10549811.2015.1118387.
- Shearman, P., Bryan, J., & Laurance, W. F. (2012). Are we approaching ‘peak timber’ in the tropics? *Biology Conservation*, 151, 17–21. doi: 10.1016/J.BIOCON.2011.10.036.
- Siregar, C. A., & Heriyanto, N. M. (2010). Akumulasi biomassa karbon pada skenario hutan sekunder di Maribaya Bogor Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam*, 7, 215–226. doi: 10.20886/jphka.2010.7.3.215-226.
- Suberi, B., Tiwari, K. R., Gurung, D. B., Roshan, M., Bajracharya, R. M., & Sitaula, B. K. (2018). Effect of harvesting and non-harvested forest management on carbon stocks. *Journal of Environment and Climate Change*, 8(3), 152–164. doi: 10.9734/ijecc/2018/v8i327153.
- Sugiyono. (2009). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Suwardi, A. B., Mukhtar, E., & Syamsuardi. (2013). Komposisi jenis dan cadangan karbon di hutan tropis dataran rendah Ulu Gandut Sumatera Barat. *Jurnal Biologi*, 12(2), 168–176. doi: 10.14203/beritabiologi.v12i2.529.
- Toochi, E. C. (2018). Carbon sequestration: how much can forestry sequester CO₂? *Forestry Research Engineering International Journal*, 2(3), 148–150. doi: 10.15406/freij.2018.02.00040.
- Ullah, M. R., & Al-Amin, M. (2012). Above- and below-ground carbon stock estimation in a natural forest of Bangladesh. *Journal of Forest Science*, 58(8), 372–379. doi: 10.17221/103/2011-JFS.
- Whitmore, T. C. (1990). *An Introduction to Tropical Rain Forest* (2nd ed.). New York: Oxford University Press.
- Williams, C. A., Gu, H., MacLean, R., Masek, J. G., & Collatz, G. J. (2016). Disturbance and the carbon balance of US forests: A quantitative review of impacts from harvests, fires, insects, and droughts. *Global and Planetary Change*, 143, 66–80. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.06.002.
- Yuliara, I. M. (2016). *Modul Regresi Linier Sederhana*. Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Udayana.
- Zhang, C., Weimin, J., Chen, J. M., Wang, X., Yang, L., & Zheng, G. (2015). Disturbance-induced reduction of biomass carbon sinks of China’s forests in recent years. *Environment Research Letter*, 10, 1–12. doi: 10.1088/1748-9326/10/11/114021.
- Zhou, R., Li, W., Zhang, Y., Peng, M., Wang, C., Sha, L., ... Wang, S. (2018). Responses of the carbon storage and sequestration potential of forest vegetation to temperature increases in Yunnan Province, SW China. *Forests*, 9(227), 1–16. doi: 10.3390/f9050227.