

Biomass and Carbon Stocks in Post-Agriculture Secondary Forest in Manokwari, West Papua, Indonesia

Slamet Arif Susanto¹, Agatha Cecilia Maturbongs², Heru Joko Budirianto², Eko Tenoyo Sriwidodo¹, Agustinus Kilmaskossu¹, Peniwidiyanti³

¹Sekolah Tinggi Sains dan Teknologi Mnuwar (STITEK Mnuwar), Jl. Pasir Putih Bakaro No. 28, Manokwari, Papua Barat, Indonesia;

²Jurusan Biologi FMIPA, Universitas Papua, Jl. Gunung Salju Amban, Manokwari, Papua Barat, Indonesia;

³Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. Raya Jakarta-Bogor KM 46, Cibinong, Jawa Barat, Indonesia;

Article History

Received : August 01th, 2023

Revised : August 20th, 2023

Accepted : September 12th, 2023

*Corresponding Author: **Slamet Arif Susanto**,

Sekolah Tinggi Sains dan Teknologi Mnuwar (STITEK Mnuwar), Manokwari, Papua Barat, Indonesia;

Email: ssarf4@gmail.com

Abstract: Vegetations in post-agriculture forests (PAF) have the potential to absorb carbon dioxide and store it in the form of biomass. However, information on carbon stocks in post-agriculture secondary forest in Papua, Indonesia still needs to be available. This study aimed to analyze the density of vegetation and its relationship to the carbon stock of aboveground vegetation biomass on PAF in the lowland of Manokwari, West Papua. This study was conducted on PAF aged 4 and 7 years using a one-factor, completely randomized design. Carbon stock is calculated using an allometric equation based on a diameter at breast height of 1.30 m (dbh \geq 5cm). The results showed that 60% of the relative density of trees on the two PAF's was composed by *Premna odorata*, *Piper aduncum*, and *Macaranga tanarius*. Carbon stocks on PAF aged 4 and 7 years reach 550 kg/ha and 140 kg/ha respectively. There is an increase in aboveground biomass and carbon stock with relative tree density and, tree diameter, which is significantly affected by the age of the PAF ($P < 0,002$). The low carbon stock on PAF aged four years indicates that there has been a significant decrease in soil fertility after several years of cultivation by the local Papuan community. Therefore, there must be a difference in land use management between natural secondary forest and post-agriculture forest.

Keywords: Aboveground biomass, IPCC, succession, tree density.

Pendahuluan

Alih fungsi hutan menjadi area perkebunan mengubah struktur dan fungsi ekosistem. Demikian juga alih fungsi hutan menjadi ladang berpindah yang dilakukan oleh masyarakat lokal Papua di Indonesia. Ketika ladang milik masyarakat lokal Papua telah ditinggalkan maka akan terjadi proses suksesi. Proses suksesi menghasilkan variasi keanekaragaman tumbuhan dan ukuran biomassa yang berbeda-beda bergantung pada lama waktu suksesi (Karyati *et al.*, 2021). Lahan suksesi di hutan Atlantik Brasil dilaporkan ada korelasi antara jumlah tegakan

pohon dengan stok karbon pada $P < 0,001$ (Robinson *et al.*, 2015). Selain itu, suksesi ekosistem hutan lain di Sulawesi Tenggara, Indonesia dilaporkan bahwa keanekaragaman tumbuhan berhubungan erat dengan stok karbon dengan R^2 mencapai 0,72 (Sari *et al.*, 2020). Oleh sebab itu, peningkatan jumlah tumbuhan sejalan dengan waktu suksesi yang terjadi di lahan bekas kebun Papua Indonesia diduga mengubah biomassa tumbuhan di atas permukaan tanah, sehingga mendorong peningkatan stok karbon yang tersimpan.

Stok karbon pada dasarnya dibagi menjadi stok karbon tegakan vegetasi dan stok karbon tumbuhan yang telah mati. Sedangkan

berdasarkan letaknya dibagi menjadi stok karbon di atas permukaan tanah dan di bawah permukaan tanah (Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013). Stok karbon dari tegakan vegetasi di atas permukaan tanah relatif mudah diukur serta memiliki peran krusial dalam menyerap CO₂ (Chave *et al.*, 2005). Stok karbon di atas permukaan tanah juga menyumbang 24-39% total karbon pada hutan sekunder umur 40-60 tahun (Jones *et al.*, 2019) dan menyimpan 60% karbon di hutan Amazon Brasil (Heinrich *et al.*, 2021). Hal tersebut akibat dari aktivitas pertumbuhan tegakan vegetasi yang aktif dan adanya daun yang mampu melaksanakan fotosintesis (Walker *et al.*, 2021).

Stok karbon dari biomassa di atas permukaan tanah berperan penting dalam menjaga kestabilan karbon di suatu ekosistem. Stok karbon dari biomassa tumbuhan hidup berperan dalam menyimpan CO₂ dalam bentuk molekul organik sehingga tidak terbebas ke atmosfer, menurunkan suhu dan meningkatkan kelembapan udara, menghasilkan bahan organik untuk menutrisi tanah dan berpotensi untuk mengurangi pemanasan global (Ngo *et al.*, 2013; Manaye *et al.*, 2021; Cardozo *et al.*, 2022).

Stok karbon dari vegetasi di lahan suksesi, termasuk lahan bekas kebun di Papua Indonesia perlu diinvestigasi secepatnya karena lahan-lahan bekas kebun berpotensi dialihfungsikan menjadi area permukiman dan area kebun permanen. Penelitian ini bertujuan menganalisis kerapatan vegetasi dan

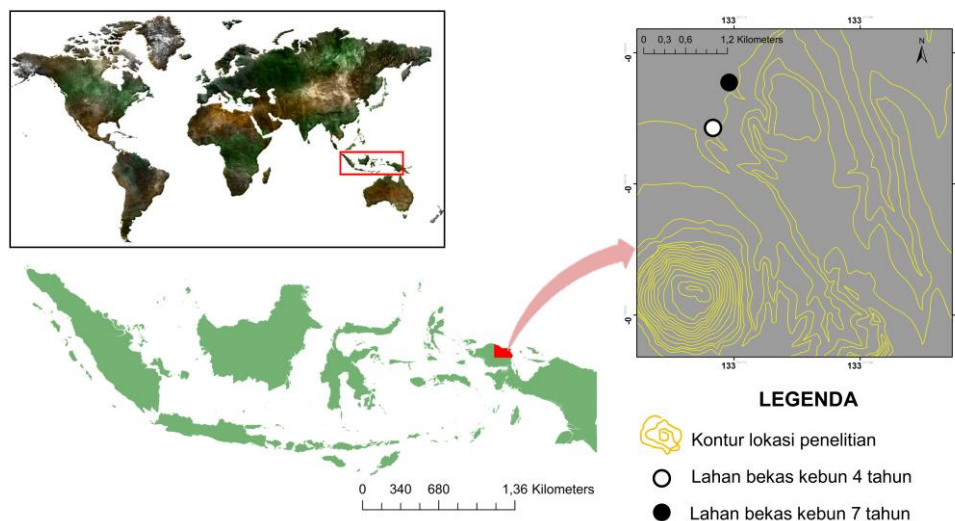
hubungannya dengan dugaan stok karbon biomassa vegetasi di atas permukaan tanah pada lahan suksesi akibat bekas kebun di Manokwari, Papua Barat.

Bahan dan Metode

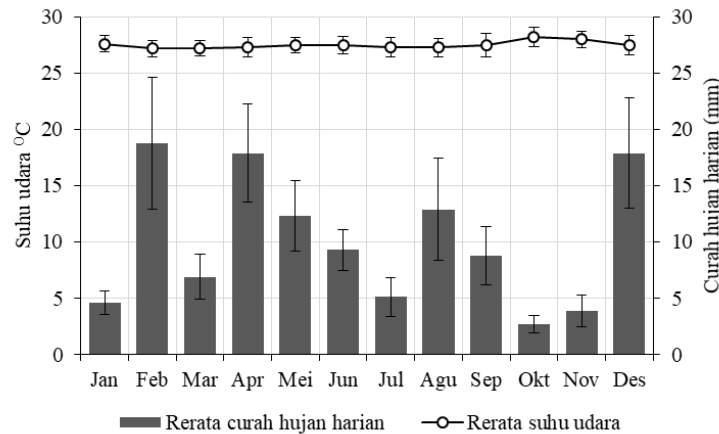
Deskripsi lokasi penelitian

Lokasi penelitian terletak di bagian barat Kabupaten Manokwari (0° 44' 57,4" LS, 133° 33' 50,4" BT), Provinsi Papua Barat, Indonesia. Lokasi penelitian termasuk hutan suksesi bekas kebun tradisional milik masyarakat lokal Papua. Lahan bekas kebun yang dipilih berumur 4 tahun dan 7 tahun. Seluruh lokasi penelitian merupakan area dataran rendah dengan ketinggian di bawah 100 mdpl. Lokasi penelitian beserta informasi kontur disajikan pada Gambar 1.

Lokasi penelitian memiliki iklim yang termasuk ke dalam tipe Af berdasarkan klasifikasi Köppen-Geiger atau hutan hujan tropis dengan ciri khas pada bulan kering curah hujan harian lebih dari 2 mm atau ≥ 60 mm tiap bulan (Peel *et al.*, 2007). Menurut data dari stasiun cuaca Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Rendani di Manokwari (130 km dari lokasi penelitian) curah hujan tahun 2021 mencapai 2891,6 mm/tahun dengan rerata suhu udara harian 27,5 °C. Rerata curah hujan harian (mm) dan suhu bulanan (°C) tahun 2021 dirangkum pada Gambar 2. Tanah di lokasi penelitian termasuk dalam jenis podsolik merah-kuning yang didominasi oleh fraksi liat.



Gambar 1. Lokasi penelitian lahan bekas kebun di dataran rendah Manokwari Papua Barat



Gambar 2. Klimatogram yang menunjukkan rerata curah hujan harian dan rerata suhu udara bulanan pada tahun 2021. *Error bars* menunjukkan standar eror (SE)

Cara pengambilan data

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap faktor tunggal yakni umur bekas kebun sebagai faktor. Setiap umur lahan bekas kebun dibuat 5 petak penelitian berukuran 20 m × 20 m yang diletakkan secara acak. Lima petak penelitian tersebut diasumsikan sebagai ulangan. Pendataan tumbuhan dilakukan pada seluruh pohon yang memiliki diameter setinggi dada (1,30 m dari permukaan tanah) atau dbh ≥ 5 cm (Chave *et al.*, 2005). Setelah itu dilakukan analisis kerapatan jenis tumbuhan menggunakan persamaan 1.

$$KR = \frac{ni}{N} \times 100 \quad (1)$$

KR sebagai kerapatan relatif (%), ni adalah jumlah individu jenis ke-i dan N sebagai total individu jenis setiap petak penelitian.

Stok karbon dari tegakkan vegetasi dihitung menggunakan persamaan alometrik tanpa melibatkan biomassa kayu lapuk, kayu mati atau cabang yang telah mati. Perhitungan stok karbon dilakukan dengan dua tahapan, pertama perhitungan total biomassa pohon di atas permukaan tanah atau *total aboveground biomass* (TAGB) menggunakan persamaan 2 dan 3.

$$\ln(\text{TAGB}) = c + \alpha \ln(\text{dbh}); \quad (2)$$

$$\text{TAGB} = 2,72^{(c + \alpha \ln(\text{dbh}))} \quad (3)$$

TAGB dinyatakan sebagai perhitungan total biomassa pohon di atas permukaan tanah atau *total aboveground biomass* (TAGB); In adalah logaritme natural berbasis bilangan Euler bernilai 2,72; c sebagai intersep yang bernilai -1,201; α = koefisien regresi yang bernilai 2,196; dbh = diameter batang pohon setinggi dada (cm). Persamaan tersebut telah diaplikasikan pada hutan campuran di Kalimantan dengan tingkat signifikansi $P < 0,001$ (Basuki *et al.*, 2009). Setelah diperoleh dugaan TAGB, tahap kedua yakni perhitungan stok karbon berdasarkan IPCC (2003).

$$\text{Stok karbon (ton/ha)} = 0,46 \times \text{TAGB} \quad (4)$$

Angka 0,46 dinyatakan sebagai nomor atom karbon.

Analisis data

Analisis regresi-korelasi digunakan untuk menentukan hubungan antara kerapatan relatif pohon dan rerata diameter pohon dengan TAGB dan banyaknya stok karbon yang dihasilkan untuk tiap umur lahan bekas kebun. Di samping itu, analisis sidik ragam faktor tunggal (ANOVA *single factor*), dilanjutkan uji Tukey pada $P < 0,05$ untuk membandingkan TAGB dan stok karbon antara kedua lokasi penelitian.

Hasil dan Pembahasan

Kerapatan relatif pohon

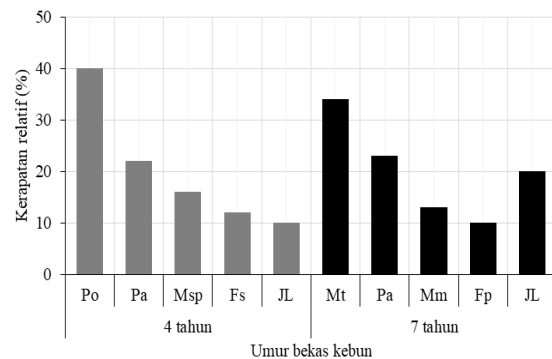
Kerapatan relatif pohon (dbh ≥ 5 cm) pada lahan bekas kebun umur 4 tahun berbeda dengan

lahan bekas kebun 7 tahun (Gambar 3). Kerapatan relatif jenis *Premna odorata* di lahan bekas kebun 4 tahun mencapai 40%, diikuti oleh *Piper aduncum*, *Macaranga* sp., dan jenis lainnya. Di sisi lain, pada lahan bekas kebun 7 tahun, *Macaranga tanarius* memiliki kerapatan relatif yang tidak mencapai 40%, namun kerapatan jenis lainnya mencapai 20%. Secara keseluruhan lahan bekas kebun umur 4 hingga 7 tahun masih didominasi oleh jenis-jenis tumbuhan perintis sebagai indikator awal suksesi. Kehadiran jenis perintis yang dominan didukung oleh tingginya kemampuan tumbuh, kecepatan reproduksi dan luasnya persebaran biji, sehingga meningkatkan tutupan area pada lahan bekas kebun (Brunet *et al.*, 2012).

Premna odorata termasuk jenis yang tergolong adaptif, dan melimpah di area hutan suksesi di Filipina (Lirio *et al.*, 2013). Jenis tersebut tumbuh sangat baik pada tanah yang didominasi fraksi liat, memiliki distribusi pada rentang ketinggian 25-1800 mdpl, dan tersebar luas di seluruh Asia Tenggara (de Kok, 2013). *Piper aduncum* memiliki toleransi yang tinggi terhadap suhu lingkungan dan cekaman kekeringan, selain itu banyaknya jumlah biji yang masak pun menjadi penyebab keberhasilan tumbuh yang tinggi dan berpotensi sebagai jenis asing invasif bila tidak dikendalikan (Wen *et al.*, 2015).

Jenis dominan yang ditemukan pada penelitian ini, seperti *Macaranga* spp. *P. odorata*, dan *P. aduncum*, mirip dengan jenis dominan pada penelitian Murdjoko *et al.*, (2022). Kehadiran tumbuh bersama antara *P. aduncum* dan *Macaranga* pun dijumpai di dataran rendah Papua Nugini yang ditandai dengan tersimpannya benih di dalam tanah (*seed bank*) dengan jumlah yang besar dan kemampuan tumbuh yang juga sangat cepat (Rogers & Hartemink, 2000). *Macaranga tanarius* mampu tumbuh menginvasi suatu area terbuka, terlebih bila terjadi akumulasi daun di atas tanah dalam waktu yang panjang karena adanya senyawa alelopati yang mampu menghambat pertumbuhan anakan dan berkompetisi dengan tumbuhan lain di sekitarnya (Tseng *et al.*, 2003). Hal ini mengindikasikan bahwa adanya keterbukaan lahan selama proses tebas bakar yang dilakukan oleh masyarakat lokal Papua menyebabkan paparan cahaya matahari yang intensif ke tanah dan mempercepat

perkecambahan jenis-jenis indikator suksesi tersebut.



Gambar 3. Kerapatan relatif tetumbuhan (dbh \geq 5 cm) di lahan bekas kebun umur 4 dan 7 tahun. Keterangan singkatan: Po: *Premna odorata*, Pa: *Piper aduncum*; Msp: *Macaranga* sp.; Fs: *Ficus septica*; Mt: *Macaranga tanarius*; Mm: *Macaranga mappa*; Fp: *Ficus pungens*; dan JL: Jenis-jenis lainnya.

Biomassa vegetasi di atas permukaan tanah dan stok karbon

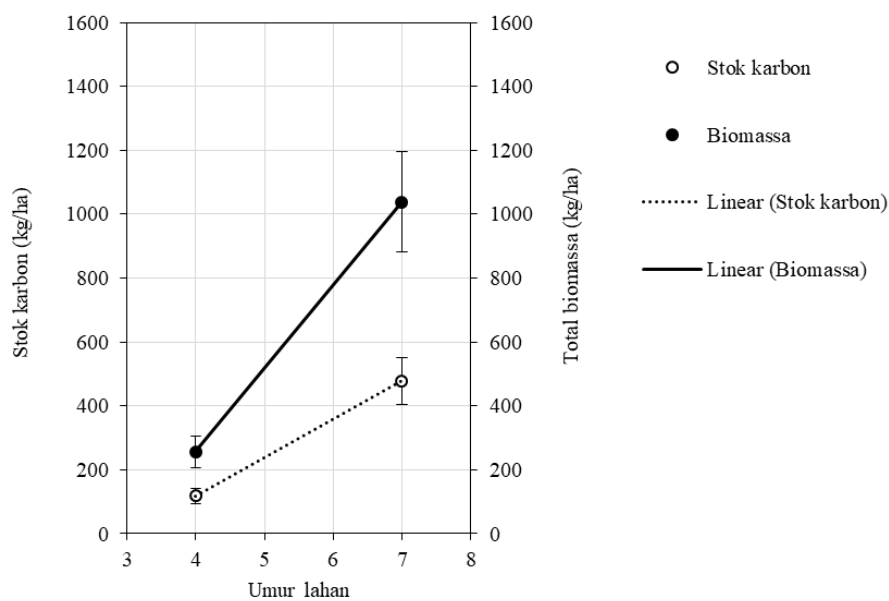
Secara keseluruhan ada peningkatan total biomassa vegetasi dan stok karbon sejalan dengan peningkatan umur lahan bekas kebun (Gambar 4). Total biomassa vegetasi dan stok karbon antara lahan bekas kebun umur 4 tahun dengan umur 7 tahun berbeda signifikan ($F_{1,9} = 22,33$; $P < 0,002$). Lahan bekas kebun umur 4 tahun dan 7 tahun memiliki total biomassa vegetasi dan stok karbon yang berbanding lurus. Secara umum penggunaan persamaan alometrik yang sama untuk seluruh pohon menyebabkan total biomassa vegetasi dan stok karbon hanya akan bergantung pada dbh dan tinggi pohon (Chave *et al.*, 2005).

Penelitian ini hanya menggunakan dbh sebagai variabel utama yang digunakan untuk menduga stok karbon. Semakin tua lahan bekas kebun, maka semakin tinggi nilai keragaman jenis, kerapatan jenis, jumlah individu hingga basal area (Mukul *et al.*, 2020). Oleh sebab itu, lahan bekas kebun umur 7 tahun memiliki lebih banyak stok karbon daripada lahan bekas kebun umur 4 tahun karena perbedaan jumlah pohon. Dengan menggunakan metode alometrik destruktif dan memasukkan variabel berat jenis kayu (dbh $< 4,5$ cm), dugaan akumulasi karbon sebesar 4,27 ton C/ha setiap tahun di lahan bekas

kebun umur 4 sampai 7 tahun daerah tropis Thailand (Pothong *et al.*, 2022).

Total biomassa vegetasi pada lahan bekas kebun umur 7 tahun mencapai 1200 kg/ha atau empat kali lebih tinggi dibandingkan lahan bekas kebun umur 4 tahun (Gambar 4). Di sisi lain, stok karbon juga memiliki kecenderungan yang sama, yakni mencapai 550 kg/ha pada lahan bekas kebun umur 7 tahun dan hanya 140 kg/ha pada lahan bekas kebun umur 4 tahun. Total biomassa vegetasi memiliki variasi nilai yang lebih besar daripada variasi nilai stok karbon. Penelitian ini menunjukkan bahwa lahan bekas kebun umur 4

dan 7 tahun memiliki rerata stok karbon 45% dari total biomassa vegetasi. Stok karbon yang berasal dari biomassa tersebut lebih rendah daripada yang direkomendasikan oleh IPCC (2003) yakni 48% dari total biomassa vegetasi. Penelitian ini hampir sama dengan penelitian Jantawong *et al.*, (2017) dan Pothong *et al.*, (2022) yang juga dilakukan di lahan bekas kebun di Thailand, yakni stok karbon dari total biomassa vegetasi pada kisaran 44,67-44,84%. Oleh sebab itu, lahan bekas kebun memiliki stok karbon dari biomassa yang rendah.



Gambar 4. Total biomassa vegetasi dan stok karbon pada lahan bekas kebun dengan umur berbeda di Manokwari, Papua Barat

Stok karbon pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan dugaan stok karbon di hutan sekunder umur 4-10 tahun berdasarkan IPCC (2003) yakni 0,46-0,67 ton/ha. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan tipe penggunaan lahan sebelumnya dan luas area sampling. Dugaan stok karbon suatu lahan akan bergantung pada faktor biotik dan abiotik, seperti tipe tanah, kandungan hara, kemiringan lahan, radiasi cahaya matahari, bahkan organisme dekomposer di tanah (Gebeyehu *et al.*, 2019; de Souza Almeida *et al.*, 2021; Wani *et al.*, 2021; Castaño *et al.*, 2023). Lahan bekas kebun yang berumur muda umumnya memiliki tingkat kesuburan tanah yang rendah, sehingga memengaruhi pertumbuhan vegetasi yang secara tidak langsung berdampak pada stok karbon.

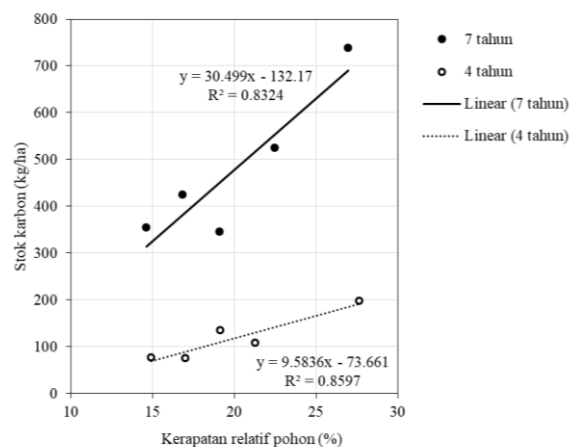
Kerapatan relatif pohon dan stok karbon

Hubungan berbanding lurus antara kerapatan relatif pohon dengan stok karbon disajikan pada Gambar 5. Jumlah pohon yang semakin meningkat menyebabkan stok karbon ikut meningkat pula. Pada lahan bekas kebun umur 4 tahun memiliki korelasi Pearson antara kerapatan relatif pohon dengan stok karbon sebesar 0,93, sedangkan pada lahan bekas kebun umur 7 tahun sebesar 0,91. Kerapatan pohon yang meningkat menyebabkan tingginya akumulasi biomassa di atas permukaan tanah, sehingga stok karbon dan potensi serapan karbon oleh vegetasi ikut meningkat (Robinson *et al.*, 2015; Martínez-Sánchez *et al.*, 2015).

Korelasi Pearson yang lebih besar pada lahan bekas kebun umur 4 tahun dibandingkan

umur 7 tahun (Gambar 5), mengindikasikan bahwa petak-petak penelitian pada lahan bekas kebun umur 4 tahun memiliki kerapatan pohon yang relatif sama. Berbeda dengan lahan bekas kebun umur 4 tahun, lahan bekas kebun umur 7 tahun memiliki kerapatan relatif pohon yang lebih bervariasi antar petak-petak penelitian, sehingga memiliki nilai korelasi Pearson yang lebih kecil.

Kerapatan pohon memiliki korelasi Pearson positif sebesar 0,36 ($P < 0,05$) dengan stok karbon (Saimun *et al.*, 2021) dan memiliki korelasi Pearson positif sebesar 0,57 ($P < 0,05$) dengan stok karbon (Pragasan, 2022). Meskipun ada variasi koefisien korelasi yang besar antara stok karbon dan kerapatan pohon, hasil analisis komponen utama pada beberapa penelitian menunjukkan bahwa kerapatan pohon lebih memengaruhi jumlah stok karbon dibandingkan faktor biotik dan abiotik lainnya (Behera *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2021; Saimun *et al.*, 2021). Stok karbon juga meningkat 32,28 ton/ha (55%) akibat peningkatan kerapatan pohon ($\text{dbh} \geq 10$ cm) sebesar 135 pohon/ha (31%) pada hutan sekunder tua dibandingkan hutan sekunder muda (Heriyanto *et al.*, 2020).

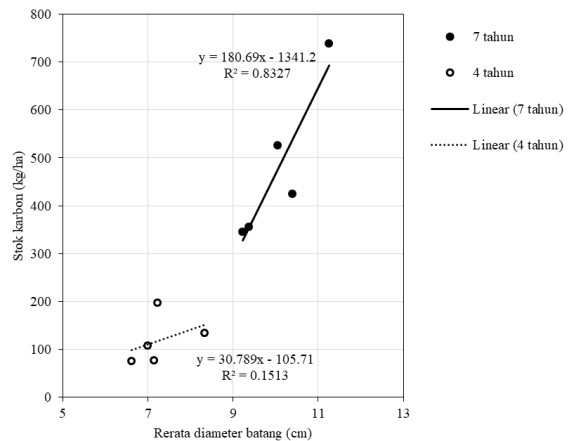


Gambar 5. Hubungan antara kerapatan relatif pohon (%) terhadap stok karbon pada lahan bekas kebun dengan umur berbeda di Manokwari, Papua Barat

Ukuran diameter batang dan stok karbon

Rerata diameter batang pohon yang semakin besar menyebabkan stok karbon semakin besar seperti yang disajikan pada Gambar 6. Meskipun begitu, pada lahan bekas kebun umur 4 tahun menunjukkan hubungan yang kurang linear antara rerata diameter batang

dengan stok karbon. Pada lahan bekas kebun umur 4 tahun memiliki korelasi Pearson antara rerata diameter batang dengan stok karbon sebesar 0,39. Di sisi lain, pada lahan bekas kebun umur 7 tahun memiliki korelasi Pearson sebesar 0,91.



Gambar 6. Hubungan antara rerata diameter batang terhadap stok karbon pada lahan bekas kebun dengan umur berbeda di Manokwari, Papua Barat

Rendahnya nilai korelasi Pearson pada lahan bekas kebun umur 4 tahun disebabkan oleh banyaknya pohon yang berdiameter lebih kecil dibandingkan lahan bekas kebun umur 7 tahun (Gambar 6). Ukuran diameter pohon, kesuburan tanah, dan topografi lahan merupakan faktor utama penentu keragaman stok karbon di ekosistem tropis (Khadanga & Jayakumar, 2020). Ukuran diameter pohon lebih memengaruhi stok karbon sebesar $P < 0,005$ dibandingkan dengan lamanya waktu suksesi $P < 0,01$ (Ma *et al.*, 2020). Ukuran diameter batang pohon juga menjadi faktor yang memengaruhi struktur vegetasi, variasi stok karbon dan untuk menduga potensi serapan karbon dari vegetasi di masa mendatang (Mensah *et al.*, 2016; Manaye *et al.*, 2021). Namun secara umum, penggunaan persamaan alometrik yang spesifik untuk setiap jenis tumbuhan maupun persamaan alometrik tunggal akan dipengaruhi oleh ukuran diameter, berat jenis kayu dan tinggi tumbuhan (Chave *et al.*, 2005).

Kesimpulan

Ada korelasi positif yang signifikan ($P < 0,05$) antara kerapatan vegetasi dengan stok

karbon biomassa vegetasi di atas permukaan tanah pada lahan suksesi akibat bekas kebun di Manokwari, Papua Barat. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa semakin banyak pohon yang memiliki diameter batang berukuran besar juga berkorelasi positif dengan peningkatan stok karbon. Di samping itu, stok karbon berbeda signifikan ($P < 0,002$) antara lahan bekas kebun umur 4 tahun dengan umur 7 tahun. Meskipun lahan bekas kebun berumur muda di Manokwari, Papua Barat memiliki stok karbon yang relatif kecil, keberadaannya turut berkontribusi dalam menyimpan karbon organik dalam bentuk biomassa.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh perangkat Distrik Sidey dan masyarakat lokal di Desa Kaironi, Manokwari, Papua Barat, khususnya Mirdan D. Husein, SH atas izin penelitian yang telah diberikan.

Referensi

- Basuki, T. M., van Laake, P. E., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2009). Allometric equations for estimating the aboveground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257(8):1684–1694. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>.
- Behera, S. K., Sahu, N., Mishra, A. K., Bargali, S. S., Behera, M. D., & Tuli, R. (2017). Aboveground biomass and carbon stock assessment in Indian tropical deciduous forest and relationship with stand structural attributes. *Ecological Engineering*, 99:513–524. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.046>.
- Brunet, J., de Frenne, P., Holmström, E., & Mayr, M. L. (2012). Life-history traits explain rapid colonization of young post-agricultural forests by understory herbs. *Forest Ecology and Management* 278:55–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.002>.
- Cardozo, E. G., Celentano, D., Rousseau, G. X., Silva, H. R. E., Muchavisoy, H. M., & Gehring, C. (2022). Agroforestry systems recover tree carbon stock faster than natural succession in Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems*, 96(5-6): 941–956. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00754-7>.
- Castaño, C., Hallin, S., Egelkraut, D., Lindahl, B. D., Olofsson, J., & Clemmensen, K. E. (2023). Contrasting plant–soil–microbial feedbacks stabilize vegetation types and uncouple topsoil C and N stocks across a subarctic–alpine landscape. *New Phytologist*, 238(6):2621–2633. <https://doi.org/10.1111/nph.18679>.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Chairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J-P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145:87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.
- de Kok, R. (2013). The genus *Premna* L. (Lamiaceae) in the Flora Malesiana area. *Kew Bulletin*, 68:55–84. <https://doi.org/10.1007/s12225-013-9433-5>.
- de Souza Almeida, L. L., Frazão, L. A., Lessa, T. A. M., Fernandes, L. A., de Carvalho Veloso, Á. L., Lana, A. M. Q., de Souza, I. A., Pegoraro, R. F., & Ferreira, E. A. (2021). Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil & Tillage Research*, 205: 104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.
- 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. <https://doi.org/10.1186/s41610-019-0105-8>.
- Heinrich, V. H. A., Dalagnol, R., Cassol, H. L. G., Rosan, T. M., de Almeida, C. T., Silva Junior, C. H. L., Campanharo, W. A., House, J. I., Sitch, S., Hales, T. C., Adami,

- M., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. O. C. (2021). Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nature Communication*, 12(1):1785. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>.
- Heriyanto, M. N., Priatna, D., & Samsedin, I. (2020). Struktur tegakkan dan serapan karbon pada hutan sekunder kelompok hutan Muara Merang, Sumatera Selatan. *Jurnal Sylva Lestari*, 8(2):230–240. <https://doi.org/10.23960/jsl28230-240>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). *In: Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., Wagner, F. (Eds.), Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC and IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, Kanagawa, Japan. ISBN 4-88788-003-0.
- Jantawong, K., Elliott, S., & Wangpakapattanawong, P. (2017). Above-ground carbon sequestration during restoration of upland evergreen forest in Northern Thailand. *Open Journal of Forestry*, 7(2):157–171. <https://doi.org/10.4236/ojf.2017.72010>.
- Jones, I. L., DeWalt, S. J., Lopez, O. R., Bunnefeld, L., Pattison, Z., & Dent, D. H. (2019). Above-and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of the Total Environment*, 697:133987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133987>.
- Karyati, K., Widiati, K. Y., Karmini, K., & Mulyadi, R. (2021). The allometric relationships for estimating above-ground biomass and carbon stock in an abandoned traditional garden in East Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(2):751–762. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220228>.
- Khadanga, S. S., & Jayakumar, S. (2020). Tree biomass and carbon stock: understanding the role of species richness, elevation, and disturbance. *Tropical Ecology*, 61:128–141. <https://doi.org/10.1007/s42965-020-00070-0>.
- Lirio, S. B., Macabeo, A. P. G., Paragas, E. M., Knorn, M., Kohls, P., Franzblau, S. G., Wang, Y., & Aguinaldo, M. A. M. (2014). Antitubercular constituents from *Premna odorata* Blanco. *Journal of ethnopharmacology*, 154(2), 471–474. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.04.015>.
- Ma, S-H., Eziz, H., Tian, D, Yan, Z-B., Cai, Q., Jiang, M-W., Ji, C-J. & Fang, J-Y. (2020). Size- and age-dependent increases in tree stem carbon concentration: implications for forest carbon stock estimations. *Journal of Plant Ecology*, 13(2):233–240. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaa005>.
- Manaye, A., Tesfamariam, B., Tesfaye, M., Worku, A., & Gufi, Y. (2021). Tree diversity and carbon stocks in agroforestry systems in northern Ethiopia. *Carbon Balance and Management*, 16(1):14. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00174-7>.
- Martínez-Sánchez, J. L., Tigar, B. J., Cámara, L., & Castillo, O. (2015). Relationship between structural diversity and carbon stocks in humid and sub-humid tropical forest of Mexico. *Ecoscience*, 22(2-4): 125–131. <https://doi.org/10.1080/11956860.2016.1169384>.
- Mensah, S., Veldtman, R., Assogbadjo, A. E., Glèlè Kakaï, R., & Seifert, T. (2016). Tree species diversity promotes aboveground carbon storage through functional diversity and functional dominance. *Ecology and Evolution*, 6(20):7546–7557. <https://doi.org/10.1002/ece3.2525>.
- Mukul, S. A., Herbohn, J., & Firn, J. (2020). Rapid recovery of tropical forest diversity and structure after shifting cultivation in the Philippines uplands. *Ecology and Evolution*, 10(4):7189–7211. <https://doi.org/10.1002/ece3.6419>.
- Murdjoko, A., Brearley, F. Q., Ungirwalu, A., Djitmau, D. A., & Benu, N. M. (2022). Secondary succession after slash-and-burn cultivation in Papuan lowland forest, Indonesia. *Forests*, 13(3): 434. <https://doi.org/10.3390/f13030434>.
- Ngo, K. M., Turner, B. L., Muller-Landau, H. C., Davies, S. J., Larjavaara, M., bin Nik

- Hassan, N. F., & Lum, S. (2013). Carbon stocks in primary and secondary tropical forests in Singapore. *Forest Ecology and Management*, 296: 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.004>.
- Oliveira, C. P. D., Ferreira, R. L. C., da Silva, J. A. A., de Lima, R. B., Silva, E. A., da Silva, A. F., de Lucena, J. D. S., dos Santos, N. A. T., Lopes, I. J. C., de Lima Pessoa, M. M., & de Melo, C. L. S-M. S. (2021). Modeling and spatialization of biomass and carbon stock using LiDAR metrics in tropical dry forest, Brazil. *Forest*, 12(4):473. <https://doi.org/10.3390/f12040473>.
- Orihuela-Belmonte, D. E., De Jong, B. H. J., Mendoza-Vega, J., Van der Wal, J., Paz-Pellat, F., Soto-Pinto, L., & Flamenco-Sandoval, A. (2013). Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 171:72–84. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.012>.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5): 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pothong, T., Elliott, S., Chairuangri, S., Chanthorn, W., Shannon, D. P., & Wangpakapattanawong, P. (2022). New allometric equations for quantifying tree biomass and carbon sequestration in seasonally dry secondary forest in northern Thailand. *New Forests*, 53:17–36. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09844-3>.
- Pragasam, L. A. (2022). Tree carbon stock and its relationship to key factors from a tropical hill forest of Tamil Nadu, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 6(1):32–39. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1742510>.
- Robinson, S. J., van den Berg, E., Meirelles, G. S., & Ostle, N. (2015). Factors influencing early secondary succession and ecosystem carbon stocks in Brazilian Atlantic Forest. *Biodiversity and Conservation*, 24:2273–2291. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0982-9>.
- Rogers, H. M., & Hartemink, A. E. (2000). Soil seed bank and growth rates of an invasive species, *Piper aduncum*, in the lowlands of Papua New Guinea. *Journal of Tropical Ecology*, 16:243–251. <https://doi.org/10.1017/S0266467400001383>.
- Saimun, M. S. R., Karim, M. R., Sultana, F., & Arfin-Khan, M. A. (2021). Multiple drivers of tree and soil carbon stock in the tropical forest ecosystems of Bangladesh. *Trees, Forests and People*, 5: 100108. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100108>.
- Sari, R. R., Saputra, D. D., Hairiah, K., Rozendaal, D. M., Roshetko, J. M., & Van Noordwijk, M. (2020). Gendered species preferences link tree diversity and carbon stocks in cacao agroforest in Southeast Sulawesi, Indonesia. *Land*, 9(4):108. <https://doi.org/10.3390/land9040108>.
- Tseng, M., Huo, Y., Chen, Y., & Chou, C. (2003). Allelopathic potential of *Macaranga tanarius* (L.) Muell.-Arg. *Journal of Chemical Ecology* 29(5):1269–1286.
- Walker, A. P., De Kauwe, M. G., Bastos, A., Belmecheri, S., Georgiou, K., Keeling, R. F., & Zuidema, P. A. (2021). Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂. *New Phytologist*, 229(5):2413–2445. <https://doi.org/10.1111/nph.16866>.
- Wani, A. A., Bhat, A. F., Gattoo, A. A., Zahoor, S., Mehraj, B., Najam, N., Wani, Q. S., Islam, M. A., Murtaza, S., Dervash, M. A., & Joshi, P. K. (2021). Assessing relationship of forest biophysical factors with NDVI for carbon management in key coniferous strata of temperate Himalayas. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26: 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09937-6>.
- Wen, B., Xue, P., Zhang, N., Yan, Q., & Ji, M. (2015). Seed germination of the invasive species *Piper aduncum* as influenced by high temperature and water stress. *Weed Research* 55: 155–162. DOI: <https://doi.org/10.1111/wre.12134>