

Estimasi Cadangan Karbon di Beberapa Jenis Penggunaan Lahan di Indonesia***Estimation of Carbon Stocks in Different Land Use Types in Indonesia*****Mela Faradika^{1*} Hefri Oktoyoki¹ Maria Paulina²**¹Program Studi Ilmu Lingkungan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu
Jl. WR. Supratman, Kandang Limun, Kec. Muara Bangka Hulu, Sumatera, Bengkulu 38371²Program Studi Kehutanan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu
Jl. WR. Supratman, Kandang Limun, Kec. Muara Bangka Hulu, Sumatera, Bengkulu 38371*email: melafaradika@unib.ac.id**ABSTRACT**

Studies on carbon stock estimation in different land use types in Indonesia have been conducted. This study aims to estimate carbon stocks in various types of land cover in Indonesia, in forest and non-forest land. The results are expected to inform sustainable land management and determine climate change mitigation strategies. Forests have higher carbon stocks compared to non-forest land. The highest carbon stocks were found in mangrove forests with an average of 215.82 ton/ha, followed by primary forests and swamp forests with 205.43 ton/ha and 140.02 ton/ha, respectively. The lowest carbon stocks were found in savanna at 18.92 ton/ha, followed by shrubs and bushes at 26.6 ton/ha, and ex-mining reclamation land at 31.50 ton/ha. The variation in carbon stocks found in various types of land cover can be caused by several factors, including vegetation composition, soil conditions, ecosystem age, climate and environmental conditions, and human activities

Keywords: *carbon, ecosystem, forest, land cover***ABSTRAK**

Studi mengenai estimasi cadangan karbon di beberapa jenis penggunaan lahan di Indonesia telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi cadangan karbon pada berbagai jenis tutupan lahan di Indonesia, pada hutan dan lahan non-hutan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi dalam pengelolaan lahan yang berkelanjutan dan menentukan strategi mitigasi perubahan iklim. Hutan memiliki cadangan karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan lahan non hutan. Cadangan karbon tertinggi terdapat pada hutan mangrove dengan rata-rata 215,82 ton/ha, kemudian diikuti dengan hutan primer dan hutan rawa, berturut-turut sebesar 205,43 ton/ha dan 140,02 ton/ha. Cadangan karbon terendah terdapat pada savana sebesar 18,92 ton/ha, diikuti dengan semak dan belukar sebesar 26,6 ton/ha, dan lahan reklamasi bekas tambang sebesar 31,50 ton/ha. Adanya variasi cadangan karbon yang terdapat di berbagai jenis tutupan lahan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya komposisi vegetasi, kondisi tanah, usia ekosistem, iklim dan kondisi lingkungan, serta aktivitas manusia.

Kata kunci: karbon, ekosistem, hutan, tutupan lahan

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara megabiodiversitas dengan berbagai jenis ekosistem, seperti hutan tropis, hutan mangrove, savana, dan jenis tutupan lahan lainnya baik hutan maupun non hutan. Setiap jenis tutupan lahan ini mempunyai kapasitas berbeda dalam menyimpan karbon yang berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim. Perubahan tutupan lahan, seperti deforestasi dan konversi lahan dapat menyebabkan pelepasan karbon signifikan ke atmosfer, sehingga dapat meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca.

Penelitian yang dilakukann Alam et al., (2022), menunjukkan bahwa hutan memiliki cadangan karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan lahan non-hutan. Studi di Kalimantan Barat melaporkan bahwa hutan primer memiliki cadangan karbon sebesar 269,4 ton/ha, sementara semak belukar dan lahan pertanian masing-masing memiliki 32,59 ton/ha dan 31,41 ton/ha (Sugiarto et al., 2024)(Luhulima et al., 2020).

Selain itu, perubahan tutupan lahan dapat menyebabkan penurunan stok karbon. Studi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Blega menunjukkan bahwa selama periode 1990-2020, terjadi penurunan stok karbon sebesar 25,98%, dengan penurunan terbesar terjadi antara tahun 1990-2000 sebesar 19,41% (Yuhardi et al., 2023).

Mengestimasi cadangan karbon berdasarkan jenis tutupan lahan sangat penting untuk pengelolaan lahan yang berkelanjutan dan menentukan strategi mitigasi perubahan iklim. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu dalam perencanaan penggunaan lahan yang mempertimbangkan kapasitas penyimpanan karbon, sehingga dapat meminimalkan emisi karbon akibat perubahan tutupan lahan.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur. Penulis melakukan kajian pustaka dari berbagai jurnal yang berkaitan dengan cadangan karbon pada beberapa jenis tutupan lahan di berbagai wilayah di Indonesia sebagai bahan review. Dari data yang diperoleh ditentukan rata-rata cadangan karbon pada setiap penggunaan lahan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Cadangan Karbon di Beberapa Jenis Lahan

Penggunaan lahan terbagi atas hutan dan non hutan. Pada penelitian ini, lahan yang termasuk kategori hutan adalah hutan primer, hutan sekunder, hutan bakau, hutan tanaman, dan

hutan rawa. Sedangkan untuk kategori non hutan terdiri dari perkebunan, perkebunan campuran, pertanian lahan kering, savana, semak dan belukar, lahan sistem agroforestri, dan lahan reklamasi bekas tambang. Data cadangan karbon di beberapa jenis penggunaan lahan di berbagai daerah di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.

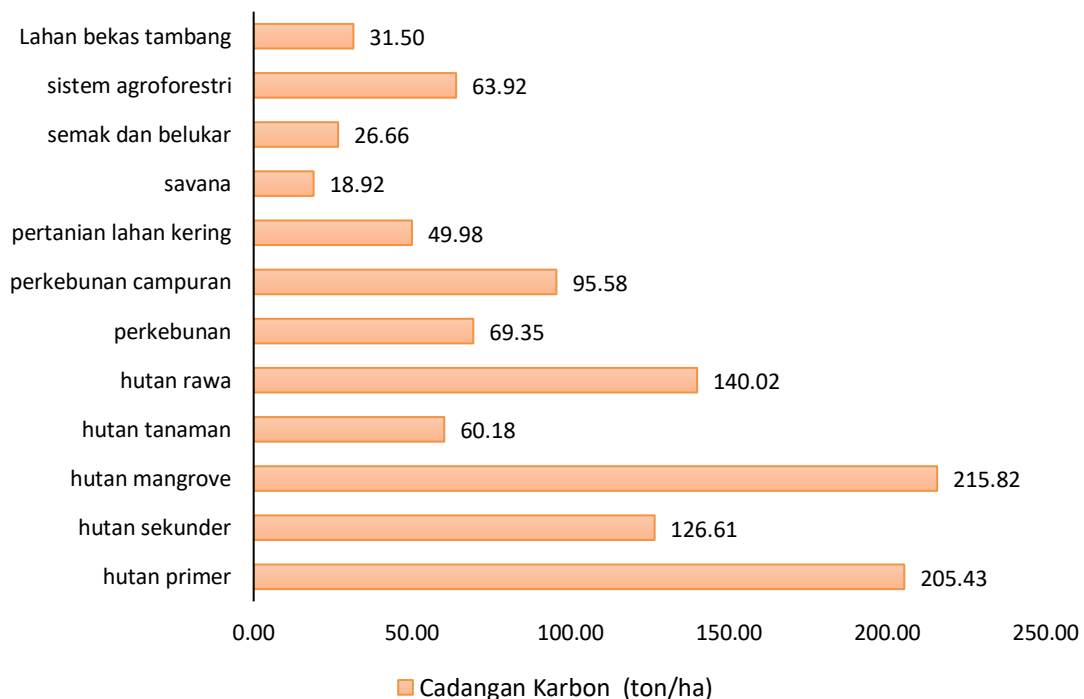
Tabel 1. Cadangan karbon di beberapa jenis penggunaan lahan di Indonesia

Jenis Lahan	Cadangan Karbon (ton ha⁻¹)	Lokasi	Referensi
Hutan primer	214,23	DAS Amandit, Kalimantan Selatan	Syam'ani et al., 2012
Hutan rawa	109,54	DAS Amandit, Kalimantan Selatan	Syam'ani et al., 2012
Hutan sekunder	76,39	DAS Amandit, Kalimantan Selatan	Syam'ani et al., 2012
Hutan tanaman	52,24	DAS Amandit, Kalimantan Selatan	Syam'ani et al., 2012
Perkebunan campuran	75,91	DAS Amandit, Kalimantan Selatan	Syam'ani et al., 2012
Perkebunan	37,09	DAS Amandit, Kalimantan Selatan	Syam'ani et al., 2012
Semak belukar	4,35	DAS Amandit, Kalimantan Selatan	Syam'ani et al., 2012
Hutan Industri	40,59	PT Finnantara Intiga, Kalimantan Barat	Widhanarto et al., 2016
Kebun lada	60,3	Kutai Timur, Kalimantan Timur	Edwin, 2016
Kebun Jati	24,7	Kutai Timur, Kalimantan Timur	Edwin, 2016
Semak	24	Kutai Timur, Kalimantan Timur	Edwin, 2016
Lahan perkebunan	10,3	Lombok Utara, Nusa Tenggara Barat	Kusumo et al. 2018
Hutan Mangrove	197,36	Hutan Mangrove Desa Margasari, Lampung timur	Windarni et al., 2018
Hutan primer	187,59	Hutan Lindung Sirimau, Kota Ambon	Luhulima et al.2020
Hutan sekunder	100,48	Hutan Lindung Sirimau, Kota Ambon	Luhulima et al.2020
Semak belukar	32,59	Hutan Lindung Sirimau, Kota Ambon	Luhulima et al.2020
Pertanian lahan kering	31,41	Hutan Lindung Sirimau, Kota Ambon	Luhulima et al.2020
Savana	6,78	Hutan Lindung Sirimau, Kota Ambon	Luhulima et al.2020

Hutan sekunder	157,08	Kota Bengkulu, Bengkulu	Wiryo et al., 2021
Lahan percobaan pertanian	113,31	Kota Bengkulu, Bengkulu	Wiryo et al., 2021
Kebun sawit	91,02	Kota Bengkulu, Bengkulu	Wiryo et al., 2021
Sistem agroforestri	70,81	Kota Bengkulu, Bengkulu	Wiryo et al., 2021
Lahan bekas tambang batubara	33,98	PT Berau Coal (SMO), Kalimantan Timur	Hartati & Sudarmadji, 2022
Lahan bekas tambang batubara	23,01	PT Berau Coal (BMO), Kalimantan Timur	Hartati & Sudarmadji, 2022
Lahan bekas tambang batubara	37,5	PT Berau Coal (LMO), Kalimantan Timur	Hartati & Sudarmadji, 2022
Savana	45,97	Konawe Selatan, Sulawesi Tenggara	Alam et al. 2022
Hutan primer	150,5	Konawe Selatan, Sulawesi Tenggara	Alam et al. 2022
Semak	52,5	Konawe Selatan, Sulawesi Tenggara	Alam et al. 2022
Hutan mangrove	423,59	Suaka Margasatwa Karang Gading dan Langkat Timur Laut, Sumatera Utara	Harahap et al., 2023
Restorasi mangrove	356,53	Suaka Margasatwa Karang Gading dan Langkat Timur Laut, Sumatera Utara	Harahap et al., 2023
Kebun sawit	65,05	Suaka Margasatwa Karang Gading dan Langkat Timur Laut, Sumatera Utara	Harahap et al., 2023
Kebun campuran	50,44	Suaka Margasatwa Karang Gading dan Langkat Timur Laut, Sumatera Utara	Harahap et al., 2023
Hutan industri (Pinus)	80	DAS Tanralili, Sulawesi Selatan	Marselianti et al. 2023
Sistem agroforestri (pinus ,kopi)	83	DAS Tanralili, Sulawesi Selatan	Marselianti et al. 2023
Kebun jagung	71	DAS Tanralili, Sulawesi Selatan	Marselianti et al. 2023
Kebun cengkeh	70	DAS Tanralili, Sulawesi Selatan	Marselianti et al. 2023
Sistem agroforestri (mangga, jati)	77	DAS Tanralili, Sulawesi Selatan	Marselianti et al. 2023
Lahan hortikultura (kubis, tomat, sawi, cabai)	43	DAS Tanralili, Sulawesi Selatan	Marselianti et al. 2023

Hutan Mangrove	83,98	Hutan Mangrove Pesisir Utara Pulau Cawan, Indragiri Hilir	Emrinelson & Warningsih, 2023
Sistem agroforestri	58,86	Desa Rowsari, Kabupaten Jember	Lestari et al. 2023
Hutan primer	269,4	Kubu Raya, Kalimantan Barat	Sugiarto et al. 2024
Hutan sekunder	203,3	Kubu Raya, Kalimantan Barat	Sugiarto et al. 2024
Hutan rawa	170,5	Kubu Raya, Kalimantan Barat	Sugiarto et al. 2024

Besaran estimasi cadangan karbon di beberapa jenis lahan di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1. Cadangan karbon tertinggi terdapat pada hutan bakau rata-rata sebesar 215,82 ton/ha, diikuti dengan hutan primer sebesar 205,43 ton/ha dan hutan rawa sebesar 140,02 ton/ha. Cadangan karbon terendah terdapat pada savana sebesar 18,92 ton/ha, diikuti dengan semak dan belukar sebesar 26,6 ton/ha, dan lahan reklamasi bekas tambang sebesar 31,50 ton/ha. Ini menunjukkan bahwa penggunaan lahan berupa hutan memiliki cadangan karbon lebih tinggi dibandingkan non hutan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Wiryono et al., (2021), bahwa cadangan karbon pada lahan berupa hutan lebih tinggi dibandingkan lahan non hutan seperti pada lahan percobaan pertanian, sistem agroforestri, dan perkebunan sawit.



Gambar 1. Estimasi cadangan karbon di beberapa jenis tutupan lahan

Cadangan Karbon pada Hutan Primer

Hutan primer adalah kawasan hutan yang sudah mencapai umur lanjut dengan ciri keanekaragaman hayati tinggi, struktur vegetasi yang kompleks dengan kematangan sekaligus memiliki sifat ekologis yang khas. Hutan primer juga biasa dikenal sebagai hutan perawan (*virgin forest*) (Susetyo, 2021). Berdasarkan penelitian ini, cadangan karbon pada hutan primer berkisar 150 – 269 ton/ha. Hutan primer merupakan salah satu penyimpan karbon tertinggi dibandingkan dengan jenis lahan lainnya karena memiliki struktur vegetasi yang kompleks dan volume biomassa yang besar. Pohon-pohon yang besar memiliki biomassa yang tinggi sehingga dapat menyimpan karbon dalam jumlah besar dalam periode waktu yang lama (Heriyanto et al., 2020). Studi menunjukkan bahwa cadangan karbon di hutan primer berkisar 150-400 ton/ha tergantung pada lokasi geografis, kondisi ekologi lokal, dan jenis vegetasi. Hutan primer dapat menyimpan karbon dalam biomassa di atas tanah (batang, cabang, dan daun) serta di bawah tanah (akar dan tanah) (Sugiarto et al., 2024).

Cadangan Karbon pada Hutan Sekunder

Hutan sekunder juga memiliki peranan penting dalam menyimpan karbon atmosfer. Penelitian menunjukkan bahwa cadangan karbon pada hutan sekunder berkisar 76-203 ton/ha. Hal ini tergantung pada usia hutan dan komposisi vegetasinya. Jika dibandingkan dengan hutan primer, cadangan karbon pada hutan sekunder lebih rendah (Ngo et al., 2013). Hal ini disebabkan karena perubahan penggunaan lahan, seperti peralihan dari hutan primer menjadi hutan sekunder yang dapat mengurangi kapasitas penyimpanan karbon (Grieco et al., 2024). Sebagai contoh, di hutan lindung Gunung Sirimau, aktivitas seperti kebakaran hutan dan konversi lahan mengakibatkan perubahan komposisi vegetasi yang berpengaruh pada kapasitas penyimpanan karbonnya (Luhulima et al., 2020).

Cadangan Karbon pada Hutan Mangrove

Berdasarkan penelitian ini, hutan mangrove memiliki cadangan karbon tertinggi dibandingkan jenis lahan lainnya. Cadangan karbon pada hutan mangrove berkisar 158-423 ton/ha. Tingginya cadangan karbon pada hutan mangrove dapat disebabkan karena penyimpanan karbon di tanah, terutama di lapisan gambut yang memiliki karbon organik yang sangat tinggi. Tanah ini mampu menyimpan karbon dalam waktu yang lama disebabkan minimnya proses dekomposisi akibat kondisi anaerob di lingkungan berlumpur (Kida & Fujitake, 2020). Penelitian yang dilakukan Chatting et al. (2022), menunjukkan bahwa hutan

mangrove dapat menyimpan karbon 4 hingga 5 kali lebih banyak dibandingkan hutan daratan biasa.

Cadangan Karbon pada Hutan Tanaman

Hutan tanaman merupakan hutan yang sengaja ditanami untuk meningkatkan kualitas serta potensi hutan produksi. Salah satu contohnya yaitu Hutan Tanaman Industri (HTI), yaitu hutan yang dikelola untuk memenuhi kebutuhan bahan baku industri kehutanan seperti pulp dan kertas. Hutan tanaman memiliki cadangan karbon sekitar 40-80 ton/ha. Hutan tanaman memiliki cadangan karbon yang cukup rendah dibandingkan dengan hutan alam (Wungshap et al., 2023). Hal ini dapat disebabkan karena rendahnya keanekaragaman hayati. Hutan tanaman biasanya, hanya ditanami satu atau beberapa jenis yang homogen, seperti akasia, sengon, dan eukaliptus (Warner et al., 2023). Selain itu, hutan tanaman memiliki siklus pemanfaatan yang cepat jika dibandingkan hutan alam. Pohon-pohon sering dipanen pada usia tertentu yang belum mencapai usia matang penuh, sehingga kayu tersebut tidak memiliki waktu yang lama untuk menyimpan karbon (Farooq et al., 2021).

Cadangan Karbon pada Hutan Rawa

Cadangan karbon pada hutan rawa berkisar 100-170 ton/ha. Hutan rawa memiliki cadangan karbon yang disebabkan karena keberadaan tanah gambut yang memiliki karbon organik yang cukup tinggi. Hutan rawa memiliki vegetasi dengan biomassa yang tinggi, misalnya pohon dengan akar napas dan sistem akar yang besar. Selain itu, pada hutan rawa yang memiliki komposisi lembab dan minim oksigen menyebabkan proses penguraian bahan organik menjadi lambat, sehingga mengurangi pelepasan karbon ke atmosfer dan meningkatkan cadangan karbon (Hirano et al., 2024). Akan tetapi, jika dibandingkan dengan hutan mangrove, cadangan karbon pada hutan rawa lebih rendah. Hal ini dapat disebabkan karena hutan mangrove yang biasanya berada di wilayah pesisir banyak menerima sedimen kaya karbon dari aliran sungai, laut, dan ekosistem sekitarnya (Suello et al., 2022).

Cadangan Karbon pada Perkebunan dan Sistem Agroforestri

Perkebunan dan sistem agroforestri memiliki cadangan karbon yang relatif rendah jika dibandingkan dengan hutan. Rendahnya cadangan karbon pada perkebunan dan sistem agroforestri dapat disebabkan karena perubahan penggunaan lahan dari hutan alami ke perkebunan yang menyebabkan banyaknya pelepasan karbon dalam jumlah besar ke atmosfer

(Toru & Kibret, 2019). Selain itu, sistem pengelolaan yang buruk, misalnya pembakaran lahan, dapat mengurangi jumlah cadangan karbon dan meningkatkan emisi karbon (Sharma & Sharma, 2022). Cadangan karbon pada perkebunan dan sistem agroforestri berkisar 63-95 ton/ha, tergantung dari jenis biomassa, usia, dan kondisi lingkungannya (Tsedeke et al., 2021).

Cadangan Karbon pada Pertanian Lahan Kering

Cadangan karbon pada pertanian lahan kering cenderung lebih rendah daripada perkebunan. Hal tersebut dapat disebabkan dari jenis tanaman pertanian. Tanaman pertanian umumnya merupakan tanaman semusim yang memiliki biomassa yang rendah jika dibandingkan dengan tanaman berkayu (Rosmalia, 2021). Cadangan karbon pada pertanian lahan kering berkisar 31-54 ton/ha. Meskipun memiliki cadangan karbon yang rendah, pertanian lahan kering juga berperan dalam penyumbang cadangan karbon.

Cadangan Karbon pada Semak dan Belukar

Semak dan belukar adalah salah satu penyumbang karbon terendah dibandingkan penggunaan lahan lainnya. Cadangan karbon pada semak belukar berkisar 26 ton/ha. Meskipun memiliki nilai karbon yang rendah, ekosistem ini memiliki peranan penting dalam siklus karbon terutama di daerah dengan curah hujan rendah dan tanah marginal (Zikri Azham, 2015). Semak dan belukar juga memiliki kontribusi pada mitigasi perubahan iklim, melalui pemulihan lahan terdegradasi, penyediaan habitat untuk spesies yang mendukung stabilitas ekosistem, dan menyimpan karbon dalam tanah yang relatif stabil (Agus, 2013).

Cadangan Karbon pada Savana

Savana merupakan ekosistem yang dicirikan dengan vegetasi padang rumput dengan pohon atau semak yang tersebar. Pada penelitian ini, savana merupakan penyumbang karbon terendah, yaitu 18%. Rendahnya penyimpanan karbon pada savana dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya komposisi vegetasi yang didominasi oleh rerumputan, kondisi lingkungan, dan gangguan ekosistem, seperti kebakaran dan aktivitas penggembalaan (Yang et al., 2019). Kebakaran yang sering terjadi dapat melepaskan karbon dalam jumlah besar ke atmosfer dan overgrazing oleh ternak dapat merusak vegetasi serta mengurangi kandungan karbon tanah (Conant & Paustian, 2002; Rahsia et al., 2020). Walaupun demikian, savana juga

memiliki peranan penting dalam siklus karbon global karena luasnya yang signifikan dan menyimpan karbon organik tanah yang relatif stabil.

Cadangan Karbon pada Lahan Bekas Tambang

Lahan bekas tambang memiliki cadangan karbon sekitar 31%. Cadangan karbon organik tanah di lahan bekas tambang yang sudah direvegetasi selama 7 tahun lebih rendah daripada di hutan, kebun sawit, dan agroforestri (Wiryo et al. 2021). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa deforestasi dan alih fungsi lahan akibat kegiatan pertambangan menyebabkan penurunan drastis simpanan karbon (Nave et al., 2024). Akan tetapi, melalui upaya reklamasi dan rehabilitasi yang tepat, cadangan karbon dapat dipulihkan seiring waktu. Pemilihan jenis vegetasi yang sesuai, pengelolaan lahan yang baik, dan pemantauan berkelanjutan sangat penting untuk memastikan keberhasilan restorasi. Di Indonesia, pohon legum seperti Sengon dan Mangium banyak digunakan untuk revegetasi pada lahan bekas tambang karena cepat tumbuh dan dapat meningkatkan kandungan nitrogen tanah melalui proses fiksasi nitrogen (Munawar & Wiryo, 2015).

Dengan demikian cadangan karbon pada berbagai jenis penggunaan lahan memiliki besaran yang berbeda. Variasi tersebut dapat disebabkan oleh berbagai macam faktor, diantaranya komposisi vegetasi, kondisi tanah, usia ekosistem, iklim dan kondisi lingkungan, serta aktivitas manusia (Kumar et al., 2023). Komposisi vegetasi seperti jenis vegetasi serta kerapatan vegetasi sangat mempengaruhi cadangan karbon. Vegetasi dengan biomassa tinggi seperti pohon berkayu keras akan menyimpan banyak karbon dibandingkan dengan rumput atau semak (Huang et al., 2023). Kondisi tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi memiliki kapasitas untuk menyimpan karbon yang lebih besar. Ekosistem yang lebih matang, seperti hutan primer yang memiliki umur yang lebih matang memiliki cadangan karbon yang lebih besar karena proses akumulasi biomassa selama bertahun-tahun, sedangkan lahan yang memiliki umur yang muda, seperti hutan sekunder atau lahan reklamasi memiliki cadangan karbon yang lebih kecil karena masih dalam proses akumulasi karbon (Bispo et al., 2023). Iklim dan kondisi lingkungan yang lembab serta memiliki curah hujan cukup tinggi, lebih mendukung pertumbuhan vegetasi yang cepat. Aktivitas manusia dapat menambah dan mengurangi besarnya cadangan karbon pada lahan tertentu. Deforestasi dapat mengurangi cadangan karbon secara signifikan dengan menghilangkan biomassa vegetasi, sedangkan kegiatan reforestasi dan reklamasi dapat meningkatkan cadangan karbon namun memerlukan waktu hingga bertahun-tahun (Syamsudin Noor et al., 2020).

KESIMPULAN

Cadangan karbon pada hutan lebih besar dibandingkan dengan lahan non-hutan. Estimasi cadangan karbon tertinggi terdapat pada hutan mangrove dengan rata-rata sebesar 215,82 ton/ha diikuti dengan hutan primer rata-rata sebesar 205,43 ton/ha. Cadangan karbon terendah terdapat pada tutupan lahan berupa savana dengan rata-rata sebesar 18,92 ton/ha. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh berbagai macam faktor, diantaranya komposisi vegetasi, kondisi tanah, usia ekosistem, iklim dan kondisi lingkungan, serta aktivitas manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, F. (2013). Soil and carbon conservation for climate change mitigation and enhancing sustainability of agricultural development. *Pengembangan Inovasi Pertanian*, 6(Maret 2013), 23–33.
- Bispo, D. F. A., Guimarães, D. V., Marques, J. J. G. de S. M., Beniaich, A., Acuña-Guzman, S. F., Silva, M. L. N., & Curi, N. (2023). Soil Organic Carbon as Response to Reforestation Age and Land Use Changes: A Qualitative Approach to Ecosystem Services. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086863>
- Chatting, M., Al-Maslamani, I., Walton, M., Skov, M. W., Kennedy, H., Husrevoglu, Y. S., & Le Vay, L. (2022). Future Mangrove Carbon Storage Under Climate Change and Deforestation. *Frontiers in Marine Science*, 9(February), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.781876>
- Conant, R. T., & Paustian, K. (2002). Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 90–100. <https://doi.org/10.1029/2001gb001661>
- Emrinelson, T., & Warningsih, T. (2023). Estimasi Simpanan Karbon Hutan Mangrove di Pesisir Utara Pulau Cawan, Indragiri Hilir. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 5, 58–68. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v5i.704>
- Farooq, T. H., Shakoor, A., Wu, X., Li, Y., Rashid, M. H. U., Zhang, X., Gilani, M. M., Kumar, U., Chen, X., & Yan, W. (2021). Perspectives of plantation forests in the sustainable forest development of China. *IForest*, 14(2), 166–174.

<https://doi.org/10.3832/ifor3551-014>

- Grieco, E., Vangi, E., Chiti, T., & Collalti, A. (2024). Impacts of deforestation and land use / land cover change on carbon stock dynamics in Jomoro District , Ghana. *Journal of Environmental Management*, 367(May), 121993. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121993>
- Harahap, M., Basyuni, M., Sulistiyono, N., Sasmito, S. D., Latifah, S., Delvian, Amelia, R., Bimantara, Y., Harahap, S. S. H., Larekeng, S. H., Sumarga, E., Al Mustaniroh, S. S., Slamet, B., Arifanti, V. B., & Ali, H. M. (2023). Carbon Stock and CO₂ Fluxes in Various Land Covers in Karang Gading and Langkat Timur Laut Wildlife Reserve, North Sumatra, Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/su152115196>
- Hartati, W., & Sudarmadji, T. (2022). The dynamics of soil carbon in revegetated post-coal mining sites: A case study in Berau, East Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas*, 23(10), 4984–4991. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d231004>
- Heriyanto, N. M., Priatna, D., & Samsedin, I. (2020). Vegetation Structure and Carbon Stocks in Secondary Forests of Muara Merang Forest Complex, South Sumatera. *Jurnal Sylva Lestari*, 8(2), 230. <https://doi.org/10.23960/jsl28230-240>
- Hirano, T., Ohkubo, S., Itoh, M., Tsuzuki, H., Sakabe, A., Takahashi, H., Kusin, K., & Osaki, M. (2024). Large variation in carbon dioxide emissions from tropical peat swamp forests due to disturbances. *Communications Earth and Environment*, 5(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01387-7>
- Huang, W. Q., Xu, B., Chen, F. S., Zong, Y. Y., Duan, X. Q., Zhang, G. X., Wu, Z. J., & Fang, X. M. (2023). The effects of vegetation type on ecosystem carbon storage and distribution in subtropical plantations. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6(April), 1–9. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1149799>
- Kida, M., & Fujitake, N. (2020). Organic carbon stabilization mechanisms in mangrove soils: A review. *Forests*, 11(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/f11090981>
- Kumar, P., Kumar, A., Patil, M., Hussain, S., & Singh, A. N. (2023). Factors influencing tree biomass and carbon stock in the Western Himalayas, India. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6(January), 1–13. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1328694>

- Luhulima, S. H., Osok, R. M., & Kaya, E. (2020). Simpanan Karbon Di Atas Permukaan Pada Berbagai Penggunaan Lahan Di Hutan Lindung Sirimau, Pulau Ambon. *Jurnal Budidaya Pertanian*, 16(2), 215–223. <https://doi.org/10.30598/jbdp.2020.16.2.215>
- Munawar, A., & Wiryono, W. (2015). Serapan Karbon oleh Mangium dan Sengon Berumur Empat Tahun pada Lahan Pascatambang yang Sudah Direklamasi. *Jurnal Natur Indonesia*, 16(1), 42. <https://doi.org/10.31258/jnat.16.1.42-47>
- Nave, L. E., DeLyser, K., Domke, G. M., Holub, S. M., Janowiak, M. K., Keller, A. B., Peters, M. P., Solarik, K. A., Walters, B. F., & Swanston, C. W. (2024). Land use change and forest management effects on soil carbon stocks in the Northeast U.S. *Carbon Balance and Management*, 19(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s13021-024-00251-7>
- Ngo, K. M., Turner, B. L., Muller-Landau, H. C., Davies, S. J., Larjavaara, M., Nik Hassan, N. F. bin, & 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>
- Rahsia, S. A., Gusmayanti, E., & Nusantara, R. W. (2020). Emisi Karbondioksida (CO₂) Lahan Gambut Pasca Kebakaran Tahun 2018 di Kota Pontianak. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 384–391. <https://doi.org/10.14710/jil.18.2.384-391>
- Rosmalia. (2021). Analisis Penyimpanan Biomassa Karbon pada Lahan Hutan Sekunder dan Pertanian di Kecamatan Lembah Seulawah Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Real Riset*, 3 (2), 179–186. <https://doi.org/10.47647/jrr>
- Sharma, G., & Sharma, L. K. (2022). Assessment of Soil Carbon Stock and Important Physicochemical Properties in relation to Land use Patterns in Semi-arid Region of Rajasthan, India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 70(2), 191–203. <https://doi.org/10.5958/0974-0228.2022.00019.6>
- Suello, R. H., Hernandez, S. L., Bouillon, S., Belliard, J. P., Dominguez-Granda, L., Van De Broek, M., Rosado Moncayo, A. M., Veliz, J. R., Ramirez, K. P., Govers, G., & Temmerman, S. (2022). Mangrove sediment organic carbon storage and sources in relation to forest age and position along a deltaic salinity gradient. *Biogeosciences*, 19(5), 1571–1585. <https://doi.org/10.5194/bg-19-1571-2022>

- Sugiarto, A., Utaya, S., Sumarmi, Bachri, S., & Shrestha, R. P. (2024). Estimation of carbon stocks and CO₂ emissions resulting from the forest destruction in West Kalimantan, Indonesia. *Environmental Challenges*, 17(September), 101010. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101010>
- Syam'ani, Agustina, A. R., & Nugroho, Y. (2012). Cadangan Karbon Di atas Permukaan Tanah Pada Berbagai Sitem Penutupan Lahan Di Sub-sub Das Amandit. *Jurnal Hutan Tropis*, 13(2), 148–158.
- Syamsudin Noor, M., Hafizianoor, H., & Suyanto, S. (2020). Analisis Cadangan Karbon Pada Tanaman Reklamasi Lahan Bekas Pertambangan Batubara Di Pt. Borneo Indobara. *Jurnal Hutan Tropis*, 8(1), 99. <https://doi.org/10.20527/jht.v8i1.8166>
- Toru, T., & Kibret, K. (2019). Carbon stock under major land use/land cover types of Hades sub-watershed, eastern Ethiopia. *Carbon Balance and Management*, 14(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0122-z>
- Tsedeke, R. E., Dawud, S. M., & Tafere, S. M. (2021). Assessment of carbon stock potential of parkland agroforestry practice: the case of Minjar Shenkora; North Shewa, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00211-3>
- Warner, E., Cook-Patton, S. C., Lewis, O. T., Brown, N., Koricheva, J., Eisenhauer, N., Ferlian, O., Gravel, D., Hall, J. S., Jactel, H., Mayoral, C., Meredieu, C., Messier, C., Paquette, A., Parker, W. C., Potvin, C., Reich, P. B., & Hector, A. (2023). Young mixed planted forests store more carbon than monocultures—a meta-analysis. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6(November), 1–12. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1226514>
- Windarni, C., Setiawan, A., & Rusita, R. (2018). Carbon Stock Estimation of Mangrove Forest in Village Margasari Sub-District Labuhan Maringgai District East Lampung. *Jurnal Sylva Lestari*, 6(1), 66. <https://doi.org/10.23960/jsl1667-75>
- Wiryono, Mukhtar, Z., Deselina, Nurliana, S., Aningtias, H., & Anugrah, P. M. (2021). Soil Organic Carbon in Forest and Other Land Use Types at Bengkulu City, Indonesia. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 27(3), 184–192. <https://doi.org/10.7226/jtfm.27.3.184>
- Wungshap, H., Paul, A., Bordoloi, R., Das, B., Sahoo, U. K., Tripathi, S. K., Yumnam, J. Y.,

- Tripathi, O. P., Sarangi, P. K., Prus, P., & Imbrea, F. (2023). Carbon Stock Assessment in Natural Forests and Plantations Using Geo-Informatics in Manipur, Northeast India. *Agronomy*, 13(8), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082023>
- Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., & Lehman, C. (2019). Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature Communications*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08636-w>
- Zikri Azham. (2015). ESTIMASI CADANGAN KARBON PADA TUTUPAN LAHAN Hutan Sekunder , Semak dan Belukar di Kota Samarinda. *Agrifor*, 14(2), 325–338. <http://ejurnal.untag-smd.ac.id/index.php/AG/article/view/1438%0Ahttp://ejurnal.untag-smd.ac.id/index.php/AG/article/viewFile/1438/1501>