

ESTIMASI NILAI EKONOMI SIMPANAN KARBON TEGAKAN PINUS PADA BERBAGAI KELAS UMUR DI RPH HAURKUNING PERUM PERHUTANI KPH KUNINGAN

Irfan Aprilianto Suhara^{1*}), Agus Yadi Ismail¹⁾, Dede Kosasih¹⁾

¹Kehutanan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Universitas Kuningan

*20200720029@uniku.ac.id

agus.yadi@uniku.ac.id

dede.kosasih@uniku.ac.id

Abstrak

One of Indonesia's efforts to mitigate greenhouse gas emissions and engage in carbon trading is through Presidential Regulation No. 98 of 2021 on the Carbon Economic Value (NEK), which also regulates the carbon market. The objective of this research is to calculate biomass, estimate carbon storage, CO₂ absorption, and the economic value of carbon storage in pine stands at various age classes. The study was conducted from January 2024 to April 2024. Data collection was performed randomly by measuring the height and diameter of trees within predetermined sample plot, based on the forest inventory procedure P.33 Menhut-II 2009. A total of 135 sample plots were used. Based on calculations using allometric equations, the average biomass potential was found to be 229.28 tons/ha. The average carbon storage was 105,47 tons/ha, with a total carbon storage of 90,350.04 tons. The average CO₂ sequestration was 387.08 tons/ha. Based on the average and total carbon storage values, the average carbon economic value was Rp. 3,164,121.64 per hectare, with the total carbon economic value in RPH Haurkuning, BKPH Garawangi, KPH Kuningan being Rp. 2,710,501,200.

Keywords: Pine stands various age classes, Biomass, Carbon storage, Carbondioksida sequestration, Carbon Economic Value

Abstrak

Salah satu upaya Indonesia dalam mitigasi emisi gas rumah kaca dan terlibat dalam perdagangan karbon adalah melalui Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Nilai Ekonomi Karbon (NEK) yang sekaligus mengatur pasar karbon. Tujuan penelitian ini adalah menghitung biomassa, mengestimasi simpanan karbon, penyerapan CO₂, dan nilai ekonomi simpanan karbon pada tegakan pinus pada berbagai kelas umur. Penelitian dilakukan pada bulan Januari 2024 sampai dengan April 2024. Pengumpulan data dilakukan secara acak dengan mengukur tinggi dan diameter pohon pada petak contoh yang telah ditentukan, berdasarkan prosedur inventarisasi hutan P.33 Menhut-II 2009. Sebanyak 135 petak contoh digunakan. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan persamaan allometrik, diperoleh potensi biomassa rata-rata sebesar 229,28 ton/ha. Rata-rata simpanan karbon sebesar 105,47 ton/ha, dengan total simpanan karbon sebesar 90.350,04 ton. Rata-rata serapan CO₂ sebesar 387,08 ton/ha. Berdasarkan nilai rata-rata dan total penyimpanan karbon, diperoleh nilai ekonomi karbon rata-rata sebesar Rp. 3.164.121,64 per hektare, dengan total nilai ekonomi karbon di RPH Haurkuning, BKPH Garawangi, KPH Kuningan sebesar Rp. 2.710.501.200.

Kata Kunci: Tegakan pinus berbagai kelas umur, Biomassa, Penyimpanan karbon, Penyerapan karbondioksida, Nilai Ekonomi Karbon

PENDAHULUAN

Indonesia mempunyai hutan tropis terluas ketiga terbesar di dunia, setelah Brazil dan Zaire. Hutan Indonesia adalah pusat dunia dan penyeimbang iklim karena berada di garis katulistiwa (KLHK, 2018). Luas total hutan di Indonesia adalah 125,79 juta hektar (PPID, Januari 30, 2023). Menempati urutan kedua di dunia untuk keanekaragaman hayati wilayah daratan (YKAN, Agustus 30, 2023) dan memiliki keanekaragaman hayati paling tinggi di Asia (IRI, 2022). Sebagai sumber daya alam, hutan memberikan manfaat bagi kesejahteraan makhluk hidup di Bumi, baik secara langsung maupun tidak langsung (Pohan, 2016). Hutan memiliki banyak manfaat secara langsung, seperti hasil kayu dan kayu bukan kayu. Hutan juga memiliki manfaat secara tidak langsung, seperti fungsi hidrologi, produksi oksigen, dan penyerapan karbondioksida (Gusmardi, 2016).

Kondisi hutan Indonesia saat ini sedang mengalami kerusakan karena tindakan manusia seperti penebangan liar, kebakaran hutan, perambahan hutan, tidak menanam kembali pohon, menebang pohon muda, menebang di kawasan lindung, dan menebang hutan di hulu sungai (Putra *et al.*, 2021). Kondisi hutan Indonesia semakin memburuk sebagai akibat dari deforestasi yang terjadi pada tahun 2023, yang mencakup 149,139 hektar kawasan hutan produksi, 12,631 hektar kawasan hutan konservasi, dan 26,624 hektar kawasan hutan lindung (Wicaksono, Maret 23, 2024). Degradasi dan deforestasi menyebabkan pemanasan global melalui emisi karbon dioksida (CO₂) sebagai gas rumah kaca (Irfan *et al.*, 2021). Sebagai akibat dari pemanasan global yang disebabkan oleh gas rumah kaca, suhu permukaan bumi meningkat. Ini dapat mengganggu ekosistem dan mekanisme semua biota di Bumi, terutama hutan, yang berfungsi sebagai cara untuk mendaur ulang karbon dioksida di udara (Pratama, 2019). Jumlah emisi gas rumah kaca Indonesia pada tahun 2022 sebesar 2,18 miliar ton CO₂e, atau setara 2,18 gigaton CO₂e (Jones *et al.*, 2024). Untuk mengurangi dampak pemanasan global tersebut, maka hutan perlu direboisasi untuk peningkatan penyerapan CO₂ sebagai salah satu gas rumah kaca (Mulyani, 2021). Oleh karena itu, pemerintah Indonesia berhasil mengurangi emisi gas rumah kacanya pada tahun 2023 sebesar 127,67 juta ton CO₂e (KESDM, Januari 19, 2024).

Salah satu daya dukung untuk meminimalkan gas rumah kaca adalah mekanisme perdagangan karbon yang berperan dalam mengendalikan emisi CO₂. Mekanisme yang berkontribusi pada transformasi dan peningkatan energi ini akan memanfaatkan lebih banyak energi bersih seperti gas alam (Li & Yan, 2013). Hal ini juga merupakan salah satu upaya untuk mendukung Peraturan Presiden No. 98 tahun 2021 tentang Nilai Ekonomi Karbon atau NEK yang di dalamnya juga mengatur tentang pasar karbon (KLHK, November 3, 2021). Upaya lain yang mendukung peraturan pemerintah tersebut adalah terpenuhinya akurasi data mengenai estimasi produksi biomasa, stok karbon dan penyerapan pada berbagai tipe ekosistem di Indonesia yang mendukung penghitungan insentif yang diterima negara dalam perdagangan karbon (Polosakan *et al.*, 2014).

Mekanisme perdagangan karbon bertanggung jawab atas pengendalian emisi karbon dioksida, yang merupakan salah satu faktor yang membantu dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Mekanisme transformasi dan peningkatan energi ini menggunakan energi yang lebih bersih, seperti gas alam (Li & Yan, 2013). Selain itu, ini adalah bagian dari upaya untuk mendukung Peraturan Presiden No. 98 tahun 2021 tentang Nilai Ekonomi Karbon, juga dikenal sebagai NEK, yang mengatur pasar karbon (KLHK, November 3, 2021). Penyediaan data yang tepat tentang estimasi produksi biomasa, stok karbon, dan penyerapan di berbagai jenis ekosistem di Indonesia adalah upaya tambahan untuk mendukung peraturan pemerintah mengenai penghitungan insentif dalam perdagangan karbon (Polosakan *et al.*, 2014).

Selain mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK), harga karbon atau NEK, juga dapat mendorong investasi ramah lingkungan karena akan semakin sedikit penggunaan emisi karbon industri. Selain itu, karena perdagangan karbon terjadi, NEK juga menjadi sumber dana tambahan untuk mengatasi kekurangan pembiayaan perubahan iklim (Kemenkeu, November 6, 2021). Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) memperkirakan bahwa jual beli kredit karbon dapat menghasilkan pendapatan tambahan sebesar Rp 350 triliun bagi Indonesia, terutama mengingat banyaknya lahan gambut dan hutan yang dimiliki negara (Antara News, November 2, 2021). Penelitian yang telah dilakukan oleh Panuntun (2022) menunjukkan bahwa tegakan pinus di Resort Pemangkuhan Hutan (RPH) Temanggal, BKPH Magelang, dan KPH Kedu Utara memiliki potensi simpanan karbon pohon sebesar 127,39 ton/ha. Dengan jumlah total 139.958,40 ton simpanan karbon, nilai ekonomi simpanan karbon adalah €3.601.209,53, atau setara dengan Rp 57.743.499.775,94.

Salah satu hal yang dilakukan untuk mendukung akurasi data dalam mengoptimalkan perdagangan karbon yaitu dengan dilakukannya penelitian yang berjudul “Estimasi Nilai

Ekonomi Simpanan Karbon Tegakan Pinus pada Berbagai Kelas Umur di RPH Haurkuning Perum Perhutani KPH Kuningan”.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menghitung potensi biomassa dan simpanan karbon di atas permukaan tanah pada tegakan pinus dari berbagai kelas umur di RPH Haurkuning, BKPH Garawangi, KPH Kuningan, Perum Perhutani Unit III Jawa Barat. Data potensi biomassa dan simpanan karbon digunakan untuk menentukan nilai ekonomi karbon. Perhitungan potensi biomassa dilakukan dengan pendekatan model allometrik berdasarkan nilai diameter dan tinggi. Pengukuran diameter dan tinggi dilakukan pada plot contoh yang ditempatkan secara sistematis terstratifikasi berdasarkan kelas umur tegakan pinus. Dari data biomassa tersebut, dapat dihitung nilai simpanan karbon berdasarkan nilai biomassa total dikalikan faktor konversi. Selain itu dihitung juga nilai penyerapan karbondioksida oleh pohon dengan cara mengalikan berat total karbon (C) dengan factor konversi dari unsur karbon (C) ke karbondioksida (CO₂). Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah menghitung estimasi nilai ekonomi karbon yang dapat dihitung dengan mengalikan jumlah simpanan karbon dengan harga karbon.

Untuk analisis data yang digunakan adalah sebagai berikut :

A. Estimasi Biomassa

Pendugaan biomassa pohon *Pinus merkusii* dilakukan menggunakan model allometrik yaitu:

$$AGB = 0.02977 \times (DBH^2 \times H)^{0.9633} \text{ (Heriyanto et al., 2005).}$$

Total biomassa dari semua individu pohon diubah menjadi ton per hektar dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Arupa, 2014) :

Total biomassa seluruh plot (ton) = Total Biomassa ÷ 1000 kg

Total biomassa per plot (ton) = Total Biomassa ÷ Jumlah Plot

Total biomassa per hektar (ton/ha) = Biomassa per plot × (10000 m² ÷ Ukuran Plot)

B. Estimasi Simpanan Karbon

Nilai biomassa dengan faktor konversi 0,46 (faktor konversi pendugaan karbon) digunakan untuk menghitung jumlah karbon yang tersimpan pada pohon pinus. Menurut Bachmid *et al.* (2018), karena konsentrasi karbon dalam bahan organik adalah 46%. Persamaan yang digunakan untuk menghitung estimasi simpanan karbon pada suatu pohon sebagai berikut:

$$C = B \times 0,46$$

Keterangan:

C : Jumlah karbon tersimpan (ton/ha)

B : Biomassa (ton/ha)

C. Potensi Penyerapan Karbondioksida

Nilai biomassa digunakan untuk menentukan potensi penyerapan karbondioksida (CO₂), dengan faktor koreksi karbon sebesar 3,67 terhadap besarnya serapan karbondioksida (CO₂) (Murdiyarso 1999). Persamaan yang digunakan yaitu :

$$WCO_2 = C \times 3,67$$

Keterangan:

WCO₂ : Total CO₂ terserap (ton/ha)

C : Karbon (ton/ha)

3,67 : Konversi unsur karbon (C) ke CO₂

D. Nilai Ekonomi Simpanan Karbon

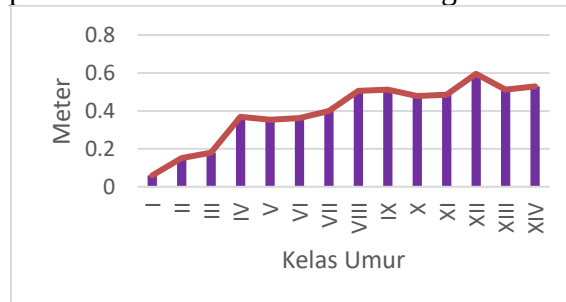
Nilai simpanan karbon dan harga satuan karbon digunakan untuk melakukan analisis nilai ekonomi karbon. Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) menetapkan harga karbon sebesar Rp 30 per kilogram karbon atau Rp 30.000 per ton karbon.

$$\text{NEK} = \text{Simpanan Karbon} \times \text{Harga Karbon}$$

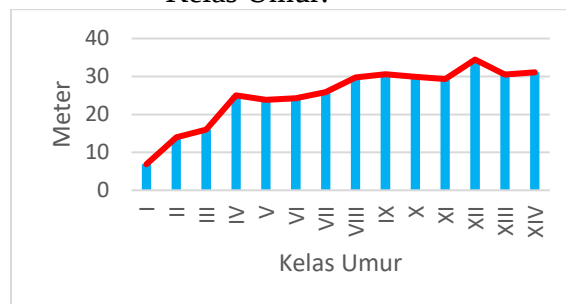
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Biomassa Tegakan Pinus

Pada penelitian ini, nilai diameter dan tinggi pohon pinus dipengaruhi oleh nilai biomassa tegakan. Penelitian Feldpausch *et al.* (2011) menunjukkan bahwa diameter dan parameter tinggi pohon dapat meningkatkan biomassa. Gambar 3 dan 4 menunjukkan nilai diameter dan tinggi tegakan pinus rata-rata di RPH Haurkuning untuk setiap kelas umur.



Gambar 3. Rata-Rata Diameter Tegakan Pohon Pinus di RPH Haurkuning pada Berbagai Kelas Umur.



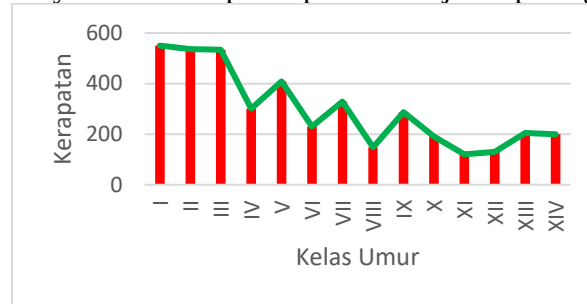
Gambar 4. Rata-Rata Tinggi Tegakan Pohon Pinus di RPH Haurkuning pada Berbagai Kelas Umur.

Nilai rata-rata diameter dan tinggi tegakan yang paling rendah terdapat pada kelas umur I dengan nilai rata-rata diameter sebesar 59,97 cm dan tinggi sebesar 6,86 m. Kelas umur I terdiri dari tegakan pinus tahun tanam 2021 dan tahun tanam 2020, memiliki rata-rata diameter berturut-turut sebesar 5,56 cm dan 6,21 cm. Sedangkan untuk parameter tinggi, tegakan pinus tahun tanam 2021 dan tahun tanam 2020 masing-masing memiliki rata-rata sebesar 6,04 m dan 7,27 m. Disisi lain nilai rata-rata diameter dan tinggi tegakan terbesar terdapat pada kelas umur XII masing-masing sebesar 59,55 cm dan 34,46 m. Tegakan dengan kelas umur XII hanya terdapat pada tegakan pinus tahun tanam 1969.

Perbedaan umur memengaruhi perbedaan nilai parameter diameter dan tinggi tersebut. Pada saat tanaman masih muda, sebagian besar hara digunakan untuk melanjutkan perkembangannya, sehingga biomasnya masih rendah. Setelah berumur, tanaman menggunakan nutriennya untuk menghasilkan biomassa, yang ditunjukkan oleh pohon yang lebih tinggi dan diameter lebih besar (Ijazah dan Sancayaningsih, 2015).

Kerapatan tegakan pohon mempengaruhi tinggi dan diameter pohon juga. Kerapatan persatuan luas yang masih tinggi dimiliki oleh sistem jarak tanam pinus yang lebih muda, yang belum mengalami penjarangan dan memiliki kerapatan yang tinggi (Polosakan *et al.*, 2014). Hal ini menyebabkan pohon bersaing satu sama lain untuk mendapatkan nutrisi, yang berarti

tegakan pohon lebih tinggi meskipun diameter batangnya lebih kecil. Kerapatan pohon ini juga berdampak pada diameternya. Nilai kerapatan pohon disajikan pada gambar 5.



Gambar 5. Kerapatan Tegakan Pohon di RPH Haurkuning pada Berbagai Kelas Umur

Pada gambar 5 kita bisa melihat bahwa kerapatan pohon pada setiap kelas umur berbeda-beda. Perbedaan ini bisa terjadi karena terdapat perlakuan seperti penjarangan untuk mendapatkan tegakan tinggal dengan diameter besar ataupun bisa dikarenakan pohon tumbang yang menyebabkan kerapatan pohon kembali berkurang. Pengaruh dari kerapatan ini bisa kita lihat dari meningkatnya diameter dan tinggi tegakan pohon. Seperti pada kasus kelas umur III dan kelas umur IV dimana terjadi penurunan kerapatan dengan nilai rata-rata diameter dari kelas umur III ke kelas umur IV yang mengalami peningkatan diameter dan tinggi seperti yang diperlihatkan pada gambar 3 dan 4. Kondisi ini juga terjadi dari kelas umur V ke kelas umur VI dan dari kelas umur VII ke kelas umur VIII. Kelas umur XII juga memiliki kerapatan kecil dibandingkan kelas umur XIII dan kelas umur XIV, sehingga memiliki nilai rata-rata diameter dan tinggi yang lebih besar. Namun hal itu bisa juga berlaku sebaliknya, dimana kerapatan dari kelas umur IV kembali mengalami kenaikan di kelas umur V dimana nilai rata-rata diameter dan tingginya mengalami penurunan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Polosakan *et al.* (2014), ditemukan bahwa, meskipun kerapatan yang rendah pada pinus berusia tiga puluh tahun, luas bidang dasar pohon berusia tiga puluh tahun cenderung lebih besar karena interval diameter batang yang luas, yang berkisar antara 7 dan 60 cm. Sehingga kerapatan tegakan yang semakin rendah mampu menghasilkan tegakan biomassa yang semakin besar pula (Lukito dan Rohmatiah, 2013).

Perbedaan parameter diameter dan tinggi selain disebabkan oleh perbedaan umur dan kerapatan tegakan pohon, bisa juga disebabkan oleh perbedaan kualitas tempat tumbuh. Jika kita kembali melihat pada gambar 5 dimana terdapat penurunan kerapatan dari kelas umur yang lebih muda ke kelas umur yang lebih tua namun malah terjadi penurunan rata-rata diameter dan tinggi seperti pada gambar 3 dan 4 alih-alih peningkatan rata-rata diameter dan tinggi. Kondisi ini ditunjukkan dari nilai rata-rata diameter dan tinggi kelas umur IX yang lebih tinggi daripada kelas umur X dan kelas umur XI. Pengaruh kualitas tempat tumbuh juga diduga terlihat pada kelas umur XII yang memiliki nilai rata-rata diameter dan tinggi lebih besar dibandingkan dengan kelas umur XIII dan XIV. Menurut Budiman *et al.* (2015), potensi tanah untuk pertumbuhan tanaman adalah salah satu faktor lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan diameter pohon. Kondisi fisik tanah dan sifat kimia tanah adalah dua komponen yang mempengaruhi potensi tanah. Hardjana (2013) juga menyatakan bahwa sedikitnya ada tiga faktor lingkungan dan faktor genetik (internal), yaitu tingkat hara mineral dalam tanah, kelembaban tanah dan paparan sinar matahari, dan keseimbangan faktor genetik antara diameter dan ketinggian pohon.

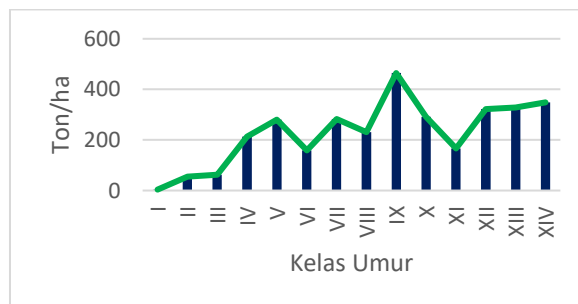
Kualitas tempat tumbuh ini ditentukan oleh tiga faktor yaitu faktor klimatik, edafik (tanah) dan topografi. Pada faktor klimatik terdapat suhu dan curah hujan Siswamartana *et al.* (2002) menyatakan bahwa tanaman pinus dapat hidup dengan baik pada suhu tahunan antara 19 dan 28 derajat Celcius dan pada ketinggian antara 200 dan 1700 meter di atas permukaan laut, kadang-kadang tumbuh di bawah 200 meter di atas permukaan laut. Sumaryono (2000) menyatakan bahwa jika topografi berbentuk lereng curam, pohon akan sulit berdiri tegak

karena perakaran mendatar. Di antara faktor edafik adalah tekstur tanah, kedalaman efektif tanah, dan sifat kimia tanah. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Hanafiah (2005), semakin tidak poreus (tidak kedap air) tekstur tanah, semakin sulit bagi air dan udara untuk bersirkulasi. Namun, air yang ada di tanah tidak dapat dihilangkan dengan mudah. Menurut penelitian Hardjowigeno (2007), kedalaman efektif tanah mempengaruhi drainase, pertumbuhan dan pengembangan akar, serta sifat fisik tanah. Tanah dengan kedalaman efektif dangkal menghambat perkembangan akar tanaman, sedangkan tanah dengan kedalaman efektif dalam memiliki aerasi dan drainase yang baik, dan mampu menyokong perkembangan akar dan tanaman dengan baik.

Pada aspek sifat kimia tanah terdapat beberapa hal yang termasuk kedalamnya diantaranya yaitu:

1. Nilai pH tanah, yang dapat digunakan sebagai pengukur kesuburan kimiawi tanah, karena dapat menunjukkan jumlah hara yang tersedia dalam tanah. Penelitian Spurway, Forth (1984) dalam Hanafiah (2005) menyatakan bahwa tanaman pinus akan tumbuh dengan baik pada pH antara 4,5 dan 5,0, tetapi pada pH 6,5, pinus akan tumbuh dengan lebih baik.
2. Kandungan bahan organik tanah (C organik), unsur penting untuk mendukung kesuburan tanah. Hardjowigeno (2007) menyatakan bahwa bahan organik memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat fisik dan kimia tanah, di antaranya sebagai granulator, sumber unsur hara, N, P, dan S, unsur mikro, meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan air, menahan unsur hara, dan sebagai sumber energi bagi mikroorganisme.
3. Unsur hara makro, yang disebutkan oleh Munawar (2001) termasuk unsur-unsur yang sangat dibutuhkan tanaman dalam jumlah besar (0.1% hingga 5%), termasuk (C, H, O, N, P, S, K, Ca, dan Mg). Nitrogen (N) bersama dengan fosfor (P) dan kalium (K) disebut juga hara primer, karena keduanya paling sering membatasi pertumbuhan tanaman.
4. Kapasitas tukar kation: Dalam penelitian Hardjowigeno (2003), ditemukan bahwa tanah dengan KTK tinggi memiliki potensi untuk meningkatkan kesuburan tanah jika didominasi oleh kation basa Ca, Mg, K, dan Na (yang memiliki kejenuhan basa tinggi), tetapi jika didominasi oleh kation asam Al dan H (yang memiliki kejenuhan basa rendah) dapat mengurangi kesuburan tanah.

Potensi biomassa tegakan pinus di RPH Haurkuning didapatkan dari hasil perhitungan biomassa pada setiap kelas umur. Hasil perhitungan biomassa pada tegakan pinus di RPH Haurkuning berkisar antara 3,64 – 464,44 ton/ha. Nilai estimasi biomassa per hektar dari tiap-tiap kelas umur disajikan pada gambar 6.



Gambar 6. Estimasi Biomassa di RPH Haurkuning pada Berbagai Kelas Umur

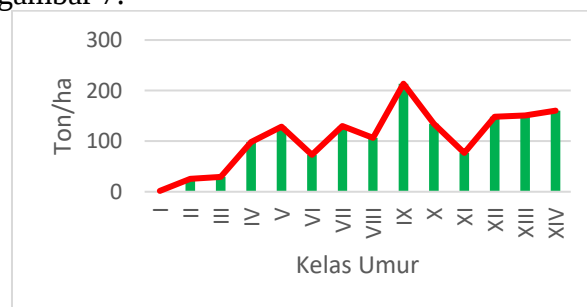
Pada gambar 6 dapat dilihat bahwa rata-rata biomassa paling rendah terdapat pada tegakan pinus kelas umur I yaitu sebesar 3,64 ton/ha. Untuk nilai rata-rata biomassa tertinggi terdapat pada kelas umur IX yaitu sebesar 464,44 ton/ha. Rata-rata biomassa untuk keseluruhan kelas umur adalah 229,28 ton/ha dan total biomassa yang didapatkan adalah sebesar 196413,14 ton. Nilai rata-rata biomassa tersebut lebih kecil dibandingkan dengan hasil penelitian dari Indrajaya (2016) sebesar 247,17 ton/ha. Nilai biomassa tersebut dipengaruhi oleh parameter

tinggi dan diameter pohon penyusun tegakan tersebut. Hal ini sejalan dengan pendapat Mizana dan Retno Peni (2015) dimana nilai biomassa lebih tergantung pada tinggi dan diameter pohon.

Normalnya pada setiap kelas umur memiliki jumlah pohon yang lengkap sesuai dengan jarak tanamnya, sehingga didapatkan data yang representatif untuk memperlihatkan perbedaan nilai estimasi biomassa persatuan luasnya. Berdasarkan data di lapangan pada beberapa kelas umur yang lebih tua memiliki jumlah pohon lebih sedikit pada plot contoh penelitian dibandingkan dengan kelas umur yang lebih muda dan ada juga kelas umur yang lebih muda memiliki jumlah pohon yang lebih sedikit dibandingkan kelas umur yang lebih tua. Perbedaan jumlah pohon ini disebabkan oleh perlakuan penjarangan untuk menghasilkan tegakan pohon tinggal dengan diameter besar ataupun adanya kejadian pohon tumbang yang menyebabkan jumlah tegakan pohon tinggal semakin sedikit. Hal ini menyebabkan perbedaan nilai kerapatan pada gambar 5. Ketika kerapatan tegakan besar ditunjang dengan nilai rata-rata diameter dan tinggi yang besar maka menghasilkan nilai biomassa yang besar. Hal ini bisa dilihat pada nilai biomassa kelas umur IX. Dibandingkan dengan kelas umur I walaupun memiliki kerapatan paling besar tetapi nilai rata-rata diameter dan tinggi kecil, maka nilai biomasanya menjadi rendah. Untuk kasus kelas umur XII yang memiliki nilai rata-rata diameter dan tinggi paling besar, namun kerapatan nya menempati kedua terendah sehingga dalam persatuan luas hektar nilai biomassa nya tidak sebesar kelas umur IX. Perbedaan kerapatan juga mengakibatkan nilai rata-rata biomassa tegakan pada kelas umur yang tua lebih rendah dibandingkan kelas umur lebih muda ketika nilai rata-rata diameter dan tingginya tidak berbeda jauh. Seperti contohnya pada kelas umur V ke kelas umur VI atau dari kelas umur X ke kelas umur XI. Selain kerapatan yang tidak sama setiap kelas umurnya, perbedaan kualitas tempat tumbuh juga mempengaruhi besarnya biomassa. Hal ini selaras dengan pernyataan Terpujana (2022) bahwa hubungan biomassa pada berbagai kelas umur tegakan jati cenderung meningkat seiring dengan usia dan diameter tegakan. Namun, pada Kelas Umur (KU) VI terjadi penurunan dibandingkan KU V, tetapi kenaikan biomassa terjadi pada KU VII. Hal yang sama terjadi pada KU VIII, yang memiliki nilai biomassa yang lebih rendah daripada KU VII, dan begitu pula pada KU X sampai KU XIV, yang memiliki nilai biomassa yang lebih rendah daripada KU IX. Terpujana (2022) menyatakan bahwa faktor yang mempengaruhi adalah perbedaan kualitas tempat tumbuh.

B. Simpanan Karbon Tegakan Pinus

Potensi simpanan karbon tegakan pinus di RPH Haurkuning dihitung berdasarkan nilai simpanan karbon tegakan pinus dari setiap kelas umur. Potensi simpanan karbon pada tegakan pinus di RPH Haurkuning berkisar antara 1,67 – 213,64 ton/ha. Biomassa tegakan pohon sangat mempengaruhi potensi karbon tersimpan. . Hal ini sejalan dengan pernyataan Hanafi dan Bernardianto (2012) bahwa berat biomassa yang signifikan akan berdampak pada jumlah cadangan karbon yang ada di lahan. Nilai estimasi simpanan karbon per hektar dari tiap-tiap kelas umur disajikan pada gambar 7.



Gambar 7. Estimasi Simpanan Karbon Per Hektar di RPH Haurkuning pada Berbagai Kelas Umur

Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa simpanan karbon terkecil terdapat pada tegakan pinus kelas umur I dengan nilai 1,67 ton/ha. Untuk nilai estimasi biomassa per hektar tertinggi

terdapat pada kelas umur IX sebesar 213,64 ton/ha. Dengan rata-rata estimasi simpanan karbon per hektar dari setiap kelas umur sebesar 105,47 ton/ha dan total simpanan karbon yang didapatkan adalah sebesar 90350,04 ton. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian dari Indrajaya (2016) yang mendapatkan bahwa rata-rata nilai simpanan karbonnya sebesar 113,7 ton/ha.

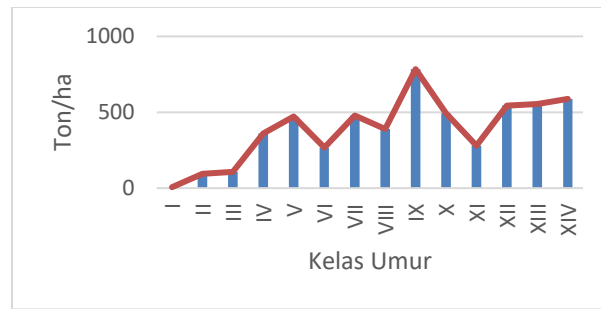
Pada gambar 7 menunjukkan. peningkatan simpanan karbon dari kelas umur I sampai dengan kelas umur V. Ini sesuai dengan pernyataan Sunarno *et al.* (2020) bahwa seiring bertambahnya usia, dimensi tegakan akan meningkat, menghasilkan peningkatan potensi karbon. Setiap kelas umur tidak selalu mengalami peningkatan simpanan karbon dari kelas umur sebelumnya. Seperti halnya simpanan karbon pada kelas umur VI lebih rendah dari kelas umur V, hal ini diduga karena perbedaan kualitas tempat tumbuh yang menyebabkan pohon tidak mengalami peningkatan dalam dimensi seperti tinggi dan diameter. Menurut Rahayu *et al.* (2007), kesuburan tempat tumbuh juga memengaruhi diameter dan tinggi tegakan; lebih subur tempat tumbuh, lebih baik pertumbuhannya. Ini sejalan dengan Chanan (2012), yang menyatakan bahwa kerapatan tegakan, umur tegakan, dan kualitas tempat tumbuh tegakan lebih cenderung memengaruhi perbedaan biomassa dan karbon pada tegakan tersebut.

Pada kelas umur X, XI, XII, XIII, dan XIV simpanan karbonnya lebih rendah daripada kelas umur IX, selain diduga karena perbedaan kelas tumbuh, perbedaan tersebut diduga karena adanya perbedaan kerapatan tegakan. Menurut Syukri (2017), kerapatan suatu jenis dan volume dan jumlah vegetasi pada setiap plot penelitian memengaruhi jumlah cadangan karbon pada setiap tingkatan vegetasi. Namun, penelitian Petsa (2019) menemukan bahwa diameter pohon dan kerapatan mempengaruhi total kandungan karbon, tetapi kerapatan tidak meningkatkan total kandungan karbon jika diameter pohonnya kecil.

Semua faktor yang mempengaruhi biomassa juga akan mempengaruhi simpanan karbon pada suatu tegakan secara tidak langsung (Asmaini *et al.*, 2023). Berdasarkan model allometrik, dapat dikatakan bahwa tinggi tegakan dan diameter memengaruhi besarnya biomassa dan cadangan karbon yang tersimpan (Asmaini *et al.*, 2023). Hal ini sejalan dengan Lubis *et al.* (2013) yang menyatakan bahwa ketika diameter pohon meningkat, cadangan karbonnya meningkat. Diameter, tinggi, dan berat jenis pohon yang tinggi akan meningkatkan akumulasi nilai cadangan karbonnya. Dalam hal pengaruh pada simpanan karbon, kedua dimensi tegakan, yaitu diameter dan tinggi, terkait erat dengan umur pohon. Usia pohon meningkatkan jumlah serapan karbon karena dimensi tegakan meningkat seiring dengan umur pohon, sehingga potensi karbon meningkat (Sunarno *et al.*, 2020). Menurut Mansur dan Tuhteru (2010), dengan bertambahnya umur pohon, potensi karbonnya meningkat dikarenakan semakin tua umur suatu pohon maka akan semakin bertambah diameter dan tinggi pohon tersebut.

C. Penyerapan Karbondioksida Tegakan Pinus

Potensi penyerapan karbondioksida tegakan pinus di RPH Haurkuning dihitung berdasarkan nilai penyerapan karbondioksida tegakan pinus dari setiap kelas umur. Serapan karbondioksida (CO₂) pada tegakan pinus di RPH Haurkuning berkisar antara 6,14 – 784,06 ton/ha. Nilai estimasi penyerapan karbon per hektar dari tiap-tiap kelas umur disajikan pada gambar 8.



Gambar 8. Estimasi Penyerapan Karbondioksida di RPH Haurkuning pada Berbagai Kelas Umur

Pada gambar 8 dapat dilihat bahwa rata-rata penyerapan karbondioksida persatuan hektar yang paling terkecil terdapat pada tegakan pinus dengan kelas umur I dengan nilai 6,14 ton/ha. Untuk nilai estimasi rata-rata penyerapan karbondioksida persatuan hektar tertinggi terdapat pada kelas umur IX sebesar 784,06 ton/ha. Dengan nilai rata-rata estimasi penyerapan karbondioksida pada setiap kelas umur adalah sebesar 387,08 ton/ha dan total penyerapan karbon yang didapatkan adalah sebesar 331584,6 ton. Nilai rata-rata penyerapan karbon dioksida tersebut lebih kecil dibandingkan dengan hasil penelitian Indrajaya (2016) yang mendapatkan nilai sebesar 417,28 ton/ha. Perbedaan besarnya penyerapan karbondioksida diduga karena perbedaan umur. Hal ini sejalan dengan pernyataan Banurea (2020) bahwa fotosintesis, proses fisiologis tumbuhan, terkait dengan serapan karbondioksida. Kandungan klorofil, jumlah stomata persatuan luas, dan umur tegakan daun berkorelasi dengan laju fotosintesis tegakan. Luas daun tegakan persatuan lahan berkorelasi positif dengan jumlah CO₂ yang diserap oleh tegakan. Luas daun tegakan berkorelasi positif dengan umur tegakan.

Selain umur pohon, kerapatan tegakan juga memengaruhi tingkat penyerapan karbondioksida tegakan pinus. Hal ini sejalan dengan apa yang dijelaskan oleh Akbar *et al.* (2015), yang menjelaskan bahwa kerapatan yang tinggi akan menyebabkan intensitas cahaya berkurang dan dapat menghambat pertumbuhan diameter tumbuhan dan biomassa karena jumlah hara, air, cahaya, dan CO₂ yang dikonsumsi oleh tumbuhan berkurang. Jadi, penjarangan dilakukan untuk mengurangi persaingan nutrisi dan meningkatkan pertumbuhan tumbuhan, yang pada gilirannya akan meningkatkan penyerapan karbondioksida. Hal ini sejalan dengan apa yang dikatakan Sunarno *et al.* (2020), yang menyatakan bahwa pengaturan jarak tanam pohon atau tanaman (dibuat penjarangan) adalah komponen yang dapat meningkatkan potensi karbon. Pengaturan jarak antara pohon akan mengurangi persaingan, meningkatkan kualitas pertumbuhan dan dimensi tegakan. Dury *et al.* (2002) menyatakan bahwa tingkat serapan karbon pada ekosistem juga dipengaruhi oleh pengelolaan hutan yang baik, yang mencakup pengaturan penjarangan dan rotasi pohon.

Nilai biomassa sangat memengaruhi tingkat penyerapan CO₂. Menurut De Costa dan Suranga (2012), potensi sekuestrasi karbon hutan ditentukan oleh laju produksi biomassa. Laju produksi biomassa dapat menunjukkan kemampuan hutan untuk menyerap CO₂ atmosfer dan mengurangi pemanasan global dalam jangka waktu tertentu. Tingkat penyerapan CO₂ mempengaruhi pertumbuhan tegakan dalam hal ini yaitu diameter dan tinggi pohon. Karena proses fotosintesis menyerap CO₂ dari atmosfer, biomassa didistribusikan ke daun, ranting, batang, dan akar, sehingga meningkatkan diameter dan tinggi pohon (Chanan, 2012). Nilai estimasi penyerapan karbondioksida berbeda untuk setiap umur karena perbedaan tinggi dan diameter. Ini sesuai dengan penelitian Suwardi *et al.* (2013), yang menunjukkan bahwa perbedaan dalam ukuran pohon (diameter dan tinggi), jumlah individu, dan jenis pohon yang membentuk suatu lahan akan membedakan nilai biomassa pohon dan serapan CO₂ di sana.

D. Nilai Ekonomi Karbon Tegakan Pinus

Nilai ekonomi karbon direpresentasikan berdasarkan simpanan karbon pada tegakan hutan. Setengah dari biomassa hutan tersusun atas karbon (Hutajulu dan Afifah, 2019).

Potensi nilai ekonomi karbon tegakan pinus di RPH Haurkuning dihitung berdasarkan nilai ekonomi karbon tegakan pinus dari setiap kelas umur. Nilai ekonomi karbon tegakan pada tegakan pinus di RPH Haurkuning berkisar antara Rp. 50.225,84 – Rp. 6.409.201,57 per hektar. Untuk nilai ekonomi karbon di tegakan pinus pada tiap kelas umur disajikan pada tabel berikut ini :

Tabel 1. Nilai Rata-Rata Ekonomi Karbon di RPH Haurkuning pada Berbagai Kelas Umur

Kelas Umur	NEK Per Ha (Rp/ha)	NEK Total (Rupiah)
I	50225,8379	1062300
II	764528,957	41506200
III	870885,566	19159500
IV	2939890,42	29398800
V	3864159,27	505045500
VI	2190257,5	58370400
VII	3906482,97	150204300
VIII	3191464,54	106467300
IX	6409201,57	131068200
X	4025405,72	1369402800
XI	2297159,35	21271800
XII	4443764,67	39993900
XIII	4529893,78	58888500
XIV	4814382,8	178661700
Jumlah	44297702,9	2710501200
Rata-Rata	3164121,64	

Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa rata-rata nilai ekonomi karbon tegakan pinus terendah terdapat pada tegakan pinus dengan kelas umur I dengan nilai Rp. 50.225,84 per ha. Untuk nilai estimasi rata-rata nilai ekonomi karbon tegakan pinus tertinggi terdapat pada kelas umur IX sebesar Rp. 6.409.201,57 per ha. Dengan nilai rata-rata estimasi nilai ekonomi karbon pada setiap kelas umur adalah sebesar Rp. 3.164.121,64 per ha. Pada dasarnya nilai ekonomi karbon sangatlah dipengaruhi besarnya nilai simpanan karbon seperti yang disebutkan dalam Hutajulu dan Afifah (2019) bahwa besarnya simpanan karbon memiliki nilai ekonomi yang besar.

Untuk total nilai ekonomi karbon di RPH Haurkuning, BKPH Garawangi, KPH Kuningan ini yaitu sebesar Rp. 2.710.501.200 dengan total simpanan karbon adalah sebesar 90.350,04 ton. Nilai ekonomi karbon tersebut sangat kecil jika dibandingkan penelitian Panuntun (2022) dimana harga karbon yang didapat adalah sebesar Rp 57.743.499.775,94 dengan total simpanan karbon adalah sebesar 139.958,40 ton. Namun hal itu dikarenakan standar harga yang diterapkan adalah standar European Union Allowance. Dimana harga 1 ton karbon didalam penelitian tersebut sekitar € 25,8, dimana dapat asumsikan 1 € pada tahun 2022 sekitar Rp. 16.000. Maka jika dihitung menggunakan standar European Union Allowance maka nilai ekonomi karbon tegakan pinus di RPH haurkuning sebesar Rp. 37.267.584.499.

Jika nilai ekonomi pohon pinus hanya dihitung dari nilai getah dan kayunya, nilai ekonominya masih dianggap rendah. Oleh karena itu, seharusnya ada upaya untuk menghitung manfaat hutan sebagai penyedia jasa lingkungan, salah satunya adalah penyerapan karbon, yang diharapkan mampu memberi nilai ekonomi yang lebih (Suryatmojo, 2004). Penelitian oleh Polosakan *et al.* (2014) menemukan bahwa pohon pinus memiliki nilai ekonomi yang cukup rendah jika dihasilkan dari kayu yang dipilih. Selain itu, pendapat ini sejalan dengan

penelitian yang dilakukan oleh Polosakan *et al.* (2014), yang menemukan bahwa pohon pinus, baik yang dihasilkan dari kayu maupun getahnya, memiliki nilai ekonomi yang cukup rendah. Maka penentuan nilai jasa lingkungan berupa penyerapan karbon dioksida (CO₂) dapat memberi nilai yang lebih tinggi. Pendekatan nilai ekonomi karbon ini dianggap layak sebagai kompensasi untuk hutan karena kemampuan mereka untuk menyerap emisi CO₂ (Fauzi dan Siregar, 2018).

Untuk saat ini, perhitungan nilai ekonomi karbon sangat penting, selain untuk mengetahui nilai ekonomi karbon juga dapat mempermudah pembayaran dalam perdagangan karbon (Betani *et al.*, 2016). Pendapat ini sejalan dengan penelitian Simalango (2014) dimana nilai ekonomi diperlukan untuk membantu perdagangan karbon. Perdagangan karbon dapat mendorong berkurangnya penebangan pohon, memungkinkan pohon tetap hidup dan menyerap karbon dari udara dalam jumlah yang cukup besar, yang berarti lebih banyak pohon yang dijaga dan lebih sedikit emisi karbon. Selain itu, Falson dan Afrisca (2023) dalam penelitiannya menyatakan bahwa program pengurangan emisi karbon dapat menghasilkan manfaat karbon dalam mendukung perekonomian; program ini memungkinkan pemerintah dan pelaku usaha untuk menghasilkan kredit karbon yang dapat dijual di pasar karbon.

Setelah diketahui potensi nilai ekonomi karbon, maka langkah selanjutnya adalah melakukan perdagangan karbon ataupun dalam hal ini bisa melalui offset emisi GRK yang telah diatur dalam PP No. 98 tahun 2021 yang mekanismenya disebutkan dalam PERMEN LHK No. 7 Tahun 2023 pasal 11 diantaranya sebagai berikut :

1. Penyusunan dan penetapan peta jalan Perdagangan Karbon sektor Kehutanan. Tujuan utama dari peta jalan ini adalah untuk menetapkan perdagangan karbon sebagai strategi untuk mengurangi dampak lingkungan dari perubahan iklim.
2. Penetapan penyediaan cadangan pengurangan emisi (*buffer*). Cadangan ini sangat penting karena memungkinkan fleksibilitas dalam mencapai target penurunan emisi di sektor kehutanan
3. Penetapan *Baseline* Emisi GRK sektor Kehutanan.
4. Penetapan target pengurangan emisi sektor Kehutanan. Mekanisme ke-3 dan ke-4 ini diperlukan untuk menetapkan tujuan yang jelas
5. Penyusunan Dokumen Rancangan Aksi Mitigasi Perubahan Iklim (DRAM) yang akan menjadi pedoman pelaksanaan.
6. Validasi DRAM;
7. Laporan hasil Validasi DRAM untuk memastikan keakuratan dan keberhasilan langkah mitigasi yang dilakukan.
8. Laporan hasil pelaksanaan Aksi Mitigasi Perubahan Iklim disusun dan diverifikasi untuk memantau kemajuan dan efektivitas aksi mitigasi.
9. Verifikasi laporan hasil pelaksanaan Aksi Mitigasi Perubahan Iklim;
10. Penyusunan laporan hasil Verifikasi pelaksanaan Aksi Mitigasi Perubahan Iklim;
11. Pembentukan dan penelaahan oleh tim MRV dimana tim Pengukuran, Pelaporan, dan Verifikasi (“MRV”) ditugaskan untuk merumuskan dan meninjau langkah-langkah yang telah diambil, dan
12. Penerbitan SPE-GRK merupakan bukti penurunan emisi oleh Badan Usaha dan/atau peserta kegiatan yang telah melalui proses MRV. (Wijayanto, Juli 25, 2023).

Sertifikat Pengurangan Emisi - Gas Rumah Kaca (SPE-GRK) sendiri biasa dikenal dengan Carbon Credit adalah surat bentuk bukti pengurangan emisi oleh usaha dan/atau kegiatan yang telah melalui Pengukuran, Pelaporan, dan Verifikasi / *Measurement, Reporting, and Verification*, serta tercatat dalam Sistem Registri Nasional Pengendalian Perubahan Iklim dalam bentuk nomor dan/atau kode registri. Perusahaan dapat membeli unit karbon untuk digunakan dalam memenuhi target penurunan emisi atau memenuhi komitmen dalam carbon neutral atau *net-zero emission* (IDX Carbon, n.d).

SPE-GRK dapat diperdagangkan per proyek melalui mekanisme Lelang, *Marketplace*, atau Negosiasi, dimana pelaku usaha dapat melakukan jual beli untuk SPE-GRK tertentu melalui Bursa Karbon. Selain per proyek, SPE-GRK juga dapat diperdagangkan sesuai dengan jenis pengelompokan di pasar reguler. Di pasar ini setiap SPE-GRK yang diperdagangkan di IDXCARBON akan dikelompokkan ke dalam suatu standar tertentu, dan Pembeli akan mengetahui detail proyek yang dibeli setelah transaksi dilakukan (IDX Carbon, n.d).

SIMPULAN

Di RPH Haurkuning terdapat 14 kelas umur dimulai dari kelas umur I sampai dengan kelas umur XIV. Produksi biomassa, simpanan karbon dan penyerapan karbon yang dihasilkan cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya umur tanaman. Pertambahan umur tegakan pinus berbanding lurus dengan meningkatnya diameter dan tinggi pohon. Namun pengaruh kerapatan tegakan dan kualitas tempat tumbuh diduga membuat suatu tegakan pinus yang memiliki umur yang lebih tua memiliki nilai biomassa, simpanan karbon dan serapan karbondioksida yang lebih kecil dibandingkan umur tegakan yang lebih muda. Rata-rata biomassa untuk keseluruhan kelas umur adalah 229,28 ton/ha. Pada berbagai kelas umur rata-rata simpanan karbon sebesar 105,47 ton/ha. Nilai rata-rata penyerapan karbondioksida pada setiap kelas umur adalah sebesar 387,08 ton/ha. Untuk total nilai ekonomi karbon tegakan pinus di RPH Haurkuning, BKPH Garawangi, KPH Kuningan ini yaitu sebesar Rp. 2.710.501.200, dengan rata-rata nilai ekonomi karbon pada setiap kelas umur adalah sebesar Rp. 3.164.121,64 per hektar.

SARAN

Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada analisis lebih mendalam mengenai pengaruh faktor lingkungan dan praktik silvikultur terhadap akumulasi biomassa, simpanan karbon, dan penyerapan karbon dioksida. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk mengkaji hubungan antara kerapatan tegakan dengan efisiensi pertumbuhan pohon serta akumulasi karbon, guna menentukan perlunya intervensi silvikultur seperti penjarangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah berpartisipasi dalam penelitian ini, terutama pada civitas akademika Fakultas Kehutanan Universitas Kuningan dan rekan-rekan mahasiswa/

REFERENSI

- Akbar, N., Baksir, A., & Tahir, I. (2015). Struktur komunitas ekosistem mangrove di kawasan pesisir Sidangoli Kabupaten Halmahera Barat, Maluku Utara. *Depik*, 4(3),132–143.
- Antara News. (2021), November 2 . Luhut:
- Perpres Tentang Nilai Ekonomi Karbon Telah Disahkan Presiden. Retrieved from <https://www.antaraneews.com/berita/2497485/luhut-perpres-tentang-nilai-ekonomi-karbon-telah-disahkan-presiden>
- Arupa. (2014). Menghitung Cadangan Karbon di Hutan Rakyat Panduan bagi Para Pendamping Petani Hutan Rakyat. Buku. Biro Penerbit Arupa. Sleman. 28p.
- Asmaini, T., Muslih, A.M., Basri, & Hairul. (2023). Estimasi Karbon Tersimpan Pada Hutan Pinus (*Pinus merkusii*) Di Kecamatan Blang Jerango Kabupaten Gayo Lues. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 8(4).

- Bachmid, F., Bachmid, C.F.A., & Kusen, J.D. (2018). Estimasi penyerapan karbon hutan mangrove Bahowo Kelurahan Tongkaina Kecamatan Bunaken. *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, 1,8-13.
- Banurea, D. (2020). Pendugaan cadangan karbon tersimpan pada tegakan *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* dan *Alstonia scholaris* di Arboretum Universitas Sumatera Utara. Skripsi. Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Betani, A., Sribudiani, E., & Mukhamadun. (2016). Valuasi Ekonomi Karbon Pada Tegakan Tingkat Tiang Dan Pohon Di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Hutan Diklat Bukit Suligi Kabupaten Rokan Hulu. *JomFaperta UR*, 3(2).
- Budiman, M., Hardiansyah, G., dan Darwati, H. (2015). Estimasi biomassa karbon serasah dan tanah pada basal area tegakan *Meranti Merah (Shorea macrophylla)* di areal arboretum Universitas Tanjungpura Pontianak. *Jurnal Hutan Lestari*. 3(1):98—107
- Chanan, M. (2012). Pendugaan Cadangan Karbon (C) Tersimpan di Atas Permukaan Tanah pada Vegetasi Hutan Tanaman Jati (*Tectona grandis* Linn. F) (Di RPH Sengguruh BKPH Sengguruh KPH Malang Perum Perhutani II Jawa Timur). *Jurnal GAMM*, 7(2),61–73.
- De Costa, W.A.J.M., & Suranga, H.R. (2012). Estimation of carbon stocks in the forest plantations of Sri Lanka. *J.Natural Science Foundation of Sri Lanka*, 40(1),9–41.
- Dury, S.J., Polglase, P.J., & Vercose, T. (2002). Greenhouse Resource Kit for Private Forest Growers. Canberra.
- Falson, J., & Afrisca, C.C. (2023). Nilai Ekonomi Cadangan Karbon Pada Tanaman Damar Untuk Mendukung Keberlanjutan Pembangunan Nasional. *Jurnal Indonesia RICH*, 4(1),13-21.
- Fauzi, R., & Siregar, C.A. (2019). Estimasi Harga Konservasi Karbon Pada Kegiatan A/R Cdm Di Hutan Lindung Sekaroh, Lombok Timur. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*,16(1),1-12.
- Feldpausch, T.R., Banin, L., Phillips, O.L., Baker, T.R., Lewis, S.L., Quesada, C.A., Affum-Baffoe, K., Arets, E.J.M.M., Berry, N.J., Bird, M., Brondizio, E.S., Camargo, P.de., Chave, J., Djangbletey, G., Domingues, T.F., Drescher, M., Fearnside, P.M., Franca, M.B., Fyllas, N.M., Lopez-Gonzalez, G., Hladik, A., Higuchi, N., Hunter, M.O., Iida, Y., Salim, K.A., Kassim, A.R., Keller, M., Kemp, J., King, D.A., Lovett, J.C., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Lenza, E., Marshall, A.R., Metcalfe, D.J., Mitchard, E.T.A., Moran, E.F., Nelson, B.W., Nilus, R., Nogueira, E.M., Palace, M., Patiño, S., Peh, K.S.H., Raventos, M.T., Reitsma, J.M., Saiz, G., Schrod, F., Sonke, B., Taedoumg, H.E., Tan, S., White, L., Woll, H., & Lloyd, J. (2011). Height-Diameter Allometry Of tropical Forest Trees. *Biogeosciences*, 8:1081-1106.
- Gusmardi, I. (2016). Struktur Vegetasi dan Potensi Cadangan Karbon Pada Tiga Kondisi Hutan di Pulau Siberut Kabupaten Kepulauan Mentawai. Masters Thesis. Universitas Andalas, Padang.
- Hanafi, N., & Bernardianto, R.B. (2012). Pendugaan Cadangan Karbon Pada Sistem Penggunaan Lahan di Areal PT. Sikatan Wana Raya. *Media Sains*, 4(2).
- Hanafiah KA. (2005). Dasar-dasar Ilmu Tanah. Jakarta: PT Grafindo Persada

- Hardjana, A.K. (2010). Potensi Biomassa dan Karbon Pada Hutan Tanaman Acacia Mangium di HTI PT. Surya Hutani Jaya, Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 7,237-249.
- Hardjana, A. K. (2013). *Model hubungan tinggi dan diameter tajuk dengan diameter setinggi dada pada tegakan Tengkawang Tungkul Putih (Shorea macrophylla (de Vriese) P.S. Ashton) dan Tungkul Merah (Shorea stenoptera Burck.) di Semboja, Kabupaten Sanggau.* *Jurnal Penelitian Dipterokarpa*, 7(1), 7–18.
<https://doi.org/10.20886/jped.2013.7.1.7-18>
- Hardjowigeno, S. 92003). *Klasifikasi Tanah dan Pedogenesis*. Jakarta: Akademika Pressindo.
- Hardjowigeno, S. (2007). *Ilmu Tanah*. Jakarta: Akademika Pressindo.
- Heriyanto, N.M., Siringoringo, H.H., Miyakuni, K., & Yoshiyuki, K. (2005). Allometric Equations and Other Parameters For Estimating The Amount of Biomass in Pinus Merkusii Forests. *Prosiding Kajian Manajemen Pengikatan Karbon di Hutan Indonesia*. Jakarta: FORDA dan JICA.
- Hutajulu, G.B., & Afifah, H. (2019). Nilai Ekonomi Simpanan Karbon Hutan Alam Taman Nasional Way Kambas. *BIOTIKA*, 17(2). DOI :
<https://doi.org/10.24198/biotika.v17i2.26645>
- IDX Carbon, (n.d). Produk SPE-GRK. Retrieved from <https://idxcarbon.co.id/id/product-spe-grk>
- Ijazah, M. & Sancayaningsih, R.P. (2015). Penyimpanan Karbon Pada Tegakan Pinus Merkusii Dan Acacia Auriculiformis Di Hutan Lindung Mangunan, Dlingo, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada. *Seminar Nasional XII Pendidikan Biologi FKIP UNS 2015*. Hlm 830-837.
- Indrajaya, Y. (2016). Manfaat Lingkungan Penyerapan Karbon Hutan Pinus Pada Beberapa Kelas Tempat Tumbuh Di Jawa. *Prosiding Seminar Nasional Geografi Ums 2016*. ISBN: 978-602-361-044-0
- Interfaith Rainforest Initiative. (2022). *Hutan Tropis dan Keanekaragaman Hayati*. Jakarta : IRI.
- Irfan, M., Widhanarto, G.O., Dewantara, I. (2021). Estimasi Cadangan Karbon Dari Kegiatan Reklamasi Blok Tambang PT. Citra Mineral Investido, Tbk. Kecamatan Sandai Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat. *Jurnal Hutan Lestari*, 9(3),354.–365
- Jones, M.W., Glen P., Peters., Thomas, G., Robbie M., Andrew., Clemens, S., Johannes, G., Richard, A., Houghton., Pierre, F., Julia, P., and Corinne, L.Q. (2024). “National Contributions to Climate Change Due to Historical Emissions of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide”. *Scientific Data. Zenodo*. DOI :
<https://doi.org/10.5281/zenodo.10839859>.
- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. (2024), Januari 19. Pemerintah Sukses Tekan Emisi GRK dan Intensitas Energi Primer. Retrieved from <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemerintah-sukses-tekan-emisi-grk-dan-intensitas-energi-primer>. Jakarta : KESDM.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2018). *The State of Indonesia’s Forests 2018*. Jakarta : KLHK.

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021), November 3. SIARAN PERS Nomor: SP.383/HUMAS/PP/HMS.3/11/2021. Retrieved from ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/6269/perpres-nilai-ekonomi-karbon-dukung-pencapaian-ndc-Indonesia. Jakarta : KLHK.
- Kementerian Keuangan. (2021), Oktober 6. Retrieved from <https://fiskal.kemenkeu.go.id/fiskalpedia/2021/10/06/18-nilai-ekonomi-karbon-carbon-pricing>
- Li., Yan. (2013). The Best Utilization Mode of Natural Gas For China's Low Carbon Economy. *Energy Policy*, 53,477-483.
- Lukito, M. & Rohmatiah, A. (2013). Estimasi biomassa dan karbon tanaman jati umur 5 tahun. *Jurnal Agritek*, 14(1), 1-23.
- Mansur, I. dan F. D. Tuhteru. (2010). Kayu Jabon . Buku. Penebar Swadaya. Jakarta. 129p.
- Mulyani, A.S. (2021). Pemanasan Global, Penyebab, Dampak Dan Antisipasinya. Universitas Kristen Indonesia, Jakarta.
- Murdiyarso, D. (1999). Strategi Nasional Antisipasi Dampak Perubahan Iklim. Retrieved from www.perpustakaanmenlh.or.id.
- Panuntun, E.B. (2022). *Nilai Ekonomi Karbon Pohon Di Atas Permukaan Tanah Pada Tegakan Pinus (Pinus Merkusii) Di RPH Temanggal, BKPH Magelang, KPH Kedu Utara*. Skripsi. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Pejabat Pengelola Informasi dan Dokumentasi. (2023), Januari 30. Menteri LHK: Tata Batas Kawasan Hutan Selesai Tahun Ini!. Retrieved from <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/7017/menteri-lhk-tata-batas-kawasan-hutan-selesai-tahun-ini>. Jakarta : PPID
- Petsa, N.P. (2019). Potensi Cadangan Karbon Pada Permukaan Tanah di Areal Pengelolaan Hutan Berbasis Masyarakat (PHBM) di Nagari Kotobaru, Kabupaten Solok Selatan. Skripsi. Universitas Andalas, Padang.
- Polosakan, R., Alhamd, L., & Rahajoe, J. S. (2014). Estimasi biomassa dan karbon tersimpan pada Pinus merkusii Jungh. & de Vriese di hutan pinus Gunung Bunder, Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Berita Biologi*, 13.
- Pratama, R. (2019). Efek Rumah Kaca Terhadap Bumi. *Buletin Utama Teknik*. 14(2).
- Putra, A., Arman, A., Yusran, R., Hasmira, M. H., Kamal, E., & Razak, A. (2021). Spesies dan karakteristik tumbuhan ekosistem mangrove berdasarkan hasil survei di kawasan Teluk Bungus-Padang. *Jurnal Kependudukan Dan Pembangunan Lingkungan*, 2(1), 9-18.
- Rahayu, S., Lusiana, B. & Noordwijk, M.V. (2007). Pendugaan Cadangan Karbon di Atas Permukaan Tanah Pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Timur. World Agroforestry Centre, Bogor.
- Simalango, A.O. (2014). Nilai Ekonomi Cadangan Karbon di Atas dan di Bawah Permukaan Tanah pada Tegakan Pohon di Hutan Pendidikan Universitas Sumatera Utara. Skripsi. Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Siswamartana S, Utomo WH, Soedjoko SA, Priyono CNS, Mulyana NM, Rusdiana O, Pramono IB. (2002). Hutan Pinus dan Hasil Air. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press

- Sumaryono. (2000). Sebaran diameter pohon ditinjau dari oksilasi residu persamaan regresinya di HPH PT. Limbang Ganeca. *Jurnal Ilmiah Kehutanan RIMBA Kalimantan* 4(1):1-4.
- Sunarno., Rahadian, R., Suedy, S.W.A., Pradika, B., Adistya, B., Wahyudi, F.E., Rahman, A.Z., Paramasatya, S., & Widiartanto. (2020). Potensi Dan Nilai Ekonomi Cadangan Karbon Pada Area Hijau Yang Dikelola Oleh Pt. Pertamina (Persero) Fuel Terminal Boyolali. *Lembaga Penerbitan Bina Patria*, 15(3).
- Suryatmojo, H. (2004). Peran Hutan Pinus Sebagai Penyedia Jasa Lingkungan Melalui Penyimpanan Karbon Dan Penyediaan Sumberdaya Air. Hasil Penelitian. Yogyakarta.
- Suwardi, A. B., Mukhtar, E., & Syamsuardi. (2013). Komposisi jenis dan cadangan karbon di hutan tropis dataran rendah, Ulu Gadut. *Berita Biologi*, 12(2),169-176.
- Syukri, M. (2017). Estimasi Cadangan Karbon Vegetasi Mangrove Hubungannya dengan Tutupan Kanopi di Ampallas, Kelurahan Bebanga, Kecamatan Kalukku Kabupaten Mamuju Sulawesi Barat. Skripsi. Universitas Hasanuddin Makassar, Makassar.
- Terpujiana, Y. (2022). Estimasi Biomassa, Simpanan Karbon Dan Serapan Co2 Pada Berbagai Kelas Umur Tegakan Jati Di Rph Wungu, Kph Madiun. Skripsi. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Wicaksono, R.A. (2024), Maret 23 . Hari Hutan Sedunia: Deforestasi Indonesia 2023 Capai 257 Ribu Ha. Retrieved from <https://betahita.id/news/detail/10044/hari-hutan-sedunia-deforestasi-indonesia-2023-capai-257-ribu-ha.html?v=1711142623>
- Wijayanto, A.K. 2023, Juli 25. Carbon Offset: Strategi Atasi Perubahan Iklim dan Optimalisasi Potensi Ekonomi. Retrieved from <https://adcolaw.com/id/blog/carbon-offset-strategi-atasi-perubahan-iklim-dan-optimalisasi-potensi-ekonomi/>