

## PENAKSIRAN STOK KARBON BERDASARKAN TUTUPAN LAHAN PADA KHDTK AEK NAULI BAGI PEMBANGUNAN KEHUTANAN BERKELANJUTAN DI KABUPATEN SIMALUNGUN

Dimpu Jekson Panjaitan<sup>1</sup>, Jef Rudiantho Saragih<sup>2</sup>, Benteng Haposan Sihombing<sup>3</sup>,  
Tioner Purba<sup>4\*</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Program studi Perencanaan Wilayah Kota, Sekolah Pascasarjana, Universitas Simalungun,  
\*Email korespondensi: tionerpurba47@email.com

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur stok karbon pada berbagai tipe penutupan lahan di KHDTK. Penelitian dilaksanakan pada bulan Nopember 2025 – Januari 2026 di KHDTK Aek Nauli Kecamatan Girsang Sipangan Bolon Kabupaten Simalungun. Luas KHDTK Aek Nauli adalah 2.415,36 hektar yang terdiridari hutan terbuka, hutan pinus dan hutan campuran. Metode pengumpulan data meliputi data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari pengamatan langsung dilapangan yang mencakup pencatatan jenis tanaman, pengukuran diameter batang dan tinggi tanaman berkayu, vegetasi non kayu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa stok karbon di KHDTK Aek Nauli bervariasi secara signifikan antar tipe penutupan lahan, yang dipengaruhi oleh perbedaan biomassa. Tegakan pinus memiliki stok karbon tertinggi sebesar 296,69 ton/ha. Hutan campuran memiliki stok karbon sedang sebesar 117,62 ton/ha, lahan terbuka menunjukkan stok karbon terendah sebesar 75,83 ton/ha. Tegakan pinus berperan dominan dalam fungsi regulasi iklim dan peningkatan kualitas lingkungan, sementara hutan campuran berfungsi sebagai penyangga ekologis pada skala lanskap. Lahan terbuka menjadi indikator degradasi ekosistem dan prioritas utama rehabilitasi. Oleh karena itu, pengelolaan hutan KHDTK Aek Nauli dalam kerangka PHPL perlu difokuskan pada restorasi lahan terbuka, penguatan struktur hutan campuran, perlindungan tegakan pinus, serta monitoring karbon untuk menjamin keberlanjutan ekosistem jangka Panjang

**Kata Kunci:** Stok Karbon, Tutupan Lahan, Pengembangan Hutan Berkelanjutan

### ABSTRACT

*This study aims to measure carbon stocks in various land cover types in KHDTK. The study was conducted in November 2025–January 2026 in KHDTK Aek Nauli, Girsang Sipangan Bolon District, Simalungun Regency. The area of KHDTK Aek Nauli is 2,415.36 hectares consisting of open forest, pine forest, and mixed forest. Data collection methods include primary and secondary data. Primary data were obtained from direct observations in the field which included recording plant types, measuring stem diameter and height of woody plants, non-woody vegetation. The results showed that carbon stocks in KHDTK Aek Nauli varied significantly between land cover types, which were influenced by differences in biomass. Pine stands had the highest carbon stock of 296.69 tons/ha. Mixed forests had a medium carbon stock of 117.62 tons/ha, open land showed the lowest carbon stock of 75.83 tons/ha. Pine stands play a dominant role in climate regulation and improving environmental quality, while mixed forests serve as ecological buffers at the landscape scale. Open land is an indicator of ecosystem degradation and a top priority for rehabilitation. Therefore, forest management within the Aek Nauli KHDTK PHPL framework needs to focus on restoring open land, strengthening mixed forest structures, protecting pine stands, and monitoring carbon footprint to ensure long-term ecosystem sustainability. Keywords: Carbon Stock, Land cover, sustainable forest development*



## **PENDAHULUAN**

Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) merupakan bagian penting dari sistem pengelolaan hutan di Indonesia yang berfungsi tidak hanya sebagai area penelitian dan pendidikan, tetapi juga sebagai kawasan penyangga kehidupan. Salah satu fungsi ekologis utama KHDTK adalah kemampuannya dalam menyerap dan menyimpan karbon (carbon stock), yang berperan besar dalam mitigasi perubahan iklim global. Penaksiran cadangan karbon di KHDTK menjadi langkah strategis untuk mengetahui kontribusinya terhadap penyerapan gas rumah kaca, terutama karbondioksida (CO<sub>2</sub>) yang merupakan penyumbang terbesar efek rumah kaca (Hairiah et al., 2011). Melalui pengukuran biomassa dan konversi karbon, dapat diketahui berapa besar potensi hutan ini dalam menahan emisi dan menstabilkan iklim mikro kawasan sekitarnya. Dengan demikian, KHDTK tidak hanya berfungsi sebagai laboratorium alam, tetapi juga sebagai aset ekosistem yang berperan dalam keseimbangan karbon global.

Secara nasional, Indonesia memiliki komitmen kuat untuk menurunkan emisi karbon melalui mekanisme pengelolaan hutan lestari, sebagaimana tercantum dalam Nationally Determined Contribution (NDC) yang ditetapkan oleh pemerintah. KHDTK dapat menjadi model percontohan dalam pengelolaan hutan berkelanjutan karena keberadaannya yang dilindungi dan dimanfaatkan untuk penelitian jangka panjang (KLHK, 2022). Dengan demikian, penaksiran stok karbon dan produksi oksigen dari KHDTK dapat memberikan data empiris yang mendukung kebijakan nasional dalam mitigasi perubahan iklim. Data ini juga dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan strategi konservasi dan rehabilitasi vegetasi yang sesuai dengan kondisi biofisik wilayah setempat.

Hubungan antara stok karbon dengan pembangunan hutan berkelanjutan bersifat timbal balik. Kawasan hutan dengan stok karbon tinggi biasanya menunjukkan kondisi lingkungan yang stabil sebagai penyerap dan penyimpanan karbon (carbon sink) yang vital untuk mitigasi perubahan iklim. Sebaliknya, wilayah yang mengalami degradasi hutan dan penurunan cadangan karbon cenderung mengalami masalah lingkungan seperti banjir, kekeringan, dan suhu ekstrem (Yuliasmara & Dewi, 2019). Oleh karena itu, penaksiran stok karbon dan oksigen di KHDTK dapat dijadikan dasar ilmiah untuk mempertahankan keanekaragaman hayati, fungsi hidrologi, dan mendukung kehidupan masyarakat lokal yang merupakan inti dari pembangunan berkelanjutan serta memastikan bahwa pembangunan fisik tidak mengorbankan keseimbangan ekosistem.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kawasan hutan penelitian memiliki potensi simpanan karbon yang tinggi, terutama pada jenis-jenis vegetasi endemik dan tanaman keras berumur panjang. Menurut Hairiah dan Rahayu (2007), biomassa pohon menyumbang lebih dari 70% total karbon tersimpan di ekosistem hutan tropis. Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan vegetasi dan pemantauan pertumbuhan pohon sangat menentukan besar kecilnya cadangan karbon suatu kawasan. Dalam konteks KHDTK, kegiatan penelitian dan penanaman spesies lokal berkontribusi besar terhadap peningkatan stok karbon dan produksi oksigen jangka panjang.

Penelitian penaksiran stok karbon di KHDTK juga dapat menjadi dasar pengembangan pendidikan lingkungan dan kebijakan konservasi berbasis ilmiah. Hasil kajian ini dapat digunakan untuk memperkuat kurikulum pendidikan kehutanan dan perencanaan wilayah yang mengintegrasikan aspek ekologi dan pembangunan. Lebih jauh, data empiris ini bisa menjadi

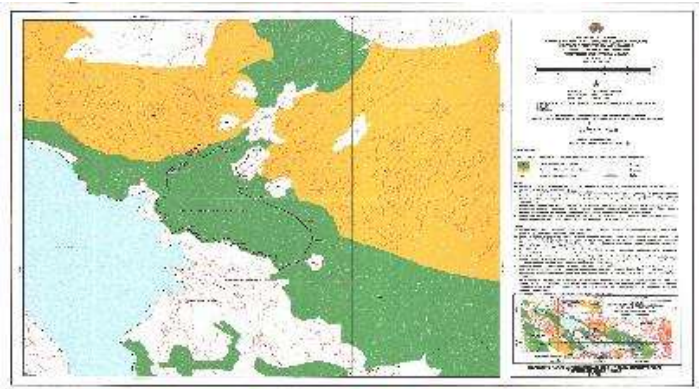


bahan advokasi untuk memperkuat kebijakan perlindungan hutan dari konversi lahan yang tidak ramah lingkungan (Sutaryo, 2020). Dengan demikian, penelitian ini memiliki nilai strategis baik dalam konteks ilmiah maupun kebijakan publik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur dan menaksir besarnya stok karbon tersimpan pada berbagai tipe penutupan lahan di KHDTK berdasarkan pengukuran dan penghitungan biomassa di atas dan di bawah permukaan tanah (*above-ground dan below-ground biomass*) untuk mengetahui total cadangan karbon per hektar, serta variasinya berdasarkan jenis vegetasi dan umur tegakan

## **METODE PENELITIAN**

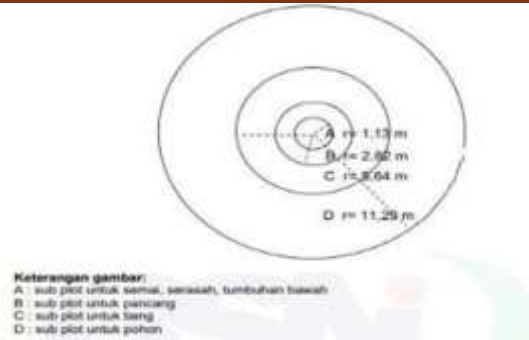
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Nopember 2025– Januari 2026 dan untuk pengambilan data dilakukan di lokasi KHDTK Aek Nauli Kecamatan Girsang Sipangan Bolon Kabupaten Simalungun, dengan luas 2.415,36 hektar yang tergolong kepada 3 (tiga) tipe hutan yaitu hutan terbuka, hutan pinus dan hutan campuran. Peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian**

Bahan yang menjadi obyek dalam penelitian ini adalah vegetasi berpohon dari 3 (tiga) tipe tutupan lahan yaitu tipe hutan yaitu hutan terbuka, hutan pinus dan hutan campuran. Peralatan yang dibutuhkan dan digunakan dalam penelitian ini adalah kendaraan bermotor, meteran, alat tulis, tally sheet, kamera digital, laptop, scanner, printer dan lain-lain.

Metode pengumpulan data meliputi data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari pengamatan langsung dilapangan yang mencakup pencatatan jenis tanaman, pengukuran diameter batang dan tinggi tanaman berkayu, vegetasi non kayu dan nekrosa sedangkan data sekunder diperoleh dari data yang sudah ada berupa kondisi umum lokasi penelitian, peta tutupan lahan, data iklim dan studi literatur. Pembangunan PSP pada setiap tipe tegakan masing-masing dibuat sebanyak (10) sepuluh PSP yang dilihat secara representatif dan non deskriptif. Bentuk PSP yang digunakan adalah berbentuk lingkaran dan ukuran plot untuk tiap tingkatan pertumbuhan vegetasi dijelaskan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Design Pembangunan PSP

### Prosedur Pengukuran Biomasa di atas permukaan tanah (*Above Ground Biomass*)

Tumbuhan yang diukur meliputi tingkat pohon, tiang, pancang dan semai dengan ukuran masing-masing plot seperti pada Gambar 2. Data yang dikumpulkan antara lain: data jenis pohon, keliling pohon dan tinggi pohon. Pengukuran keliling/ diameter menggunakan meteran dan phiband. Pengukuran keliling tumbuhan pada tingkat pohon, tiang dan pancang dilakukan pada ketinggian 1,3 m dari permukaan tanah. Untuk tingkat semai, pengukuran dilakukan pada ketinggian 10 cm dari permukaan tanah.

### Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan dan analisis data hasil pengukuran lapangan untuk menduga nilai cadangan karbon pada lima *carbon pool* mengacu pada SNI 7724 (2019). Penghitungan karbon ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### *Above Ground Biomass (AGB)*

Penghitungan AGB dilakukan dengan menggunakan persamaan alometrik yang sesuai dengan karakteristik lokasi pengukuran yang meliputi zona iklim, tipe hutan, serta nama jenis. AGB terdiri dari pengukuran tumbuhan tingkat pohon, tiang, pancang dan semai serta tumbuhan bawah.

#### a. Penghitungan Biomassa Berdasarkan Biomassa Expansion Factor

$$B_{ov} = v \times BJ \times BEF$$

Keterangan:

- B<sub>ov</sub> adalah biomassa atas permukaan, dinyatakan dalam kilogram (kg);
- v adalah volume kayu bebas cabang (komersil), dinyatakan dalam meter kubik (m<sup>3</sup>);
- BJ adalah berat jenis kayu, dinyatakan dalam kilogram per meter kubik (kg/m<sup>3</sup>)
- BEF adalah *biomass expansion factor*

#### b. Karbon Dari Biomassa

$$C_b = B \times \% C\text{-organik}$$

Keterangan:

- C<sub>b</sub> adalah kandungan karbon dari biomassa, dinyatakan dalam kilogram (kg);
- B adalah total biomassa, dinyatakan dalam kilogram (kg);
- % C-organik adalah nilai persentase kandungan karbon, sebesar 0,47 atau menggunakan nilai persen karbon yang diperoleh dari hasil pengukuran di laboratorium.

#### c. Cadangan karbon per hektar dari biomassa atas permukaan tanah

$$C_n = \frac{C_x}{1000} \times \frac{10000}{l_{plot}}$$



Keterangan:

- $C_n$  adalah kandungan karbon pada masing-masing *carbon pool* pada tiap plot (ton/ha);  
 $C_x$  adalah kandungan karbon pada setiap *carbon pool* pada tiap plot (kg);  
 $L_{plot}$  adalah luas plot pada masing-masing pool, dinyatakan dalam meter persegi (m<sup>2</sup>)

### Hubungan dengan Pembangunan Kehutanan Berkelanjutan

Konsep pembangunan kehutanan berkelanjutan berbasis ekosistem adalah hubungan yang bersifat integratif, ekologis, ekonomi, dan sosial. Data stok karbon bukan sekadar angka ilmiah, tetapi fondasi dalam perencanaan tata ruang, kebijakan ekonomi hijau, dan peningkatan kualitas hidup masyarakat. Wilayah yang mengelola cadangan karbonnya dengan baik akan memiliki daya saing lebih tinggi, lingkungan lebih stabil, serta masyarakat yang lebih sejahtera. Dengan demikian, penaksiran stok karbon menjadi jembatan ilmiah antara pelestarian lingkungan dan pembangunan wilayah berkelanjutan (Bappenas, 2021; KLHK, 2022).

Data Stok karbon hutan yang diukur melalui inventarisasi vegetasi (diameter pohon, tinggi pohon, jenis) atau persamaan alometrik untuk menghitung biomassa dan kandungan karbon (misalnya *Brown, 1997* atau *IPCC 2019 Guidelines*) yang dinyatakan dalam ton karbon per hektar (tC/ha). Untuk mendukung pembangunan kehutanan yang berkelanjutan, hasil analisis perlu dipetakan secara spasial menggunakan Sistem Informasi Geografis (GIS) maka peta hasil analisis tutupan lahan (*land cover*) digunakan sebagai dasar dalam menunjukkan wilayah dengan stok karbon tinggi dan produksi oksigen besar di mana dalam kebijakan lingkungan ditetapkan bahwa area ini layak dipertahankan sebagai zona konservasi atau penyangga ekoregion atau penyangga ekologis. Sementara itu, wilayah dengan nilai stok karbon tinggi dan produksi oksigen sedang dapat diarahkan pada pola agroforestry atau reforestasi terencana dan area yang nilai stok karbon dan produksi oksigen rendah (*low-carbon development*) dapat diarahkan untuk rehabilitasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Stok Karbon Berdasarkan Kualitas Tutupan Lahan

KHDTK Aek Nauli secara geografis terletak diantara 2° 41' – 2° 44' LU dan 98° 57' – 98° 58' BT. Secara administratif termasuk dalam wilayah Desa Sibaganding, Kecamatan Girsang Sipanganbolon, Kabupaten Simalungun. Kawasan ini merupakan daerah pegunungan pada ketinggian sekitar 1100 – 1650 meter dari permukaan laut dengan kemiringan antara 3 – 65 %. Curah hujan bulanan rata-rata sebesar 206,5 mm dan curah hujan tahunan rata-rata sebesar 2.452 mm dengan jumlah hari hujan sekitar 151 hari/tahun. Suhu maksimum bulanan berkisar antara 21,1 – 25 °C dengan kisaran suhu minimum antara 15,8 – 17,8 °C. Kelembaban relatif maksimum dan minimum bulanan rata - rata berkisar antara 67,5% - 85,6% dan 49,6% - 73,9% (Butarbutar dan Harbagung, 1996).

Tabel 1. Rekapitulasi Stok Karbon Ekosistem Hutan KHDTK

No	Karbon Pool	Lahan Terbuka	Hutan Campuran	Hutan Pinus
1.	Biomassa Permukaan	40,63	64,24	164,43
	Pohon	40,63	57,16	162,74
	Tiang	-	7,07	1,68
	Pancang	-	-	-
	Semai, tumbuhan bawah	-	1,07	0,31
	<b>Total (ton/ha)</b>	<b>81,26</b>	<b>129,54</b>	<b>329,16</b>
	<b>Luas areal (Ha)</b>	<b>130,22</b>	<b>1.725,04</b>	<b>547,55</b>
	<b>Karbon/Tuplah (ton)</b>	<b>129,54</b>	<b>223461,7</b>	<b>180.231,56</b>



Pada Tabel 1, menunjukkan bahwa total cadangan karbon pada tiga tipe tutupan lahan dari lahan terbuka, hutan campuran, dan hutan pinus memiliki perbedaan yang sangat signifikan baik pada level per hektare maupun total area. Lahan terbuka memiliki total karbon (81,26 ton/ha), jauh lebih rendah dibandingkan hutan campuran (129,54 ton/ha) dan khususnya hutan pinus yang mencapai (329,16) ton/ha. Perbedaan ini menggambarkan tingginya kontribusi vegetasi berkayu dalam menyimpan karbon. Semakin rapat dan dewasa struktur vegetasi, terutama pohon dengan diameter besar, semakin besar kemampuan kawasan tersebut menyimpan karbon. Lahan terbuka umumnya hanya memiliki sedikit biomassa dan didominasi tumbuhan bawah sehingga kontribusi karbonnya rendah. Berbeda dengan hutan campuran yang memiliki struktur vegetasi beragam serta hutan pinus yang cenderung homogen namun memiliki tegakan dengan biomassa besar. Data ini memperlihatkan bahwa KHDTK Aek Nauli memiliki potensi besar dalam meningkatkan serapan karbon terutama melalui rehabilitasi lahan terbuka dan optimalisasi pengelolaan hutan campuran. Dari perspektif pengelolaan hutan berkelanjutan, memahami distribusi stok karbon seperti ini sangat penting untuk penentuan zonasi konservasi dan strategi restorasi yang tepat sasaran. Kondisi ini menegaskan pandangan bahwa vegetasi pepohonan merupakan kumpulan karbon terbesar dalam ekosistem darat (IPCC, 2006).

Jika dilihat berdasarkan klasifikasi stok karbon menurut IPCC (2006) dan berbagai penelitian kehutanan, stok karbon dapat dibagi menjadi beberapa kategori umum: rendah (<100 ton/ha), sedang (100–250 ton/ha), dan tinggi (>250 ton/ha). Dengan menggunakan klasifikasi ini, lahan terbuka di KHDTK Aek Nauli termasuk kategori **rendah**, hutan campuran kategori **sedang**, dan hutan pinus masuk kategori **tinggi**. Pola ini memperlihatkan bahwa pinus memiliki peningkatan biomassa yang jauh lebih cepat dalam fase tegakan homogen, sementara hutan campuran lebih stabil namun tidak mencapai puncak akumulasi karbon seperti tegakan monokultur berumur tua. Analisis semacam ini membantu dalam pengambilan keputusan terkait pengalokasian sumber daya pengelolaan. Misalnya, area stok karbon rendah perlu menjadi prioritas dalam kegiatan rehabilitasi atau reforestasi. Sementara itu, area dengan stok karbon tinggi seperti pinus perlu dijaga agar tidak terjadi degradasi yang dapat melepaskan karbon besar ke atmosfer. Dengan demikian, klasifikasi stok karbon memberikan dasar ilmiah dalam pengembangan kebijakan konservasi dan peningkatan kapasitas karbon di tingkat tapak.

Lahan terbuka dengan stok karbon 81,26 ton/ha menunjukkan kondisi ekosistem yang berada pada fase awal suksesi vegetasi. Tingkat biomassa di atas permukaan sangat rendah (40,63 ton/ha). Ini menandakan rendahnya tutupan pohon dan dominasi vegetasi rendah seperti semak atau rerumputan. Kondisi tersebut menyebabkan kemampuan penyimpanan karbon menjadi terbatas sehingga kontribusi lahan terbuka terhadap mitigasi perubahan iklim relatif kecil. Namun, secara ekologis, lahan terbuka memiliki potensi besar sebagai target rehabilitasi untuk meningkatkan stok karbon melalui penanaman spesies cepat tumbuh atau spesies lokal yang berperan penting dalam restorasi ekosistem. Selain itu, pemetaan stok karbon rendah seperti ini penting untuk mencegah alih fungsi lahan yang dapat memperburuk kondisi lingkungan. Oleh karena itu, pengelolaan lahan terbuka harus diarahkan pada peningkatan tutupan vegetasi dan pengoptimalan produktivitas biomassa secara bertahap.

Hutan campuran di KHDTK Aek Nauli menunjukkan stok karbon sebesar 129,54 ton/ha, yang menggambarkan struktur tegakan heterogen dan kompleksitas vegetasi yang lebih tinggi daripada lahan terbuka. Dalam hutan campuran, biomassa terdiri dari beberapa strata seperti pohon, tiang, pancang, serta tumbuhan bawah. Nilai biomassa di atas permukaan (64,24 ton/ha) menunjukkan bahwa pertumbuhan pohon sudah cukup stabil meskipun belum mencapai tingkat akumulasi biomassa maksimum. Kategori stok karbon sedang ini menunjukkan ekosistem yang berada pada tahap suksesi menengah dan berpotensi terus meningkat apabila pengelolaan dilakukan secara lestari. Intervensi seperti pengayaan tanaman, perlindungan dari gangguan antropogenik, dan penataan ruang hutan dapat meningkatkan kapasitas serapan



karbon di masa depan. Dengan demikian, hutan campuran menjadi zona strategis untuk peningkatan karbon jangka menengah.

Tegakan pinus menunjukkan stok karbon sangat tinggi, yaitu 329,16 ton/ha, yang termasuk kategori tinggi menurut banyak literatur kehutanan. Pinus dikenal memiliki produktivitas biomassa yang besar, terutama ketika tumbuh dalam tegakan homogen. Biomassa atas permukaan mencapai 164,43 ton/ha, jauh melebihi kategori lain. Biomassa bawah tanah (60,84 ton/ha) juga sangat tinggi, mencerminkan sistem akar yang kuat dan persisten. Tingginya stok karbon ini menjadikan hutan pinus sebagai penyerap karbon yang signifikan, memberikan kontribusi besar terhadap mitigasi perubahan iklim. Namun, tingginya stok karbon juga berarti tingginya risiko apabila terjadi kebakaran hutan atau penebangan tidak terkendali karena pelepasan karbon akan sangat besar. Oleh karena itu, pengelolaan tegakan pinus harus difokuskan pada perlindungan kebakaran, penjarangan selektif, dan pemeliharaan tegakan untuk menjaga stabilitas stok karbon dalam jangka panjang.

Perbandingan stok karbon antar-tutupan lahan menunjukkan bahwa perbedaan utama berada pada struktur vegetasi dan tingkat gangguan. Lahan terbuka umumnya merupakan hasil dari degradasi, penebangan, atau gangguan lain yang menyebabkan hilangnya biomassa. Sebaliknya, hutan campuran berada dalam kondisi yang lebih baik namun masih relatif dinamis. Pinus, yang umumnya merupakan hasil pengelolaan intensif, memiliki tingkat penutupan kanopi tinggi dan biomassa besar sehingga mampu menyimpan karbon secara maksimal. Dengan demikian, variasi stok karbon sejalan dengan teori suksesi ekologis dan produktivitas biomassa vegetasi. Perbandingan ini sangat penting bagi perencanaan pengelolaan KHDTK karena dapat membantu menentukan zona prioritas perlindungan dan area yang memerlukan intervensi restorasi. Selain itu, hasil ini memberikan gambaran mengenai kapasitas KHDTK terhadap mitigasi perubahan iklim secara keseluruhan.

Dalam konteks pengelolaan hutan berkelanjutan, stok karbon sering dijadikan indikator keberhasilan pengelolaan. Stok karbon tinggi menunjukkan bahwautupan vegetasi dalam kondisi sehat, memiliki produktivitas tinggi, dan mampu menjaga siklus ekologi secara alami. Sebaliknya, stok karbon rendah mencerminkan kondisi ekosistem terdegradasi atau belum pulih sepenuhnya. Oleh karena itu, data KHDTK menunjukkan bahwa upaya menjaga dan meningkatkan stok karbon pada hutan campuran serta merehabilitasi lahan terbuka merupakan bagian penting dari penerapan prinsip keberlanjutan. Prinsip ini sejalan dengan konsep *climate-smart forestry* yang menekankan pengelolaan hutan tidak hanya untuk produksi kayu tetapi juga untuk jasa lingkungan seperti penyerapan karbon dan produksi oksigen. Dengan demikian, stok karbon menjadi parameter fundamental dalam evaluasi keberlanjutan KHDTK.

Stok karbon juga memiliki hubungan erat dengan produksi oksigen karena biomassa yang tersimpan merupakan hasil dari proses fotosintesis. Hutan dengan stok karbon tinggi, seperti pinus, juga cenderung memiliki produksi oksigen lebih tinggi dibandingkanutupan lahan lain. Hal ini dikarenakan proses penyerapan CO<sub>2</sub> secara intensif yang kemudian menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan. Oleh sebab itu, pengelolaan stok karbon juga berarti pengelolaan kapasitas produksi oksigen. Kesehatan vegetasi, intensitas aktivitas fotosintesis, dan luasutupan pohon menjadi faktor utama dalam kapasitas produksi oksigen dalam suatu kawasan hutan. Dengan demikian, stok karbon sangat relevan tidak hanya dalam mitigasi perubahan iklim tetapi juga dalam menjaga kualitas udara dan keseimbangan ekosistem.

Dari perspektif kebijakan, klasifikasi stok karbon dapat digunakan untuk menentukan arah pengelolaan dan alokasi program. Misalnya, area dengan stok karbon rendah dapat dijadikan target program rehabilitasi hutan dan lahan (RHL) atau agroforestry. Area dengan stok karbon sedang seperti hutan campuran dapat diarahkan pada program peningkatan kualitas tegakan melalui silvikultur intensif. Sementara itu, area dengan stok karbon tinggi seperti pinus lebih tepat difokuskan pada perlindungan, pengurangan risiko kebakaran, dan pengelolaan ketat



untuk mempertahankan stok karbon. Pendekatan berbasis klasifikasi ini sejalan dengan arahan IPCC dan FAO yang menekankan pentingnya inventarisasi karbon sebagai dasar penyusunan rencana pengelolaan hutan.

Secara keseluruhan, stok karbon di KHDTK Aek Nauli memperlihatkan komposisi ekosistem yang beragam dan berpotensi besar dalam mendukung tujuan pengelolaan hutan berkelanjutan. Analisis menunjukkan bahwa upaya peningkatan stok karbon dapat difokuskan pada pemulihan lahan terbuka, penguatan struktur hutan campuran, dan pemeliharaan tegakan pinus yang telah mencapai stok karbon tinggi. Dengan mengintegrasikan data stok karbon dalam perencanaan, KHDTK dapat menjadi model pengelolaan yang tidak hanya berorientasi pada produksi tetapi juga pada mitigasi iklim dan pelestarian ekosistem. Hal ini sangat penting dalam konteks perubahan iklim global, di mana hutan menjadi salah satu instrumen paling efektif dalam penyerapan karbon. Dengan demikian, data ini memberikan landasan kuat bagi perumusan strategi pengelolaan yang lebih adaptif, responsif, dan ilmiah dalam jangka panjang.

Menariknya, komponen tiang hanya muncul pada hutan campuran (7,07 ton/ha) dan hutan pinus (1,68 ton/ha), sementara pada lahan terbuka tidak ditemukan. Kehadiran tiang menunjukkan regenerasi tegakan yang kuat dan adanya stratifikasi vertikal yang baik dalam hutan campuran. Hal ini menambah kompleksitas struktur vegetasi dan meningkatkan kapasitas penyerapan karbon. Pada hutan pinus, jumlah tiang relatif kecil, kemungkinan karena penutupan tajuk yang rapat sehingga menghambat regenerasi alami. Ketidakhadiran tiang pada lahan terbuka menunjukkan bahwa area tersebut tidak memiliki potensi regenerasi pohon atau berada pada kondisi degradasi tinggi. Secara ekologis, fase tiang merupakan masa pertumbuhan aktif dengan laju akumulasi karbon yang tinggi, sehingga keberadaannya pada hutan campuran memberi kontribusi penting terhadap penambahan karbon jangka panjang. Data ini menggarisbawahi bahwa hutan dengan stratifikasi struktur yang lengkap (pancang–tiang–pohon) biasanya memiliki stok karbon lebih stabil dan berkelanjutan (Chave et al., 2005). Hal ini juga menunjukkan potensi restorasi yang lebih tinggi pada hutan campuran dibanding lahan terbuka.

Komponen semai dan tumbuhan bawah memiliki kontribusi yang rendah terhadap total karbon, namun tetap penting sebagai indikator kondisi ekosistem. Hutan campuran memiliki nilai semai dan tumbuhan bawah sebesar 1,07 ton/ha, jauh lebih tinggi dibanding hutan pinus (0,31 ton/ha) dan lahan terbuka (0, ton/ha). Kondisi ini umum terjadi karena hutan campuran biasanya didominasi oleh vegetasi herba, semak, dan rumput, sehingga biomassa tumbuhan bawah tinggi. Pada lahan terbuka sama sekali tidak ada stok karbon yang tersimpan, untuk hutan pinusutupan tajuk menghambat cahaya yang masuk, menyebabkan pertumbuhan tumbuhan bawah menurun. Meski kontribusi karbonnya kecil dalam pengelolaan hutan, tumbuhan bawah berfungsi menjaga kelembapan tanah, mengurangi erosi, serta menjadi pendorong regenerasi awal sebelum pohon berkembang. Literatur ekologi hutan menyebutkan bahwa tumbuhan bawah berperan penting dalam memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan potensi penyerapan karbon jangka panjang (Fujimori, 2001). Data ini menunjukkan bahwa meskipun tidak besar, karbon yang tersimpan pada komponen bawah permukaan menjadi bagian penting dari dinamika ekosistem.

Jika dihitung berdasarkan luas areal, total cadangan karbon menunjukkan kontribusi signifikan terhadap stok karbon lanskap. Lahan terbuka dengan luas 130,22 ha menghasilkan 9.947,89-ton karbon. Hutan campuran, meskipun stok karbon per hektare tidak sebesar pinus, memiliki luas jauh lebih besar (1.725,04 ha) sehingga total karbonnya mencapai 202.912,01 ton, terbesar di antara semuautupan lahan. Hutan pinus memiliki stok karbon per hektare tertinggi namun luas areal sedang (547,55 ha) dengan total 162.450,93 ton. Data ini menunjukkan bahwa kontribusi total karbon tidak hanya ditentukan oleh potensi per hektare tetapi juga skala luasanutupan lahan. Secara ekologis, hutan campuran merupakan penyimpan karbon terbesar karena luas yang dominan. Hal ini mendukung teori bahwa pengelolaan lanskap



hutan harus mempertimbangkan hubungan antara kualitas stok karbon dan luas kawasan untuk memaksimalkan peran hutan dalam mitigasi perubahan iklim (Pan et al., 2011).

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa hutan pinus memiliki potensi penyimpanan karbon per hektare paling tinggi berkat struktur tegakan yang padat dan biomassa pohon yang besar. Hutan campuran memiliki stok karbon per hektare sedang, namun kontribusi totalnya sangat besar karena luasan kawasan yang dominan. Lahan terbuka memiliki stok karbon paling rendah pada semua komponen, baik atas maupun bawah permukaan, sehingga memberikan kontribusi paling kecil terhadap mitigasi perubahan iklim. Interpretasi ini menegaskan kembali pentingnya mempertahankan tutupan hutan serta melakukan rehabilitasi pada lahan terbuka untuk meningkatkan stok karbon nasional. Upaya reforestasi dapat meningkatkan biomassa, memperbaiki kualitas tanah, menambah serasah, serta memperbaiki iklim mikro. Literatur menunjukkan bahwa transisi dari lahan terbuka menuju hutan dapat meningkatkan stok karbon lebih dari tiga kali lipat dalam 20–30 tahun (Silver et al., 2000). Oleh karena itu, hasil Analisis menunjukkan bahwa upaya peningkatan stok karbon dapat difokuskan pada pemulihan lahan terbuka, penguatan struktur hutan campuran, dan pemeliharaan tegakan pinus yang telah mencapai stok karbon tinggi. Dengan mengintegrasikan data stok karbon dalam perencanaan, KHDTK dapat menjadi model pengelolaan yang tidak hanya berorientasi pada produksi tetapi juga pada mitigasi iklim dan pelestarian ekosistem. Hal ini sangat penting dalam konteks perubahan iklim global, di mana hutan menjadi salah satu instrumen paling efektif dalam penyerapan karbon. Dengan demikian, data ini memberikan landasan kuat bagi perumusan strategi pengelolaan yang lebih adaptif, responsif, dan ilmiah dalam jangka panjang.

#### **Hubungan KHDTK dengan Pengelolaan Hutan Lestari**

Mengacu kepada data stock karbon menurut tutupan lahan yang ada di KHDTK Aek Nauli diketahui data ini dapat menunjukkan bahwa KHDTK memiliki tiga tipe tutupan lahan dengan karakter stok karbon yang sangat berbeda: Lahan Terbuka (75,83 ton/ha), Hutan Campuran (117,62 ton/ha), dan Pinus (296,69 ton/ha). Perbedaan ini mencerminkan variasi struktur vegetasi, biomassa, dan kapasitas ekosistem dalam menyerap karbon. Lahan Terbuka memiliki stok karbon paling rendah karena ketiadaan tegakan pohon yang mampu menyimpan karbon dalam jumlah besar. Sebaliknya, vegetasi Pinus menunjukkan akumulasi karbon sangat tinggi, menandakan keberadaan pohon dewasa dengan biomassa besar. Hutan Campuran berada di posisi menengah karena komposisi vegetasi yang beragam namun tidak sepadat hutan monokultur Pinus. Kondisi ini menggambarkan bahwa struktur dan umur tegakan sangat berpengaruh terhadap total simpanan karbon. Dari perspektif ekologi, semakin tinggi stok karbon maka semakin besar pula kontribusi suatu lahan terhadap mitigasi perubahan iklim. Data ini memberikan gambaran bahwa diversifikasi dan peningkatan tutupan vegetasi merupakan kunci pengelolaan hutan berkelanjutan di KHDTK.

Jika dilihat dari komponen karbon biomassa atas permukaan, tegakan Pinus mendominasi dengan nilai mencapai 164,43 ton/ha. Hal ini menunjukkan bahwa pinus dalam kondisi umur tegakan yang matang sehingga mampu menyimpan karbon dalam batang dan cabang dengan sangat efektif. Hutan Campuran juga memberikan kontribusi besar (64,24 ton/ha), meski lebih rendah dari Pinus, karena keberagaman spesies dan variasi umur pohon. Lahan Terbuka menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah yaitu 40,63 ton/ha, yang berasal dari vegetasi semak dan rerumputan. Rendahnya biomassa pohon pada lahan terbuka menandakan bahwa area tersebut memiliki potensi besar untuk ditingkatkan melalui restorasi, reboisasi, atau silvikultur intensif. Penyimpanan karbon dalam biomassa atas permukaan merupakan indikator kesehatan ekosistem. Menurut IPCC (2019), biomassa tegakan merupakan penyumbang terbesar dalam total simpanan karbon, sehingga data ini sangat penting dalam menentukan prioritas pemulihan lahan KHDTK.

Total stok karbon menunjukkan bahwa Pinus menyimpan karbon hampir empat kali lipat lebih besar dibanding Lahan Terbuka. Jika dikaitkan dengan kapasitas produksi oksigen,



maka Pinus merupakan tipe hutan yang memberikan kontribusi ekosistem paling signifikan. Produksi oksigen pada tegakan Pinus diperkirakan setara dengan besarnya intensitas fotosintesis yang terjadi pada area yang memiliki kanopi rapat dan biomassa tinggi. Dengan demikian, data menunjukkan bahwa Pinus tidak hanya berfungsi sebagai penyerap karbon tetapi juga produsen oksigen yang tinggi. Hutan Campuran memberikan kontribusi menengah yang juga penting secara ekologis karena menyediakan biodiversitas tinggi. Menurut Beer et al. (2010), produktivitas primer bersih (NPP) merupakan penentu utama produksi oksigen, sehingga tingginya nilai karbon Pinus berbanding lurus dengan kapasitas produksi oksigennya.

Dalam konteks pengelolaan berbasis keberlanjutan, ketiga tipe tutupan lahan memberikan implikasi berbeda. Lahan Terbuka merupakan area prioritas untuk rehabilitasi karena memiliki stok karbon rendah. Pemulihan lahan dapat meningkatkan jasa ekosistem secara signifikan, terutama jika diarahkan pada peningkatan vegetasi dengan tingkat pertumbuhan cepat dan serapan karbon tinggi. Hutan Campuran dapat difokuskan pada penguatan struktur tegakan dan peningkatan biodiversitas. Sementara ekosistem Pinus dapat dikembangkan sebagai areal penghasil karbon tinggi dengan tetap menjaga siklus ekologis seperti dekomposisi dan regenerasi. Pengelolaan yang berkelanjutan harus mempertimbangkan keseimbangan antara produksi kayu, serapan karbon, keanekaragaman hayati, dan fungsi hidrologi.

Data karbon menunjukkan pentingnya menjaga mosaik ekosistem dalam KHDTK. Hutan monokultur Pinus memiliki nilai stok karbon yang sangat tinggi, tetapi kurang mendukung keanekaragaman hayati. Sebaliknya, Hutan Campuran menyeimbangkan serapan karbon dengan keanekaragaman biotik. Lahan Terbuka memberikan peluang untuk suksesi alami jika dikelola dengan baik. Prinsip pengelolaan hutan berkelanjutan menurut ITTO (2015) mendorong keseimbangan fungsi ekologis, ekonomi, dan sosial. Dengan demikian, kombinasi ketiga tipe tutupan lahan dapat menjadi model lanskap hutan yang ideal. Strategi yang direkomendasikan adalah mempertahankan Pinus sebagai penopang simpanan karbon, meningkatkan kualitas Hutan Campuran, dan memulihkan Lahan Terbuka untuk meningkatkan fungsi ekologis lainnya.

Secara keseluruhan, interpretasi data menunjukkan bahwa KHDTK memiliki potensi besar dalam memberikan jasa ekosistem berupa penyerapan karbon dan produksi oksigen, terutama dari tegakan Pinus dan Hutan Campuran. Lahan Terbuka menjadi titik kritis yang perlu direstorasi untuk mencapai tujuan pengelolaan hutan berkelanjutan. Pendekatan berbasis lanskap hutan dan pengelolaan adaptif menjadi sangat penting. Dengan memadukan peningkatan biomassa, konservasi biodiversitas, dan peningkatan kualitas tanah, KHDTK dapat menjadi kawasan yang optimal dalam konservasi karbon sekaligus mendukung tujuan mitigasi perubahan iklim. Data ini menegaskan pentingnya pengelolaan hutan berkelanjutan yang tidak hanya berfokus pada produksi kayu tetapi juga mempertimbangkan seluruh fungsi ekologis yang dihasilkan.

## **KESIMPULAN**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Stok karbon di KHDTK Aek Nauli bervariasi secara signifikan antar tipe penutupan lahan,
2. Tegakan pinus memiliki stok karbon tertinggi sebesar 296,69 ton/ha
3. Hutan campuran memiliki stok karbon sedang sebesar 117,62 ton/ha,
4. lahan terbuka menunjukkan stok karbon terendah sebesar 75,83 ton/ha, mencerminkan rendahnya biomassa dan kondisi vegetasi pada fase suksesi awal.
5. Tegakan pinus berperan dominan dalam fungsi regulasi iklim dan peningkatan kualitas lingkungan, sementara hutan campuran berfungsi sebagai penyangga ekologis pada skala



lanskap. Lahan terbuka menjadi indikator degradasi ekosistem dan prioritas utama rehabilitasi.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- [SNI] Standar Nasional Indonesia 7724. 2019. Pengukuran dan Penghitungan Cadangan Karbon – Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon berbasis lahan ((land-based carbon accounting).
- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G. B. M., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Asner, G. P., & Willcock, S. (2016). An integrated Pan-Tropical Biomass Map Using Multiple Reference Datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406–1420.
- Baldocchi, D. (2003). Assessing the Eddy Covariance Technique for Evaluating Carbon Dioxide Exchange Rates of Ecosystems. *Global Change Biology*, 9(4), 479–492.
- Bappenas. (2021). Indonesia's FOLU Net Sink 2030 Roadmap. Jakarta.
- Beer, C., et al. (2010). "Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate." *Science*, 329(5993), 834–838.
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., et al. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329, 834–838.
- Brown, S. (1997). Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer. FAO Forestry Paper 134, Rome.
- Chave, J., et al. (2014). Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190.
- Costanza, R., et al. (1997). The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 387, 253–260.
- Clark, D. A., et al. (2001). Measuring Net Primary Production in Forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications*, 11(2), 356–370.
- FAO. (2020). Global Forest Resources Assessment 2020: Terms and Definitions. FAO, Rome.
- FAO. (2020). State of the World's Forests.
- Fujimori, T. (2001). Ecology and Silviculture of Mixed Forests.
- Hairiah, K., & Rahayu, S. (2007). Pengukuran Karbon Tersimpan di Berbagai Macam Penggunaan Lahan. ICRAF SEA Regional Office, Bogor.
- Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F., Velarde, S., Ekadinata, A., Rahayu, S., & van Noordwijk, M. (2011). Measuring Carbon Stocks Across Land Use Systems: A Manual. World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor.
- Hairiah, K., et al. (2020). Soil Carbon Stocks in Indonesian (Agro)forest Transitions. *Science of The Total Environment Science Direct*.
- Hairiah, K., Sitompul, S. M., van Noordwijk, M., & Palm, C. (2011). Methods for Measuring Carbon Stocks in Forest and Agroforestry Systems. World Agroforestry Centre (ICRAF).
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC. (2019). Climate Change and Land.
- IPCC. (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC. (2019). Special Report on Climate Change and Land. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- ITTO. (2015). Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management.
- KLHK. (2020). Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- KLHK. (2020). Pedoman Pengelolaan Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.



- KLHK. (2022). Laporan NDC Indonesia: Komitmen Pengurangan Emisi Karbon Nasional. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Jakarta.
- KLHK. (2022). Rencana Operasional FOLU Net Sink 2030. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Pan, Y., et al. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333, 988–993.
- Purba, R. T., Manullang, M., Siregar, R. T., & Damanik, S. E. (2019). Dampak Relokasi Pusat Pemerintahan Terhadap Efisiensi Pelayanan Masyarakat Dan Pengembangan Wilayah Kabupaten Simalungun. *Jurnal Regional Planning*, 1(1), 54 –. <https://doi.org/10.36985/jrp.v1i1.579>
- Sarumpaet, E., Manullang, M., Silalahi, M., & Purba, J. (2023). Kesenjangan Persepsi Dan Pemahaman Masyarakat Terhadap Indikator Pembangunan Berkelanjutan Dalam Perencanaan Wilayah Di Kota Sibolga. *Jurnal Regional Planning*, 5(1), 25-40
- Sihombing, J., Siregar, R. T., Manullang, M., & Damanik, S. E. (2021). Ketersediaan Ruang Terbuka Hijau Publik Dalam Pembangunan Kota Pematangsiantar. *Jurnal Regional Planning*, 3(1), 54-69
- Silver, W., Ostertag, R., & Lugo, A. (2000). “The potential for carbon sequestration through reforestation.” *BioScience*.
- Siregar, M. A. N., Manullang, M., Siregar, R. T., & Damanik, S. E. (2019). Dampak Perusahaan Kelapa Sawit PTPN - IV Terhadap Kesejahteraan Sosial Masyarakat Dalam Pembangunan Wilayah Di Desa Kedai Damar Kecamatan Pabatu Kabupaten Serdang Badagei. *Jurnal Regional Planning*, 1(1), 39 –. <https://doi.org/10.36985/jrp.v1i1.578>
- Sutaryo. (2020). Peran Data Ekologis dalam Kebijakan Konservasi Hutan Tropis Indonesia. LIPI Press, Jakarta.
- Yuliasmara, F., & Dewi, S. (2019). Analisis Cadangan Karbon pada Hutan Sekunder di Sumatera Utara. *Jurnal Kehutanan Tropika Humida*, 12(1), 25–34.

