

POTENSI CADANGAN KARBON PADA TEGAKAN MERANTI
(*Shorea spp.*) DI AREA TEBANG PILIH TANAM JALUR (TPTJ)

TEKNIK SILIN PT. ERNA DJULIAWATI
SERUYAN - KALIMANTAN TENGAH

Sugeng Basuki¹, Renhart Jemi², Chartina Pidjath², Vera Amelia², Vera Amalia²,
Soaloon Snaga²

¹Mahasiswa Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan

²Staf Pengajar Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan
Lingkungan

ABSTRAK

Pemanasan global akibat peningkatan emisi karbon mendorong pengelolaan hutan produksi berkelanjutan sebagai upaya mitigasi. Penelitian ini dilakukan di areal PBPH PT Erna Djulawati, Kalimantan Tengah, dengan sistem Tebang Pilih Tanam Jalur (TPTJ) dan Silvikultur Intensif (SILIN) pada tegakan Meranti (*Shorea spp.*) berumur 2–12 tahun. Tujuan penelitian ialah mengestimasi cadangan karbon dan serapan CO₂ pada tegakan Meranti, tumbuhan bawah, dan seresah serta menganalisis pengaruh diameter dan tinggi pohon terhadap total cadangan karbon. Hasil menunjukkan peningkatan cadangan karbon dari 0,31 ton/ha pada umur 2 tahun menjadi 56,59 ton/ha pada umur 12 tahun, dengan kontribusi tegakan Meranti mencapai 99,1%. Diameter berpengaruh lebih besar terhadap akumulasi karbon dibandingkan tinggi pohon. Pengelolaan silvikultur intensif berpotensi signifikan dalam mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan serapan karbon hutan tropis produksi.

Kata kunci: Biomassa, Cadangan karbon, Meranti.

ABSTRACT

Global warming caused by increasing carbon emissions drives the need for sustainable forest management as a mitigation effort. This study was conducted in the PBPH area of PT Erna Djuliawati, Central Kalimantan, applying the Selective Cutting and Line Planting (TPTJ) system and Intensive Silviculture (SILIN) on Meranti (*Shorea spp.*) stands aged 2–12 years. The objectives were to estimate carbon stock and CO₂ uptake in Meranti stands, understory vegetation, and litter, and to analyze the influence of diameter and tree height on total carbon stock. Results showed that carbon stock increased from 0.31 ton/ha at age 2 to 56.59 ton/ha at age 12, with Meranti stands contributing up to 99.1%. Diameter had a stronger effect on carbon accumulation than tree height. Intensive silviculture management significantly supports climate change mitigation through enhanced carbon sequestration in tropical production forests.

Keywords: Biomass, Carbon stock, Meranti.

PENDAHULUAN

Permasalahan pemanasan global saat ini menjadi isu penting yang mendapat perhatian luas di tingkat dunia. Peningkatan emisi karbon di atmosfer merupakan penyebab utama dari kondisi ini, di mana aktivitas manusia atau antropogenik memberikan kontribusi signifikan terhadap kenaikan konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK) seperti Karbon Dioksida (CO₂), Metana (CH₄), dan Nitrogen Dioksida (NO₂) yang secara alami sudah ada di atmosfer (IPCC, 2006). Sumber emisi karbon berasal dari berbagai sektor, antara lain energi, Forest and Other Land Use (FOLU), kebakaran hutan, pertanian, limbah, serta proses industri dan penggunaan produk (IPPU). Dari seluruh sektor tersebut, sektor energi menjadi penyumbang terbesar dengan kontribusi sekitar 34,2%, disusul oleh sektor FOLU sebesar 25,1% (BPS, 2019).

Sebagai bentuk komitmen global terhadap mitigasi perubahan iklim, Indonesia turut serta dalam Perjanjian Paris (Paris Agreement) dengan menyusun dokumen *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang berisi rencana aksi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Berdasarkan NDC tahun 2016, Indonesia menargetkan pengurangan emisi GRK sebesar 29% secara mandiri dan 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030. Target ini kemudian diperbarui dalam *Enhanced Nationally Determined Contribution* (ENDC) menjadi 31,89% secara mandiri dan 43,20% dengan bantuan internasional (Anonim, 2022). NDC juga merinci kontribusi pengurangan emisi dari lima sektor utama, yaitu kehutanan sebesar 17,2%, energi 11%, pertanian 0,32%, industri 0,10%, dan limbah 0,38% dibandingkan skenario *Business as Usual* (BAU) pada tahun 2030 (KLHK, 2017).

Keberhasilan pencapaian target NDC memerlukan sinergi antara pemerintah, sektor swasta, akademisi, lembaga swadaya masyarakat, dan masyarakat luas. Dalam konteks kehutanan, peran sektor swasta melalui skema Perizinan Berusaha Pemanfaatan Hutan (PBPH) sangat penting dalam mendukung mitigasi emisi GRK. PBPH memberikan izin kepada pelaku usaha untuk memanfaatkan kawasan hutan secara berkelanjutan, termasuk hasil hutan kayu dan bukan kayu, jasa lingkungan, serta pengolahan dan pemasaran hasil hutan (KLHK, 2021). Oleh karena itu, penghitungan emisi dan cadangan karbon di area PBPH menjadi bagian dari kontribusi sektor swasta terhadap pencapaian target pengurangan emisi, khususnya di sektor FOLU.

Pelaku usaha PBPH diwajibkan mengelola hutan secara lestari melalui pendekatan seperti multiusaha kehutanan, *Reduced Impact Logging* (RIL), dan Silvikultur Intensif (SILIN). Teknik SILIN mengintegrasikan pemuliaan pohon, manipulasi lingkungan, dan pengendalian organisme pengganggu tanaman untuk mempercepat pertumbuhan tegakan (KLHK, 2021). Pemerintah mendorong penerapan teknik ini bersama RIL sebagai strategi utama dalam menekan emisi karbon di sektor kehutanan (Murdiyarto et al., 2015). Salah satu contoh implementasi PBPH adalah PT Erna Djuliawati di Kabupaten Seruyan, Kalimantan Tengah, yang sejak tahun 2005 ditetapkan sebagai HPH model pelaksana SILIN melalui Keputusan Dirjen Bina Usaha No. 261/VI-BPHA/2005 (Istanto, 2020). Perusahaan ini menerapkan sistem Tebang Pilih Tanam Jalur (TPTJ) sebagai bagian dari SILIN. Penelitian sebelumnya di PT Sari Bumi Kusuma menunjukkan bahwa pertumbuhan diameter batang (*diameter at breast height* atau DBH) tertinggi dicapai oleh *Shorea leprosula* Miq sebesar 1,94 cm per tahun, diikuti oleh beberapa jenis *Shorea* lainnya (Widiyatno et al., 2011).

Peningkatan tipe naungan tertentu bahkan mampu meningkatkan pertumbuhan DBH hingga 96% dan pertumbuhan tinggi hingga 33%, yang menunjukkan bahwa penerapan SILIN berpotensi signifikan dalam meningkatkan cadangan karbon dan serapan CO₂.

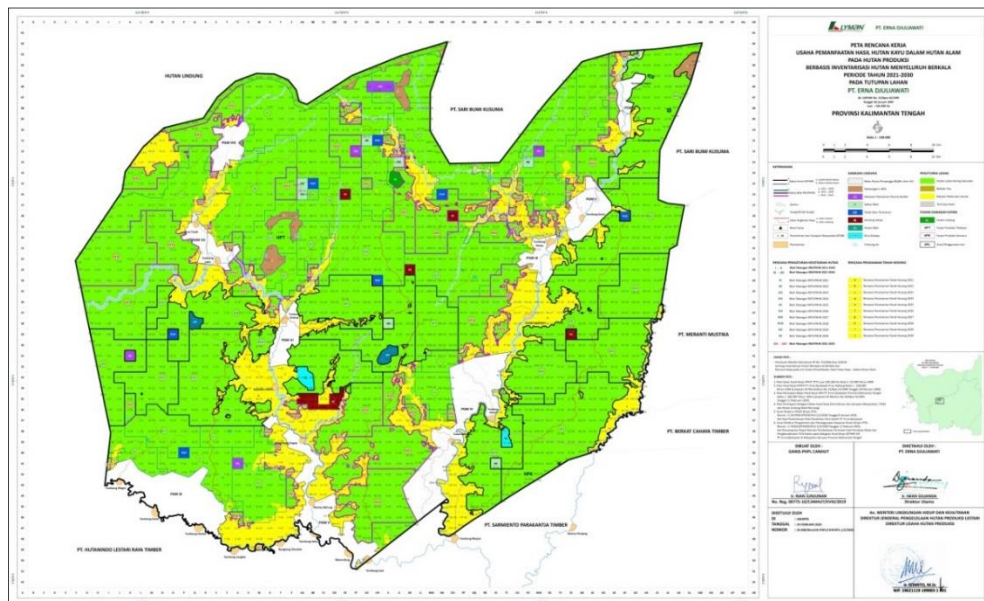
Hutan dan vegetasi di dalamnya memiliki peran penting dalam mitigasi emisi karbon melalui proses fotosintesis yang menyerap CO₂ dan menyimpannya dalam bentuk biomassa, sekaligus menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan. Keragaman pohon dan tingginya jumlah seresah menjadikan hutan sebagai penyimpan karbon terbesar dibandingkan sistem penggunaan lahan lainnya (Agus et al., 2011). Kapasitas penimbunan karbon hutan dipengaruhi oleh umur tegakan, jenis pohon, kualitas tapak, serta sistem pengelolaannya. Oleh sebab itu, pengukuran cadangan karbon diperlukan untuk mengetahui potensi penyerapan karbon dan kontribusi hutan terhadap pengurangan emisi GRK, khususnya CO₂ (Astuti et al., 2020).

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data empiris mengenai besarnya cadangan karbon dan serapan CO₂ pada tegakan Meranti, tumbuhan bawah, dan seresah di berbagai tingkat umur pada areal SILIN PT Erna Djuliawati. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis pengaruh diameter dan tinggi tegakan Meranti terhadap total cadangan karbon. Secara akademis, hasil penelitian diharapkan dapat memperkaya literatur mengenai estimasi karbon pada hutan tropis Indonesia dan memberikan pemahaman ilmiah tentang faktor-faktor yang memengaruhi penyimpanan karbon dalam sistem SILIN. Secara praktis, hasilnya dapat dimanfaatkan oleh pengelola hutan, praktisi kehutanan, dan pembuat kebijakan sebagai dasar dalam memperkirakan potensi cadangan

karbon, merencanakan strategi pengelolaan hutan berkelanjutan, serta mendukung pencapaian target pengurangan emisi karbon nasional.

METODE PENELITIAN

Tempat Penelitian dilakukan di Petak TPTJ Teknik SILIN (silvikultur Intensif) Umur 2 tahun (RKT 2021), Umur 4 tahun (RKT 2019) Umur 6 tahun (RKT 2017), Umur 8 tahun (RKT 2015), dan Umur 10 tahun (RKT 2013) di PBPH PT. Erna Djuliawati yang terletak di Bukit Beruang Km. 97 Desa Tumbang Darap Kecamatan Seruyan Hulu Kabupaten Seruyan Provinsi Kalimantan Tengah. PT. Erna Djuliawati merupakan Pemegang Perijinan Berusaha Pemanfaatan Hutan (PBPH) dengan Surat Keputusan Menteri LHK Nomor : SK.1426 / MENLHK / SETJEN/HPL.0/12/2021 Tanggal 31 Desember 2021 dengan luas Area Ijin 184.206 Ha.

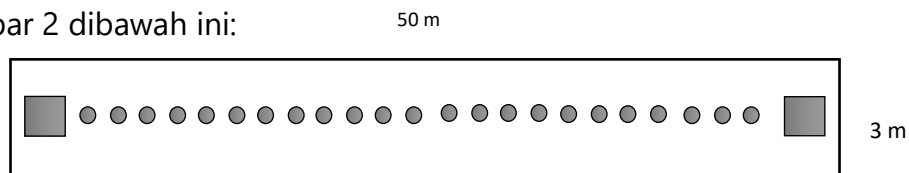


Gambar 1. Peta Areal ijin PT Erna Djuliawati di Kab. Seruyan

Metode Pengambilan Sampel

Perhitungan nilai karbon dilakukan pada tiga tingkatan vegetasi, yaitu tanaman Meranti dalam jalur tanam, tumbuhan bawah, dan seresah. Pengambilan sampel menggunakan metode *Non-Stratified Systematic*

Sampling karena kondisi tajuk relatif homogen pada setiap kelas umur. Plot penelitian berbentuk persegi panjang berukuran 3 m × 50 m, disesuaikan dengan lebar jalur tanam sistem TPTJ-SILIN untuk memudahkan pengukuran dan meningkatkan ketelitian di lapangan. Pemilihan ukuran plot ini sejalan dengan rekomendasi Masripatin et al. (2010) bahwa ukuran plot harus mempertimbangkan ketelitian dan kemudahan penerapan di berbagai proyek karbon. Gambaran bentuk plot untuk pengukuran biomassa pada areal TPTJ Silin lebih jelas tersaji pada gambar 2 dibawah ini:



- Ket. : ■ Kuadran untuk sampel seresah dan tanaman bawah
 ● Tanaman *Shorea spp.*

Gambar 2. Bentuk Plot untuk pengukuran biomassa pada areal TPTJ silin.

Jumlah plot ditentukan berdasarkan kaidah statistik dalam metode sampling, karena berpengaruh terhadap ketelitian dan biaya (Masripatin et al., 2010). Penelitian ini menggunakan intensitas sampling sebesar 0,5%, sesuai Suhartanto (1995) yang menyatakan bahwa intensitas sampling umumnya 0,1–2% dari luas areal, tergantung tujuan, homogenitas tegakan, dan sumber daya yang tersedia. Jumlah plot pada setiap petak dihitung seperti dibawah ini:

Jumlah Jalur per petak	= 50 Jalur
Panjang tiap jalur	= 1.000 m
Lebar tiap Jalur	= 3 m
Luas tiap jalur	= 3 x 1.000 m ²
	= 3.000 m ²

$$\begin{aligned}
 \text{Total luas jalur per petak} &= 50 \text{ jalur} \times 3.000 \text{ m}^2 \\
 &= 150.000 \text{ m}^2 \\
 \text{Intensitas Sampling 0,5 \%} &= 0,5 \% \times 150.000 \text{ m}^2 \\
 &= 750 \text{ m}^2 \\
 \text{Luas plot} &= 3 \text{ m} \times 50 \text{ m} \\
 &= 150 \text{ m}^2 \\
 \text{Jumlah plot tiap petak} &= \text{Intensitas Sampling 0,5 \%} : \text{Luas plot} \\
 &= 750 \text{ m}^2 : 150 \text{ m}^2 \\
 &= 5 \text{ buah.}
 \end{aligned}$$

Jadi, untuk jumlah plot di tiap petak adalah 5 buah plot.

Analisis Data

Perhitungan Potensi Biomassa Tegakan Meranti (*Shorea spp.*)

Potensi biomassa dihitung menggunakan persamaan alometrik. Jika tidak tersedia persamaan spesifik untuk jenis pohon tertentu, pendugaan dilakukan dengan rumus alometrik volume. Persamaan yang digunakan berasal dari berbagai penelitian sebelumnya pada tegakan Meranti (*Shorea spp.*), famili Dipterocarpaceae, dan hutan tropis. Pendekatan ini memudahkan estimasi biomassa secara akurat tanpa pengukuran langsung yang memerlukan waktu dan biaya besar. Persamaan lengkap disajikan pada Tabel 1.

No	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Rumus
1	Estimasi Biomassa Dan Karbon Tegakan <i>Dipterocarpa</i> Di PT. Sari Bumi Kusuma (SBK) Kalimantan Tengah	Niapele Sabaria	2011	$W = 0,067.(D)^{2,578}$
2	Pendugaan cadangan karbon tegakan meranti (<i>Shorea leprosula</i>) di hutan alam pada area silin PT Inhutani II Pulau Laut Kalimantan Selatan.	Lia Yunita	2016	$W = 0,067.(D)^{2,859}$

No	Judul Penelitian	Penulis	Tahun	Rumus
3	Membangun Persamaan Alometrik Biomassa Tanaman <i>Shorea Leprosula</i> Di Areal IUPHHK-HA PT. Itciku Kalimantan Timur	Asef K. Hardjana	2011	$W = 0,067 \cdot (D)^{2,859}$
4	<i>Allometry and Improved Estimation of Carbon Stocks and Balance in Tropical Forests</i>	Chave et. Al.	2005	$(AGB)_{est} = \rho \times \exp(-1,499 + 2,148 \ln(D) + 0,207 (\ln(D))^2 - 0,0281 (\ln(D))^3)$
5	<i>Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees</i>	Chave et. Al.	2014	$Y = 0,0559 \times \rho \times DBH^2 \times T$

Penelitian ini menggunakan rumus alometrik Chave et al. (2014) karena memiliki akurasi tinggi untuk hutan hujan tropis, disusun berdasarkan data ribuan pohon dari berbagai kawasan tropis dunia. Rumus ini mencakup variabel diameter batang (DBH), tinggi pohon (H), dan kerapatan kayu (ρ), sehingga memberikan estimasi biomassa di atas permukaan tanah yang lebih tepat. Selain itu, rumus Chave et al. telah diadopsi oleh IPCC dan banyak digunakan dalam pelaporan karbon internasional, program REDD+, serta penelitian kehutanan tropis.

Perhitungan Potensi Biomassa Tumbuhan Bawah dan Serasah

Rumus yang digunakan menurut Hairiah dan Rahayu (2007) sebagai berikut:

$$BKT = \frac{BKc}{BBc} \times BBT$$

Keterangan:

BKT = berat kering total (kg)

BKc = berat kering contoh (kg)

BBc = berat basah contoh (kg)

BBT = berat basah total (kg)

Pendugaan Potensi Karbon di Atas Permukaan Tanah

Cadangan karbon di atas permukaan tanah diperkirakan dengan mengonversi 47% dari biomassa atau nekromassa (IPCC 2006; BSN 2011). Beberapa jenis pohon memiliki fraksi karbon spesifik, seperti mangium 45% dan sengon 44% (Kemenhut 2013). Pendekatan ini meningkatkan ketepatan estimasi cadangan karbon sesuai karakteristik tiap jenis pohon.

Perhitungan Karbon Per Hektar untuk Biomassa di Atas Permukaan Tanah

Rumus yang di gunakan (SNI, 2011) adalah:

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

Keterangan:

C_n = kandungan karbon per hektar pada masing-masing *carbon pool* pada tiap plot (ton/ha)

C_x = kandungan karbon pada masing-masing *carbon pool* pada tiap plot (kg)

L_{plot} = Luas plot pada masing-masing *pool* (m²).

Perhitungan Potensi Serapan CO₂

Menurut Hardjana (2009), rumus yang digunakan dalam perhitungan tersebut adalah sebagai berikut:

$$CO_2 = C \times 3.67$$

Keterangan :

C = Jumlah karbon (biasanya dalam satuan ton atau kg)

CO_2 = Jumlah karbon dioksida (dalam satuan yang sama dengan C , biasanya tn atau kg)

3,67 = Faktor konversi dari karbon menjadi karbon dioksida (berasal dari perbandingan massa molekul CO_2 terhadap massa atom C , yaitu 44/12)

Analisis Hubungan Antar Variabel dan Pengujian Hipotesis Hubungan Antar Variabel

Model regresi linear berganda yang digunakan secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \varepsilon$$

Keterangan :

- Y = Total cadangan karbon ekosistem (ton C/ha)
- X₁ = Diameter tegakan Meranti (cm)
- X₂ = Tinggi tegakan Meranti (m)
- X₃ = Biomassa tumbuhan bawah (ton/ha)
- X₄ = Biomassa seresah (ton/ha)
- β₀ = Konstanta
- β₁-β₄ = Koefisien regresi
- ε = Error

HASIL DAN PEMBAHASAN

Cadangan Karbon pada Tegakan Meranti, Tumbuhan Bawah, dan Seresah.

Adapun data mengenai hasil pengamatan dan perhitungan cadangan karbon berdasarkan umur tegakan, seperti dalam tabel dibawah ini :

Tabel 2. Tabel hasil pengamatan dan perhitungan cadangan karbon (Cn) tegakan meranti, Tumbuhan Bawah dan Seresah berdasarkan umur (dalam ton per hektar).

Umur Tegakan (tahun)	Jumlah Karbon Tegakan Meranti *) (ton/ha)	Jumlah Karbon Tumbuhan Bawah (ton/ha)	Jumlah Karbon Seresah (ton/ha)	Jumlah Karbon Total (ton/ha)
2	0.01471	0.04103	0.25437	0.31012
4	2.84958	0.17127	0.33560	3.35644
6	5.28376	0.15066	0.35693	5.79134
8	18.89715	0.11811	0.26895	19.28420
10	10.28739	0.06783	0.34946	10.70468

12	56.08760	0.16162	0.34548	56.59471
----	----------	---------	---------	----------

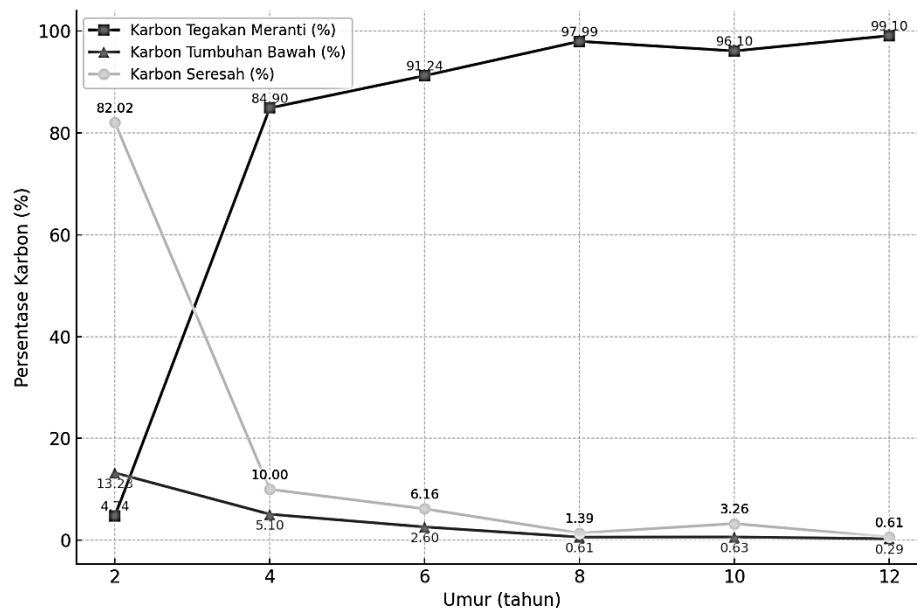
*) Memakai Rumus Chave et. Al. (2014).

Untuk melihat proporsi masing-masing komponen dibuat tabel dalam bentuk presentase antara Jumlah karbon masing-masing komponen dengan Karbon Total, bisa dilihat seperti dalam tabel dibawah ini :

Tabel 3. Tabel Presentase antara jumlah cadangan karbon (Cn) tegakan meranti, Tumbuhan Bawah dan Seresah dengan Jumlah Total Karbon (dalam persen).

Umur (tahun)	Jumlah Karbon Tegakan Meranti (%)	Jumlah Karbon Tumbuhan Bawah (%)	Jumlah Karbon Seresah (%)	Jumlah Karbon Total (%)
2	4.74%	13.23%	82.02%	100%
4	84.90%	5.10%	10.00%	100%
6	91.24%	2.60%	6.16%	100%
8	97.99%	0.61%	1.39%	100%
10	96.10%	0.63%	3.26%	100%
12	99.10%	0.29%	0.61%	100%

Apabila divisualisasikan dalam bentuk grafik, akan tampil seperti dalam gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Grafik Presentase jumlah cadangan karbon (Cn) tegakan meranti, Tumbuhan Bawah dan Seresah dengan Jumlah Total (dalam persen).

Grafik dan tabel menunjukkan bahwa seiring bertambahnya umur, cadangan karbon pada tegakan Meranti meningkat tajam, sedangkan pada tumbuhan bawah dan seresah menurun. Pada umur 2 tahun, cadangan karbon tegakan Meranti hanya 0,0147 ton/ha (4,74% dari total), meningkat menjadi 56,09 ton/ha (99,1%) pada umur 12 tahun. Sebaliknya, kontribusi tumbuhan bawah dan seresah menurun dari 13,23% dan 82,02% pada umur 2 tahun menjadi 0,29% dan 0,61% pada umur 12 tahun. Peningkatan ini disebabkan oleh pertumbuhan diameter dan tinggi pohon yang memperbesar biomassa dan kapasitas penyimpanan karbon (Brown, 2002; IPCC, 2006). Hasil ini menegaskan bahwa pohon Meranti dewasa merupakan penyimpan karbon utama, sementara peran tumbuhan bawah dan seresah lebih signifikan pada tahap awal pertumbuhan. Penerapan silvikultur intensif terbukti efektif meningkatkan cadangan karbon dan mendukung mitigasi perubahan iklim melalui pengelolaan hutan produksi yang berkelanjutan.

Perhitungan Serapan CO₂

Untuk menghitung serapan CO₂ dari data jumlah karbon (Cn) pada tiap umur, digunakan rumus berikut:

$$\text{Serapan CO}_2 = \text{Jumlah Karbon} \times \frac{44}{12}$$

Keterangan :

Serapan CO₂ = jumlah karbon dioksida yang diserap tanaman (ton C/ha)

Jumlah Karbon = karbon yang tersimpan di tanaman (ton atau kg)

44/12 = faktor konversi dari karbon (C) menjadi CO₂.

Catatan :

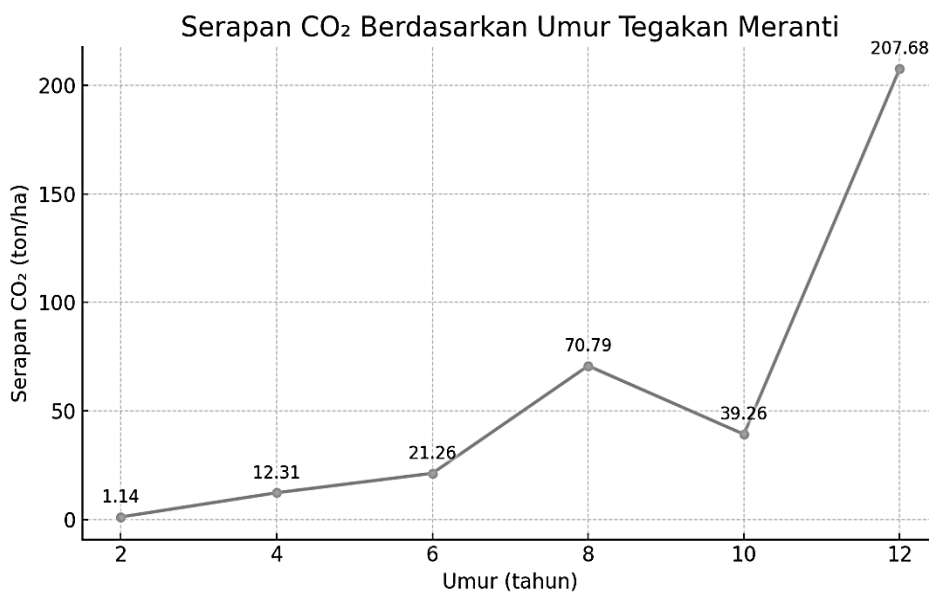
Angka 44 adalah massa molekul CO₂ (12 untuk karbon dan 32 untuk dua oksigen; 12+16+16=44). 12 adalah massa atom karbon (C). Karena satu molekul karbon akan membentuk satu molekul CO₂ dengan tambahan dua atom oksigen, maka massa CO₂ hasil konversi akan menjadi 3,67 kali massa karbonnya.

Dengan menggunakan rumus diatas, perhitungan serapan CO₂ berdasarkan umur tersaji dalam tabel 3 dibawah ini :

Tabel 4. Tabel total serapan CO₂ berdasarkan umur (dalam ton C /ha).

Umur (tahun)	Jumlah Karbon Total (ton/ha)	Serapan CO ₂ (ton/ha) = Karbon × 3,67
2	0.31012	1.13717
4	3.35644	12.30716
6	5.79143	21.26356
8	19.28420	70.78900
10	10.70469	39.26020
12	56.59471	207.67857

Dari tabel 3 diatas dapat digambarkan dalam bentuk grafik seperti tersaji dalam gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Grafik Serapan CO₂ berdasarkan Umur (dalam ton C/ha)

Adapun total serapan CO₂ pada tegakan Meranti untuk setiap umur yang tercantum dalam tabel 3 adalah sebagai berikut:

- Umur 2 tahun: Serapan CO₂ sebesar 1,14 ton/ha
- Umur 4 tahun: Serapan CO₂ sebesar 12,31 ton/ha
- Umur 6 tahun: Serapan CO₂ sebesar 21,26 ton/ha
- Umur 8 tahun: Serapan CO₂ sebesar 70,79 ton/ha
- Umur 10 tahun: Serapan CO₂ sebesar 39,26 ton/ha
- Umur 12 tahun: Serapan CO₂ sebesar 207,68 ton/ha

Umur pohon berpengaruh besar terhadap kemampuan serapan karbon, terutama pada tegakan Meranti. Seiring bertambahnya umur, volume dan biomassa pohon meningkat sehingga kapasitas penyimpanan karbon juga bertambah (Houghton, 2003; Pan et al., 2011). Grafik 4 menunjukkan bahwa tegakan Meranti berumur tua, seperti pada usia 12 tahun, memiliki serapan CO₂ jauh lebih tinggi dibandingkan tegakan muda. Penelitian Wahyuni et al. (2020) juga menemukan bahwa hutan sekunder tua menyimpan karbon lebih besar (76,1 ton C/ha) dibandingkan hutan muda (49,17 ton C/ha). Dengan demikian, umur tegakan menjadi faktor kunci dalam meningkatkan peran hutan Meranti sebagai penyerap karbon, sehingga pengelolaan hutan berkelanjutan sangat penting untuk mitigasi perubahan iklim.

Hubungan Diameter dan Tinggi Pohon dengan Cadangan Karbon

Hasil analisis tersebut selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperjelas pola hubungan antara variabel-variabel tersebut (Astuti *et al.*, 2020).

Tabel 5. Model data Analisis Hubungan antara Diameter dan Tinggi Pohon dengan cadangan Karbon.

UMUR (TAHUN)	DIAMETER (cm)	TINGGI (m)	Cadangan Karbon /Y (Kg/Pohon) Rumus Chave 2014
12	11.5	7	26.91
12	6.2	6	6.704
....
10	7.01	8	11.427
10	9.8	8	22.334
....
8	9.7	9	24.615
8	5.3	4	3.266
....
6	7.3	6	9.294
6	4.1	2	0.977
....
4	6.3	3.5	4.038
4	7.7	4.6	7.928
....
2	1	1.3	0.038
2	1.2	1.3	0.054
....

Data tersebut kemudian dianalisis dengan menggunakan Aplikasi SPSS versi 30 dengan menggunakan metode *Linier Mixed Model*, dengan Cadangan Karbon sebagai Variabel Tergantung (*Dependent Variable/Y*), Diameter dan Tinggi sebagai Variabel Efek tetap (*Fixed Effects Variable*), sedangkan Umur sebagai Variable Efek Random (*Random effects Variable*).

Adapun hasil analisis Regresi Campuran seperti tersaji dalam table 6 dan tabel 6 dibawah ini.

Tabel 6. Tabel hasil estimasi parameter tetap (*fixed effects*) dari model regresi campuran (*mixed model*)

Term	Estimate	SE	df	t	p
Intercept	-46.730	21.867	5.975	-2.137	0.077
Diameter (cm)	4.424	1.058	6.788	4.181	0.004
Tinggi (m)	3.809	1.726	6.645	2.207	0.065

Mengacu pada hasil tabel diatas :

Intercept : -46,730

Estimate Diameter : 4,424

Estimate Tinggi : 3,809

Maka, model rumus regresinya untuk Estimasi Parameter tetap yaitu :

$$Y = -46,730 + 4,424 \times \text{Diameter (cm)} + 3,809 \times \text{Tinggi (m)}$$

Tabel 7. Tabel hasil estimasi efek acak (*random effects*) dari model regresi campuran (*mixed model*).

Umur (Tahun)	(Intercept)	Diameter (cm)	Tinggi (m)
2	44.042	-1.923	-3.207
4	32.690	-1.428	-2.380
6	24.494	-1.070	-1.784
8	-2.138	0.093	0.156
10	14.602	-0.638	-1.063
12	-113.691	4.965	8.279

Dari Tabel diatas bisa disusun rumus regresinya sesuai kelompok umur:

1. Umur 2 Tahun:

$$Y = (-46,730 + 44,042) + (4,424 - 1,923) \times \text{Diameter} + (3,809 - 3,207) \times \text{Tinggi}$$

$$Y = -2,688 + 2,501 \times \text{Diameter} + 0,602 \times \text{Tinggi}$$

2. Umur 4 Tahun :

$$Y = (-46,730 + 32,690) + (4,424 - 1,428) \times \text{Diameter} + (3,809 - 2,380) \times \text{Tinggi}$$

$$Y = -14,040 + 2,996 \times \text{Diameter} + 1,429 \times \text{Tinggi}$$

3. Umur 6 Tahun :

$$Y = (-46,730 + 24,494) + (4,424 - 1,070) \times \text{Diameter} + (3,809 - 1,784) \times \text{Tinggi}$$

$$Y = -22,236 + 3,354 \times \text{Diameter} + 2,025 \times \text{Tinggi}$$

4. Umur 8 Tahun :

$$Y = (-46,730 - 2,138) + (4,424 + 0,093) \times \text{Diameter} + (3,809 + 0,156) \times \text{Tinggi}$$

$$Y = -48,868 + 4,517 \times \text{Diameter} + 3,965 \times \text{Tinggi}$$

$$Y = -48,868 + 4,517 \times \text{Diameter} + 3,965 \times \text{Tinggi}$$

5. Umur 10 Tahun :

$$Y = (-46,730 + 14,602) + (4,424 - 0,638) \times \text{Diameter} + (3,809 - 1,063) \times \text{Tinggi}$$

$$Y = -32,128 + 3,786 \times \text{Diameter} + 2,746 \times \text{Tinggi}$$

6. Umur 12 Tahun :

$$Y = (-46,730 - 113,691) + (4,424 + 4,965) \times \text{Diameter} + (3,809 + 8,279) \times \text{Tinggi}$$

$$Y = -160,421 + 9,389 \times \text{Diameter} + 12,088 \times \text{Tinggi}$$

Keterangan:

Y = Cadangan karbon (kg/pohon)

Diameter = Diameter pohon (cm)

Tinggi = Tinggi pohon (m)

Rangkuman rumus diatas seperti terlihat dalam tabel 8 dibawah ini:

Tabel 8. Persamaan Regresi untuk mengestimasi Biomassa berdasarkan Diameter dan Tinggi pada Berbagai Umur Tegakan

Umur Tegakan (Tahun)	Rumus Regresi
2	$Y = -2,688 + 2,501 \times \text{Diameter} + 0,602 \times \text{Tinggi}$
4	$Y = -14,040 + 2,996 \times \text{Diameter} + 1,429 \times \text{Tinggi}$
6	$Y = -22,236 + 3,354 \times \text{Diameter} + 2,025 \times \text{Tinggi}$
8	$Y = -48,868 + 4,517 \times \text{Diameter} + 3,965 \times \text{Tinggi}$
10	$Y = -32,128 + 3,786 \times \text{Diameter} + 2,746 \times \text{Tinggi}$
12	$Y = -160,421 + 9,389 \times \text{Diameter} + 12,088 \times \text{Tinggi}$

Hasil analisis regresi campuran menunjukkan bahwa diameter dan tinggi pohon berpengaruh signifikan terhadap cadangan karbon, terutama pada tegakan Meranti berumur tua (Rahaju et al., 2019). Diameter memiliki pengaruh paling kuat dengan koefisien 4,424 ($p < 0,05$), artinya setiap peningkatan 1 cm diameter menambah cadangan karbon sekitar 4,424 kg/pohon. Tinggi pohon juga berpengaruh positif meski tidak selalu signifikan (estimasi 3,809). Analisis efek acak menunjukkan bahwa umur pohon memengaruhi besarnya cadangan karbon, di mana pohon berumur

tua memiliki efek diameter dan tinggi yang lebih besar. Dengan demikian, ukuran dan umur pohon menjadi faktor utama dalam menentukan kapasitas penyimpanan karbon.

Berdasarkan hasil analisis efek acak, rumus regresi untuk setiap kelompok umur telah disusun. Misalnya, untuk umur 2 tahun, rumus regresinya adalah:

$$Y = -2,688 + 2,501 \times \text{Diameter} + 0,602 \times \text{Tinggi}$$

Sedangkan untuk umur 12 tahun, rumus regresinya menjadi:

$$Y = -160,421 + 9,389 \times \text{Diameter} + 12,088 \times \text{Tinggi}$$

Perbedaan ini menunjukkan bahwa pengaruh diameter dan tinggi terhadap cadangan karbon bervariasi berdasarkan umur pohon.

Diameter, tinggi, dan umur pohon berpengaruh signifikan terhadap cadangan karbon. Semakin besar ukuran dan semakin tua umur pohon, semakin besar pula kapasitas penyimpanan karbonnya (Susanti et al., 2021; Putra et al., 2018). Pohon tua memiliki volume kayu dan biomassa lebih besar sehingga mampu menyimpan karbon lebih stabil. Temuan ini penting untuk pengelolaan hutan berkelanjutan, karena hubungan antara ukuran, umur, dan cadangan karbon dapat digunakan untuk memperkirakan potensi serapan karbon dan mendukung mitigasi perubahan iklim secara optimal.

Alternatif model persamaan regresi untuk semua Umur

Analisis regresi per kelompok umur digunakan untuk memprediksi potensi cadangan karbon secara lebih spesifik pada tiap fase pertumbuhan hutan. Pendekatan ini menangkap perbedaan karakteristik ekosistem, seperti dominasi tumbuhan bawah pada umur muda dan tegakan Meranti pada umur tua, serta mengurangi bias antar kelompok. Namun, metode ini memiliki keterbatasan karena sensitif terhadap outlier, kurang stabil pada

data terbatas, dan tidak menggambarkan pola umum antar umur. Oleh karena itu, pada subbab ini dilakukan perbandingan tiga model regresi — linear, kuadratik tanpa variabel asli, dan kuadratik dengan variabel asli — untuk semua umur guna memperoleh model prediksi biomassa yang paling akurat dan representatif.

Dari hasil analisis Statistik Linier berganda, didapatkan hasil seperti terangkum dalam tabel 9 dibawah ini.

Tabel 9. Perbandingan Uji regresi dengan tiga model berbeda untuk semua umur

Model	Intercept	Umur	D	D ²	T	T ²	R ²
Linear (Asli)	-15,60	-5,26	9,74	–	0,94	–	0,25
Kuadratik tanpa Asli	1,99	-2,85	–	0,37	–	0,25	0,94
Kuadratik + Asli	8,57	0,41	-7,68	0,58	0,97	0,31	0,98

Keterangan :

- Intercept = Konstanta pada model regresi (nilai biomassa ketika semua variabel lain = 0)
- Umur = umur tanaman/pohon (tahun)
- D = diameter batang tanaman/pohon (cm)
- D² = kuadrat diameter batang tanaman/pohon ((cm)²)
- T = tinggi tanaman/pohon (meter)
- T² = kuadrat tinggi tanaman/pohon ((meter)²)
- R² = koefisien determinasi (mengukur seberapa baik model menjelaskan variasi data biomassa)

Dari tabel diatas bisa dibuat persamaannya sebagai berikut :

Model Linear (Asli)

Biomassa = -15,60 + (-5,26) × Umur + 9,74 × Diameter + 0,94 × Tinggi
dengan R² = 0,25

Model Kuadratik tanpa Variabel Asli

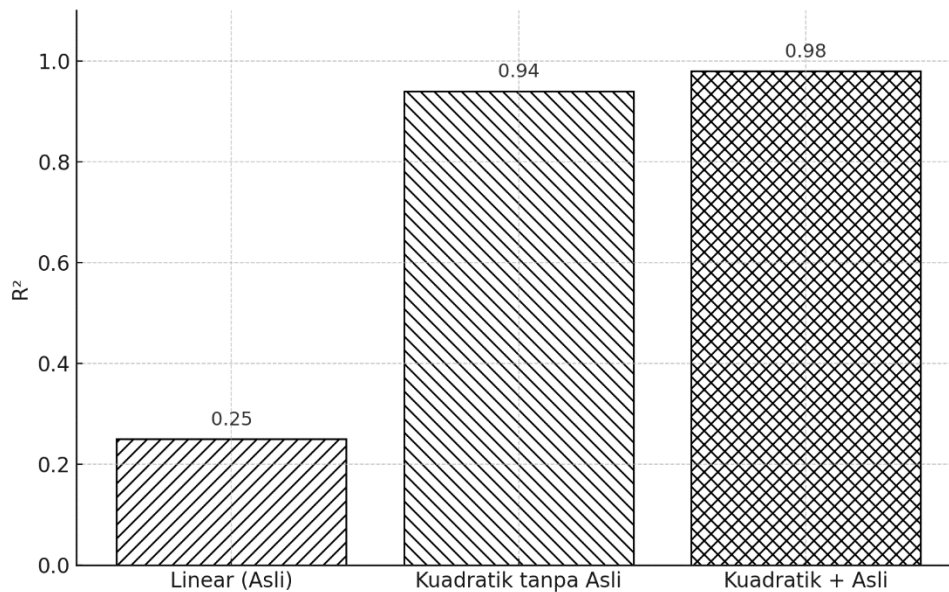
Biomassa = 1,99 + (-2,85) × Umur + 0,37 × Diameter² + 0,25 × Tinggi²
dengan R² = 0,94

Model Kuadratik + Asli (*Model Terbaik*)

$$\text{Biomassa} = 8,57 + 0,41 \times \text{Umur} + (-7,68) \times \text{Diameter} + 0,58 \times \text{Diameter}^2 \\ + 0,97 \times \text{Tinggi} + 0,31 \times \text{Tinggi}^2$$

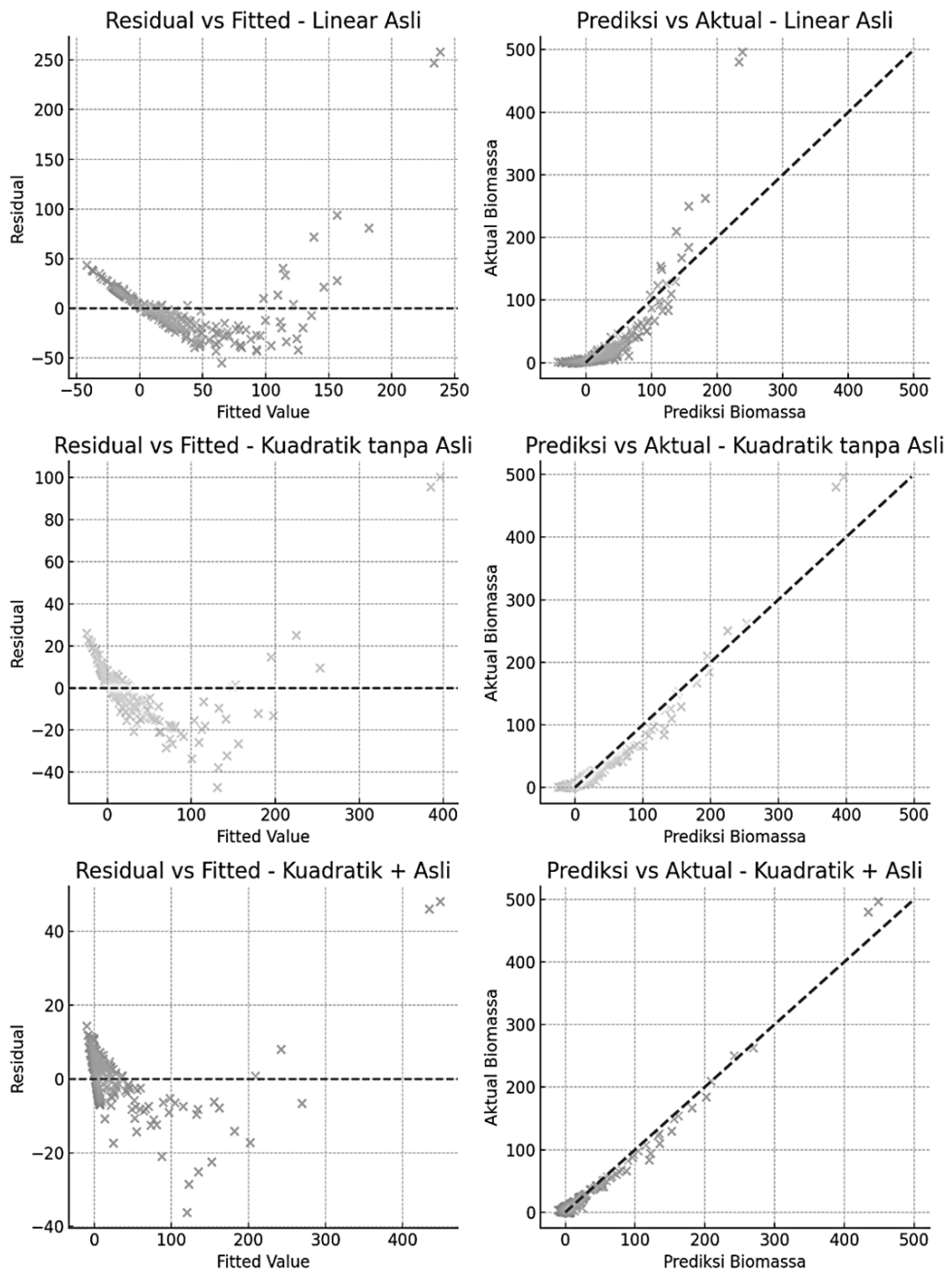
dengan $R^2 = 0,98$

Tabel 7 menunjukkan perbandingan tiga model regresi yang menganalisis hubungan antara umur, diameter (D), tinggi (T), dan bentuk kuadratnya. Model linear hanya menggunakan variabel asli dan menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,25, yang berarti hanya mampu menjelaskan 25% variasi data, sehingga kurang efektif untuk hubungan yang bersifat non-linear. Model kuadratik tanpa variabel asli menunjukkan peningkatan signifikan dengan R^2 sebesar 0,64, menandakan hubungan yang lebih kompleks dapat dijelaskan lebih baik. Model terbaik adalah model kuadratik dengan variabel asli, yang menggabungkan unsur linear dan non-linear sekaligus, menghasilkan R^2 sebesar 0,98. Nilai ini menunjukkan model tersebut memiliki kemampuan prediksi yang sangat tinggi dan paling akurat dalam menggambarkan hubungan antara variabel biomassa pohon. Perbandingan nilai R^2 ketiga model ini divisualisasikan pada Gambar 6.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai R² tiga model regresi semua umur

Gambar 5 menunjukkan bahwa model kuadratik dengan variabel asli memiliki kemampuan prediksi terbaik ($R^2 = 0,98$), diikuti model kuadratik tanpa variabel asli ($R^2 = 0,94$) dan model linear ($R^2 = 0,25$). Evaluasi performa model juga dilihat melalui plot Residual vs Fitted dan Prediksi vs Aktual (Gambar 8), untuk menilai sebaran error serta akurasi prediksi biomassa dibandingkan dengan data aktual.



Gambar 6. Grafik *Plot Residual vs Fitted* dan *Prediksi vs Aktual* tiga model regresi semua umur.

Gambar 6 menunjukkan bahwa model kuadratik dengan variabel asli memberikan hasil prediksi biomassa paling optimal berdasarkan nilai R^2 , sebaran residual, dan kecocokan prediksi terhadap data aktual. Model ini

direkomendasikan untuk pemodelan biomassa tegakan pohon tropis, namun tetap memerlukan uji asumsi klasik dan validasi sebelum digunakan untuk prediksi atau pengambilan keputusan.

Menghitung Prediksi Target Cadangan Karbon pada Hutan Alam Tropis

Dari hasil analisis data tabel tersebut diperoleh Persamaan polinomial kuadrat hasil pemodelan:

$$\text{Karbon (ton/ha)} = 0.76 \times (\text{Umur})^2 - 6.11 \times (\text{Umur}) + 12.67$$

Dari rumus tersebut apabila kita ingin mengetahui pada umur berapa nilai cadangan karbon bisa memenuhi syarat IPCC diatas, berikut cara dan hasil perhitungannya :

Mencari umur saat karbon mencapai 200 ton/ha:

$$200 = 0.7596 \times (\text{Umur})^2 - 6.1070 \times (\text{Umur}) + 12.6710$$

Ubah ke bentuk persamaan kuadrat:

$$0.7596 \cdot X^2 - 6.1070 \cdot X + 12.6710 - 200 = 0$$

$$0.7596 \cdot X^2 - 6.1070 \cdot X - 187.329 = 0$$

Maka, gunakan rumus kuadrat:

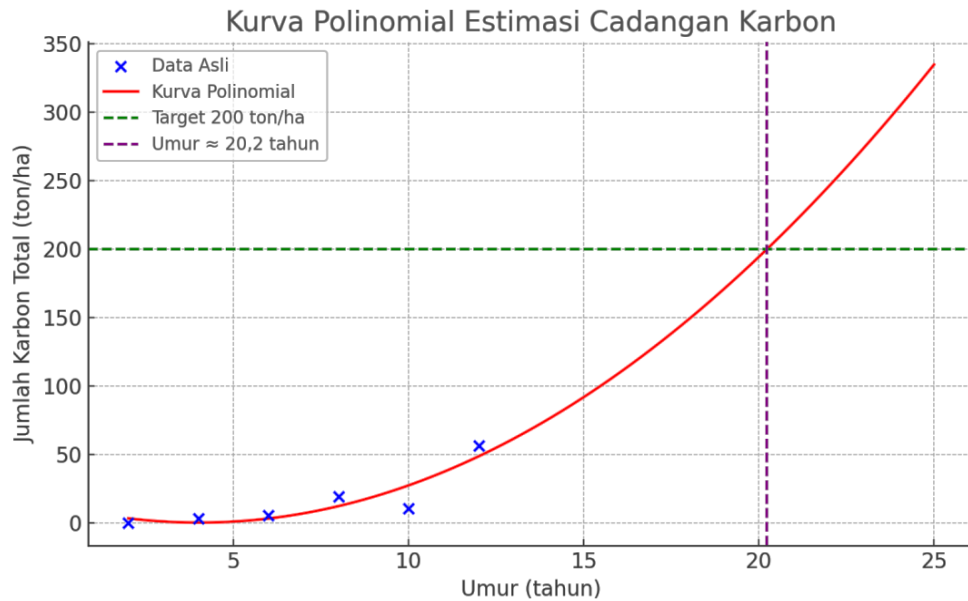
$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Dengan $a = 0.7596$, $b = -6.1070$, $c = -187.329$

Hasil perhitungan: $X = 20.23$

Umur saat karbon 200 ton/ha dicapai adalah sekitar 20,2 tahun.

Bila digambarkan dalam bentuk grafik bisa dilihat dalam gambar 9 berikut ini.



Gambar 7. Grafik Perhitungan Estimasi cadangan karbon standar hutan alam tropis

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara umur tegakan dan cadangan karbon berdasarkan hasil observasi dan model polinomial derajat dua ($Y = 0.76x^2 - 6.11x + 12$), dengan target 200 ton/ha tercapai pada umur sekitar 20,2 tahun. Model polinomial dipilih karena mampu menggambarkan pola pertumbuhan karbon yang tidak linear pada fase awal hingga dewasa, meskipun memiliki keterbatasan ketika digunakan di luar rentang data (2–12 tahun). Untuk simulasi jangka panjang, disarankan menggunakan model biologis seperti sigmoid yang lebih realistis dalam memprediksi pertumbuhan karbon hutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa cadangan karbon pada tegakan Meranti, tumbuhan bawah, dan seresah meningkat seiring bertambahnya umur, dengan total 56,59 ton/ha dan serapan CO₂ 207,68 ton/ha pada umur 12 tahun. Diameter pohon berpengaruh paling signifikan terhadap cadangan karbon. Model kuadratik dengan variabel asli dan pangkat duanya memberikan prediksi biomassa paling akurat (R^2 tertinggi). Hasil

pemodelan polinomial menunjukkan cadangan karbon hutan tropis sebesar 200 ton/ha diperkirakan tercapai pada umur 20,2 tahun, menjadikan model ini dasar penting untuk perencanaan dan pengelolaan hutan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, F., Hairiah, K., & Mulyani, A. (2011). *Petunjuk praktis pengukuran cadangan karbon tanah gambut*. World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Agus, F., (2011). Estimating carbon stocks in forest ecosystems: A comparison of methods and approaches. *Journal of Forestry*, 45(2), 110–123.
- Astuti, R., Wasis, B., & Hilwan, I. (2020). Potensi cadangan karbon pada lahan rehabilitasi di Kabupaten Gunung Mas, Kalimantan Tengah. *Media Konservasi*, 25(2), 140–148. <https://doi.org/10.29244/medkon.25.2.140-148>
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 7724-2011: Pengukuran dan penghitungan cadangan karbon—Pengukuran lapangan untuk penaksiran cadangan karbon hutan (ground based forest carbon accounting)*. <https://www.bsn.go.id>
- Baskaran, M., Swamy, G. S. K., Jayakumar, S., & Prabakaran, S. (2016). Estimation of biomass and carbon stock in the natural forests using regression models in the Eastern Ghats of Tamil Nadu, India. *Ecological Engineering*, 97, 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.064>
- Bastomi, S. (2019). *Karakteristik Biji Tengkawang (Shorea stenoptera) dan Potensinya sebagai Pengganti Cocoa Butter*. *Jurnal Sumber Daya Alam*, 8(3), 90-98.
- Binus University. (2021, August 12). *Memahami analisis regresi linear berganda*. <https://accounting.binus.ac.id/2021/08/12/memahami-analisis-regresi-linear-berganda/>

- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Réjou - Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190
- Ghazoul, J., & Sheil, D. (2010). Staggered flowering in the Dipterocarpaceae: New insights into floral induction and the evolution of mast fruiting in the aseasonal tropics. *The American Naturalist*, 176(5), 652–663. <https://doi.org/10.1086/284837>
- Hadi, S. (2018). *Studi Pemanfaatan Minyak Tengkwang dalam Industri Kosmetik dan Pangan di Kalimantan Barat*. Jurnal Industri Alam, 5(1), 102-113.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Pearson.
- Hairiah, K., & Rahayu, S. (2007). *Pengukuran karbon tersimpan di berbagai macam penggunaan lahan*. World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Office.
- Harry, K. S. (2018). Analisis Pertumbuhan Meranti Merah dan Meranti Putih di Kalimantan Tengah. Skripsi, Universitas Muhammadiyah Palangkaraya. <https://repository.umpr.ac.id/331/15/BAB%20II.pdf>
- Hosaka, T., Inoue, T., Kato, M., & Yumoto, T. (2016). *Dispersal seed predators to sequential flowering of dipterocarps in Pasoh Forest Reserve, Malaysia*. *Biotropica*, 48(6), 825–833. https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/30265/Hosaka_et_al_2016_Biotropica.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- Indonesia. (2016). *Nationally determined contribution (NDC) pertama Republik Indonesia*.

http://ditjenppi.menlhk.go.id/reddplus/images/resources/ndc/terjemahan_NDC.pdf

- IPCC. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- Irwanto. (2006). *Pengaruh Perbedaan Naungan terhadap Pertumbuhan Semai Shorea sp di Persemaian* [Tesis, Universitas Gadjah Mada].
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An introduction to statistical learning: With applications in R* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1>
- JASP Team. (2023). *JASP (Version 0.18) [Computer software]*. <https://jasp-stats.org>
- Junaedi, D. (2017). Estimasi biomassa, stok karbon, dan sekuestrasi karbon dari berbagai tipe habitat terestrial di Kabupaten Gresik (Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember). [https:// repository.its.ac.id/47266/7/1512100703Undergraduate_Theses.pdf](https://repository.its.ac.id/47266/7/1512100703Undergraduate_Theses.pdf).
- Kementerian Kehutanan dan Perkebunan Republik Indonesia. (1998). *Keputusan Menteri Kehutanan Nomor 625/Kpts-II/1998 tentang Sistem Silvikultur Tebang Pilih dan Tanam Jalur (TPTJ) dalam Pengelolaan Hutan Produksi Alam*. Diakses dari <https://peraturan.huma.or.id/pub/971-surat-keputusan-menteri-kehutanan-dan-perkebunan-nomor-625-kpts-ii-1998>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2017). *Strategi implementasi NDC*. [http:// ditjenp pi.me nlhk.g o.id/r eddpl us/images/adminppi/dokumen /strategi_implementasi_ndc.pdf](http://ditjenppi.menlhk.go.id/reddplus/images/adminppi/dokumen/strategi_implementasi_ndc.pdf)
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2018). *Peraturan Direktur Jenderal Pengelolaan Hutan Produksi Lestari Nomor P.12/PHPL/SET/KUM.1/12/2018 tentang Pedoman Teknik Silvikultur Intensif (SILIN) Meranti dalam Pengelolaan Hutan Alam Produksi*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2020). Sistem Registri Nasional Pengendalian Perubahan Iklim (SRN PPI Indonesia). <https://srn.menlhk.go.id/>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2021 tentang Tata Hutan dan Penyusunan Rencana Pengelolaan Hutan, serta Pemanfaatan Hutan di Hutan Lindung dan Hutan Produksi*.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). *Manual Pelaksanaan Teknik Silvikultur Intensif (SILIN)*. Direktorat Jenderal Pengelolaan Hutan Produksi Lestari, KLHK. Tersedia di: https://pctl.menlhk.go.id/assets/img/publication/Draft_Manual_Serial_Folu_3_08_04_23.pdf
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1-3), 199–209.
- Masripatin, N., Ginoga, K., Wibowo, A., Dharmawan, W. S., Siregar, C. A., Lugina, M., Indartik, Wulandari, W., Sakuntaladewi, N., Maryani, R., Pari, G., Apriyanto, D., Subekti, B., Puspasari, D., & Utomo, A. S. (2010). *Pedoman pengukuran karbon untuk mendukung penerapan REDD+ di Indonesia*. Kementerian Kehutanan.
- Martawijaya, A., Kartasujana, I., Kadir, K., & Prawira, S.A. (1981). *Atlas Kayu Indonesia Jilid I*. Bogor: Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan RI.
- Murdiyarsa, D., Dewi, S., Lawrence, D., & Seymour, F. (2015). *Pengelolaan hutan produksi alam dalam perubahan iklim (REDD+, pengelolaan hutan lestari dan RIL-C)* [Policy paper]. Institut Pertanian Bogor. https://repository.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/82948/1/Policy%20Paper_Lores_Final.pdf

- Murdiyarto, D., Widayati, A., Dwi, A. S., & Herdini, D. (2002). Estimasi cadangan karbon hutan. *CIFOR*.
- Rahayu, D. P., & Noviyanti, D. (2021). Penggunaan software JASP dalam analisis data statistik untuk penelitian sosial. *Jurnal Statistika dan Pendidikan Matematika*, 5(1), 38–45. <https://doi.org/10.32602/jspm.v5i1.505>
- Runkle, J. R. (2021). *Regression modeling for environmental scientists*. CRC Press.
- Sahid, R. (2014). Cara melakukan analisis regresi multiple (berganda) dengan SPSS. <https://www.spssindonesia.com/2014/02/analisis-regresi-multipes-dengan-spss.html>
- Santoso, S. (2017). *Menguasai statistik multivariat dengan SPSS*. Elex Media Komputindo.
- Sugiyono. (2017). *Statistik untuk penelitian* (edisi revisi). Alfabeta.
- Sukotjo. (2009). *Teknik Silvikultur Intensif (SILIN)*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Suyanto, D. (2012). *Pemanfaatan Biji Tengawang dalam Industri Kosmetik dan Pangan*. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 10(2), 45-55.
- Wahyudi, I., Rachman, O., & Yuniarti, Y. (2018). Media Tanam Optimal untuk Pembibitan dan Penanaman Hutan. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 15(3), 155-163.
- Wahyuni, S., et al. (2020). Struktur Vegetasi dan Serapan Karbon di Kelompok Hutan Sungai Meranti, Kalimantan Barat. *Jurnal Hutan Tropis Borneo*, 8(1), 45-54.
- Wicaksono, B., Prasetyo, L. B., & Haruni, A. E. (2020). Praktik Silvikultur Intensif di Hutan Alam Produksi Indonesia. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 9(2), 101-113.
- Widiyatno, W., Soekotjo, S., Naiem, M., Hardiwinoto, S., & Purnomo, S. (2011). Pertumbuhan Meranti (*Shorea spp.*) pada sistem tebang pilih tanam jalur dengan teknik silvikultur intensif (TPTJ-SILIN).

Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam, 8(4), 373–383.

<https://doi.org/10.20886/jphka.2011.8.4.373-383>

Wibisono, D. N. (2022). *Pengantar analisis data menggunakan JASP*. Deepublish.