

PENDUGAAN BIOMASSA ATAS PERMUKAAN DAN SIMPANAN KARBON *ACACIA CRASSICARPA* DAN *EUCALYPTUS PELLITA* DI AREAL HUTAN TANAMAN INDUSTRI

Estimation of Aboveground Biomass and Carbon Stock of Acacia crassicarpa and Eucalyptus pellita in Industrial Plantation Forest Areas

Ghina Alliya Syabita¹, Ujang Suwarna², Irsya Muthia Muthmainnah^{2*}

(Diterima 24 Juni 2026 /Disetujui 28 Juni 2026)

ABSTRACT

This study aimed to estimate stand volume, aboveground biomass (AGB), and carbon stock of Acacia crassicarpa on peatland and Eucalyptus pellita on mineral soil at ages 1, 2, and 3 years at PT Arara Abadi, and to analyze differences across ages within each species. Data were collected from 36 circular plots (radius 11.29 m) by measuring DBH and tree height. Volume was estimated using the cylinder formula with a form factor of 0.7, AGB using species-specific allometric equations, and carbon stock using a conversion factor of 0.47. The mean volume of A. crassicarpa increased from 22.08 to 86.07 and 110.96 m³/ha, with AGB of 10.55, 39.01, and 51.48 ton/ha and carbon stock of 4.96, 18.33, and 24.20 tonC/ha. The mean volume of E. pellita increased from 28.56 to 74.43 and 91.28 m³/ha, with AGB of 23.50, 62.95, and 82.28 ton/ha and carbon stock of 11.04, 29.59, and 38.67 tonC/ha. Because variances were heterogeneous for A. crassicarpa, Welch ANOVA with the Games-Howell test was applied, whereas One-Way ANOVA with Tukey HSD was used for E. pellita. Age significantly affected all variables in both species (Sig. < 0.001). All age pairs differed significantly, except stand volume between ages 2 and 3 years in E. pellita (Sig. = 0.051). Each species used a different allometric model on a different site type, so comparisons were made within each species across ages.

Keywords: Acacia crassicarpa, aboveground biomass, carbon stock, eucalyptus pellita, plantation stand age

¹ Alumnus Program Sarjana Program Studi Manajemen Hutan, Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

² Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

*Penulis korespondensi: Irsya Muthia Muthmainnah
e-mail: irsyamuthia@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Pemanasan global akibat meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (GRK), terutama karbon dioksida (CO₂), menjadi salah satu tantangan lingkungan terbesar saat ini. Intergovernmental Panel on Climate Change melaporkan bahwa sebagian besar emisi GRK global bersumber dari CO₂ akibat aktivitas manusia, sehingga upaya mitigasi berbasis sektor kehutanan menjadi semakin penting (IPCC 2023). Sektor kehutanan berperan melalui fungsi hutan sebagai penyerap karbon (carbon sink), yaitu mengubah CO₂ menjadi biomassa melalui proses fotosintesis. Sekitar 47% biomassa kering pohon tersusun atas unsur karbon, sehingga biomassa atas permukaan (*Above Ground Biomass/AGB*) dan simpanan karbon menjadi indikator penting dalam menilai kemampuan suatu tegakan menyerap karbon (BSN 2019). Pendugaan biomassa dan simpanan karbon umumnya dilakukan melalui pendekatan volume tegakan karena berkaitan erat dengan dimensi pohon dan dapat diperoleh tanpa pemanenan destruktif (Husch *et al.* 2003).

PT Arara Abadi di Kabupaten Siak, Provinsi Riau, merupakan salah satu perusahaan Hutan Tanaman Industri (HTI) yang mengembangkan spesies cepat tumbuh (*fast-growing species*), yaitu *Acacia crassicarpa* di lahan gambut dan *Eucalyptus pellita* di lahan mineral sebagai bahan baku industri pulp dan kertas. Kedua spesies dibudidayakan pada kombinasi jenis tapak yang berbeda, yakni *Acacia crassicarpa* gambut dan *Eucalyptus pellita* mineral. Umur tegakan merupakan faktor penting yang menentukan laju akumulasi biomassa dan karbon, terutama pada fase awal pertumbuhan sebelum penutupan tajuk (Mindawati *et al.* 2010). Namun, informasi mengenai besaran dan perubahan volume, biomassa atas permukaan, serta simpanan karbon pada umur awal rotasi kedua kombinasi jenis tapak tersebut, khususnya di PT. Arara Abadi, masih terbatas. Keterbatasan ini menjadi kesenjangan yang perlu dijawab agar pengelola memiliki dasar kuantitatif dalam menilai potensi produksi sekaligus potensi serapan karbon tegakan muda.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menjawab dua pertanyaan utama: (1) berapa besar volume tegakan, biomassa atas permukaan, dan simpanan karbon *Acacia crassicarpa* di lahan gambut dan *Eucalyptus pellita* di lahan mineral pada umur 1, 2, dan 3 tahun dan (2) apakah terdapat perbedaan yang nyata antar umur terhadap ketiga variabel tersebut pada masing-masing kombinasi jenis tapak. Tujuan penelitian ini adalah menduga volume tegakan, biomassa atas permukaan, dan simpanan karbon serta menganalisis perbedaannya antar umur pada setiap spesies. Karena *Acacia crassicarpa* hanya terdapat pada lahan gambut dan *Eucalyptus pellita* hanya pada lahan mineral, perbedaan yang teramati tidak dapat diklaim semata-mata disebabkan oleh jenis atau tapak; oleh karena itu analisis dilakukan di dalam masing-masing kombinasi jenis tapak antar umur, bukan sebagai perbandingan langsung antar spesies. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar ilmiah dalam mendukung pengelolaan HTI yang berkelanjutan, khususnya sebagai pertimbangan awal dalam penentuan rotasi tebang yang mengoptimalkan produktivitas kayu sekaligus fungsi penyimpanan karbon sebagai bagian dari upaya mitigasi perubahan iklim.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di HTI PT. Arara Abadi, Distrik Rasau Kuning, Kecamatan Perawang, Kabupaten Siak, Provinsi Riau. Areal penelitian mencakup dua tipe lahan, yakni lahan gambut sebagai tempat tumbuh *Acacia crassicarpa* dan lahan mineral sebagai tempat tumbuh *Eucalyptus pellita*. Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari–Februari 2026.

Alat dan Bahan

Objek penelitian berupa tegakan *Eucalyptus pellita* di lahan mineral dan *Acacia crassicarpa* di lahan gambut pada umur 1, 2, dan 3 tahun. Alat yang digunakan meliputi tali rafia, pita ukur, *phi-band* (pita diameter), *Global Positioning System* (GPS), *Avenza Map*, kompas, dan komputer. Perangkat lunak yang digunakan adalah *Microsoft Excel*.

Pengumpulan Data

Jenis data yang dikumpulkan berupa data primer dan data sekunder. Data sekunder meliputi *logbook* inventarisasi perusahaan dan literatur ilmiah. Data primer diambil melalui pengukuran plot contoh berbentuk lingkaran dengan jari-jari 11,29 m (luas 0,04 ha) mengacu pada BSN (2019). Pengukuran dilakukan terhadap seluruh pohon hidup berdiameter ≥ 5 cm di dalam plot, meliputi diameter setinggi dada (DBH, $\pm 1,3$ m dari permukaan tanah) dan tinggi pohon.

Metode pengambilan contoh yang digunakan adalah *Stratified Purposive Sampling*. Stratifikasi dilakukan berdasarkan spesies dan umur tegakan sehingga terbentuk enam stratum, yaitu *Eucalyptus pellita* umur 1, 2, dan 3 tahun di lahan mineral serta *Acacia crassicaarpa* umur 1, 2, dan 3 tahun di lahan gambut. Pemilihan plot dilakukan secara *purposive* dengan kriteria: (1) keterwakilan kondisi tegakan pada setiap kombinasi spesies dan umur, dan (2) aksesibilitas lokasi, yaitu plot ditempatkan pada petak tegakan yang relatif mudah dijangkau dari jalan utama selama periode penelitian. Penetapan titik plot di dalam petak diatur dengan jarak antarplot minimal 150 m untuk menjaga independensi antarplot dan menghindari tumpang tindih tegakan yang terukur. Pendekatan stratified purposive serupa juga digunakan oleh Noor *et al.* (2020) dalam analisis simpanan karbon dengan pertimbangan kondisi pertumbuhan tegakan yang beragam. Total plot contoh berjumlah 36 plot, terdiri atas 6 plot per kombinasi spesies–umur yang dibagi ke dalam dua petak pengamatan (3 plot per petak).

Intensitas sampling (IS) dihitung sebagai perbandingan luas total plot contoh terhadap luas total areal penelitian (Husch *et al.* 2003):

$$IS (\%) = (n \times \text{luas plot}) \div \text{luas areal penelitian} \times 100\% \quad (1)$$

$$0,82\% = (n \times 0,04 \text{ ha}) \div 174,80 \text{ ha} \times 100\% \rightarrow n = (0,82 \times 174,80) \div (0,04 \times 100) = 35,97 \approx 36 \text{ plot}$$

Nilai IS 0,82% telah memenuhi batas minimum intensitas sampling untuk hutan tanaman umur I–II sebesar 0,5% sebagaimana ditetapkan dalam PP No. 4 Tahun 2004. Tegakan HTI bersifat monokultur dan relatif homogen, sehingga intensitas sampling yang lebih kecil pun masih representatif karena ketelitian sampling sangat dipengaruhi oleh tingkat homogenitas tegakan (Simon 2007). Kecukupan jumlah plot diverifikasi menggunakan *Winrock Sample Plot Calculator* (Pearson *et al.* 2005), yang menunjukkan jumlah plot minimum 6 plot per stratum pada target presisi 10% dan tingkat kepercayaan 95%, sehingga penggunaan 6 plot per stratum memenuhi syarat kecukupan dan independensi data. Rincian jumlah dan lokasi plot disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Jumlah dan lokasi plot penelitian

<i>Spesies</i>	<i>Tipe Lahan</i>	<i>Umur (tahun)</i>	<i>Jumlah Plot</i>	<i>Luas (ha)</i>	<i>Lokasi Petak</i>
<i>Eucalyptus pellita</i>	Mineral	1	6	24,7	RSKA175A01; RSKA175A04
	Mineral	2	6	34,3	RSKA003402; RSKA003603
	Mineral	3	6	26,9	RSKA007602; RSKA194A01
<i>Acacia crassicaarpa</i>	Gambut	1	6	35,5	RSKA286C01; RSKA286B01
	Gambut	2	6	19,6	RSKA924201; RSKA018601
	Gambut	3	6	33,8	RSKA194C01; RSKA194D02

Pengolahan dan Analisis Data

Volume tegakan diduga menggunakan rumus silinder yang dikoreksi dengan faktor bentuk 0,7 (Hardjana 2009). Biomassa atas permukaan diduga menggunakan persamaan alometrik spesifik jenis (Riya *et al.* 2023 untuk *Acacia crassicaarpa*), dan simpanan karbon dihitung dengan faktor konversi 0,47 (BSN 2019). Analisis statistik menggunakan *IBM SPSS Statistics*, dengan tahapan: (1) uji normalitas Shapiro-Wilk; (2) uji homogenitas Levene; (3) uji beda antar kelas umur; dan (4) uji lanjut post hoc. Pemilihan uji beda disesuaikan dengan hasil uji homogenitas: tegakan *Acacia crassicaarpa* yang tidak homogen (Levene *Based on Mean*, Sig. < 0,05) menggunakan Welch ANOVA dengan uji lanjut Games-Howell, sedangkan tegakan *Eucalyptus pellita* yang homogen menggunakan *One-Way ANOVA* dengan uji lanjut Tukey HSD (Field 2018; Montgomery 2017).

Volume

Volume kayu yang dapat dimanfaatkan (*merchantable volume*) tiap pohon dihitung menggunakan rumus silinder (Simon 2007) yang dikoreksi faktor bentuk batang (Hardjana 2009):

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 \times H \times f \quad (2)$$

dengan V = volume batang (m^3); $\pi = 3,14$; D = diameter setinggi dada/DBH (m); H = tinggi pohon (m); dan f = faktor bentuk batang = 0,7. Faktor bentuk 0,7 digunakan untuk seluruh jenis dan umur karena merupakan nilai yang umum diterapkan pada tegakan HTI spesies cepat tumbuh di Indonesia dan mencerminkan proporsi volume nyata batang terhadap volume silinder dengan diameter dan tinggi yang sama (Hardjana 2009). Penggunaan satu nilai faktor bentuk untuk kedua jenis merupakan keterbatasan penelitian ini; tarif volume spesifik jenis dan tapak akan memberikan pendugaan yang lebih akurat apabila tersedia. Volume tegakan per ha tiap plot diperoleh dengan persamaan:

$$V/ha = (v \div \text{luas plot}) \times 10.000 \quad (3)$$

dengan V/ha = volume tegakan (m^3/ha); v = jumlah volume seluruh pohon dalam satu plot (m^3); dan luas plot = 400 m^2 . Nilai rata-rata volume per ha dari enam plot tiap kombinasi spesies-umur digunakan sebagai dasar analisis.

Biomassa atas permukaan

Biomassa atas permukaan diduga menggunakan persamaan alometrik spesifik jenis. Untuk *Eucalyptus pellita* digunakan persamaan total biomassa atas permukaan dari Ambar *et al.* (2014):

$$B = 0,079 D^{2,79} \quad (4)$$

dan untuk *Acacia crassicaarpa* digunakan persamaan dari Riya *et al.* (2023):

$$B = 0,027 D^{2,891} \quad (5)$$

dengan B = biomassa atas permukaan (kg) dan D = diameter setinggi dada/DBH (cm). Kedua persamaan hanya menggunakan peubah diameter karena hasil pengujian model menunjukkan diameter sebagai peubah yang berpengaruh nyata terhadap biomassa, sedangkan tinggi tidak nyata (Ambar *et al.* 2014). Persamaan *Acacia crassicaarpa* dari Riya *et al.* (2023) valid untuk pohon berdiameter > 5 cm, sedangkan persamaan *Eucalyptus pellita* dari Ambar *et al.* (2014) disusun secara destruktif dari pohon yang mewakili kelas diameter kecil, sedang, dan besar pada tegakan *Eucalyptus pellita* di HTI Provinsi Riau. Sesuai rentang valid tersebut, pengukuran pada penelitian ini dibatasi pada pohon berdiameter ≥ 5 cm.

Simpanan karbon

Simpanan karbon dihitung dari biomassa dengan faktor konversi 47% (BSN 2019):

$$C = B \times 47\% \quad (6)$$

dengan C = simpanan karbon (kg) dan B = biomassa (kg). Nilai karbon per plot kemudian dikonversi ke satuan ton karbon per ha (tonC/ha) berdasarkan luas plot.

Analisis statistik

Data volume, biomassa atas permukaan, dan simpanan karbon dianalisis menggunakan *IBM SPSS Statistics*. Normalitas data diuji dengan uji Shapiro-Wilk yang lebih sesuai untuk sampel kecil ($n = 6$ per stratum) dibandingkan uji Kolmogorov-Smirnov (Razali dan Wah 2011). Homogenitas varians diuji dengan uji Levene. Kriteria utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah Levene *Based on Mean*, yaitu varians dinyatakan homogen apabila $\text{Sig.} > 0,05$; nilai *Based on Median* hanya disajikan sebagai pembanding karena pada ukuran sampel kecil hasil uji Levene perlu ditafsirkan secara hati-hati (Montgomery 2017; Field 2018). Apabila asumsi homogenitas terpenuhi, perbedaan antar umur diuji dengan *One-Way ANOVA* ($\alpha = 0,05$) dan dilanjutkan uji Tukey HSD. Apabila asumsi homogenitas tidak terpenuhi, digunakan Welch ANOVA yang lebih *robust* terhadap ketidaksamaan varians, dengan uji lanjut Games-Howell. Pelaporan Welch ANOVA memuat statistik F' (Welch), df_1 , dan df_2 yang telah disesuaikan, beserta nilai signifikansinya. Pengujian dilakukan secara terpisah untuk masing-masing spesies, sehingga uji statistik membandingkan umur di dalam satu kombinasi jenis-tapak dan tidak membandingkan kedua spesies secara langsung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Volume, Biomassa, dan Simpanan Karbon *Acacia crassicaarpa*

Volume tegakan *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut meningkat seiring bertambahnya kelas umur, yaitu dari 132,56 m³/ha pada umur 1 tahun menjadi 516,95 m³/ha pada umur 2 tahun dan 666,17 m³/ha pada umur 3 tahun (Tabel 2). Peningkatan volume terbesar terjadi antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 384,39 m³/ha, yang mengindikasikan fase pertumbuhan paling aktif. Pertambahan volume yang berlangsung hingga umur 3 tahun menunjukkan bahwa tegakan masih berada dalam fase pertumbuhan aktif dan belum mencapai riap maksimum.

Tabel 2 Estimasi volume tegakan *Acacia crassicaarpa* (m³/ha) di lahan gambut

<i>Spesies</i>	Umur	Kerapatan (pohon/ha)	Rata-rata Diameter (cm)	Rata-rata Tinggi (m)	Volume (m ³ /ha)
<i>Acacia crassicaarpa</i>	1 tahun	1.488	6,41	5,84	132,56
	2 tahun	1.404	10,20	9,21	516,95
	3 tahun	1.575	10,89	9,43	666,17

Biomassa atas permukaan *Acacia crassicaarpa* meningkat dari 31,64 ton/ha pada umur 1 tahun menjadi 117,03 ton/ha pada umur 2 tahun dan 154,42 ton/ha pada umur 3 tahun (Tabel 3). Peningkatan terbesar terjadi antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 85,39 ton/ha. Simpanan karbon mengikuti pola yang sama, yaitu 14,87 tonC/ha pada umur 1 tahun, 55,00 tonC/ha pada umur 2 tahun, dan 72,58 tonC/ha pada umur 3 tahun. Pola tersebut menunjukkan bahwa *Acacia crassicaarpa* memiliki potensi yang baik sebagai penyerap karbon pada HTI di lahan gambut, sejalan dengan hasil Yuniawati *et al.* (2011) yang melaporkan akumulasi biomassa dan karbon yang meningkat konsisten seiring bertambahnya umur tegakan *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut Pelalawan, Riau.

Tabel 3 Estimasi biomassa atas permukaan (AGB) dan simpanan karbon *Acacia crassicaarpa*

<i>Spesies</i>	Umur	AGB (ton/ha)	Simpanan Karbon (tonC/ha)
<i>Acacia crassicaarpa</i>	1 tahun	31,64	14,87
	2 tahun	117,03	55,00
	3 tahun	154,42	72,58

Acacia crassicaarpa

Volume tegakan merupakan salah satu parameter penting dalam inventarisasi hutan yang menggambarkan potensi produksi kayu per satuan luas (Husch *et al.* 2003). Hasil pendugaan volume tegakan *Acacia crassicaarpa* pada umur 1, 2, dan 3 tahun di lahan gambut disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Estimasi volume tegakan *Acacia crassicaarpa* (m³/ha) di lahan gambut

Jenis	Umur	Kerapatan (pohon/ha)	Rata-rata Diameter (cm)	Rata-rata Tinggi (m)	Rata-rata Volume (m ³ /ha) ± SD
<i>Acacia crassicaarpa</i>	1 tahun	1.488	6,41	5,84	22,08 ± 1,32
<i>Acacia crassicaarpa</i>	2 tahun	1.404	10,20	9,21	86,07 ± 9,71
<i>Acacia crassicaarpa</i>	3 tahun	1.575	10,89	9,43	110,96 ± 12,38

Keterangan: SD = simpangan baku rata-rata volume per ha dari enam plot. Nilai kerapatan, diameter, dan tinggi merupakan rata-rata tegakan hasil inventarisasi.

Volume tegakan *Acacia crassicaarpa* meningkat seiring bertambahnya umur, yaitu 22,08 m³/ha pada umur 1 tahun, 86,07 m³/ha pada umur 2 tahun, dan 110,96 m³/ha pada umur 3 tahun. Peningkatan terbesar terjadi antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 63,99 m³/ha, yang mencerminkan fase pertumbuhan paling aktif sebelum laju pertumbuhan melambat pasca penutupan tajuk (Mindawati *et al.* 2010). Pertambahan volume yang masih positif hingga umur 3 tahun menunjukkan bahwa tegakan belum mencapai volume maksimum. Peningkatan ini sejalan dengan pertambahan diameter rata-rata dari 6,41 cm pada umur 1 tahun menjadi 10,20 cm dan 10,89 cm pada umur 2 dan 3 tahun, sebagai hasil pembelahan sel kambium yang berlangsung terus-menerus (Yuniawati *et al.* 2011). Kondisi tata

air lahan gambut yang terjaga melalui sistem kanal turut mendukung pertumbuhan, karena tinggi muka air tanah berpengaruh nyata terhadap pertambahan diameter dan tinggi *Acacia crassicaarpa* (Valentina *et al.* 2014). Jika dibandingkan dengan Yuniawati *et al.* (2011) yang melaporkan potensi tegakan *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut Pelalawan, Riau pada umur 2 tahun sebesar 141,40 m³/ha, volume pada penelitian ini relatif lebih rendah. Perbedaan ini diduga berkaitan dengan perbedaan kerapatan tegakan, kondisi tapak, serta rumus volume dan faktor bentuk yang digunakan pada masing-masing lokasi.

Tabel 5 Estimasi biomassa atas permukaan (AGB) dan simpanan karbon *Acacia crassicaarpa*

Jenis	Umur	AGB (ton/ha) ± SD	Karbon (tonC/ha) ± SD
<i>Acacia crassicaarpa</i>	1 tahun	10,55 ± 0,87	4,96 ± 0,41
<i>Acacia crassicaarpa</i>	2 tahun	39,01 ± 1,59	18,33 ± 0,75
<i>Acacia crassicaarpa</i>	3 tahun	51,48 ± 5,75	24,20 ± 2,70

Biomassa atas permukaan tegakan *Acacia crassicaarpa* meningkat seiring bertambahnya umur, yaitu 10,55 ton/ha pada umur 1 tahun, 39,01 ton/ha pada umur 2 tahun, dan 51,48 ton/ha pada umur 3 tahun. Peningkatan terbesar terjadi antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 28,46 ton/ha, mencerminkan fase pertumbuhan vegetatif paling aktif. Simpanan karbon mengikuti pola yang sama, yaitu 4,96 tonC/ha, 18,33 tonC/ha, dan 24,20 tonC/ha, karena dihitung langsung dari biomassa dengan faktor konversi 47% (BSN 2019). Nilai biomassa dan karbon pada penelitian ini berada pada kisaran yang sejalan dengan tegakan *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut. Riya *et al.* (2023) melaporkan AGB *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut Kubu Raya sebesar 40,65 ton/ha pada umur 3 tahun dan 52,73 ton/ha pada umur 4 tahun, dengan karbon 19,11 tonC/ha dan 24,78 tonC/ha. Nilai AGB umur 3 tahun pada penelitian ini (51,48 ton/ha) dan karbonnya (24,20 tonC/ha) mendekati kisaran tersebut, sehingga hasil ini konsisten dengan potensi *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut. Perbedaan yang ada wajar mengingat perbedaan umur yang dibandingkan, kerapatan tegakan, kondisi tapak, dan persamaan alometrik yang digunakan (Riya *et al.* 2023).

Eucalyptus pellita

Volume tegakan *Eucalyptus pellita* merupakan indikator produktivitas tegakan pada lahan mineral sekaligus dasar pendugaan biomassa dan simpanan karbon. Hasil pendugaan volume pada umur 1, 2, dan 3 tahun disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Estimasi volume tegakan *Eucalyptus pellita* (m³/ha) di lahan mineral

Jenis	Umur	Kerapatan (pohon/ha)	Rata-rata Diameter (cm)	Rata-rata Tinggi (m)	Rata-rata Volume (m ³ /ha) ± SD
<i>Eucalyptus pellita</i>	1 tahun	1.696	6,29	7,47	28,56 ± 4,93
<i>Eucalyptus pellita</i>	2 tahun	1.292	9,79	10,41	74,43 ± 8,06
<i>Eucalyptus pellita</i>	3 tahun	1.283	10,70	10,56	91,28 ± 17,09

Keterangan: SD = simpangan baku rata-rata volume per ha dari enam plot.

Volume tegakan *Eucalyptus pellita* meningkat dari 28,56 m³/ha pada umur 1 tahun menjadi 74,43 m³/ha pada umur 2 tahun dan 91,28 m³/ha pada umur 3 tahun. Peningkatan terbesar terjadi antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 45,87 m³/ha, sejalan dengan pertambahan diameter rata-rata dari 6,29 cm menjadi 9,79 cm dan 10,70 cm, serta tinggi dari 7,47 m menjadi 10,41 m dan 10,56 m. Pertambahan dimensi pohon inilah yang secara langsung mendorong peningkatan volume per ha (Husch *et al.* 2003). Pertumbuhan volume yang tinggi pada umur muda merupakan ciri *Eucalyptus pellita* sebagai spesies cepat tumbuh dengan akumulasi biomassa tinggi pada awal rotasi (Hardiyanto *et al.* 2021). Berdasarkan tinjauan literatur, lahan mineral umumnya memiliki pH lebih tinggi, aerasi lebih baik, dan ketersediaan hara makro yang lebih seimbang dibandingkan lahan gambut, kondisi yang mendukung laju pertumbuhan diameter dan tinggi (Pamoengkas dan Maharani 2018). Karena penelitian ini tidak mengukur sifat kimia tanah dan tinggi muka air pada lokasi, penjelasan tersebut bersifat dugaan berdasarkan literatur dan bukan kesimpulan dari data tapak lokasi.

Tabel 7 Estimasi biomassa atas permukaan (AGB) dan simpanan karbon *Eucalyptus pellita*

Jenis	Umur	AGB (ton/ha) $\pm$ SD	Karbon (tonC/ha) $\pm$ SD
<i>Eucalyptus pellita</i>	1 tahun	23,50 $\pm$ 2,78	11,04 $\pm$ 1,31
<i>Eucalyptus pellita</i>	2 tahun	62,95 $\pm$ 5,92	29,59 $\pm$ 2,78
<i>Eucalyptus pellita</i>	3 tahun	82,28 $\pm$ 15,18	38,67 $\pm$ 7,14

Biomassa atas permukaan tegakan *Eucalyptus pellita* meningkat dari 23,50 ton/ha pada umur 1 tahun menjadi 62,95 ton/ha pada umur 2 tahun dan 82,28 ton/ha pada umur 3 tahun, dengan peningkatan terbesar antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 39,46 ton/ha. Simpanan karbon mengikuti pola yang sama, yaitu 11,04 tonC/ha; 29,59 tonC/ha; dan 38,67 tonC/ha. Nilai biomassa umur 3 tahun pada penelitian ini (82,28 ton/ha) lebih rendah dibandingkan Supangat (2012) yang melaporkan total biomassa *Eucalyptus pellita* umur 4 tahun di lahan mineral Riau sebesar 284,4 ton/ha. Perbedaan ini wajar karena umur yang dibandingkan lebih tua dan komponen biomassa yang diukur berbeda, namun pola umumnya tetap konsisten, yaitu biomassa meningkat seiring bertambahnya umur (Brown 1997). Demikian pula, simpanan karbon pada penelitian ini berada di bawah rata-rata yang dilaporkan Dewi (2013) pada tegakan *Eucalyptus pellita* di HTI PT Finnantara Intiga (69,39 tonC/ha untuk gabungan beberapa umur), yang konsisten karena penelitian ini hanya mencakup umur muda 1–3 tahun. Perlu dicatat bahwa biomassa *Eucalyptus pellita* diduga dengan persamaan total biomassa dari Ambar *et al.* (2014), sedangkan *Acacia crassiparva* menggunakan persamaan dari Riya *et al.* (2023); perbedaan bentuk model dan tipe tapak menyebabkan rasio biomassa terhadap volume kedua spesies tidak setara, sehingga besaran antar spesies tidak dapat dibandingkan secara langsung dan pembahasan difokuskan pada pola antar umur di dalam masing-masing spesies.

Volume, Biomassa, dan Simpanan Karbon *Eucalyptus pellita*

Volume tegakan *Eucalyptus pellita* di lahan mineral meningkat dari 171,79 m³/ha pada umur 1 tahun menjadi 416,98 m³/ha pada umur 2 tahun dan 547,99 m³/ha pada umur 3 tahun (Tabel 4). Peningkatan terbesar terjadi antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 245,19 m³/ha. Biomassa atas permukaan meningkat dari 70,49 ton/ha menjadi 188,86 ton/ha dan 246,82 ton/ha (Tabel 5). Nilai biomassa pada umur 3 tahun masih menunjukkan tren peningkatan, sejalan dengan Supangat (2012) yang melaporkan biomassa *Eucalyptus pellita* umur 4 tahun di lahan mineral Riau mencapai 284,4 ton/ha. Simpanan karbon mengikuti pola yang sama, yaitu 33,13; 88,76; dan 116,01 tonC/ha. Kondisi ini didukung oleh karakteristik lahan mineral yang menyediakan ketersediaan hara lebih seimbang, aerasi lebih baik, dan pH lebih tinggi sehingga pertumbuhan diameter dan akumulasi biomassa berlangsung lebih optimal dibandingkan lahan gambut (Pamoengkas dan Maharani 2018).

Tabel 8 Estimasi volume tegakan *Eucalyptus pellita* (m³/ha) di lahan mineral

Spesies	Umur	Kerapatan (pohon/ha)	Rata-rata Diameter (cm)	Rata-rata Tinggi (m)	Volume (m ³ /ha)
<i>Eucalyptus pellita</i>	1 tahun	1.696	6,29	7,47	171,79
	2 tahun	1.292	9,79	10,41	416,98
	3 tahun	1.283	10,70	10,56	547,99

Tabel 9 Estimasi biomassa atas permukaan (AGB) dan simpanan karbon *Eucalyptus pellita*

Spesies	Umur	AGB (ton/ha)	Simpanan Karbon (tonC/ha)
<i>Eucalyptus pellita</i>	1 tahun	70,49	33,13
	2 tahun	188,86	88,76
	3 tahun	246,82	116,01

Uji Asumsi Normalitas

Uji normalitas Shapiro-Wilk dilakukan sebagai prasyarat analisis parametrik. Hasil uji disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10 Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk

Variabel	Spesies, Umur	Statistik K-S	Sig. K-S	Statistik S-W	df	Sig. S-W
Volume	EPEL, U1	0,229	0,200	0,926	6	0,548
	EPEL, U2	0,267	0,200	0,932	6	0,598
	EPEL, U3	0,202	0,200	0,925	6	0,545
	ACRA, U1	0,182	0,200	0,955	6	0,778
	ACRA, U2	0,181	0,200	0,955	6	0,777
	ACRA, U3	0,303	0,090	0,856	6	0,176
AGB	EPEL, U1	0,272	0,189	0,870	6	0,227
	EPEL, U2	0,210	0,200	0,907	6	0,414
	EPEL, U3	0,324	0,048	0,868	6	0,218
	ACRA, U1	0,244	0,200	0,917	6	0,481
	ACRA, U2	0,261	0,200	0,926	6	0,550
	ACRA, U3	0,333	0,037	0,860	6	0,189
Karbon	EPEL, U1	0,272	0,188	0,870	6	0,227
	EPEL, U2	0,210	0,200	0,906	6	0,411
	EPEL, U3	0,324	0,048	0,868	6	0,217
	ACRA, U1	0,247	0,200	0,914	6	0,466
	ACRA, U2	0,263	0,200	0,924	6	0,535
	ACRA, U3	0,333	0,036	0,860	6	0,187

Keterangan: EPEL = *Eucalyptus pellita*; ACRA = *Acacia crassiparva*; U1–U3 = umur 1–3 tahun; K-S = Kolmogorov-Smirnov; S-W = Shapiro-Wilk.

Berdasarkan Tabel 6, seluruh nilai Sig. Shapiro-Wilk pada variabel volume, AGB, dan karbon lebih besar dari 0,05 sehingga seluruh kelompok data dinyatakan berdistribusi normal. Pada penelitian ini Shapiro-Wilk digunakan sebagai acuan utama karena lebih konsisten untuk sampel kecil dibandingkan Kolmogorov-Smirnov (Razali dan Wah 2011). Sebaran data yang normal diduga dipengaruhi oleh karakteristik tegakan HTI yang relatif seragam, baik dari segi jenis tanaman, jarak tanam, maupun pengelolaan silvikultur yang intensif. Temuan ini sejalan dengan Irundu *et al.* (2020) yang menyatakan bahwa tegakan HTI monokultur umumnya menghasilkan data yang lebih homogen dibandingkan hutan alam.

Uji Homogenitas

Uji homogenitas varians menggunakan Levene *Based on Mean* sebagai kriteria utama. Hasil uji pada masing-masing spesies disajikan pada Tabel 11 dan Tabel 12.

Tabel 11 Hasil uji homogenitas varians tegakan *Acacia crassiparva*

Variabel	Uji Levene	Statistik	df1	df2	Sig.	Keterangan
Volume	<i>Based on Mean</i>	5,666	2	15	0,015	Tidak homogen
	<i>Based on Median</i>	2,137	2	15	0,153	Homogen
AGB	<i>Based on Mean</i>	11,550	2	15	<0,001	Tidak homogen
	<i>Based on Median</i>	2,320	2	15	0,132	Homogen
Karbon	<i>Based on Mean</i>	11,540	2	15	<0,001	Tidak homogen
	<i>Based on Median</i>	2,307	2	15	0,134	Homogen

Berdasarkan kriteria utama Levene *Based on Mean*, ketiga variabel pada tegakan *Acacia crassiparva* memiliki Sig.<0,05 (volume 0,015; AGB dan karbon <0,001), sehingga asumsi homogenitas varians tidak terpenuhi. Ketidakhomogenan ini diduga berkaitan dengan karakteristik lahan gambut yang lebih heterogen, terutama variasi ketebalan gambut dan fluktuasi muka air tanah antarplot (Valentina *et al.* 2014). Oleh karena itu, analisis perbedaan antar umur pada *Acacia crassiparva* dilanjutkan menggunakan Welch ANOVA dengan uji lanjut Games-Howell (Field 2018).

Tabel 12 Hasil uji homogenitas varians tegakan *Eucalyptus pellita*

Variabel	Uji Levene	Statistik	df1	df2	Sig.	Keterangan
Volume	Based on Mean	2,553	2	15	0,111	Homogen
AGB	Based on Mean	1,344	2	15	0,290	Homogen
Karbon	Based on Mean	1,343	2	15	0,291	Homogen

Berbeda dengan *Acacia crassiparva*, seluruh variabel pada tegakan *Eucalyptus pellita* memenuhi asumsi homogenitas berdasarkan Levene *Based on Mean*, dengan Sig. volume 0,111; AGB 0,290; dan karbon 0,291 (seluruhnya $>0,05$). Keceragaman kondisi lahan mineral yang lebih stabil secara fisik dan kimia dibandingkan gambut diduga menyebabkan variasi pertumbuhan antarplot yang lebih kecil (Pamoengkas dan Maharani 2018). Oleh karena itu, analisis pada *Eucalyptus pellita* dilanjutkan dengan *One-Way ANOVA* dan uji lanjut Tukey HSD.

Welch ANOVA dan *One-Way ANOVA*

Varians tidak homogen, perbedaan antar umur pada tegakan *Acacia crassiparva* diuji menggunakan Welch ANOVA (Tabel 13), sedangkan tegakan *Eucalyptus pellita* yang variannya homogen diuji menggunakan *One-Way ANOVA* (Tabel 14).

Tabel 13 Hasil Welch ANOVA tegakan *Acacia crassiparva*

Variabel	Statistik F' (Welch)	df1	df2	Sig.
Volume	252,246	2	6,862	$<0,001$
AGB	780,821	2	8,208	$<0,001$
Karbon	778,597	2	8,220	$<0,001$

Hasil Welch ANOVA menunjukkan bahwa umur berpengaruh nyata terhadap volume, AGB, dan karbon pada tegakan *Acacia crassiparva* (Sig. $<0,001$). Nilai statistik Welch yang sangat besar mencerminkan bahwa perbedaan antar umur jauh melampaui variasi di dalam kelompok umur yang sama, menegaskan umur sebagai faktor utama dalam akumulasi ketiga variabel tersebut (Yuniawati *et al.* 2011).

Tabel 14 Hasil *One-Way ANOVA* tegakan *Eucalyptus pellita*

Variabel	Sumber Keragaman	JK	df	KT	F	Sig.
Volume	Antar Kelompok	12.645,004	2	6.322,502	49,750	$<0,001$
	Dalam Kelompok	1.906,297	15	127,086		
AGB	Antar Kelompok	10.769,441	2	5.384,720	59,147	$<0,001$
	Dalam Kelompok	1.365,595	15	91,040		
Karbon	Antar Kelompok	2.378,827	2	1.189,413	59,114	$<0,001$
	Dalam Kelompok	301,808	15	20,121		

Hasil *One-Way ANOVA* menunjukkan bahwa umur berpengaruh nyata terhadap seluruh variabel pada tegakan *Eucalyptus pellita* (Sig. $<0,001$), dengan nilai F sebesar 49,750 untuk volume, 59,147 untuk AGB, dan 59,114 untuk karbon. Nilai F yang lebih kecil dibandingkan *Acacia crassiparva* tidak menunjukkan pengaruh yang lebih lemah, melainkan mencerminkan variasi pertumbuhan antarplot yang lebih besar, yang diduga terkait dengan perbedaan topografi pada petak umur 2 dan 3 tahun (8–15%) sehingga distribusi air dan unsur hara antarplot kurang merata (Mindawati *et al.* 2010).

Uji Lanjut Games-Howell dan Tukey HSD

Uji lanjut dilakukan untuk mengidentifikasi pasangan umur yang berbeda nyata. Pada *Acacia crassiparva* digunakan Games-Howell (Tabel 15) dan pada *Eucalyptus pellita* digunakan Tukey HSD (Tabel 16).

Tabel 15 Hasil uji Games-Howell tegakan *Acacia crassicarpa*

Variabel	Umur (I)	Umur (J)	Beda Rata-rata (I-J)	Std. Error	Sig.	Keterangan
Volume	1	2	-63,990	4,001	<0,001	Berbeda nyata
	1	3	-88,880	5,084	<0,001	Berbeda nyata
	2	3	-24,890	6,424	0,009	Berbeda nyata
AGB	1	2	-28,458	0,740	<0,001	Berbeda nyata
	1	3	-40,925	2,374	<0,001	Berbeda nyata
	2	3	-12,467	2,436	0,006	Berbeda nyata
Karbon	1	2	-13,377	0,348	<0,001	Berbeda nyata
	1	3	-19,238	1,117	<0,001	Berbeda nyata
	2	3	-5,862	1,146	0,006	Berbeda nyata

Tabel 16 Hasil uji Tukey HSD tegakan *Eucalyptus pellita*

Variabel	Umur (I)	Umur (J)	Beda Rata-rata (I-J)	Std. Error	Sig.	Keterangan
Volume	1	2	-45,873	6,509	<0,001	Berbeda nyata
	1	3	-62,723	6,509	<0,001	Berbeda nyata
	2	3	-16,850	6,509	0,051	Tidak berbeda nyata
AGB	1	2	-39,455	5,509	<0,001	Berbeda nyata
	1	3	-58,777	5,509	<0,001	Berbeda nyata
	2	3	-19,322	5,509	0,008	Berbeda nyata
Karbon	1	2	-18,547	2,590	<0,001	Berbeda nyata
	1	3	-27,623	2,590	<0,001	Berbeda nyata
	2	3	-9,077	2,590	0,008	Berbeda nyata

Uji Normalitas dan Homogenitas

Seluruh data volume, AGB, dan simpanan karbon pada kedua spesies dan kelas umur dinyatakan berdistribusi normal berdasarkan uji Shapiro-Wilk (Sig. >0,05). Sebaran data yang normal diduga dipengaruhi oleh kondisi tegakan HTI yang relatif seragam, baik dari segi jenis tanaman, jarak tanam, maupun pengelolaan silvikultur yang intensif, sehingga variasi pertumbuhan antarpohon lebih kecil dan distribusi data cenderung normal (Irundu *et al.* 2020).

Hasil uji Levene menunjukkan kondisi berbeda antara kedua spesies. Pada tegakan *Acacia crassicarpa*, nilai Sig. *Based on Mean* untuk seluruh variabel di bawah 0,05 (volume = 0,015; AGB dan karbon <0,001), sehingga asumsi homogenitas *varians* tidak terpenuhi (Tabel 6). Ketidakhomogenan *varians* ini diduga berkaitan dengan heterogenitas lahan gambut, terutama variasi ketebalan gambut dan fluktuasi muka air tanah antarplot yang menyebabkan pertumbuhan lebih bervariasi (Valentina *et al.* 2014). Pada tegakan *Eucalyptus pellita*, seluruh variabel memenuhi asumsi homogenitas (Sig. >0,05) karena kondisi lahan mineral yang lebih seragam secara fisik dan kimia (Tabel 17) (Pamoengkas dan Maharani 2018).

Tabel 17 Hasil uji homogenitas Levene tegakan *Acacia crassicarpa*

Variabel	Uji Levene	Statistik	df1	df2	Sig.	Keterangan
Volume	<i>Based on Mean</i>	5,666	2	15	0,015	Tidak Homogen
	<i>Based on Median</i>	2,137	2	15	0,153	Homogen
AGB	<i>Based on Mean</i>	11,550	2	15	<0,001	Tidak Homogen
	<i>Based on Median</i>	2,320	2	15	0,132	Homogen
Karbon	<i>Based on Mean</i>	11,540	2	15	<0,001	Tidak Homogen
	<i>Based on Median</i>	2,307	2	15	0,134	Homogen

Tabel 18 Hasil uji homogenitas Levene tegakan *Eucalyptus pellita*

Variabel	Uji Levene	Statistik	df1	df2	Sig.	Keterangan
Volume	<i>Based on Mean</i>	2,553	2	15	0,111	Homogen
AGB	<i>Based on Mean</i>	1,344	2	15	0,290	Homogen
Karbon	<i>Based on Mean</i>	1,343	2	15	0,291	Homogen

Uji ANOVA dan Uji Lanjut

Berdasarkan hasil uji homogenitas, tegakan *Acacia crassicaarpa* dianalisis menggunakan Welch ANOVA dan tegakan *Eucalyptus pellita* menggunakan *One-Way ANOVA*. Kedua uji menunjukkan bahwa kelas umur berpengaruh nyata terhadap seluruh variabel (*Sig.* <0,001) (Tabel 19 dan Tabel 20). Nilai F hitung Welch ANOVA pada *Acacia crassicaarpa* yang lebih besar mencerminkan rasio keragaman antar kelas umur terhadap keragaman dalam kelompok yang lebih tinggi, konsisten dengan sifat *fast-growing* pada lahan gambut (Yuniawati *et al.* 2011).

Tabel 19 Hasil Welch ANOVA tegakan *Acacia crassicaarpa*

Variabel	Sumber Keragaman	JK	df	KT	F Welch	Sig.
Volume	Antar Kelompok	12.784,527	2	6.392,263	252,246	<0,001
	Dalam Kelompok	—	—	—	—	—
AGB	Antar Kelompok	7.016,706	2	3.508,353	780,821	<0,001
	Dalam Kelompok	—	—	—	—	—
Karbon	Antar Kelompok	1.550,267	2	775,134	778,597	<0,001
	Dalam Kelompok	—	—	—	—	—

Tabel 20 Hasil One-Way ANOVA tegakan *Eucalyptus pellita*

Variabel	Sumber Keragaman	JK	df	KT	F hitung	Sig.
Volume	Antar Kelompok	12.645,004	2	6.322,502	49,750	<0,001
	Dalam Kelompok	1.906,297	15	127,086	—	—
AGB	Antar Kelompok	10.769,441	2	5.384,720	59,147	<0,001
	Dalam Kelompok	1.365,595	15	91,040	—	—
Karbon	Antar Kelompok	2.378,827	2	1.189,413	59,114	<0,001
	Dalam Kelompok	301,808	15	20,121	—	—

Hasil uji lanjut Games-Howell pada tegakan *Acacia crassicaarpa* menunjukkan bahwa seluruh pasangan kelas umur berbeda nyata untuk ketiga variabel (Tabel 21). Beda rata-rata biomassa antara umur 1 dan 2 tahun sebesar 28,458 ton/ha, antara umur 1 dan 3 tahun sebesar 40,925 ton/ha, serta antara umur 2 dan 3 tahun sebesar 12,467 ton/ha. Besarnya perbedaan ini mencerminkan fase pertumbuhan aktif *fast-growing* pada tahun-tahun awal rotasi, yang didukung oleh kemampuan simbiosis *Acacia crassicaarpa* dengan bakteri *Rhizobium* untuk fiksasi nitrogen di lahan gambut masam (Palimbong *et al.* 2023).

Tabel 21 Hasil uji Games-Howell tegakan *Acacia crassicaarpa*

Variabel	Umur (I)	Umur (J)	Beda Rata-rata (I-J)	Std. Error	Sig.	Keterangan
Volume (m ³ /ha)	1	2	-63,990	4,001	<0,001	Berbeda*
	1	3	-88,820	5,084	<0,001	Berbeda*
	2	3	-24,830	6,424	0,009	Berbeda*
AGB (ton/ha)	1	2	-28,458	0,740	<0,001	Berbeda*
	1	3	-40,925	2,374	<0,001	Berbeda*
	2	3	-12,467	2,436	0,006	Berbeda*

Variabel	Umur (I)	Umur (J)	Beda Rata-rata (I-J)	Std. Error	Sig.	Keterangan
Karbon (tonC/ha)	1	2	-13,377	0,348	<0,001	Berbeda*
	1	3	-19,238	1,117	<0,001	Berbeda*
	2	3	-5,862	1,145	0,006	Berbeda*

Keterangan: * = berbeda nyata pada taraf $\alpha = 0,05$

Uji lanjut Tukey HSD pada tegakan *Eucalyptus pellita* menunjukkan pola yang sedikit berbeda (Tabel 22). Biomassa dan simpanan karbon berbeda nyata pada seluruh pasangan kelas umur. Satu-satunya pengecualian adalah volume antara kelas umur 2 dan 3 tahun (Sig. = 0,051) yang tidak berbeda nyata, mengindikasikan perlambatan riap diameter pasca penutupan tajuk akibat meningkatnya kompetisi antarpohon (Mindawati *et al.* 2010). Menariknya, meskipun volume melambat, biomassa dan karbon antara umur 2 dan 3 tahun tetap berbeda nyata, karena penambahan massa organik melalui pemadatan dan pematangan kayu di dalam batang masih berlangsung meskipun laju pertambahan diameter mulai menurun (Brown 1997).

Tabel 22 Hasil uji Tukey HSD tegakan *Eucalyptus pellita*

Variabel	Umur (I)	Umur (J)	Beda Rata-rata (I-J)	Std. Error	Sig.	Keterangan
Volume (m ³ /ha)	1	2	-45,873	6,509	<0,001	Berbeda*
	1	3	-62,723	6,509	<0,001	Berbeda*
	2	3	-16,850	6,509	0,051	Tidak Berbeda
AGB (ton/ha)	1	2	-39,455	5,509	<0,001	Berbeda*
	1	3	-58,777	5,509	<0,001	Berbeda*
	2	3	-19,322	5,509	0,008	Berbeda*
Karbon (tonC/ha)	1	2	-18,547	2,590	<0,001	Berbeda*
	1	3	-27,623	2,590	<0,001	Berbeda*
	2	3	-9,077	2,590	0,008	Berbeda*

Keterangan: * = berbeda nyata pada taraf $\alpha = 0,05$

Perbedaan Volume, Biomassa Atas Permukaan, dan Simpanan Karbon antar Umur

Hasil uji statistik menunjukkan bahwa umur berpengaruh nyata terhadap volume, biomassa atas permukaan, dan simpanan karbon pada kedua spesies. Pola ini secara biologis mencerminkan mekanisme pertumbuhan pohon yang bersifat kumulatif, di mana pertambahan diameter dan tinggi yang berlangsung melalui aktivitas kambium meningkatkan volume tegakan dari tahun ke tahun, yang selanjutnya mendorong akumulasi biomassa dan karbon (Munir 2021). Pada spesies *fast-growing* seperti *Acacia crassicaarpa* dan *Eucalyptus pellita*, laju pertumbuhan tertinggi umumnya terjadi pada fase awal rotasi sebelum melambat pasca penutupan tajuk (Mindawati *et al.* 2010), sehingga perbedaan antar umur 1, 2, dan 3 tahun menjadi besar dan nyata secara statistik.

Pada tegakan *Acacia crassicaarpa*, uji Games-Howell menunjukkan seluruh pasangan umur berbeda nyata untuk ketiga variabel. Perbedaan biomassa terbesar terjadi antara umur 1 dan 2 tahun (28,458 ton/ha), sedangkan antara umur 2 dan 3 tahun lebih kecil (12,467 ton/ha); pola serupa terlihat pada simpanan karbon (13,377 tonC/ha pada umur 1–2 tahun dan 5,862 tonC/ha pada umur 2–3 tahun). Hal ini menegaskan bahwa laju akumulasi tertinggi berlangsung pada tahun pertama hingga kedua, kemudian melambat seiring meningkatnya kompetisi antarpohon dan berkurangnya cahaya pasca penutupan tajuk (Mindawati *et al.* 2010). Pola peningkatan yang konsisten ini sejalan dengan Yuniawati *et al.* (2011) dan Riya *et al.* (2023) yang melaporkan bahwa biomassa dan karbon *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut meningkat nyata seiring bertambahnya umur. Ketidakhomogenan varians yang mendasari penggunaan Games-Howell pada spesies ini juga mencerminkan variasi pertumbuhan antarplot yang lebih besar sebagai karakteristik lahan gambut yang heterogen secara hidrologi (Valentina *et al.* 2014).

Pada tegakan *Eucalyptus pellita*, uji Tukey HSD menunjukkan biomassa dan simpanan karbon berbeda nyata pada seluruh pasangan umur, dengan beda rata-rata biomassa 39,455 ton/ha (umur 1–2 tahun), 58,777 ton/ha (umur 1–3 tahun), dan 19,322 ton/ha (umur 2–3 tahun). Satu-satunya pasangan yang tidak berbeda nyata adalah volume antara umur 2 dan 3 tahun (Sig. = 0,051). Hal ini tidak berarti pertumbuhan berhenti, melainkan laju pertumbuhan diameter mulai melambat akibat kompetisi cahaya dan ruang yang meningkat pasca penutupan tajuk (Mindawati *et al.* 2010; Hardiyanto *et al.* 2021). Menariknya, biomassa dan karbon pada pasangan umur yang sama tetap berbeda nyata. Brown (1997) menjelaskan bahwa pada pohon yang lebih tua proporsi kayu yang terbentuk semakin meningkat, sehingga penambahan massa organik melalui pematangan dan pemadatan jaringan kayu masih berlangsung meskipun pertumbuhan diameter melambat. Temuan ini menunjukkan bahwa volume dan biomassa tidak selalu bergerak paralel pada setiap fase pertumbuhan, sehingga pengukuran biomassa secara langsung tetap diperlukan untuk pendugaan karbon yang akurat pada tegakan yang mendekati fase penutupan tajuk.

Perbedaan pola hasil uji lanjut antara kedua spesies dapat dijelaskan melalui perbedaan kondisi tapak. Tegakan *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut menunjukkan variasi antarplot yang lebih besar akibat heterogenitas hidrologi, sehingga Games-Howell yang tidak mensyaratkan homogenitas varians lebih sesuai. Sementara itu, tegakan *Eucalyptus pellita* di lahan mineral memiliki kondisi tapak yang lebih seragam, menghasilkan varians homogen yang mendukung penggunaan Tukey HSD (Irundu *et al.* 2020). Karena kedua spesies tumbuh pada kombinasi jenis–tapak yang berbeda dan diduga dengan persamaan alometrik yang berbeda, perbedaan magnitudo antar spesies tidak dapat diatribusikan secara langsung pada faktor jenis atau tapak; analisis difokuskan pada pola antar umur di dalam masing-masing spesies. Secara keseluruhan, hasil analisis membuktikan bahwa umur merupakan faktor yang berpengaruh nyata terhadap akumulasi volume, biomassa, dan simpanan karbon pada kedua tegakan HTI, konsisten dengan Hardjana (2009) pada tegakan *Acacia mangium* di Kalimantan Timur. Sebagai implikasi awal, temuan ini mengindikasikan bahwa fase pertumbuhan aktif perlu menjadi pertimbangan dalam penentuan rotasi tebang, meskipun penetapan rotasi optimal masih memerlukan kajian lanjutan yang mencakup seri umur lebih panjang serta data riap, mutu kayu, dan biaya (Parinduri dan Parinduri 2020).

Perbedaan Antar Kelas Umur pada Kedua Spesies

Pola peningkatan volume, biomassa, dan simpanan karbon yang konsisten seiring bertambahnya kelas umur pada kedua spesies secara biologis mencerminkan mekanisme pertumbuhan pohon yang bersifat kumulatif. Pertambahan diameter batang yang terus-menerus melalui aktivitas kambium menyebabkan volume tegakan meningkat dari tahun ke tahun, dan volume yang meningkat tersebut secara langsung mendorong akumulasi biomassa serta simpanan karbon (Munir 2021). Pada spesies *fast-growing*, laju akumulasi biomassa tertinggi umumnya terjadi pada fase awal rotasi sebelum mulai melambat setelah penutupan tajuk (Mindawati *et al.* 2010).

Pada tegakan *Acacia crassicaarpa*, semua pasangan kelas umur berbeda nyata untuk ketiga variabel. Pola ini konsisten dengan Yuniawati *et al.* (2011) yang melaporkan peningkatan biomassa dan karbon yang konsisten pada tegakan *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut Pelalawan, Riau. Ketidakhomogenan varians antar kelas umur pada spesies ini juga mencerminkan heterogenitas lahan gambut, meliputi variasi ketebalan gambut dan fluktuasi muka air tanah yang menyebabkan pertumbuhan lebih bervariasi antarplot (Valentina *et al.* 2014). Perbedaan pola antara kedua spesies secara ekologis dapat dijelaskan melalui perbedaan kondisi tapak. Tegakan *Eucalyptus pellita* di lahan mineral memiliki kondisi tapak yang lebih seragam, menghasilkan varians yang homogen dan mengonfirmasi bahwa volume antara umur 2 dan 3 tahun tidak berbeda nyata akibat perlambatan riap diameter pasca penutupan tajuk. Meskipun demikian, biomassa dan karbon tetap berbeda nyata karena pemadatan dan pematangan kayu dalam batang masih berlangsung meskipun pertumbuhan diameter mulai menurun (Brown 1997; Hardiyanto *et al.* 2021).

Secara keseluruhan, hasil analisis statistik membuktikan bahwa kelas umur merupakan faktor penentu utama akumulasi volume, biomassa atas permukaan, dan simpanan karbon pada tegakan HTI. Informasi ini memiliki nilai praktis yang tinggi bagi pengelola HTI sebagai dasar ilmiah dalam menentukan rotasi tebang yang optimal, yaitu pada fase di mana laju akumulasi karbon masih tinggi

sebelum mengalami perlambatan signifikan, sehingga fungsi produksi kayu dan penyerapan karbon dapat dioptimalkan secara bersamaan (Parinduri dan Parinduri 2020).

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Umur tegakan berpengaruh nyata terhadap volume, biomassa atas permukaan, dan simpanan karbon pada kedua kombinasi jenis tapak. Volume, biomassa, dan karbon meningkat konsisten dari umur 1 hingga 3 tahun, yaitu pada *Acacia crassiparva* di lahan gambut dari 22,08 menjadi 110,96 m³/ha (volume), 10,55 menjadi 51,48 ton/ha (AGB), dan 4,96 menjadi 24,20 tonC/ha (karbon); serta pada *Eucalyptus pellita* di lahan mineral dari 28,56 menjadi 91,28 m³/ha (volume), 23,50 menjadi 82,28 ton/ha (AGB), dan 11,04 menjadi 38,67 tonC/ha (karbon). Pada *Acacia crassiparva* yang variansnya tidak homogen, Welch ANOVA dan Games-Howell menunjukkan seluruh pasangan umur berbeda nyata. Pada *Eucalyptus pellita* yang variansnya homogen, One-Way ANOVA dan Tukey HSD menunjukkan seluruh pasangan umur berbeda nyata untuk biomassa dan karbon, kecuali volume antara umur 2 dan 3 tahun (Sig. = 0,051) yang mengindikasikan perlambatan riap diameter pasca penutupan tajuk. Penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu hanya mencakup umur 1–3 tahun, menggunakan satu nilai faktor bentuk dan persamaan alometrik dari sumber lain untuk masing-masing jenis, serta tidak mengukur sifat tanah dan tinggi muka air pada lokasi, sehingga perbedaan antar spesies tidak dapat diatribusikan langsung pada jenis atau tapak.

Saran

Penelitian lanjutan disarankan mencakup seumur yang lebih panjang serta data riap tahunan (MAI/CAI) agar pola akumulasi sepanjang daur dan rotasi tebang optimal dapat ditentukan secara lebih kuat. Pendugaan biomassa sebaiknya mencakup seluruh komponen atas permukaan dan didukung pengukuran destruktif untuk menyusun persamaan alometrik spesifik lokasi, serta dilengkapi data sifat tapak (sifat kimia tanah dan tinggi muka air) agar interpretasi pengaruh tapak lebih akurat di PT Arara Abadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambar R, Suwarno E, Susanti E. 2014. *Pengukuran Karbon di Hutan Tanaman*. Pekanbaru (ID): Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Lancang Kuning.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2019. *SNI 7724:2019 Pengukuran dan Penghitungan Cadangan Karbon — Pengukuran Lapangan untuk Penaksiran Cadangan Karbon Hutan*. Jakarta (ID): BSN.
- Brown S. 1997. *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer*. FAO Forestry Paper No. 134. Roma (IT): Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Dewi R. 2013. Pendugaan biomassa dan karbon tegakan *Eucalyptus pellita* di hutan tanaman PT Finnantara Intiga, Kabupaten Sintang. *Jurnal Hutan Lestari*. 1(3):1–8.
- Field A. 2018. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. 5th ed. London (UK): SAGE Publications.
- Hardiyanto EB, Inail MA, Nambiar EKS. 2021. Productivity of *Eucalyptus pellita* in Sumatra: *Acacia mangium* legacy, response to phosphorus, and site variables for guiding management. *Forests*. 12(9):1186. <https://doi.org/10.3390/f12091186>.
- Hardjana AK. 2009. Potensi biomassa dan karbon pada hutan tanaman *Acacia mangium* di HTI PT Surya Hutani Jaya, Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*. 7(4):237–249.
- Husch B, Beers TW, Kershaw JA. 2003. *Forest Mensuration*. 4th ed. Hoboken (US): John Wiley and Sons.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva (CH): IPCC.

- Irundu I, Malik A, Pitopang R. 2020. Pendugaan biomassa dan karbon tersimpan pada tegakan hutan. *Jurnal Hutan dan Masyarakat*. 12(1):49–57.
- Mindawati NA, Indrawan A, Mansur I, Rusdiana O. 2010. Kajian pertumbuhan tegakan *Eucalyptus* di Sumatera Utara. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 7(1):39–50.
- Montgomery DC. 2017. *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed. Hoboken (US): John Wiley and Sons.
- Munir E. 2021. Hubungan volume pohon dengan cadangan karbon pada tegakan HTI. *Jurnal Agriment*. 6(1):142–150.
- Noor MS, Sidiyasa K, Karyati. 2020. Analisis cadangan karbon pada tanaman reklamasi lahan bekas pertambangan batubara di PT Borneo Indobara. *Jurnal Hutan Tropis*. 8(1):99–108.
- Palimbong A, Muin A, Yani A. 2023. Pertumbuhan *Acacia crassicaarpa* pada lahan gambut dengan perlakuan inokulasi *Rhizobium*. *Jurnal Sylva Lestari*. 11(1):1–12.
- Pamoengkas P, Maharani R. 2018. Pertumbuhan *Eucalyptus pellita* F. Muell pada berbagai kondisi tapak di lahan mineral. *Jurnal Silvikultur Tropika*. 9(2):112–120.
- Parinduri L, Parinduri T. 2020. Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*. 5(2):88–92.
- Pearson T, Walker SM, Brown S. 2005. *Sourcebook for Land Use, Land-Use Change and Forestry Projects*. Arlington (US): Winrock International and the BioCarbon Fund.
- [PP] Peraturan Pemerintah Nomor 4 Tahun 2004 tentang Perencanaan Kehutanan. Jakarta (ID): Sekretariat Negara.
- Razali NM, Wah YB. 2011. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*. 2(1):21–33.
- Riya, Astiani D, Dewantara I. 2023. Karbon tersimpan pada tegakan *Acacia crassicaarpa* di Hutan Tanaman Industri PT Kalimantan Subur Permai Kabupaten Kubu Raya. *Jurnal Hutan Lestari*. 11(3):565–579.
- Simon H. 2007. *Metoda Inventore Hutan*. Yogyakarta (ID): Pustaka Pelajar.
- Supangat AB. 2012. Produksi biomassa dan akumulasi hara pada lahan hutan tanaman *Eucalyptus pellita* F. Muell umur empat tahun di Riau. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*. 19(2):174–183.
- Valentina R, Taufik M, Yoza D. 2014. Pengaruh tinggi muka air tanah dan ukuran serat tanah gambut terhadap perakaran dan pertumbuhan tanaman akasia (*Acacia crassicaarpa*). *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Pertanian Universitas Riau*. 1(2):1–15.
- Yuniawati Y, Budiaman A, Elias E. 2011. Estimasi potensi biomassa dan massa karbon hutan tanaman *Acacia crassicaarpa* di lahan gambut. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 29(4):343–355.