

# PERAN AGROFORESTRI KOPI ARABIKA DALAM PENYERAPAN KARBON DI PERHUTANAN SOSIAL DESA KEKUYANG, ACEH TENGAH

*The Role of Arabica Coffee Agroforestry in Carbon Sequestration in Social Forestry in Kekuyang Village, Central Aceh*

Jumadil Akhir<sup>1\*</sup>, Farid Wajdi Rizaka<sup>1</sup>, Dahlan<sup>1</sup>, Tuti Arlita<sup>1</sup>, Hairul Basri<sup>2</sup>

(Diterima 26 September 2025 /Disetujui 11 Desember 2025)

## ABSTRACT

*Arabica coffee is one of the world's leading coffee species that grows optimally in tropical highland areas, such as Central Aceh, and is often cultivated in agroforestry systems. Coffee agroforestry not only increases agricultural productivity but also plays a vital role in carbon sequestration and environmental conservation through the presence of shade trees that store carbon in biomass. This system is globally recognized as a climate change mitigation strategy and supports ecological balance. These places are included in the 568 ha Social Forestry area, has great potential for sustainable coffee agroforestry development. This study aims to analyze the potential carbon stocks and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) absorption in the Social Forestry area of Kekuyang Village, Central Aceh Regency. Data were collected using a vegetation inventory method in 28 observation plots measuring 20 m × 20 m. Tree diameter data were used to calculate biomass using allometric equations, which were then converted into carbon stocks and  $\text{CO}_2$  absorption. The results showed a total aboveground biomass (AGB) of 55,439.20 kg, with an estimated carbon stock of 26,135.74 kg from the total area of the research plot. The potential for carbon dioxide absorption reached 85.64 tons/ha after conversion. The plant species with the largest contribution to carbon stocks was lamtoro (*Leucaena leucocephala*), followed by avocado (*Persea americana*) and Arabica coffee (*Coffea arabica*). The coffee agroforestry system in Kekuyang Village has proven to be ecologically effective in storing carbon and has the potential to become a model for sustainable land management that supports climate change mitigation.*

**Keywords:** agroforestry, carbon stocks, arabica coffee, climate change, potential, social forestry

## ABSTRAK

Kopi arabika (*Coffea arabica*) merupakan salah satu spesies kopi unggulan dunia yang tumbuh optimal di daerah tropis dataran tinggi, seperti Aceh Tengah, dan sering dibudidayakan dalam sistem agroforestri. Agroforestri kopi tidak hanya meningkatkan produktivitas pertanian, tetapi juga berperan penting dalam penyerapan karbon dan konservasi lingkungan melalui keberadaan pohon penaung yang menyimpan karbon dalam biomassa. Sistem ini diakui secara global sebagai strategi mitigasi perubahan iklim dan mendukung keseimbangan ekologi serta ekonomi masyarakat. Desa Kekuyang di Aceh Tengah, yang masuk dalam kawasan Perhutanan Sosial seluas 568 ha, memiliki potensi besar dalam pengembangan agroforestri kopi yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi cadangan karbon dan serapan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) pada kawasan Perhutanan Sosial Desa Kekuyang, Kecamatan Ketol, Kabupaten Aceh Tengah. Pengumpulan data dilakukan dengan metode inventarisasi vegetasi pada 28 plot pengamatan berukuran 20 m × 20 m. Data diameter pohon digunakan untuk menghitung biomassa menggunakan persamaan allometrik, yang kemudian dikonversi menjadi cadangan karbon dan serapan  $\text{CO}_2$ . Hasil penelitian menunjukkan total biomassa di atas permukaan tanah (AGB) sebesar 55.439,20 kg, dengan estimasi cadangan karbon sebesar 26.135,74 kg dari total luasan plot penelitian. Potensi serapan karbon dioksida mencapai 85,64 ton/ha setelah dikonversi. Jenis tanaman dengan kontribusi terbesar terhadap cadangan karbon adalah lamtoro (*Leucaena leucocephala*), disusul oleh alpukat (*Persea americana*) dan kopi Arabika (*C. arabica*). Sistem agroforestri kopi di Desa Kekuyang terbukti efektif secara ekologis dalam menyimpan karbon dan berpotensi menjadi model pengelolaan lahan berkelanjutan yang mendukung mitigasi perubahan iklim.

Kata kunci: agroforestri, cadangan karbon, kopi arabika, perubahan iklim, perhutanan sosial, potensial

<sup>1</sup> Department of Forestry, Agriculture Faculty, University of Syiah Kuala, Banda Aceh

\* Correspondence author:

e-mail: [jumadilakhirbb@usk.ac.id](mailto:jumadilakhirbb@usk.ac.id)

<sup>2</sup> Department of Soil Science, Agriculture Faculty, University of Syiah Kuala, Banda Aceh

## PENDAHULUAN

Kopi arabika (*C. arabica*) merupakan salah satu spesies kopi yang paling banyak dibudidayakan di dunia. Namun karena kepekaannya terhadap perubahan iklim dan penyakit, kopi arabika (*C. arabica*) membutuhkan perawatan intensif agar menghasilkan biji berkualitas tinggi dengan cita rasa yang sempurna (Saputri *et al.*, 2020). Kopi, khususnya arabika (*C. arabica*), sering ditanam dalam sistem agroforestri karena dapat tumbuh dengan baik di bawah naungan pohon, yang memberikan manfaat tambahan seperti konservasi tanah, penyerapan karbon, dan perlindungan keanekaragaman hayati (Fajri *et al.*, 2022). Agroforestri kopi arabika (*C. arabica*) menjadi salah satu model yang menarik jika dipadukan dengan pohon naungan yang sesuai. Jenis tanaman yang sering digunakan dalam agroforestri meliputi pohon penghasil kayu seperti Sengon (*Paraserianthes falcataria*) dan Mahoni (*Swietenia macrophylla*), pohon buah seperti Durian (*Durio zibethinus*) dan Alpukat (*Persea americana*), serta tanaman penghasil komoditas seperti Kopi (*Coffea spp.*) dan Kakao (*Theobroma cacao*).

Perhutanan Sosial di Desa Kekuyang dengan luasan 568 ha yang termasuk ke dalam Kelompok Tani Hutan Mumuger ini memberikan kerangka pengelolaan yang melibatkan masyarakat lokal dalam menjaga hutan sembari memanfaatkan hasil pertanian. Aceh Tengah memiliki karakteristik topografi yang sangat mendukung pertumbuhan kopi arabika (*C. arabica*). Namun demikian, kondisi lingkungan ini juga rawan terhadap degradasi hutan apabila pengelolaan lahan dilakukan secara tidak berkelanjutan. Mayoritas di Desa Kekuyang menggantungkan hidup dari sektor pertanian, khususnya kopi arabika (*C. arabica*) (Salasamuhamarram *et al.*, 2023).

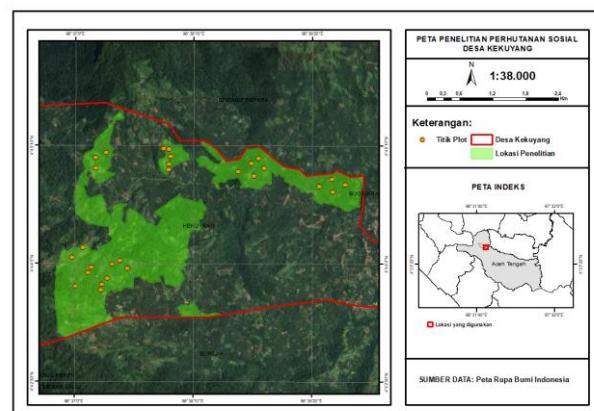
Banyak penelitian telah dilakukan, namun berfokus pada produktivitas tanaman atau kualitas biji kopi, bukan pada potensi karbon yang tersimpan di sistem agroforestrinya. Penelitian ini penting dilakukan untuk menganalisis lebih lanjut terhadap potensi karbon agroforestri kopi arabika (*C. arabica*) agar memahami dampak ekologi yang dihasilkan. Penelitian serupa telah dilakukan, namun daerah Jawa Barat, Sulawesi, atau Sumatera Selatan, sehingga hasil analisis ini akan memberikan data yang lebih akurat tentang kontribusi agroforestri terhadap pengurangan emisi karbon di kawasan Perhutanan Sosial Desa Kekuyang. Hal yang terbarukan juga terletak pada indikator keberlanjutan lingkungan sekaligus kesejahteraan masyarakat. Selain itu penelitian ini dilakukan tidak hanya akan memberikan manfaat

bagi pengelolaan lingkungan setempat, tetapi juga dapat menjadi model untuk pengembangan agroforestri di daerah lain yang memiliki potensi serupa. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi karbon agroforestri kopi arabika (*C. arabica*) di Desa Kekuyang, Aceh Tengah, dapat menjadi langkah penting dalam mewujudkan keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat.

## METODE PENELITIAN

### Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan Perhutanan Sosial Desa Kekuyang, yang terletak di Kecamatan Ketol, Kabupaten Aceh Tengah, Provinsi Aceh. Secara keseluruhan, penelitian berlangsung pada bulan Januari 2025. Pengambilan sampel dilakukan pada 28 plot yang dipilih secara *random* berdasarkan tutupan lahan agroforestri kopi pada kawasan perhutanan sosial.



Gambar 1 Peta titik plot penelitian di perhutanan sosial Desa Kekuyang

### Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam membantu penelitian ini di lapangan adalah sebagai berikut (Tabel 1).

### Pengumpulan Data atau Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif, dengan pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung di lapangan untuk memperoleh informasi mengenai jenis vegetasi, dan diameter tegakan.

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan *Microsoft Excel*. Identifikasi jenis vegetasi dilakukan dengan menanyakan langsung kepada pemandu lokal, dan kemudian diverifikasi lebih lanjut menggunakan aplikasi *PlantNet*.

Tabel 1. Alat dan bahan

No.	Nama	Keterangan
1.	Peta lokasi	Mengetahui lokasi penelitian
2.	Global Positioning System (GPS)	Menentukan dan mencatat titik koordinat
3.	Kamera	Mendokumentasikan kegiatan penelitian
4.	Pita ukur	Mengukur keliling pohon
5.	Alat tulis Meteran	Menulis data selama penelitian
6.	Tallysheet	Mengukur panjang plot
7.	Aplikasi PlantNet	Mencatat data saat di lapangan
8.		Mengidentifikasi tanaman

### Parameter Penelitian

#### 1. Diameter Pohon

Pada penelitian ini perhitungan diameter pohon saat di lapangan pada ketinggian 1,3 m dari permukaan tanah (dbh) menggunakan pita ukur, sehingga yang didapatkan berupa data keliling. Kemudian dikonversi menggunakan persamaan berikut:

$$D = \frac{K}{\pi}$$

Keterangan:

D = Diameter (cm)

K = Keliling pohon (cm)

$\pi$  = koefisien (3,14)

Adapun contoh teknik pengukuran diameter setinggi dada di berbagai kondisi pohon disajikan pada Gambar 1.

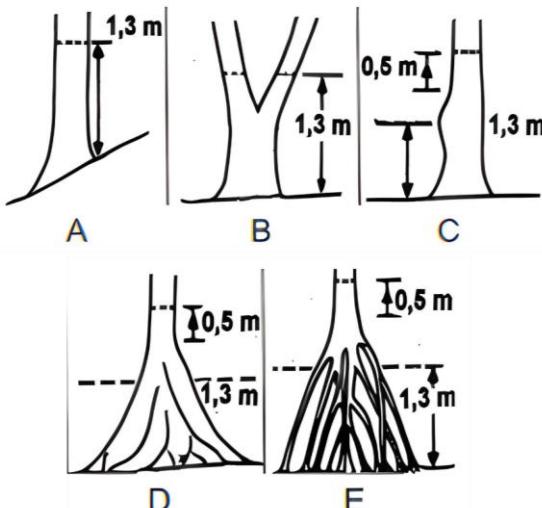
- Pohon pada lahan berlereng, letakkan ujung tongkat 1,3 m pada lereng bagian atas.
- Pohon bercabang sebelum ketinggian 1,3 m, maka ukurlah DBH semua cabang yang ada.
- Bila pada ketinggian 1,3 m terdapat benjolan, maka lakukanlah pengukuran DBH pada 0,5 m setelah benjolan.
- Bila pada ketinggian 1,3 m terdapat banir (batas akar papan) maka lakukan pengukuran DBH pada 0,5 m setelah banir. Namun bila banir tersebut mencapai ketinggian > 3 m, maka diameter batang diestimasi.
- Bila pada ketinggian 1,3 m terdapat akar-akar tunjang, maka lakukan pengukuran pada 0,5 m setelah perakaran.

#### 2. Biomassa pohon dan tanaman kopi

Pada perhitungan biomassa di dalam plot yang sudah ditentukan yaitu menggunakan model allometrik dapat dilihat pada Tabel 2.

Pada penentuan allometrik pada penelitian ini, rumus allometrik untuk tanaman kopi dalam penelitian ini mengacu pada model yang

dikembangkan oleh (Van Noordwijk *et al.*, 2002) yang telah digunakan dalam konteks agroforestri tropika khususnya di Aceh Tengah.



Gambar 2 Diameter setinggi dada pada berbagai kondisi pohon (Hairiah *et al.*, 2011)

#### 3. Potensi cadangan karbon

Mengacu pada badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI), bahwa 47% bagian biomassa vegetasi merupakan susunan dari karbon. Sehingga potensi karbon yang tersimpan di dalam vegetasi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$C = Y \times 0,47$$

Keterangan:

C = Stok karbon (kg)

Y = Biomassa di atas tanah (kg/pohon)

0,47 = % C organik

Setelah didapatkan besaran potensi cadangan karbon dalam bentuk kilogram (kg), kemudian dikonversikan ke dalam satuan ton/ha agar menyesuaikan dengan besaran potensi serapan karbon dioksida.

#### 4. Potensi serapan karbon dioksida ( $CO_2$ )

Karbon yang tersimpan dalam hutan dapat digunakan untuk mengestimasi jumlah  $CO_2$  yang diserap oleh vegetasi. Proses ini dilakukan dengan mengkonversi total nilai karbon menjadi  $CO_2$ . Perhitungan penyerapan  $CO_2$  dilakukan dengan menggunakan rumus berikut (Rahmayanti *et al.*, 2021):

$$CO_2 = C \times 3,67$$

Keterangan:

$CO_2$  = Serapan karbon dioksida (ton/ha)

C = Kandungan karbon persatu luas (ton/ha)

3,67 = Konstanta untuk konversi unsur C ke  $CO_2$

Tabel 2. Model allometrik pendugaan biomassa

Jenis tanaman	Persamaan allometrik	R <sup>2</sup>	Sumber
Tanaman kopi	$Y = 0,281 D^{2,06}$	0,95	(Van Noordwijk <i>et al.</i> , 2002)
Tegakan pohon naungan	$Y = 0,11 D^{2,62}$	0,90	(Ketterings <i>et al.</i> , 2001)

Keterangan:

Y = Biomassa di atas tanah (kg/pohon)

D = Diameter setinggi dada (cm)

### Pengolahan dan Analisis Data

Data dalam penelitian ini dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif untuk memberikan gambaran yang jelas tentang hasil pengukuran. Proses analisis dilakukan dengan mengolah data menggunakan Microsoft Excel, yang membantu menghitung, dan menyajikan data secara rapi. Hasilnya ditampilkan dalam bentuk tabel untuk memudahkan pemahaman data secara rinci. Pendekatan ini memungkinkan penelitian menyajikan informasi yang jelas dan terukur, sehingga hasilnya dapat digunakan untuk mendukung pengelolaan Perhutanan Sosial di Desa Kekuyang, Kecamatan Ketol, Kabupaten Aceh Tengah. Dengan cara ini, data yang disajikan lebih mudah dipahami dan berguna untuk pengambilan keputusan yang berbasis bukti.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Komposisi dan Jenis Tanaman Agroforestri

Penelitian ini dilakukan di kawasan Perhutanan Sosial Desa Kekuyang, Kecamatan Ketol, Kabupaten Aceh Tengah, yang merupakan bagian dari wilayah pengelolaan Kelompok Tani Hutan (KTH) Mumuger. Sistem agroforestri yang dikembangkan di lokasi ini mengandalkan kopi arabika (*C. arabica*) sebagai tanaman utama dengan dukungan berbagai jenis tanaman penaung untuk membentuk sistem pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pengamatan dilakukan pada 28 plot berukuran 20 m × 20 m (400 m<sup>2</sup>), sehingga total luas pengamatan adalah 11.200 m<sup>2</sup> atau 1,12 hektar. Penempatan plot dilakukan secara *purposive* dengan mempertimbangkan keberagaman tutupan vegetasi dan intensitas agroforestri kopi. Data vegetasi dikumpulkan melalui inventarisasi jenis tanaman yang tumbuh dalam plot, yang mencakup tanaman utama (kopi arabika) dan tanaman penaung atau pelindung seperti lamtoro, alpukat, gamal, durian, dan lainnya. Hasil identifikasi vegetasi menunjukkan bahwa terdapat total 2.041 tanaman dari 8 jenis berbeda. Komposisi vegetasi yang beragam ini juga akan menjadi dasar penting dalam analisis potensi cadangan karbon kopi arabika (*C. arabica*).

Kopi arabika merupakan tanaman utama dalam sistem agroforestri yang diamati di kawasan Perhutanan Sosial Desa Kekuyang. Dari total 2.041

tanaman yang tercatat di 28 plot pengamatan, kopi arabika mendominasi komposisi vegetasi dengan jumlah sebanyak 1.679 tanaman, atau sekitar 82,26% dari total vegetasi. Jumlah ini menunjukkan bahwa masyarakat Desa Kekuyang sangat bergantung pada komoditas kopi sebagai sumber utama penghidupan dan produksi pertanian. Kehadiran kopi arabika dalam kegiatan agroforestri berkontribusi terhadap penyimpanan karbon, terutama melalui biomassa batang dan daun, meskipun secara struktur tanaman cenderung lebih kecil dibandingkan pohon penaung. Dari sisi ekologi, meskipun kontribusi per tanaman kopi terhadap karbon relatif kecil, namun jumlahnya yang sangat besar menjadikannya signifikan terhadap total stok karbon dalam sistem agroforestri ini. Selain itu, penanaman kopi arabika dalam pola berlapis dengan pohon penaung memberikan manfaat tambahan dalam menjaga struktur tanah dan mengurangi erosi, sekaligus meningkatkan nilai ekonomis sistem pertanian secara keseluruhan.

#### 1. Lamtoro (*L. leucocephala*)

Lamtoro merupakan salah satu jenis pohon penaung dominan yang ditemukan di sistem agroforestri kopi arabika di Desa Kekuyang. Sebanyak 286 tanaman lamtoro tercatat, menempati urutan kedua terbanyak setelah kopi. Secara ekologis, lamtoro memiliki kemampuan melakukan fiksasi nitrogen melalui simbiosis dengan bakteri *Rhizobium*, yang berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah secara alami (Hikmawati dan Prijono, 2022). Peran ini sangat penting dalam sistem agroforestri karena dapat mengurangi ketergantungan petani terhadap pupuk kimia. Selain itu, daun dan ranting lamtoro sering dimanfaatkan sebagai pakan ternak, sedangkan batangnya digunakan sebagai kayu bakar atau tiang.

#### 2. Alpukat (*P. americana*)

Tanaman alpukat juga ditemukan dalam sistem agroforestri kopi arabika sebagai pohon penaung sekaligus tanaman penghasil buah. Sebanyak 41 tanaman alpukat tercatat dalam plot pengamatan. Meskipun jumlahnya tidak sebanyak kopi atau lamtoro, alpukat memiliki peran strategis sebagai tanaman multifungsi dalam sistem agroforestri. Alpukat memiliki tajuk yang lebar dan dedaunan yang rimbun, sehingga efektif dalam memberikan

naungan terhadap tanaman kopi. Naungan ini membantu menjaga suhu dan kelembaban mikro di sekitar tanaman kopi, yang sangat penting untuk kualitas dan produktivitas biji kopi arabika (Kurniawan *et al.*, 2023). Selain fungsi naungan, alpukat juga memiliki nilai ekonomis tinggi sebagai komoditas buah, sehingga memberikan diversifikasi pendapatan bagi petani.

### 3. Gamal (*G. sepium*)

Gamal merupakan salah satu jenis tanaman penaung dalam sistem agroforestri yang dikenal dengan pertumbuhannya yang cepat serta kemampuannya memperbaiki kondisi tanah. Dalam penelitian ini, tercatat sebanyak 16 tanaman gamal di 28 plot pengamatan. Meskipun jumlahnya relatif kecil dibandingkan lamtoro atau alpukat, gamal memiliki kontribusi ekologis yang signifikan. Menurut (Kurniawan *et al.*, 2023), sebagai tanaman *leguminosa*, gamal mampu melakukan fiksasi nitrogen dari atmosfer ke dalam tanah, sangat penting dalam menjaga kesuburan tanah secara alami. Daunnya juga sering dimanfaatkan sebagai pakan ternak, sedangkan batangnya digunakan sebagai kayu bakar. Gamal berperan sebagai tanaman multifungsi yang mendukung integrasi antara kehutanan dan pertanian dalam sistem agroforestri.

### 4. Durian (*D. zibethinus*)

Durian merupakan tanaman buah yang juga berfungsi sebagai pohon penaung dalam sistem agroforestri kopi. Dalam plot pengamatan, tercatat sebanyak 11 tanaman durian. Tanaman ini memiliki tajuk yang lebar dan batang besar, sehingga mampu memberikan naungan intensif terhadap tanaman kopi di bawahnya. Durian memiliki nilai ekonomis yang tinggi karena buahnya dapat dipanen dan dijual dengan harga yang menguntungkan. Keberadaannya dalam sistem agroforestri memberikan diversifikasi komoditas yang dapat meningkatkan ketahanan ekonomi petani. Namun menurut Hikmawati dan Prijono (2022), kepadatan atau ukuran tajuk durian yang terlalu besar berpotensi mengurangi intensitas cahaya bagi tanaman kopi, sehingga perlu diatur dengan pemangkasan teratur agar keseimbangan cahaya tetap terjaga.

### 5. Jambu Biji (*Psidium guajava*)

Jambu biji ditemukan sebanyak 6 tanaman dalam sistem agroforestri kopi di Desa Kekuyang. Meskipun jumlahnya tergolong sedikit, tanaman ini memiliki peran sebagai pohon pelengkap yang memberi nilai tambah berupa hasil buah serta memberikan naungan ringan kepada tanaman kopi. Dari aspek ekologi, pohon jambu biji memiliki ukuran batang sedang dan tidak terlalu menaungi

tanaman di bawahnya secara berlebihan. Hal ini membuatnya cocok digunakan dalam sistem agroforestri yang membutuhkan keseimbangan antara cahaya dan perlindungan. Selain itu, jambu biji merupakan tanaman adaptif dan mudah tumbuh di berbagai kondisi tanah (Hikmawati dan Prijono, 2022).

### 6. Jeruk Nipis dan Kemiri

Dalam penelitian ini, masing-masing satu tanaman jeruk nipis (*Citrus aurantifolia*) dan kemiri (*Aleurites moluccanus*) ditemukan dalam plot pengamatan. Kehadiran kedua jenis tanaman ini kemungkinan merupakan hasil dari pertumbuhan alami atau penanaman terbatas oleh masyarakat sebagai sumber buah atau pelengkap lahan. Meskipun kontribusinya kecil secara kuantitas, keberadaan jenis-jenis ini menambah keanekaragaman tanaman dan memperkaya struktur vegetasi yang merupakan karakteristik khas agroforestri.

### Potensi Biomassa Agroforestri Kopi Arabika

Biomassa adalah total massa bahan organik yang tersimpan dalam tubuh tanaman, baik dalam bentuk batang, cabang, maupun daun (Sutaryo, 2009). Biomassa dalam agroforestri menjadi parameter penting karena menunjukkan kapasitas pertumbuhan dan akumulasi material hidup suatu vegetasi yang dapat dikonversi menjadi cadangan karbon. Perhitungan potensi biomassa jenis tanaman disusun secara rinci dalam bentuk tabel pada Tabel 3. Secara ilmiah, biomassa merupakan materi organik yang diperoleh dari hasil fotosintesis, tumbuhan menyerap karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dari udara dan mengubahnya menjadi senyawa organik melalui proses fotosintesis (Hairiah *et al.*, 2011). Biomassa agroforestri berperan penting dalam mengurangi tingkat emisi karbon dengan mengurangi konsentrasi  $\text{CO}_2$  di atmosfer. Perhitungan biomassa kopi arabika pada agroforestri di Perhutanan Sosial Desa Kekuyang menggunakan persamaan alometrik yang dikembangkan oleh (Van Noordwijk *et al.*, 2002). Adapun persamaan perhitungan tanaman naungan menggunakan proporsi dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Ketterings *et al.* (2001). Adapun hasil pengukuran biomassa vegetasi dari seluruh plot disajikan dalam Tabel 3.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem agroforestri kopi arabika di kawasan Perhutanan Sosial Desa Kekuyang memiliki total biomassa yang cukup tinggi. Data dari 28 plot pengamatan seluas 1,12 hektar mencatat total biomassa sebesar 55.439,20 kg. Biomassa ini tersebar pada delapan jenis tanaman berbeda, baik tanaman utama maupun penaung.

Tabel 3. Total biomassa per jenis tanaman di kawasan agroforestri kopi arabika

No.	Nama Lokal	Ilmiah	Total Biomassa (kg)
1	Lamtoro	<i>Leucaena leucocephala</i>	31.098,75
2	Alpukat	<i>Persea americana</i>	9.700,24
3	Kopi arabika	<i>Coffea arabica</i>	9.693,70
4	Durian	<i>Durio zibethinus</i>	3.265,85
5	Gamal	<i>Gliricidia sepium</i>	1.028,77
6	Jambu biji	<i>Psidium guajava L</i>	341,60
7	Kemiri	<i>Aleurites moluccanus</i>	296,23
8	Jeruk nipis	<i>Citrus aurantifolia</i>	14,06
<b>Total</b>			<b>55.439,20</b>

Jenis tanaman dengan kontribusi biomassa terbesar adalah lamtoro (*L. leucocephala*), total biomassa mencapai lebih dari 31.000 kg. Jumlah ini disebabkan oleh ukuran pohon yang besar dan jumlah tanaman yang relatif banyak, yaitu 286 pohon. Tanaman lainnya juga memberikan kontribusi signifikan adalah kopi arabika (*C. arabica*) dengan biomassa sekitar 9.600 kg dan alpukat (*P. americana*) menyimpan biomassa sekitar 9.700 kg. Tanaman seperti durian, gamal, jambu biji, dan lainnya menyumbang biomassa dalam jumlah yang lebih kecil namun tetap berkontribusi terhadap total struktur vegetasi.

#### Potensi Karbon dan Serapan Karbon pada Sistem Agroforestri Kopi Arabika

Cadangan karbon adalah jumlah karbon yang disimpan dalam biomassa tanaman hidup. Mengacu pada badan Standarisasi Nasional Indonesia (SNI), bahwa 47% bagian biomassa vegetasi merupakan susunan dari karbon. Sehingga potensi karbon yang tersimpan di dalam vegetasi dalam penelitian ini dapat dihitung dengan 0,47 yang merupakan estimasi kandungan karbon dalam biomassa kering. Selanjutnya, nilai karbon tersebut dikonversi dengan rumus yang dikembangkan oleh Rahmayanti *et al.* (2021) menjadi potensi serapan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dengan menggunakan faktor 3,67 sesuai dengan massa molekul  $\text{CO}_2$  terhadap karbon. Pada penelitian ini karbon dihasilkan dalam bentuk kilogram (kg) melalui allometrik yang digunakan seperti yang dilampirkan pada Lampiran

1, akan tetapi kemudian dikonversi menjadi ton/ha dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Cn = \frac{C}{1000} \times \frac{10000}{Lplot}$$

Keterangan:

$Cn$  = Kandungan karbon per hektar (ton/ha)

$C$  = Kandungan karbon dari biomassa pada tiap plot (kg/pohon)

$Lplot$  = Luas per plot ( $m^2$ )

Berdasarkan hasil pengukuran diameter dan konversi biomassa menggunakan rumus allometrik, diperoleh nilai total estimasi karbon tersimpan sebesar 26.135,74 kg dalam area 1,12 hektar tersebut, sebelum dikonversi dalam satuan ton/ha. Karbon ini kemudian dikonversi menjadi potensi serapan  $\text{CO}_2$  sebesar 85,64 ton/ha. Rincian hasil perhitungan karbon dan serapan karbon dioksida dapat dilihat pada Tabel 4.

Simpanan karbon tanaman lamtoro (*L. leucocephala*) merupakan penyumbang biomassa tertinggi di antara seluruh jenis tanaman yang diamati dalam plot penelitian. Simpanan karbon tanaman lamtoro (*L. leucocephala*) merupakan penyumbang biomassa tertinggi di antara seluruh jenis tanaman yang diamati dalam plot penelitian. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hairiah *et al.* (2011) menyatakan bahwa jenis pohon leguminosa seperti lamtoro memiliki potensi biomassa yang tinggi serta kemampuan fiksasi nitrogen yang mendukung pertumbuhan cepat.

Tabel 4. Hasil Perhitungan potensi karbon dan serapan  $\text{CO}_2$  di agroforestri kopi arabika

No	Nama Lokal	Nama Ilmiah	Cn (ton/ha)	$\text{CO}_2$ (ton/ha)
1	Lamtoro	<i>Leucaena leucocephala</i>	13,12	48,15
2	Alpukat	<i>Persea americana</i>	4,07	14,94
3	Kopi arabika	<i>Coffea arabica</i>	4,07	14,93
4	Durian	<i>Durio zibethinus</i>	1,37	5,03
5	Gamal	<i>Gliricidia sepium</i>	0,43	1,58
6	Jambu biji	<i>Psidium guajava L.</i>	0,14	0,53
7	Kemiri	<i>Aleurites moluccanus</i>	0,12	0,46
8	Jeruk nipis	<i>Citrus aurantifolia</i>	0,01	0,02
<b>Total</b>			<b>23,34</b>	<b>85,64</b>

Selain itu, menurut Suryani dan Dariah (2012) lamtoro dapat menghasilkan biomassa hingga 50–60 ton/ha/tahun pada sistem agroforestri intensif dan menjadikannya salah satu jenis tanaman yang paling efisien dalam menyimpan karbon. Total estimasi karbon tersimpan yang dihasilkan oleh lamtoro pada penelitian ini mencapai sebesar 13,12 ton/ha dan serapan karbon mencapai 48,15 ton/ha. Lamtoro dapat dijadikan tanaman mitigasi emisi karbon melalui proses penyerapan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang sangat tinggi. Hal ini diperkuat oleh hasil penelitian Suryani and Dariah (2012) bahwa lamtoro mampu menghasilkan biomassa tinggi pada lahan kering dan subur, sehingga efektif dalam menyimpan karbon secara signifikan.

Penelitian yang dilakukan oleh Kennedy (2024) menunjukkan bahwa lamtoro memiliki potensi simpanan karbon yang sebanding dengan pohon kehutanan primer pada sistem agroforestri intensif. Integrasi tanaman lamtoro dalam sistem agroforestri kopi arabika terbukti memberikan kontribusi yang signifikan secara ekologis, terutama dalam memperbaiki kualitas tanah dan mendukung konservasi karbon.

Tanaman alpukat (*P. americana*) juga memberikan kontribusi penting terhadap simpanan karbon dalam sistem agroforestri. Meskipun jumlah tanamannya relatif sedikit, yakni sebanyak 41 pohon, total estimasi karbon tersimpan sebesar 4,07 ton/ha dan estimasi serapan karbon sebesar 14,94 ton/ha. Selain fungsi ekologis, alpukat juga memiliki nilai ekonomis tinggi sebagai tanaman buah, sehingga berperan ganda dalam sistem agroforestri. Temuan ini diperkuat oleh penelitian Natalia *et al.* (2014) yang menyebutkan bahwa pohon buah seperti alpukat dapat berfungsi sebagai penyerap karbon yang efektif dalam sistem multistrata, khususnya ketika dikombinasikan dengan tanaman bawah seperti kopi. Selain itu, menurut Rijal *et al.* (2019) pemanfaatan tanaman buah dalam agroforestri mampu meningkatkan pendapatan petani tetapi juga memperkaya struktur vegetasi yang berperan dalam mitigasi perubahan iklim. Tanaman kopi arabika (*C. arabica*) sebagai komoditas utama dalam sistem agroforestri di Perhutanan Sosial Desa Kekuyang juga memberikan kontribusi besar terhadap simpanan karbon. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kopi arabika mampu menyimpan karbon sebesar 4,067 ton/ha, dengan estimasi serapan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) sebesar 14,93 ton/ha. Meskipun tergolong dengan biomassa tanaman yang relatif rendah dibandingkan pohon penaung, jumlah populasinya yang sangat tinggi yaitu 1679 tanaman menjadikannya kontribusi totalnya terhadap cadangan karbon menjadi sangat berarti. Fungsi ekologis kopi tidak hanya terbatas pada penyimpanan karbon,

tetapi juga pada kemampuan memperbaiki struktur tanah melalui akar yang rapat dan kontribusinya terhadap penyerapan air dan pencegahan erosi. Dari sisi ekonomi, kopi merupakan komoditas andalan masyarakat dan memiliki nilai jual yang stabil, menjadikan sistem agroforestri kopi sebagai strategi yang mengintegrasikan fungsi ekosistem dan pendapatan petani. Agroforestri berbasis kopi arabika di dataran tinggi memiliki potensi besar dalam menyimpan cadangan karbon, terutama ketika dikombinasikan dengan pohon penaung (Pramulya, 2021). Sementara itu Fajri *et al.* (2022) juga menunjukkan bahwa struktur multistrata dalam sistem kopi di Aceh Tengah secara nyata meningkatkan efisiensi penyimpanan karbon di atas permukaan tanah.

Tanaman buah lainnya yang turut berkontribusi terhadap potensi karbon adalah durian (*D. zibethinus*). Tercatat sebanyak 11 tanaman durian menghasilkan total estimasi karbon tersimpan sebesar 1,37 ton/ha dan potensi serapan karbon mencapai 5,03 ton/ha. Durian memiliki batang yang besar dan tajuk yang lebar, sehingga memungkinkan akumulasi biomassa yang tinggi dalam waktu relatif cepat. Selain memberikan manfaat ekonomi yang signifikan melalui hasil buahnya, durian juga berperan dalam meningkatkan stok karbon sistem agroforestri secara keseluruhan, terutama bila dikombinasikan dengan tanaman bawah seperti kopi arabika. Menurut penelitian oleh Natalia *et al.* (2014) pohon buah tropis seperti durian mampu menyumbang simpanan karbon yang sebanding dengan spesies pohon kehutanan jika ditanam dalam sistem agroforestri yang padat. Penambahan pohon buah dengan struktur tajuk tinggi dan biomassa besar tidak hanya mendukung mitigasi perubahan iklim, tetapi juga memperkuat diversifikasi ekonomi petani (Rijal *et al.*, 2019).

Sementara itu, tanaman gamal (*G. sepium*), meskipun hanya berjumlah 16 tanaman, menunjukkan efisiensi yang cukup tinggi dalam menyimpan karbon. Total estimasi karbon tersimpan sebesar 0,43 ton/ha dan potensi serapan karbon mencapai 1,58 ton/ha. Hal ini menunjukkan bahwa gamal adalah spesies penaung yang efektif dalam menyumbang simpanan karbon meskipun dalam jumlah terbatas. Selain itu, gamal juga dikenal sebagai tanaman *leguminosa* yang mampu memperbaiki kesuburan tanah melalui proses fiksasi nitrogen. Penelitian oleh Widiyanto (2019) menyatakan bahwa *G. sepium* memiliki laju pertumbuhan yang cepat dan adaptasi yang baik pada lahan marginal, menjadikannya efektif dalam mendukung sistem agroforestri yang berkelanjutan. Selain itu, menurut Insusanty *et al.* (2017) gamal berkontribusi terhadap peningkatan kandungan karbon tanah melalui guguran daun dan limbah

organik yang cepat terdekomposisi, sehingga memberikan manfaat ganda baik dari segi penyerapan karbon maupun perbaikan kualitas tanah.

Tanaman jambu biji (*P. guajava*) juga tercatat memberikan kontribusi terhadap simpanan karbon, meskipun dalam jumlah yang relatif kecil. Dari total 6 tanaman, jambu biji menyimpan estimasi karbon tersimpan sebesar 0,14 ton/ha dan potensi serapan karbon mencapai 0,53 ton/ha. Meskipun kontribusinya terhadap total stok karbon tidak dominan, keberadaan jambu biji tetap penting dalam memperkaya keanekaragaman jenis vegetasi dalam sistem agroforestri. Selain itu, tanaman ini juga menyediakan buah bernilai ekonomi yang dapat dimanfaatkan oleh petani secara langsung, sehingga tetap memberikan manfaat dari sisi produksi dan ketahanan pangan lokal. Penelitian oleh Luth dan Setiyono (2019) menunjukkan bahwa tanaman buah berbatang kecil seperti jambu biji memiliki potensi karbon yang relatif rendah, tetapi tetap berperan sebagai pelengkap dalam struktur vertikal sistem agroforestri. Peran ini terutama penting dalam meningkatkan keanekaragaman dan resilien ekosistem terhadap gangguan iklim maupun hama.

Dua jenis tanaman lainnya, yaitu jeruk nipis (*Citrus aurantifolia*) dan kemiri (*Aleurites moluccanus*), masing-masing hanya ditemukan satu tanaman dalam plot pengamatan. Tanaman jeruk nipis menyimpan estimasi karbon tersimpan sebesar 0,01 ton/ha dan potensi karbon sebesar 0,02 ton/ha, sedangkan kemiri menyimpan karbon sebesar 0,12 ton/ha dan potensi serapan karbon mencapai 0,46 ton/ha. Meskipun kedua tanaman ini tidak memiliki peran dominan sebagai pohon penaung utama, kehadirannya tetap memberikan kontribusi positif terhadap keanekaragaman jenis vegetasi yang merupakan salah satu indikator penting dalam sistem agroforestri berkelanjutan. Menurut Natalia *et al.* (2014) kehadiran tanaman minor seperti jeruk dan kemiri dalam sistem multistrata mampu memperkuat ketahanan ekologis lahan serta memberikan hasil sampingan yang bermanfaat bagi petani. Sementara itu, Supriadi dan Pranowo (2015) menekankan bahwa meskipun kontribusi karbon tanaman minor rendah, keberadaannya dapat meningkatkan kompleksitas ekosistem dan efisiensi pemanfaatan ruang dalam agroforestri.

Secara umum, keberagaman jenis tanaman dalam sistem agroforestri kopi arabika di Desa Kekuyang memberikan kontribusi besar terhadap simpanan karbon dan stabilitas ekosistem. Kombinasi antara tanaman utama, yaitu kopi arabika dengan berbagai jenis tanaman penaung seperti lamtoro, alpukat, gamal, durian, jambu biji,

serta jenis minoritas seperti jeruk nipis dan kemiri membentuk struktur vegetasi multistrata yang kompleks. Struktur ini memungkinkan terjadinya akumulasi biomassa yang lebih merata dan optimal di berbagai lapisan kanopi, sekaligus memperkaya keanekaragaman vegetasi yang penting untuk resilien ekosistem (Natalia *et al.*, 2014).

Jenis-jenis buah seperti durian dan jambu biji menambah nilai ekonomi sistem, sedangkan tanaman minoritas seperti kemiri dan jeruk tetap memiliki fungsi ekologis dalam menjaga kompleksitas vegetasi. Keberagaman fungsi ini menunjukkan bahwa sistem agroforestri kopi tidak hanya berperan sebagai strategi konservasi karbon, tetapi juga sebagai pendekatan pertanian adaptif dan produktif yang mendukung ketahanan pangan dan penghidupan masyarakat lokal. Dengan demikian, sistem agroforestri kopi arabika di Desa Kekuyang dapat dikategorikan sebagai praktik berbasis lahan yang efektif untuk mitigasi perubahan iklim, sekaligus mendukung keberlanjutan ekonomi dan ekologi kawasan perhutanan sosial.

Hal ini sebanding dengan penelitian agroforestri kopi arabika di Aceh yang dilakukan oleh Pramulya (2021) menunjukkan bahwa model agroforestri kopi arabika berpotensi mengurangi emisi melalui penyerapan karbon. Stok karbon tumbuhan di kebun agroforestri kopi di dataran tinggi Hayo menunjukkan karbon dalam tanaman kopi dan jenis tanaman lainnya berasa pada rata-rata 71.052 ton C/ha. Hal ini tentunya menunjukkan bahwa agroforestry mempunyai potensi yang besar dalam penyerapan karbon, oleh karena itu perlu adanya penelitian lebih lanjut di Kawasan hutan kemasayarakatan yang berskema sebagai Perhutanan Sosial.

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Total biomassa tanaman di kawasan agroforestri kopi arabika Desa Kekuyang, Aceh Tengah sebesar 55.439,20 kg, dengan estimasi cadangan karbon sebesar 26.135,74 kg dari total luasan plot penelitian. Biomassa per jenis tanaman tertinggi ditemukan pada tanaman lamtoro yaitu sebesar 31.098,75 kg, sedangkan terendah ditemukan pada biomassa tanaman jeruk nipis yaitu sebesar 14,06 kg. Selanjutnya diperoleh hasil perhitungan potensi serapan CO<sub>2</sub> dari jenis tanaman yang terdapat di kawasan agroforestri kopi arabika sebesar 85,64 ton/ha, dengan serapan CO<sub>2</sub> tertinggi terdapat pada tanaman lamtoro yaitu sebesar 48,15 ton/ha dan terendah ditemukan pada tanaman jeruk nipis yaitu sebesar 0,02 ton/ha.

### Saran

Hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar untuk menyusun kebijakan dan program yang mendorong pengelolaan agroforestri berkelanjutan, termasuk potensi partisipasi masyarakat dalam skema insentif berbasis karbon seperti karbon kredit. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menambah parameter seperti keterkaitan antara jenis plot yang dominan dengan yang tidak, mengukur cadangan karbon pada biomassa bawah tanah (akar), serasah, serta kandungan karbon tanah agar perhitungan total stok karbon lebih komprehensif.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada konsorsium Katalis (Kolaborasi Penelitian Strategis) *Cicorest Coffee* Indonesia yang telah membantu dalam mendanai penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Fajri, M., Wijayanto, N. and Hilwan, I. (2022) Komposisi, struktur dan cadangan karbon pada agroforestri kopi Arabika di Kabupaten Aceh Tengah, Aceh, *Jurnal Agrotek Lestari*, 8(1): 98–106.
- Hairiah, K., Ekadinata, A., Sari, R.R. and Rahayu, S. (2011) *Petunjuk Praktis Pengukuran Cadangan Karbon*. 2nd ed. Bogor: World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Hikmawati, R.F. and Prijono, S. (2022) Analisis stabilitas agregat dan sifat fisik tanah dengan penaung berbeda pada sistem agroforestri di lahan kopi Sumbermanjing Wetan, Kabupaten Malang, *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 9(2): 405-412. <https://doi.org/10.21776/ub.jts.1.2022.009.2.21>
- Insusanty, E., Ikhwan, M. and Sadjati, E. (2017) Kontribusi agroforestri dalam mitigasi gas rumah kaca melalui penyerapan karbon, *Jurnal Hutan Tropis*, 5(3): 181–187.
- Kennedy, P.S.J. (2024) Kajian mengenai pemanfaatan perhutanan sosial dalam perdagangan karbon di Indonesia untuk menghadapi perubahan iklim, *Jurnal X*, 9(1): 106–120.
- Ketterings, Q.M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y. and 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): 199–207. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6).
- Kurniawan, S., Kusumawati, I.A., Prayogo, C., Nuraini, Y., Nugroho, G.A., Purnamasari, E., Mardiani, M.O. and Hairiah, K. (2023) Pendampingan kelompok tani hutan untuk perbaikan manajemen lahan agroforestri kopi di Hutan Pendidikan Universitas Brawijaya (UB Forest), *Agrimas: Jurnal Pengabdian Masyarakat Bidang Pertanian*, 2(1): 43–50. <https://doi.org/10.25047/agrimas.v2i1>
- Luth, F. and Setiyono, H. (2019) Kemampuan agroforestri berbasis kopi (*Coffea arabica*) dalam menyimpan cadangan karbon, *Paspalum: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 7(1): 34–41. <https://doi.org/10.35138/paspalum.v7i1.109>
- Maulidin, Anhar, A. and Subhan. (2023) Pendugaan cadangan karbon di atas permukaan tanah pada hutan lindung di KPH Wilayah II Aceh, *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 8(2): 562–573. [www.jim.unsyiah.ac.id/JFP](http://www.jim.unsyiah.ac.id/JFP)
- Natalia, D., Yuwono, S.B. and Qurniati, R. (2014) Potensi penyerapan karbon pada sistem agroforestri di Desa Pesawaran Indah Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung, *Sylva Lestari*, 2(1): 11–20.
- Pramulya, R. (2021). Desain Sistem Pertanian Dan Agroindustri Kopi Arabika Gayo Berkelanjutan Di Provinsi Aceh. *Jurnal Teuku Umar. Aceh*: 143–167.
- Rahmayanti, M.A., Jauhari, A. and Fitriani, A. (2021) Estimasi stok karbon dan serapan CO<sub>2</sub> di area revegetasi PIT Mangkalapi PT Arutmin Indonesia Tambang Batulicin, *Jurnal Sylva Scientiae*, 4(5): 902–909.
- Rijal, S., Bactiar, B., A, C. and Ardiansyah, T. (2019) Pengembangan agroforestry kopi dalam mendukung peran hutan di kawasan highland Kabupaten Jeneponto, *Jurnal Hutan dan Masyarakat*, 11(2): 151–162. <https://doi.org/10.24259/jhm.v11i2.6030>
- Salasamuhamram, F., Marsudi, E. and Baihaqi, A. (2023) Analisis risiko rantai pasok kopi Arabika Gayo menggunakan metode House of Risk di Kabupaten Aceh Tengah, *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 8(3): 177–185. [www.jim.unsyiah.ac.id/JFP](http://www.jim.unsyiah.ac.id/JFP)
- Saputri, M., Lioe, H.N. and Wijaya, C.H. (2020) Pemetaan karakteristik kimia biji kopi Arabika Gayo dan Robusta Gayo, *Jurnal Teknologi dan*

- Industri Pangan*, 31(1): 76–85.  
<https://doi.org/10.6066/jtip.2020.31.1.76>
- Sugiyono. (2013) *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*. 19th ed. Bandung: Alfabeta.
- Supriadi, H., Astutik, D. and Sobari, I. (2022) The role of agroforestry based cocoa on climate change mitigation: A review, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 974(1): p. 012135.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/974/1/012135>
- Supriadi, H. and Pranowo, D. (2015) Prospek pengembangan agroforestri berbasis kopi di Indonesia, *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 14(2): 135–150.
- Suryani, E. and Dariah, A. (2012) Peningkatan produktivitas tanah melalui sistem agroforestri, *Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian*, 6(2): 101–109.
- Sutaryo, D. (2009) *Perhitungan Biomassa*. Bogor: Wetlands International Indonesia Programme.
- Van Noordwijk, M. et al. (2002) “Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis,” *Science In China Series C Life Sciences-English Edition-*, 45(SUPP), pp. 75–86.
- Wang, C., Liu, S., Zhu, Y., Smith, A.R., Ning, Y. and Deng, D. (2024) Aboveground carbon sequestration of Cunninghamia lanceolata forests: Magnitude and drivers, *Forest Ecosystems*, 11.  
<https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100165>
- Widiyanto, A. (2019) Preferensi petani terhadap jenis tanaman bawah pada sistem agroforestri di perhutanan sosial, *Fakultas Kehutanan dan Lingkungan*, pp. 33–40.
- Wilujeng, S., Darliana, I., Solihat, R.F., Rohmat, T. and Susila, R. (2021) Pertumbuhan anakan kopi (*Coffea arabica* Lin.) berbasis sistem agroforestri di Hutan Rakyat Cimarias Sumedang, *Jurnal Hutan Tropis*, 9(1).
- Wulandari, C., Harianto, S.P. and Novasari, D. (2020) *Pengembangan Agroforestri yang Berkelaanjutan dalam Menghadapi Perubahan Iklim*. In: Pramana, R. (ed.) Pusaka Media.
- Yasin, G., Nawaz, M.F., Sinha, D., Qadir, I., Altaf, M., Ashraf, M.N., Soufan, W., Mammadov, A., Zulfiqar, U. and Rahman, S.U. (2024) Agroforestry status, services, and its role in climate change mitigation through carbon sequestration under semi-arid conditions, *Trees, Forests and People*, 17.  
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100640>