

**POTENSI SIMPANAN KARBON SISTEM AGROFORESTRI KOPI ARABIKA GAYO
SEBAGAI UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM
DI KABUPATEN BENER MERIAH**

***THE POTENTIAL OF CARBON STORAGE IN THE GAYO ARABICA COFFEE
AGROFORESTRY SYSTEM AS A CLIMATE CHANGE MITIGATION EFFORT
IN BENER MERIAH REGENCY***

¹Dedi Rahman, ^{2*}Halus Satriawan, dan ³Ernawita

¹Mahasiswa Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Universitas Almuslim

²Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Universitas Almuslim

³Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Universitas Almuslim

email : halussatriawan@umuslim.ac.id

Abstract

Climate change poses a growing threat to global coffee production, while agroforestry systems are increasingly recognized for their ecological and economic benefits, including their potential to enhance carbon sequestration. This study aimed to analyze the carbon stock of the Gayo coffee agroforestry system in Bener Meriah Regency. Field data were collected using a purposive sampling approach based on canopy density and accessibility, covering 16 plots measured between July and September 2024. Carbon estimation was conducted using the RaCSA method developed by ICRAF. The results show that Gayo coffee agroforestry represents a complex system with diverse plant species contributing to carbon storage. The highest carbon stock is recorded for Petai (Parkia speciosa) at 28.98 ton C/ha, while the lowest occurs in red chili (Capsicum annuum L.) at 0.034 ton C/ha. The total measured carbon stock reaches 2,115.072 ton C, with an average of 124.416 ton C/ha. These findings demonstrate that the Gayo coffee agroforestry system provides a substantial contribution to climate change mitigation through aboveground carbon storage. The study concludes that enhancing agroforestry-based coffee farming has ecological and economic benefits and strengthens opportunities for implementing low-carbon agricultural certification and social forestry programs. Future research may further explore belowground carbon and long-term carbon dynamics across different management intensities.

Keywords: agroforestry, carbon stock, climate change mitigation, Gayo coffee, RaCSA method

Abstrak

Perubahan iklim semakin mengancam produksi kopi global, sementara sistem agroforestri semakin diakui karena manfaat ekologi dan ekonominya, termasuk potensinya dalam meningkatkan penyerapan karbon. Studi ini bertujuan untuk menganalisis cadangan karbon sistem agroforestri kopi Gayo di Kabupaten Bener Meriah. Data lapangan dikumpulkan menggunakan pendekatan sampling purposif berdasarkan kepadatan kanopi dan aksesibilitas, mencakup 16 plot yang diukur antara Juli dan September 2024. Perhitungan karbon dilakukan menggunakan metode RaCSA yang dikembangkan oleh ICRAF. Hasil menunjukkan bahwa sistem agroforestri kopi Gayo merupakan

sistem kompleks dengan berbagai spesies tumbuhan yang berkontribusi pada penyimpanan karbon. Cadangan karbon tertinggi tercatat pada Petai (*Parkia speciosa*) sebesar 28,98 ton C/ha, sementara yang terendah pada cabai merah (*Capsicum annuum L.*) sebesar 0,034 ton C/ha. Total cadangan karbon yang diukur mencapai 2.115,072 ton C, dengan rata-rata 124,416 ton C/ha. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem agroforestri kopi Gayo memberikan kontribusi signifikan dalam mitigasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon di atas tanah. Studi ini menyimpulkan bahwa peningkatan pertanian kopi berbasis agroforestri memiliki manfaat ekologi dan ekonomi, serta memperkuat peluang untuk menerapkan sertifikasi pertanian rendah karbon dan program kehutanan sosial. Penelitian di masa depan dapat lebih mengeksplorasi karbon di bawah tanah dan dinamika karbon jangka panjang di berbagai intensitas pengelolaan.

Kata kunci: Agroforestri, cadangan karbon, perubahan iklim, mitigasi, kopi gayo, metode RaCSA

PENDAHULUAN

Kopi termasuk komoditas pertanian yang memiliki nilai perdagangan global besar (dua per tiga dari perdagangan minyak bumi dan gas) dan produksi meningkat 200 % dibandingkan tahun 1950 (Rega & Ferranti, 2019). Konsumsi kopi masih mengalami pertumbuhan di negara pengimpor kopi dan mulai meningkat minat konsumsi kopi di negara produsen kopi. Namun produksi kopi jangka Panjang kemungkinan tidak dapat memenuhi permintaan kopi dunia. Produksi kopi dunia diperkirakan menurun dikarenakan pengaruh langsung dan tidak langsung dari perubahan iklim (Bilen et al. 2022). Peningkatan suhu dan perubahan pola musim hujan menyebabkan pertumbuhan kopi terganggu. Perubahan iklim menyebabkan kesesuaian lahan kopi berkurang (Moreira et al. 2020; Ovalle-Rivera et al. 2015) dan semakin luasnya lahan berubah menjadi habitat bagi Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) kopi (Avelino et al., 2015). Penyebaran hama penggerek utama kopi, *Hypothenemus hampei* telah mencapai perkebunan kopi di Indonesia, Uganda dan Tanzania (Langkai et al., 2023).

Serangan OPT ditemukan tahun 2010 dan sejak 2015 telah menyebar ke seluruh kecamatan di Aceh Tengah dan Bener Meriah (Pramulya et al., 2019). Costa Rica menjadikan pertanian sebagai bagian dari rencana dan aksi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Costa Rica terlibat progresif menurunkan emisi gas rumah kaca sektor pertanian kopi bersama sektor lainnya melalui program “carbon neutral” (Birkenberg & Birner, 2018).

Pertanian kopi Arabika Gayo dengan model agroforestri, sama halnya dengan sistem agroforestri tanaman lainnya memiliki potensi keberlanjutan pertanian dan agroindustri dari perspektif ekologi industri, terutama dalam memitigasi perubahan iklim (Fisher-Ortiz et al. 2022). Pemanfaatan biomassa hasil pemangkasan dan pembersihan gulma dari kebun menjadi sumber bahan organik bagi tanah yang memiliki fungsi ekonomi dengan menyediakan unsur makro dan mikro bagi tanaman kopi untuk mengantikan pupuk kimia (Thomas et al. 2024). Selain itu, biomassa sebagai bahan organik memiliki fungsi ekologi untuk kondisi pemanfaatan

tanah yang mempengaruhi pertumbuhan akar, sifat fisika (porositas tanah dan kapasitas menyimpan air) dan kesuburan tanah (pH tanah), daur ulang nutrisi, dan meningkatkan ketahanan tanaman dari serangan OPT (Hameed et al., 2020).

Pertanian kopi Arabika Gayo memiliki model perkebunan agroforestri umumnya tanaman penaung adalah lamtoro. Petani mengenal berbagai jenis lamtoro yang dibedakan berdasarkan cepat atau lambatnya pertumbuhan tanaman pada ketinggian di atas permukaan laut (dpl) tertentu dan ketahanan terhadap penyakit. Keberadaan lamtoro berperan dalam proses ekologi yang memberikan manfaat bagi lingkungan agroforestri kopi. Lamtoro yang berfungsi sebagai tanaman fiksasi nitrogen menyuplai kebutuhan nutrisi bagi tanaman kopi dan memberikan lingkungan alamiah yang mendukung berkembangnya aktifitas ekosistem mikroba dan proses mineralisasi unsur hara di lahan. Petani menerapkan manajemen perkebunan organik dengan teknik sebagai berikut, yaitu: 1). menggunakan hasil pangkas tanaman dan limbah pengolahan primer sebagai bahan organik yang ditempatkan di areal perkebunan, dan 2) tidak menggunakan bahan kimia dalam pemupukan, penanggulangan gulma dan pemberantasan hama penyakit.

Perkebunan kopi berkelanjutan menekankan produksi dalam jangka panjang dan tetap menguntungkan serta bersifat ramah lingkungan. Sistem ini tidak hanya menghasilkan biji kopi, tetapi juga memberikan layanan kepada lingkungan seperti konservasi tanah dan air serta

konservasi keanekaragaman hayati. Proses ekologis seperti siklus nutrisi dan air, aliran energi, dan mekanisme pengaturan populasi berfungsi mirip dengan yang terjadi di hutan tropis (Hernandez-Aguilera et al., 2019) penting dilakukan untuk membantu pemetaan stok karbon secara detail pada setiap komponen agroforestri kopi Gayo, analisis stratifikasi vegetasi, pengukuran kontribusi dominan tanaman buah-buahan dalam penyimpanan karbon, serta identifikasi jenis tanaman penyimpan karbon tertinggi dan terendah. Penelitian ini juga memberikan estimasi aktual stok karbon pada 16 plot menggunakan metode RaCSA dan menghubungkan hasilnya dengan peluang kebijakan mitigasi perubahan iklim, termasuk sertifikasi *low-carbon coffee*. Selain itu, mengingat pada dekade ini konsumen kopi menaruh perhatian terhadap kondisi sosial-ekonomi dan ekologi yang dihadapi oleh petani di negara-negara sedang berkembang untuk mendorong pertumbuhan berkelanjutan yang berorientasi pada standar tertentu (ICO, 2019). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai cadangan karbon pada sistem agroforestri kopi gayo di Kabupaten Bener Meriah.

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli – September 2024 di wilayah Kabupaten Bener Meriah Provinsi Aceh. Lokasi penelitian yang dipilih adalah perkebunan kopi gayo yang di dalamnya terdapat tanaman pelindung/penaung dan tanaman campuran lainnya.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi GPS, hygrometer, luxmeter, pH meter, meteran panjang, tali rafia, pasak, pita meteran, gram, gergaji kecil, gunting stek, oven, foil aluminium, alat tulis, termasuk blangko penelitian, kantong plastik (wadah contoh), ayakan, dan kamera. Selain itu, bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pohon tegakan, tumbuhan bawah, pohon mati, dan serasah yang ditemukan di lahan agroforestri.

Metode Penelitian

Data di lapangan dikumpulkan melalui metode purposive sampling yang direncanakan, yang didasarkan pada sebaran persentase kerapatan tajuk dan aksesibilitas. Data dikumpulkan pada 16 plot. Metode pengumpulan karbon cepat RaCSA digunakan untuk menghitung simpanan karbon pohon kopi. Metode ini dikembangkan oleh ICRAF (International Centre for Research in Agroforestry). Ukuran berat biomassa yang kering di atas permukaan tanah dilakukan dalam petak berukuran 40 m x 5 m (Hairiah et al., 2011).

Analisis Data

Pengukuran bobot kering dimulai dengan mengukur nekromassa dan biomassa tumbuhan bawah, atau understorey, serta biomassa tanaman pokok, penaung, atau pohon lainnya. Pengukuran cadangan karbon dilakukan tiga kali di setiap lokasi. Terlebih dahulu, berat kering tanaman dihitung dengan mengukur diameter batangnya pada ketinggian 130 sentimeter di atas tanah untuk tanaman penaung dan kopi. Selama

pelaksanaan di lapangan, tanaman TBM 1 dan TBM 2 diukur diameternya dengan jangka sorong; tanaman dengan diameter lebih dari 5 cm diukur dengan menggunakan meteran dan kemudian dikonversi menjadi diameter batang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem Agroforestri

Tanaman kopi, yang merupakan tanaman tahunan, seringkali dikelola bersama dengan tanaman atau pohon lain untuk keuntungan ekonomi dan ekologis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem perkebunan kopi di Bener Meriah termasuk agroforestri kompleks dengan kombinasi tanaman kopi, pohon penaung, tanaman buah, dan tanaman semusim. Komposisi ini menggambarkan sistem ekologi yang menyerupai hutan sekunder dengan strata tajuk berlapis, yang tidak hanya mendukung keberlanjutan produksi tetapi juga berperan dalam penyerapan karbon atmosferik (CO₂). Menurut Ullah et al. (2014), kompleksitas vegetasi menentukan kapasitas penyerapan karbon; semakin beragam dan berstrata tajuk, maka semakin besar pula cadangan karbon yang dapat disimpan di biomassa. Jika dibandingkan dengan sistem agroforestri sederhana, sistem agroforestri yang lebih kompleks dapat menyimpan lebih banyak karbon (Lestari & Dewi, 2023). Dengan demikian, agroforestri kopi di Bener Meriah memainkan peran penting dalam siklus karbon. Studi ini juga menemukan bahwa pohon penghasil kayu-buah Petai (*Pithecellobium speciosum*) dan Jengkol (*Archidendron pauciflorum*) memiliki cadangan karbon

tertinggi, selain tanaman kopi gayo yang memiliki cadangan karbon berturut-turut sebesar 28.98, 27.44 dan 21.35 ton C/ha.

Stok Karbon Aktual Pengukuran Lapangan

Hasil pengamatan lapangan (Tabel 1) menunjukkan bahwa jenis pohon penghasil kayu-buah Petai (*Parkia speciosa*) memiliki

stok karbon tertinggi (28,98 ton C/ha), sementara cabai merah (*Capsicum annuum L*) memiliki stok karbon terendah (0,034 ton C/ha), yang dimasukkan ke dalam jenis pohon lain karena tidak menghasilkan kayu (tanaman semusim). Menurut pengukuran dari 16 plot, stok karbon total sebesar 2115.072 (ton C) dan rata-rata 124.416 (ton C/ha).

Tabel 1. Stok karbon hasil pengukuran lapangan setiap jenis tanaman

No	Jenis tanaman	Stok Karbon (ton C/ha)
1	Kopi (<i>Coffea arabica L</i>)	21.35
2	Alpukat (<i>Persea americana</i>)	3.215
3	Kesemek (<i>Diospyros kaki</i>)	4.12
4	Durian (<i>Durio zibethinus L</i>)	4.39
5	Gamal (<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp)	4.13
6	Lamtoro (<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	25.88
7	Terong Belanda (<i>Solanum betaceum</i>)	0.178
8	Labu Jepang (<i>Sechium edule</i>)	0.195
9	Jambu Biji (<i>Psidium guajava L</i>)	2.11
10	Nangka (<i>Artocarpus heterophyllus</i>)	3.12
11	Mangga (<i>Mangifera indica L</i>)	2.09
12	Jeruk Nipis (<i>Citrus aurantiaca Swingle</i>)	1.71
13	Jeruk Keprok (<i>Citrus reticulata Blanco</i>)	2.34
14	Petai (<i>Parkia speciosa</i>)	28.98
15	Jengkol (<i>Archidendron pauciflorum</i>)	27.44
16	Pepaya (<i>Carica papaya L.</i>)	0.91
17	Cabai Merah (<i>Capsicum annuum L</i>)	0.034

Selain tanaman kopi sebagai komoditas utama, sistem agroforestri kopi gayo di Kabupaten Bener Meriah menemukan pengisi lahan perkebunan dari tiga jenis pohon, yaitu: 1) pohon penghasil kayu yaitu jenis Lamtoro (*Cinnamomum alainii* (C.K.Allen) Alain) dan Gamal

(*Gliricidiasepium* (Jacq.)Walp); 2) pohon penghasil buah seperti Alpukat (*Persea americana*), Kesemek (*Diospyros kaki*), Durian (*Durio zibethinus L*), Jambu Biji (*Psidium guajava L*), Nangka (*Artocarpus heterophyllus*), Mangga (*Mangifera indica L*), Petai (*Parkia speciosa*), Jeruk Nipis

(*Citrus aurantiaca* Swingle), Jeruk Keprok (*Citrus reticulata* Blanco) dan Jengkol (*Archidendron pauciflorum*) dan 3) tanaman semusim antara lain: Labu Jepang (*Sechium edule*), Terong Belanda (*Solanum betaceum*), Pepaya (*Carica papaya* L.) dan Cabai Merah (*Capsicum annuum* L.). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pohon penghasil buah-buahan dan kopi menyumbang 76.52% dari komposisi vegetasi penyusun agroforestri di daerah penelitian (Tabel 2). Dengan kata lain, tanaman kopi yang dikombinasikan dengan pohon penghasil buah-buahan menyumbang 2/3 dari total cadangan karbon yang disimpan di atas permukaan tanah sistem agroforestri.

Sedangkan kombinasi tanaman kopi dan komponen pohon penghasil kayu memiliki kemampuan menyimpan karbon 38.97% dari total cadangan karbon di atas permukaan tanah pada sistem agroforestri. Artinya praktik sistem agroforestry kopi gayo yang selama ini diterapkan masyarakat mempunyai kontribusi yang penting terhadap penyerapan dan penyimpanan karbon. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sari et al. (2025), sistem agroforestri dengan bagian tanaman berkayu yang lebih besar cenderung memiliki potensi persediaan karbon yang lebih besar daripada sistem agroforestri yang didominasi oleh tanaman pertanian.

Tabel 2. Simpanan karbon setiap komponen agroforestri

No	Komponen Agroforestry Kopi	Stok Karbon (TonC/ha)	Persentase (%)
1	Tanaman Kopi	21.35	16.20
2	Pohon penghasil Kayu	30.01	22.77
3	Pohon buah-buahan	79.515	60.32
4	Tanaman semusim	0.944	0.72
Jumlah		131.819	100.00

Disatu sisi, kontribusi terbesar berasal dari kelompok tanaman buah-buahan (60,32%), diikuti pohon penghasil kayu (22,77%), tanaman kopi (16,20%), dan tanaman semusim (0,72%) (Tabel 2). Proporsi ini memperlihatkan bahwa kombinasi kopi dengan tanaman buah menjadi bentuk integrasi paling efisien dari segi ekologi dan ekonomi. Selain menghasilkan produk bernilai jual, tanaman buah memberikan penaungan alami, mengurangi suhu mikro, serta memperbaiki kesuburan tanah melalui guguran daun yang menjadi bahan organik. Hal ini sejalan

dengan penelitian sejenis yang dilakukan oleh Fahruri (2018), bahwa kacang tanah mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara di dalam tanah. Unsur N meningkat dari 0, 16% menjadi 0, 45%, sehingga merangsang pertumbuhan vegetatif (warna hijau) seperti daun. Unsur P meningkat dari 5, 57 mg/100 gr menjadi 8, 93 mg/100 gr, Unsur K yaitu dari 15, 87 mg/100 gr menjadi 41, 50 mg/100 gr, dan C organik meningkat dari 0, 83% menjadi 1, 55%.

Simpanan karbon di lokasi penelitian juga terdiri dari berbagai tingkat pertumbuhan (pohon, tiang, pancang, dan

semai), yang membentuk stratifikasi tajuk dalam sistem agroforestri. Tingkat pohon adalah yang paling penting untuk menyimpan

karbon dalam penelitian ini, diikuti oleh pancang, tiang, dan tingkat semai yang paling rendah (Tabel 3).

Tabel 3. Sebaran serapan karbon berdasarkan strata pohon

No	Tingkat pertumbuhan	Stok Karbon (TonC/ha)	Percentase (%)
1	Pohon	49.43	37.50
2	Tiang	40.86	31.00
3	Pancang	29.18	22.14
4	Semai	12.35	9.37
Jumlah		131.82	100.00

Distribusi stok karbon menurut strata vegetasi menunjukkan bahwa tingkat pohon menyumbang 37,5%, diikuti oleh tiang (31%), pancang (22,14%), dan semai (9,37%). Pola ini memperlihatkan bahwa fase pertumbuhan vegetatif berkontribusi signifikan terhadap penyerapan karbon. Semakin besar diameter batang, semakin tinggi akumulasi biomassa dan cadangan karbon yang tersimpan.

Pada agroforestri kompleks, jumlah jenis dan individu pohon atau tanaman naungan lebih sedikit. Adanya populasi pohon berkayu yang besar menunjukkan potensi serapan karbon yang berbanding lurus. Menurut Yuniawati et al. (2022) dan Ma et al. (2020), peningkatan diameter batang pohon adalah hasil akumulasi karbon sebagai biomassa tanaman. Salah satu gas rumah kaca (GRK), gas CO₂ memainkan peran penting dalam pembentukan biomassa tanaman. Kondisi tersebut juga menggambarkan keberhasilan sistem agroforestri dalam menjaga struktur vertikal ekosistem, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan CO₂ melalui fotosintesis pada

berbagai strata tanaman (Noulekoun et al. 2023).

Proses fotosintesis terjadi ketika pohon dan tanaman berkembang dalam kemampuan mereka untuk menyerap karbon. Proses ini terjadi dengan menyerap CO₂ dari atmosfer dan mengubahnya menjadi karbon organik, yaitu karbohidrat (C₆H₁₂O₆), yang kemudian disimpan dalam biomassa pohon atau tanaman, termasuk jaringan batang, daun, akar, umbi, buah, dan bagian tumbuhan lainnya (Lestari & Dewi, 2023). Untuk memungkinkan fotosintat, yang terdiri dari karbohidrat dan oksigen (O₂), proses tersebut sekaligus membutuhkan peran air bersamaan dengan gas CO₂.

Secara ekologis, sistem ini membantu mempertahankan kualitas tanah, menstabilkan kelembapan mikro, dan mendorong konservasi keanekaragaman hayati di kawasan dataran tinggi Gayo. Sementara dari sisi sosial-ekonomi, praktik agroforestri memberi diversifikasi pendapatan bagi petani melalui hasil kopi, buah-buahan, dan kayu bernilai ekonomi. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa

pendekatan ekologi industri dapat diterapkan di sektor perkebunan rakyat di mana limbah organik hasil pemangkasan dikembalikan ke lahan untuk menjaga siklus nutrisi dan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia

KESIMPULAN

Hasil analisis memperlihatkan bahwa agroforestri kopi Gayo memiliki potensi tinggi dalam mitigasi perubahan iklim. Hasil analisis diperoleh bahwa stok karbon tertinggi adalah jenis Petai (*Parkia speciosa*) dengan stok karbon sebesar (28,98 ton C/ha), sementara cabai merah (*Capsicum annuum L*) memiliki stok karbon terendah sebesar (0,034 ton C/ha). Stok karbon pengukuran lapangan sebesar 2115.072 (ton C) dan rata-rata 124.416 (ton C/ha).

Nilai stok karbon yang signifikan menunjukkan kontribusi nyata sistem ini terhadap penyerapan emisi karbon di sektor pertanian. Selain manfaat ekologis, praktik ini juga memberikan keuntungan ekonomi berkelanjutan bagi masyarakat lokal. Dengan demikian, penguatan kebijakan perhutanan sosial dan sertifikasi “low-carbon coffee” di wilayah Gayo dapat menjadi strategi adaptif menuju pertanian berketahanan iklim. Untuk memberikan informasi yang lebih luas, perlu dilakukan penelitian lanjutan terkait data stok karbon dapat dikembangkan menjadi peta spasial (GIS-based carbon mapping) untuk merencanakan intervensi kebijakan di tingkat kabupaten maupun desa.

DAFTAR PUSTAKA

- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, Läderach P, Anzueto F, Hruska AJ, Morales C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Secur.* 7(2). doi:10.1007/s12571-015-0446-9.
- Bilen, C., El Chami, D., Mereu, V., Trabucco, A., Marras, S., & Spano, D. 2022. A systematic review on the impacts of climate change on coffee agrosystems. *Plants*, 12(1), 102.
- Birkenberg A, Birner R. 2018. The world’s first carbon neutral coffee: Lessons on certification and innovation from a pioneer case in Costa Rica. *J. Clean.Prod.* 189:485-501. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.226.
- Fahruni, F. 2018. Interaksi Tanaman Kacang Tanah (*Arachis hypogaea*) dalam Agroforestri Interaction Of Peanuts (*Arachis hypogaea*) In Agroforestri. *Daun: Jurnal Ilmiah Pertanian dan Kehutanan*, 5(1), 27-35.
- Fisher-Ortíz, R. A., Rodríguez-Robles, U., Aldasoro-Maya, E. M., Soto-Pinto, M. L., & Chávez-García, E. 2022. Cacao agroforestry systems and resilience: potential factors in the face of the climate change in Mexico. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 25(2).
- Hameed, A., Hussain, S. A., & Suleria, H. A. R. 2020. “Coffee Bean-Related” agroecological factors affecting the coffee. *Co-evolution of secondary metabolites*, 641-705.

- Hernandez-Aguilera, J. N., Conrad, J. M., Gómez, M. I., & Rodewald, A. D. 2019. The economics and ecology of shade-grown coffee: A model to incentivize shade and bird conservation. *Ecological Economics*, 159, 110-121.
- [ICO]. International Coffee Organization. 2019. Coffee Development Report 2019. Report. London (UK): International Coffee Organization.
- Langkai, H., Rimbing, J., & Wanta, N. N. 2023. Persentase serangan hama pengerek buah kopi (Hypothenemus hampei Ferr)(Coleoptera: Curculionidae) pada pertanaman kopi robusta (*Coffea canephora*) di Desa Sumber Rejo Kecamatan Modayag. *Jurnal Enfit: Entomologi Dan Fitopatologi*, 3(1), 1-9.
- Lestari, K. W., & Dewi, N. 2023. Potensi Simpanan Karbon pada Beberapa Tipe Agroforestri Berbasis Kopi Robusta di Desa Rowosari, Jember. *Journal of Tropical Silviculture*, 14(02), 150-157.
- Ma, S. H., Eziz, A., Tian, D., Yan, Z. B., Cai, Q., Jiang, M. W., & Fang, J. Y. 2020. Size-and age-dependent increases in tree stem carbon concentration: implications for forest carbon stock estimations. *Journal of Plant Ecology*, 13(2), 233-240.
- Moreira, T. R., da Silva, S. F., da Silva, N. B., dos Santos, G. M. A. D. A., & dos Santos, A. R. 2020. Global warming and the effects of climate change on coffee production. In *Quality determinants in coffee production* (pp. 65-100). Cham: Springer International Publishing.
- Noulèkoun, F., Mensah, S., Kim, H., Jo, H., Gouwakinnou, G. N., Houéhanou, T. D., Khamzina, A. 2023. Tree size diversity is the major driver of aboveground carbon storage in dryland agroforestry parklands. *Scientific reports*, 13(1), 22210.
- Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G. 2015. Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS One*. 10(4).
- Pramulya, R., Bantacut, T., Noor, E., & Yani, M. 2019. Carbon Footprint Calculation for Gayo Arabica Coffee Primer Processing. *Inter J Sci Techn Res*, 8(12), 2934-2938.
- Rega FV, Ferranti P. 2019. Life Cycle Assessment of Coffee Production in Time of Global Change. Encyclopedia of Food Security and Sustainability. Elsevier. hlm 497–502.
- Sari, R. R., Ishaq, R. M., Purnamasari, E., & Saputra, D. D. 2025. Fungsi Ganda Agroforestri Kopi: Konservasi Cadangan Karbon Dan Keanekaragaman Vegetasi. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 12(1), 159-169.
- Thomas, G. V., Krishnakumar, V., & Prabhu, S. R. 2024. New paradigms in soil health management for sustainable production of plantation crops. In *Soil Health Management for Plantation Crops: Recent Advances and New Paradigms* (pp. 487-533). Singapore: Springer Nature Singapore.

Ullah, S., Wu, J., Shah, J. A., Wang, X., Lyu, Y., Guo, Z., & Sun, H. 2024. Tree diversity drives understory carbon storage rather than overstory carbon storage across forest types. *Journal of Forestry Research*, 35(1), 125.

Yuniawati, Dulsalam, Andini S. 2022. Potensi Simpanan Karbon dan Emisi CO₂ Akibat Penebangan di Hutan Alam Papua. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 40(2): 61-73.