



Populasi Bakteri, Fungi, dan Biomassa Karbon Mikroba pada Agroforestri dan Monokultur Kakao

Zulkaidhah

Program Studi Kehutanan, Universitas Tadulako, Indonesia

*Penulis Korespondensi: zul.untad@gmail.com

Abstract. Land-use simplification may alter soil biological quality by reducing vegetation diversity, organic matter inputs, and habitat availability for soil microorganisms. This study aimed to analyze soil bacterial populations, fungal populations, and microbial biomass carbon under complex agroforestry, simple agroforestry, and cocoa monoculture systems around Lore Lindu National Park, Central Sulawesi. Soil samples were systematically collected from five sampling points within each land-use system at a depth of 0–20 cm. Culturable bacterial and fungal populations were determined using serial dilution and total plate count methods, while microbial biomass carbon was measured using chloroform fumigation extraction. Data were analyzed using one-way analysis of variance followed by the Least Significant Difference test at the 5% significance level. Land-use type significantly affected all measured biological parameters. Complex agroforestry produced the highest bacterial population, fungal population, and microbial biomass carbon, reaching 9.08×10^8 CFU g⁻¹, 6.84×10^5 CFU g⁻¹, and 822.80 mg C kg⁻¹, respectively. Simple agroforestry showed intermediate values, whereas cocoa monoculture produced the lowest values. These findings demonstrate that greater vegetation complexity supports soil microbial abundance and biomass by providing diverse organic substrates and more stable microenvironmental conditions. Maintaining shade-tree diversity in cocoa agroforestry is therefore important for conserving soil biological quality in the buffer zone of Lore Lindu National Park.

Keywords: Agroforestry Complexity; Cocoa Monoculture; Microbial Biomass Carbon; Soil Bacteria; Soil Fungi.

Abstrak. Penyederhanaan penggunaan lahan dapat menurunkan kualitas biologis tanah melalui berkurangnya keragaman vegetasi, masukan bahan organik, dan ketersediaan habitat bagi mikroorganisme tanah. Penelitian ini bertujuan menganalisis populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba tanah pada agroforestri kompleks, agroforestri sederhana, dan monokultur kakao di sekitar Taman Nasional Lore Lindu, Sulawesi Tengah. Sampel tanah diambil secara sistematis dari lima titik pada setiap tipe penggunaan lahan pada kedalaman 0–20 cm. Populasi bakteri dan fungi yang dapat dikultur dianalisis menggunakan pengenceran bertingkat dan metode hitungan cawan, sedangkan biomassa karbon mikroba dianalisis dengan metode fumigasi-ekstraksi kloroform. Data dianalisis menggunakan analisis ragam satu arah dan dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Terkecil taraf 5%. Tipe penggunaan lahan berpengaruh sangat nyata terhadap seluruh parameter yang diamati. Agroforestri kompleks menghasilkan populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba tertinggi, masing-masing sebesar $9,08 \times 10^8$ CFU g⁻¹, $6,84 \times 10^5$ CFU g⁻¹, dan 822,80 mg C kg⁻¹. Agroforestri sederhana menunjukkan nilai menengah, sedangkan monokultur kakao menghasilkan nilai terendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kompleksitas vegetasi mendukung kelimpahan dan biomassa mikroorganisme melalui penyediaan substrat organik yang lebih beragam dan kondisi mikrohabitat yang lebih stabil. Pemeliharaan keragaman pohon penayang pada agroforestri kakao penting untuk mempertahankan kualitas biologis tanah di kawasan penyangga Taman Nasional Lore Lindu.

Kata kunci: Agroforestri Kompleks; Bakteri Tanah; Biomassa Karbon Mikroba; Fungi Tanah; Monokultur Kakao.

1. LATAR BELAKANG

Perubahan penggunaan lahan dari ekosistem dengan struktur vegetasi beragam menjadi sistem pertanian atau perkebunan yang lebih sederhana dapat memengaruhi kondisi biofisik dan biologis tanah (Zulkaidhah et al., 2022). Penyederhanaan vegetasi umumnya diikuti oleh berkurangnya kekayaan jenis tanaman, stratifikasi tajuk, keragaman sistem perakaran, masukan serasah, dan kontinuitas pasokan bahan organik (Zulkaidhah et al., 2021). Kondisi

tersebut dapat meningkatkan keterbukaan permukaan tanah, mengubah suhu dan kelembapan, serta memengaruhi kandungan karbon organik dan ketersediaan unsur hara (Harahap, 2019). Dampaknya tidak hanya terlihat pada vegetasi di atas permukaan tanah, tetapi juga pada biomassa, komposisi, dan aktivitas organisme tanah yang menjalankan proses dekomposisi, mineralisasi, dan siklus hara. Konversi hutan tropis menjadi sistem perkebunan intensif di Sumatra, misalnya, terbukti mengubah komunitas bakteri aktif serta proses siklus nitrogen tanah (Bender et al., 2016).

Agroforestri merupakan sistem penggunaan lahan yang mengombinasikan tanaman berkayu dengan tanaman pertanian dalam satu unit pengelolaan (Hapid & Zulkaidhah, 2019). Tingkat kompleksitasnya beragam, mulai dari agroforestri kompleks yang tersusun atas berbagai jenis pohon, tanaman utama, semak, dan tumbuhan bawah hingga agroforestri sederhana yang hanya mempertahankan sejumlah terbatas pohon penayang. Dibandingkan monokultur, agroforestri memiliki struktur vegetasi lebih heterogen dan berpotensi menghasilkan bahan organik dari daun, ranting, akar, bunga, dan buah dengan kuantitas serta kualitas yang lebih bervariasi. Keberadaan pohon penayang juga dapat mengurangi radiasi matahari langsung, menekan fluktuasi suhu, mempertahankan kelembapan, meningkatkan masukan karbon, dan menciptakan mikrohabitat yang lebih stabil bagi organisme tanah (Lukita et al., 2023; Nahon et al., 2024)

Dalam lanskap perkebunan kakao, perbedaan komposisi vegetasi dan intensitas pengelolaan menghasilkan variasi sistem penggunaan lahan. Agroforestri kompleks umumnya mempertahankan lebih banyak jenis pohon penayang dan beberapa lapisan tajuk. Agroforestri sederhana didominasi tanaman kakao dengan sedikit jenis pohon penayang, sedangkan monokultur kakao mempunyai struktur vegetasi yang relatif homogen dan biasanya disertai pengelolaan lebih intensif melalui penyiangan, sanitasi kebun, pemangkasan, serta pengurangan tumbuhan bawah dan pohon nonkomoditas. Perbedaan tersebut membentuk gradien kondisi habitat tanah dari sistem yang heterogen dan relatif stabil menuju sistem yang semakin sederhana. Pada kebun kakao sekitar Taman Nasional Lore Lindu, pola pengelolaan yang berbeda telah dilaporkan menghasilkan perbedaan kekayaan vegetasi, biomassa, produksi serasah, laju dekomposisi, dan keberlanjutan sistem usaha tani (Muhardi & Effendy, 2017).

Kualitas biologis tanah dapat dinilai melalui populasi mikroorganisme dan biomassa karbon mikroba. Bakteri dan fungi merupakan kelompok mikroorganisme utama yang berperan dalam transformasi bahan organik serta penyediaan unsur hara. Bakteri terlibat dalam mineralisasi senyawa organik, fiksasi dan transformasi nitrogen, serta pelarutan unsur hara (C. Wang & Kuzyakov, 2024; Wu et al., 2024). Fungi mampu menguraikan senyawa organik

kompleks, termasuk selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Sementara itu, biomassa karbon mikroba menggambarkan jumlah karbon dalam sel mikroorganisme hidup dan merepresentasikan fraksi karbon aktif yang terlibat dalam imobilisasi dan mineralisasi unsur hara. Karena lebih cepat merespons perubahan lingkungan dibandingkan karbon organik total, populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba dapat digunakan sebagai indikator perubahan kualitas biologis tanah akibat perbedaan penggunaan dan pengelolaan lahan (Mishra et al., 2024; Wu et al., 2024).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa keberadaan pohon pada sistem agroforestri dapat memengaruhi kelimpahan dan struktur komunitas bakteri serta fungi tanah. Konversi hutan menjadi sistem pertanian mengubah komunitas bakteri melalui perubahan kandungan bahan organik, pH, ketersediaan unsur hara, dan mikroklimat. Sebaliknya, introduksi pohon ke lahan pertanian dapat meningkatkan kelimpahan bakteri dan fungi, rasio fungi terhadap bakteri, serta gen-gen yang berhubungan dengan siklus nitrogen (Mishra et al., 2024). Pada sistem produksi kakao, pengelolaan yang mempertahankan keragaman vegetasi juga mendukung kualitas tanah dan keragaman komunitas mikroba dibandingkan pengelolaan yang lebih intensif (Nahon et al., 2024; Wu et al., 2024).

Penelitian di kawasan penyangga Taman Nasional Lore Lindu menunjukkan bahwa konversi hutan menjadi agroforestri dan monokultur diikuti oleh perubahan keanekaragaman vegetasi, tutupan kanopi, biomassa serasah, karbon organik, kadar air tanah, dan laju dekomposisi. Kebun kakao dengan keragaman pohon lebih tinggi mampu mempertahankan sebagian fungsi ekologis lebih baik dibandingkan sistem kakao dengan vegetasi lebih sederhana (Muhardi & Effendy, 2017). Penelitian di kawasan penyangga Cagar Biosfer Lore Lindu juga menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan memengaruhi keanekaragaman makrofauna dan proses dekomposisi serasah yang berkaitan erat dengan aktivitas mikroorganisme tanah (Zulkaidhah et al., 2022).

Meskipun pengaruh agroforestri terhadap kualitas tanah telah banyak dikaji, sebagian besar penelitian membandingkan agroforestri dan monokultur sebagai dua kategori umum. Informasi mengenai perubahan indikator biologis tanah sepanjang gradien agroforestri kompleks, agroforestri sederhana, dan monokultur kakao masih terbatas, khususnya di kawasan penyangga Taman Nasional Lore Lindu. Padahal, ketiga sistem tersebut memiliki perbedaan dalam kekayaan jenis tanaman, struktur tajuk, sistem perakaran, kualitas serasah, penutupan tanah, dan intensitas pengelolaan. Perbedaan tersebut diduga menimbulkan respons berbeda pada populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba.

Kebaruan penelitian ini terletak pada perbandingan simultan tiga tingkat kompleksitas penggunaan lahan berbasis kakao, yaitu agroforestri kompleks, agroforestri sederhana, dan monokultur kakao. Penelitian tidak hanya mengukur populasi bakteri dan fungi yang dapat dikultur, tetapi juga biomassa karbon mikroba sebagai indikator besarnya komunitas mikroba hidup. Kombinasi ketiga parameter tersebut diharapkan memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai perubahan kualitas biologis tanah akibat penyederhanaan vegetasi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan populasi bakteri tanah, populasi fungi tanah, dan biomassa karbon mikroba pada agroforestri kompleks, agroforestri sederhana, dan monokultur kakao di sekitar Taman Nasional Lore Lindu. Penelitian didasarkan pada dugaan bahwa peningkatan kompleksitas vegetasi akan meningkatkan keragaman dan kontinuitas masukan bahan organik serta kestabilan mikrohabitat, sehingga ketiga indikator biologis tanah akan tertinggi pada agroforestri kompleks, diikuti agroforestri sederhana, dan terendah pada monokultur kakao.

2. KAJIAN TEORITIS

Kompleksitas Vegetasi dalam Sistem Agroforestri

Kompleksitas vegetasi mencerminkan keragaman jenis tanaman, stratifikasi tajuk, variasi bentuk pertumbuhan, distribusi perakaran, dan heterogenitas ruang dalam suatu sistem penggunaan lahan. Agroforestri kompleks umumnya tersusun atas tanaman utama, berbagai jenis pohon penayang, pohon buah atau kayu, semak, serta tumbuhan bawah. Agroforestri sederhana hanya mempertahankan sedikit jenis penayang, sedangkan monokultur didominasi satu komoditas dengan struktur vegetasi homogen. Perbedaan tersebut memengaruhi jumlah dan kualitas serasah, masukan akar, penutupan permukaan tanah, serta mikrohabitat bagi organisme tanah (Nahon et al., 2024).

Vegetasi memengaruhi lingkungan tanah melalui serasah, akar mati, eksudat akar, dan perlindungan permukaan tanah. Serasah menjadi sumber karbon dan unsur hara bagi organisme dekomposer, sedangkan akar hidup melepaskan gula, asam amino, asam organik, dan berbagai metabolit yang dapat dimanfaatkan mikroorganisme di daerah rizosfer. Keragaman tanaman dengan demikian meningkatkan variasi sumber makanan dan relung ekologis bagi bakteri serta fungi. Tajuk pohon juga mengurangi radiasi langsung, menekan fluktuasi suhu, mengurangi evaporasi, dan menjaga kelembapan. Perakaran pohon dapat memperbaiki porositas, infiltrasi, dan distribusi karbon ke lapisan tanah yang lebih dalam. Kondisi tersebut mendukung lingkungan yang lebih stabil bagi aktivitas mikroorganisme dibandingkan monokultur yang dikelola secara intensif (Beule et al., 2019; Cardinael et al., 2017).

Karbon organik tanah menjadi penghubung penting antara vegetasi dan mikroorganisme. Keberadaan tanaman berkayu serta kontinuitas masukan biomassa dapat meningkatkan cadangan karbon tanah. Peningkatan karbon organik memperbesar sumber energi bagi mikroorganisme dan mendukung peningkatan biomassa serta aktivitas biologis tanah. Namun, besarnya manfaat agroforestri tetap dipengaruhi oleh jenis pohon, umur sistem, kondisi iklim, sifat tanah, serta intensitas pengelolaan (Cardinael et al., 2017; Nahon et al., 2024).

Mikroorganisme sebagai Indikator Kualitas Biologis Tanah

Mikroorganisme tanah berperan dalam dekomposisi bahan organik, mineralisasi unsur hara, pembentukan agregat, transformasi nitrogen, pelarutan fosfat, dan interaksi dengan akar tanaman. Kelimpahan, biomassa, komposisi, dan aktivitas mikroba dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan fungsi tanah akibat perbedaan penggunaan dan pengelolaan lahan. Komunitas mikroba sangat responsif terhadap pH, karbon organik, nitrogen, fosfor, kelembapan, suhu, tekstur, dan aerasi tanah (Bender et al., 2016; Berkelmann et al., 2018).

Parameter mikrobiologi sering memberikan respons lebih cepat dibandingkan beberapa sifat kimia tanah yang relatif stabil. Perubahan masukan bahan organik, kelembapan, gangguan tanah, dan intensitas pengelolaan dapat segera memengaruhi biomassa dan aktivitas mikroorganisme. Penambahan keragaman tanaman, misalnya, diketahui meningkatkan biomassa total mikroba, bakteri, dan fungi, meskipun besar responsnya dipengaruhi oleh kondisi iklim dan karakteristik tanah (Kim et al., 2020).

Penilaian mikroorganisme dapat dilakukan menggunakan metode kultur maupun molekuler. Metode kultur mengukur mikroorganisme yang mampu tumbuh pada media tertentu, sedangkan pendekatan molekuler menggambarkan struktur komunitas berdasarkan materi genetik. Walaupun metode kultur tidak mewakili seluruh komunitas mikroba, metode tersebut tetap bermanfaat untuk membandingkan populasi bakteri dan fungi yang dapat dikultur apabila seluruh sampel dianalisis menggunakan prosedur yang sama (Dodino-Gutiérrez et al., 2023).

Populasi Bakteri Tanah

Bakteri berperan dalam penguraian senyawa organik sederhana, fiksasi nitrogen, nitrifikasi, denitrifikasi, pelarutan fosfat, dan transformasi berbagai unsur hara. Sebagian besar bakteri tanah memperoleh energi dari serasah, akar mati, eksudat akar, dan hasil dekomposisi. Oleh sebab itu, ketersediaan karbon organik dan aktivitas perakaran menjadi faktor utama yang menentukan populasinya (Bender et al., 2016; Berkelmann et al., 2018).

Daerah rizosfer umumnya memiliki populasi bakteri lebih tinggi karena akar tanaman menghasilkan eksudat yang kaya gula, asam amino, asam organik, vitamin, dan metabolit

lainnya. Keragaman tanaman berpotensi menghasilkan komposisi eksudat yang lebih beragam sehingga mendukung lebih banyak kelompok bakteri. Perubahan penggunaan lahan juga terbukti mengubah komunitas bakteri aktif melalui perubahan sifat kimia dan kondisi lingkungan tanah. Keberadaan pohon dalam sistem agroforestri dapat meningkatkan kelimpahan bakteri di sekitar zona perakaran dan mengubah gen-gen yang berkaitan dengan siklus nitrogen (Berkelmann et al., 2018; Beule et al., 2019).

Dalam penelitian ini, populasi bakteri yang dihitung dengan metode hitungan cawan merupakan bakteri yang dapat tumbuh pada media Nutrient Agar. Nilai tersebut tidak menggambarkan seluruh bakteri tanah, tetapi dapat digunakan sebagai indikator komparatif antartipe penggunaan lahan. Secara teoritis, agroforestri kompleks diperkirakan memiliki populasi bakteri tertinggi karena menyediakan serasah dan eksudat akar lebih beragam, kelembapan lebih stabil, serta gangguan tanah lebih rendah (Martini et al., 2024).

Populasi Fungi Tanah

Fungi tanah berperan sebagai dekomposer, simbiosis, dan patogen. Sebagai dekomposer, fungi menghasilkan enzim ekstraseluler yang mampu menguraikan selulosa, hemiselulosa, lignin, dan polifenol. Sebagai simbiosis, fungi mikoriza memperluas daerah penyerapan akar dan membantu tanaman memperoleh air serta unsur hara. Populasi fungi dipengaruhi oleh kualitas serasah, kelembapan, pH, suhu, aerasi, dan keberadaan tanaman inang (Baldrian et al., 2023).

Agroforestri menyediakan serasah berkayu dan kualitas bahan organik yang lebih beragam dibandingkan monokultur. Kondisi ini mendukung perkembangan kelompok fungi dekomposer serta fungi simbiosis. Selain itu, sistem agroforestri yang memiliki gangguan tanah relatif lebih rendah dapat melindungi jaringan hifa yang sensitif terhadap pengolahan tanah dan sanitasi intensif. Introduksi pohon pada lahan pertanian dilaporkan meningkatkan kelimpahan fungi dan rasio fungi terhadap bakteri, sedangkan praktik agroforestri kakao memengaruhi keragaman mikroba yang berkaitan dengan siklus karbon dan nitrogen (Beule et al., 2019; Nahon et al., 2024).

Populasi fungi dalam penelitian ini menggambarkan fungi yang dapat tumbuh pada media Potato Dextrose Agar. Walaupun tidak mewakili seluruh komunitas fungi, metode ini dapat digunakan untuk membandingkan populasi fungi antartipe lahan. Agroforestri kompleks diperkirakan memiliki populasi fungi tertinggi karena menyediakan serasah lebih banyak, tanaman inang lebih beragam, dan kondisi kelembapan lebih stabil (Zhang et al., 2023).

Biomassa Karbon Mikroba Tanah

Biomassa karbon mikroba merupakan jumlah karbon yang tersimpan dalam sel mikroorganisme hidup. Meskipun proporsinya kecil dibandingkan karbon organik total, komponen ini bersifat aktif, mengalami pergantian cepat, dan berperan langsung dalam imobilisasi serta mineralisasi unsur hara. Nilainya mencerminkan kemampuan lingkungan tanah menyediakan substrat dan mempertahankan komunitas mikroba hidup (Butler et al., 2023).

Biomassa karbon mikroba sensitif terhadap perubahan penggunaan lahan karena merespons perubahan vegetasi, serasah, aktivitas akar, kelembapan, dan iklim mikro lebih cepat dibandingkan karbon organik total (Das et al., 2023). Karbon yang digunakan mikroorganisme sebagian menjadi biomassa hidup dan kemudian berkontribusi terhadap nekromassa mikroba setelah sel mati (Zhou et al., 2023). Nekromassa tersebut dapat menjadi bagian penting dalam pembentukan karbon organik stabil di dalam tanah (B. Wang et al., 2021).

Pada agroforestri, keragaman tanaman menghasilkan pasokan karbon dari serasah, akar mati, dan eksudat sepanjang tahun. Pohon juga menciptakan kondisi suhu dan kelembapan yang lebih sesuai bagi aktivitas mikroorganisme. Oleh karena itu, agroforestri kompleks diperkirakan memiliki biomassa karbon mikroba tertinggi, agroforestri sederhana berada pada tingkat menengah, dan monokultur kakao memiliki nilai terendah akibat pasokan substrat yang lebih homogen dan kondisi mikrohabitat yang kurang stabil (Beule et al., 2019; Nahon et al., 2024).

Biomassa karbon mikroba umumnya dianalisis menggunakan metode fumigasi-ekstraksi kloroform. Metode ini melisis sel mikroba melalui fumigasi, kemudian karbon yang dilepaskan diekstraksi dan dibandingkan dengan sampel nonfumigasi menggunakan faktor koreksi tertentu (Zhou et al., 2023).

3. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di kawasan penyangga Taman Nasional Lore Lindu (TNLL), tepatnya di Desa Karunia, Kecamatan Palolo, Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah. Secara geografis lokasi penelitian berada pada sisi timur Taman Nasional Lore Lindu yang termasuk kawasan Wallacea dengan karakteristik ekosistem hutan hujan tropis pegunungan. Pengambilan sampel dilakukan pada tiga tipe penggunaan lahan, yaitu agroforestri kompleks (AK), agroforestri sederhana (AS), dan monokultur kakao (MK).

Pengambilan dan penanganan sampel tanah

Penelitian menggunakan rancangan komparatif pada tiga tipe penggunaan lahan, yaitu agroforestri kompleks, agroforestri sederhana, dan monokultur kakao. Setiap tipe penggunaan lahan diwakili oleh lima kebun yang berbeda dan saling independen, sehingga jumlah unit pengamatan seluruhnya sebanyak 15 kebun. Kebun dipilih berdasarkan kesamaan kondisi umum, meliputi umur tanaman kakao, topografi, jenis tanah, dan riwayat pengelolaan, tetapi memiliki perbedaan utama pada tingkat kompleksitas vegetasi. Jarak antarkebun dalam satu tipe penggunaan lahan berkisar antara 200 m sampai 400 m, sedangkan jarak antartipe penggunaan lahan berkisar antara 500 m sampai 800 m. Pada setiap kebun dibuat satu plot pengamatan berukuran 100 m x 100 m. Di dalam setiap plot ditetapkan lima titik pengambilan sampel tanah secara sistematis. Tanah dari kelima titik dalam satu kebun dianalisis secara terpisah. Pengambilan sampel tanah dilakukan pada lima titik yang dipilih secara sistematis di dalam setiap plot sehingga diperoleh lima ulangan pada masing-masing tipe penggunaan lahan. Serasah permukaan disingkirkan terlebih dahulu, kemudian tanah diambil menggunakan bor tanah pada kedalaman 0–20 cm. Setiap sampel dimasukkan ke dalam kantong plastik steril, disimpan dalam cool box selama pengangkutan, dan segera dibawa ke laboratorium. Sampel tanah diayak menggunakan ayakan berukuran 2 mm untuk memisahkan akar, batu, dan bahan organik kasar. Sampel yang belum dianalisis disimpan pada suhu 4°C untuk mengurangi perubahan komunitas dan aktivitas mikroorganisme selama penyimpanan (Berkelmann et al., 2018; Beule et al., 2019; Vance et al., 1987).

Analisis populasi bakteri tanah

Populasi bakteri tanah dianalisis menggunakan metode Total Plate Count melalui pengenceran bertingkat dan teknik spread plate. Sebanyak 10 g tanah segar dimasukkan ke dalam 90 mL larutan NaCl fisiologis steril 0,85%, kemudian dikocok menggunakan shaker selama 30 menit untuk memperoleh pengenceran 10^{-1} . Suspensi diencerkan secara bertingkat hingga 10^{-6} . Sebanyak 0,1 mL suspensi dari pengenceran terpilih diinokulasikan pada media Nutrient Agar dan diratakan menggunakan batang penyebar steril. Cawan diinkubasi dalam posisi terbalik pada suhu 28–30°C selama 48 jam. Koloni yang tumbuh pada cawan dengan jumlah 30–300 koloni dihitung dan dinyatakan sebagai Colony Forming Unit per gram tanah kering (CFU g⁻¹) (Ben-David & Davidson, 2014).

Metode pengenceran bertingkat dan penghitungan CFU digunakan untuk memperkirakan konsentrasi mikroorganisme hidup yang mampu tumbuh dan membentuk koloni pada media kultur. Rumus perhitungannya:

$$\text{Populasi bakteri} = \frac{\text{Jumlah koloni} \times \text{faktor pengenceran}}{\text{Volume inokulum} \times \text{berat kering tanah}} \dots\dots\dots (i)$$

Apabila volume inokulum 0,1 mL digunakan, faktor volume harus dimasukkan dalam perhitungan.

Analisis populasi fungi tanah

Populasi fungi tanah dianalisis dengan metode Total Plate Count melalui pengenceran bertingkat. Suspensi tanah dibuat dengan mencampurkan 10 g tanah segar dan 90 mL larutan NaCl fisiologis steril 0,85%, kemudian dilakukan pengenceran hingga 10^{-4} . Sebanyak 0,1 mL suspensi dari pengenceran terpilih diinokulasikan pada media Potato Dextrose Agar yang telah ditambahkan kloramfenikol 50 mg L^{-1} untuk menekan pertumbuhan bakteri. Cawan diinkubasi dalam posisi terbalik pada suhu $27\text{--}28^{\circ}\text{C}$ selama 5–7 hari. Koloni fungi dihitung pada cawan yang terpisah dengan baik dan dinyatakan sebagai CFU g^{-1} tanah kering (Ben-David & Davidson, 2014).

Metode kultur perlu dijelaskan sebagai pengukuran fungi yang dapat dikultur, bukan keseluruhan komunitas fungi tanah. Teknik pengenceran-cawan hanya mendeteksi mikroorganisme yang mampu tumbuh pada media dan kondisi inkubasi yang digunakan. Penelitian perbandingan metode mikrobiologi tanah menunjukkan bahwa jumlah mikroorganisme hasil kultur dapat lebih rendah daripada jumlah komunitas sebenarnya.

Rumus perhitungannya:

$$\text{Populasi fungi} = \frac{\text{Jumlah koloni} \times \text{faktor pengenceran}}{\text{Volume inokulum} \times \text{berat kering tanah}} \dots\dots\dots (ii)$$

Apabila volume inokulum 0,1 mL digunakan, faktor volume harus dimasukkan dalam perhitungan.

Analisis biomassa karbon mikroba

Biomassa karbon mikroba atau Microbial Biomass Carbon dianalisis menggunakan metode fumigasi–ekstraksi kloroform (chloroform fumigation-extraction). Sebanyak 20 g tanah segar dibagi menjadi dua bagian, yaitu sampel fumigasi dan nonfumigasi. Sampel fumigasi ditempatkan di dalam desikator dan dipaparkan pada uap kloroform bebas etanol selama 24 jam. Setelah sisa kloroform dihilangkan, sampel fumigasi dan nonfumigasi masing-masing diekstraksi menggunakan 80 mL K_2SO_4 0,5 M selama 30 menit dengan bantuan shaker. Suspensi disaring dan karbon organik dalam ekstrak diukur menggunakan Total Organic Carbon Analyzer. Biomassa karbon mikroba dihitung berdasarkan perbedaan karbon terekstrak antara sampel fumigasi dan nonfumigasi dengan faktor koreksi kEC sebesar 0,45 (Vance et al., 1987). Rumus yang digunakan:

$$MBC = \frac{C_f - C_{nf}}{k_{EC}} \dots\dots\dots(iii)$$

Keterangan:

MBC = Microbial Biomass Carbon atau Biomassa karbon mikroba (Nilai MBC dinyatakan dalam mg C kg⁻¹ tanah kering)

C_f = karbon organik terekstrak dari tanah fumigasi;

C_{nf} = karbon organik terekstrak dari tanah nonfumigasi;

k_{EC} = faktor ekstraksi karbon mikroba sebesar 0,45.

Analisis data

Data populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba terlebih dahulu diuji terhadap asumsi normalitas dan homogenitas ragam. Pengaruh tipe penggunaan lahan terhadap setiap parameter dianalisis menggunakan analisis ragam satu arah (one-way analysis of variance). Apabila hasil analisis ragam menunjukkan perbedaan nyata pada taraf 5% ($p < 0,05$), analisis dilanjutkan menggunakan uji Beda Nyata Terkecil pada taraf 5%. Uji lanjut hanya dilakukan setelah uji F pada ANOVA menunjukkan pengaruh yang nyata (Agbangba et al., 2024). Data disajikan dalam bentuk rerata $\pm$ standar deviasi dari lima ulangan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan lahan dengan tingkat kompleksitas vegetasi yang berbeda diduga memengaruhi karakteristik biologis tanah, khususnya terhadap keberadaan dan aktivitas mikroorganisme tanah. Untuk menguji pengaruh tersebut, dilakukan pengukuran terhadap populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba (Microbial Biomass Carbon/MBC) pada tiga tipe penggunaan lahan, yaitu agroforestri kompleks, agroforestri sederhana, dan monokultur kakao. Ketiga parameter tersebut merupakan indikator biologis yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kualitas tanah karena mencerminkan kelimpahan mikroorganisme, aktivitas dekomposisi bahan organik, serta dinamika siklus hara dalam suatu ekosistem (Bender et al., 2016).

Tabel 1 menunjukkan bahwa tipe penggunaan lahan memberikan pengaruh yang sangat nyata ($p < 0,0001$) terhadap populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba tanah. Secara umum, seluruh parameter biologis tanah menunjukkan kecenderungan menurun seiring berkurangnya kompleksitas vegetasi, dengan nilai tertinggi ditemukan pada agroforestri kompleks, diikuti agroforestri sederhana, dan terendah pada monokultur kakao.

Tabel 1. Populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba pada tiga tipe penggunaan lahan.

Penggunaan Lahan	Populasi Bakteri ($\times 10^8$ CFU g ⁻¹)	Populasi Fungi ($\times 10^5$ CFU g ⁻¹)	Biomassa Karbon Mikroba (mg C kg ⁻¹)
Agroforestri Kompleks	9,08 $\pm$ 0,42 ^a	6,84 $\pm$ 0,42 ^a	822,80 $\pm$ 34,45 ^a
Agroforestri Sederhana	6,40 $\pm$ 0,27 ^b	4,66 $\pm$ 0,30 ^b	599,00 $\pm$ 26,51 ^b
Monokultur Kakao	3,28 $\pm$ 0,19 ^c	2,16 $\pm$ 0,15 ^c	350,80 $\pm$ 24,72 ^c
F hitung	437,34	284,64	334,35
p-value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
BNT 5%	0,428	0,428	39,79

Keterangan : Nilai disajikan sebagai rerata $\pm$ standar deviasi (n = 5). Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan Uji BNT taraf 5% ($\alpha = 0,05$) setelah analisis ragam (ANOVA). Seluruh parameter menunjukkan perbedaan yang sangat nyata antar tipe penggunaan lahan ($p < 0,0001$).

Populasi Bakteri Tanah

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa tipe penggunaan lahan berpengaruh sangat nyata terhadap populasi bakteri tanah ($p < 0,0001$). Hasil uji lanjut BNT taraf 5% menunjukkan bahwa seluruh tipe penggunaan lahan berbeda nyata satu sama lain (Tabel 1). Populasi bakteri tertinggi ditemukan pada agroforestri kompleks ($9,08 \pm 0,42 \times 10^8$ CFU g⁻¹ tanah), diikuti agroforestri sederhana ($6,40 \pm 0,27 \times 10^8$ CFU g⁻¹ tanah), sedangkan populasi terendah terdapat pada monokultur kakao ($3,28 \pm 0,19 \times 10^8$ CFU g⁻¹ tanah). Pola tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kompleksitas vegetasi suatu lahan, semakin tinggi pula populasi bakteri tanah yang mampu berkembang.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa keberadaan pohon dalam sistem agroforestri berkaitan dengan meningkatnya kelimpahan bakteri dan perubahan struktur komunitas bakteri tanah. Kondisi tersebut umumnya berhubungan dengan peningkatan masukan bahan organik, unsur hara, serta ketersediaan habitat yang lebih beragam bagi mikroorganisme tanah. Bakteri juga dilaporkan menjadi kelompok mikroorganisme yang dominan pada berbagai sistem agroforestri dan memiliki hubungan positif dengan karbon organik, kadar air, nitrogen, dan beberapa unsur hara tanah (Banerjee et al., 2016; Nahon et al., 2024; Radhakrishnan & Mohan, 2016).

Tingginya populasi bakteri pada agroforestri kompleks diduga berkaitan dengan struktur vegetasi yang lebih beragam dibandingkan dua tipe penggunaan lahan lainnya. Keberadaan berbagai jenis pohon penayang menghasilkan masukan serasah yang lebih besar dan lebih beragam, baik berupa daun, ranting, bunga maupun buah, sehingga meningkatkan kandungan karbon organik sebagai sumber energi utama bagi mikroorganisme tanah. Selain itu, sistem perakaran dari berbagai spesies tanaman menghasilkan eksudat akar yang beragam berupa gula

sederhana, asam amino, dan asam organik yang menjadi substrat penting bagi pertumbuhan bakteri di daerah rizosfer. Kompleksitas vegetasi juga membentuk kondisi iklim mikro yang lebih stabil, ditandai oleh suhu tanah yang lebih rendah, kelembapan yang lebih tinggi, dan fluktuasi lingkungan yang lebih kecil sehingga menciptakan habitat yang lebih sesuai bagi perkembangan komunitas bakteri tanah.

Sebaliknya, populasi bakteri pada agroforestri sederhana lebih rendah dibandingkan agroforestri kompleks karena jumlah spesies penyusun vegetasi dan keragaman tajuk relatif lebih sedikit. Kondisi tersebut menyebabkan variasi serasah dan eksudat akar yang masuk ke dalam tanah juga lebih rendah sehingga ketersediaan sumber karbon bagi bakteri menjadi lebih terbatas. Walaupun demikian, keberadaan pohon penayang pada agroforestri sederhana masih mampu mempertahankan kondisi tanah yang lebih baik dibandingkan sistem monokultur, sehingga populasi bakterinya tetap lebih tinggi dibandingkan monokultur kakao.

Nilai populasi bakteri terendah dijumpai pada monokultur kakao. Sistem monokultur umumnya hanya menghasilkan satu jenis serasah dengan kualitas yang relatif homogen sehingga menurunkan keberagaman substrat bagi mikroorganisme tanah. Selain itu, penutupan tajuk yang lebih sederhana menyebabkan suhu tanah lebih tinggi dan kelembapan tanah lebih rendah, sehingga aktivitas bakteri menjadi kurang optimal. Intensifikasi pengelolaan pada sistem monokultur juga sering dikaitkan dengan penurunan kandungan bahan organik tanah dan penyederhanaan komunitas mikroba akibat berkurangnya heterogenitas habitat. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa konversi sistem agroforestri menjadi monokultur umumnya diikuti oleh penurunan kualitas biologis tanah.

Populasi Fungi Tanah

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa tipe penggunaan lahan berpengaruh sangat nyata terhadap populasi fungi tanah ($p < 0,0001$). Hasil uji lanjut BNT taraf 5% menunjukkan bahwa seluruh tipe penggunaan lahan berbeda nyata satu sama lain (Tabel 1). Populasi fungi tertinggi ditemukan pada agroforestri kompleks ($6,84 \pm 0,42 \times 10^5$ CFU g⁻¹ tanah), diikuti agroforestri sederhana ($4,66 \pm 0,30 \times 10^5$ CFU g⁻¹ tanah), sedangkan populasi fungi terendah terdapat pada monokultur kakao ($2,16 \pm 0,15 \times 10^5$ CFU g⁻¹ tanah). Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kompleksitas vegetasi berkorelasi positif dengan meningkatnya populasi fungi tanah, sehingga sistem agroforestri mampu menyediakan habitat yang lebih mendukung perkembangan komunitas fungi dibandingkan sistem monokultur.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa keberadaan pohon dalam sistem agroforestri dapat meningkatkan kelimpahan relatif fungi dan mengubah struktur komunitas fungi tanah dibandingkan sistem monokultur. Rasio fungi

terhadap bakteri pada barisan pohon agroforestri dilaporkan lebih tinggi daripada pada lahan monokultur, terutama karena meningkatnya masukan residu pohon dan berkurangnya gangguan tanah (Beule et al., 2019). Praktik agroforestri berbasis ginkgo juga terbukti mengubah komposisi komunitas fungi tanah serta memperbaiki kondisi kesuburan dan kandungan karbon tanah dibandingkan sistem budidaya yang lebih sederhana (Guo et al., 2019). Pada sistem kakao, kompleksitas agroforestri dilaporkan memengaruhi keragaman, aktivitas, dan kelompok fungi yang berperan dalam dekomposisi serasah serta siklus karbon dan nitrogen (Nahon et al., 2024). Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa kompleksitas vegetasi, masukan bahan organik, dan kondisi tanah merupakan faktor penting dalam membentuk komunitas fungi pada sistem agroforestri..

Tingginya populasi fungi pada agroforestri kompleks diduga disebabkan oleh tingginya masukan serasah yang berasal dari berbagai jenis pohon penyusun vegetasi. Berbeda dengan bakteri yang lebih banyak memanfaatkan senyawa karbon sederhana, fungi memiliki kemampuan menghasilkan enzim ekstraseluler untuk menguraikan senyawa organik kompleks seperti lignin, selulosa, hemiselulosa, dan polifenol yang banyak terkandung dalam daun, ranting, dan sisa jaringan tanaman berkayu. Semakin beragam jenis vegetasi, semakin beragam pula kualitas serasah yang tersedia sehingga menyediakan substrat yang lebih luas bagi pertumbuhan berbagai kelompok fungi dekomposer. Selain itu, sistem agroforestri kompleks juga menghasilkan kondisi iklim mikro yang lebih stabil melalui penutupan tajuk yang lebih rapat sehingga kelembapan tanah tetap terjaga dan fluktuasi suhu menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut sangat mendukung pertumbuhan hifa dan perkembangan miselium fungi di dalam tanah.

Populasi fungi pada agroforestri sederhana lebih rendah dibandingkan agroforestri kompleks, namun masih lebih tinggi daripada monokultur kakao. Kondisi ini diduga berkaitan dengan berkurangnya keragaman spesies tanaman penyusun sehingga jumlah dan kualitas serasah yang masuk ke permukaan tanah menjadi lebih sedikit. Penurunan keragaman vegetasi juga mengurangi variasi eksudat akar dan asosiasi dengan fungi mikoriza, sehingga jumlah relung ekologis (ecological niches) yang tersedia bagi komunitas fungi menjadi lebih terbatas. Meskipun demikian, keberadaan pohon penayang pada agroforestri sederhana masih mampu mempertahankan kondisi lingkungan yang lebih baik dibandingkan sistem monokultur sehingga populasi fungi tetap relatif tinggi.

Nilai populasi fungi terendah diperoleh pada monokultur kakao. Sistem monokultur umumnya menghasilkan serasah yang lebih homogen dan dalam jumlah yang lebih sedikit sehingga membatasi ketersediaan substrat bagi fungi dekomposer. Selain itu, struktur tajuk

yang sederhana menyebabkan intensitas cahaya yang mencapai permukaan tanah lebih tinggi sehingga suhu tanah meningkat dan kelembapan menurun. Kondisi tersebut kurang mendukung pertumbuhan miselium fungi yang sangat bergantung pada ketersediaan air di dalam tanah. Praktik pengelolaan yang lebih intensif pada lahan monokultur juga sering menyebabkan penurunan kandungan bahan organik dan terganggunya jaringan hifa fungi akibat gangguan mekanis maupun penggunaan input pertanian secara terus-menerus. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa konversi agroforestri menjadi monokultur menyebabkan penurunan keanekaragaman fungi tanah, terutama kelompok fungi mikoriza arbuskula yang berperan penting dalam penyerapan unsur hara tanaman (Beule et al., 2019).

Biomassa Karbon Mikroba

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa tipe penggunaan lahan berpengaruh sangat nyata terhadap biomassa karbon mikroba (Microbial Biomass Carbon/MBC) tanah ($p < 0,0001$). Hasil uji lanjut BNT taraf 5% menunjukkan bahwa ketiga tipe penggunaan lahan berbeda nyata satu sama lain (Tabel 1). Nilai biomassa karbon mikroba tertinggi ditemukan pada agroforestri kompleks ($822,80 \pm 34,45 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ tanah}$), diikuti agroforestri sederhana ($599,00 \pm 26,51 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ tanah}$), sedangkan nilai terendah terdapat pada monokultur kakao ($350,80 \pm 24,72 \text{ mg C kg}^{-1} \text{ tanah}$). Pola tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kompleksitas vegetasi suatu ekosistem, semakin besar biomassa mikroorganisme yang mampu dipertahankan di dalam tanah.

Hasil penelitian ini konsisten dengan berbagai penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa sistem agroforestri umumnya mampu mempertahankan biomassa karbon mikroba lebih tinggi dibandingkan sistem monokultur. Keberadaan pohon dalam sistem agroforestri meningkatkan masukan bahan organik dan cadangan karbon organik tanah melalui serasah, akar, serta biomassa pohon, sehingga menyediakan sumber karbon yang lebih besar bagi komunitas mikroba tanah (Cardinael et al., 2017). Agroforestri juga memberikan berbagai manfaat ekologis berupa pengayaan tanah, perbaikan siklus hara, konservasi biodiversitas, dan peningkatan aktivitas biologis tanah melalui interaksi antara komponen pohon, tanaman pertanian, dan organisme tanah (Jose, 2009). Sistem agroforestri dilaporkan memiliki kandungan karbon dan nitrogen tanah serta biomassa karbon dan nitrogen mikroba yang lebih tinggi dibandingkan sistem rotasi jagung–kedelai tanpa pohon, yang menunjukkan bahwa keberadaan tanaman berkayu berkontribusi terhadap peningkatan kesehatan biologis tanah (Eddy & Yang, 2022). Secara keseluruhan, peningkatan biomassa karbon mikroba pada agroforestri berkaitan dengan ketersediaan substrat karbon yang lebih besar, masukan bahan

organik yang lebih beragam, dan kondisi lingkungan tanah yang lebih mendukung aktivitas mikroorganisme.

Tingginya biomassa karbon mikroba pada agroforestri kompleks erat kaitannya dengan tingginya masukan karbon organik yang berasal dari berbagai komponen vegetasi. Sistem agroforestri kompleks menghasilkan serasah dalam jumlah yang lebih besar dan lebih beragam, baik berupa daun, ranting, bunga, buah maupun akar yang mengalami dekomposisi. Akumulasi bahan organik tersebut menjadi sumber karbon utama bagi mikroorganisme tanah sehingga meningkatkan biomassa mikroba secara keseluruhan. Selain itu, keberadaan berbagai spesies tanaman menghasilkan eksudat akar yang lebih beragam sehingga menyediakan pasokan karbon yang berlangsung secara kontinu di daerah rizosfer. Kondisi ini memungkinkan mikroorganisme memanfaatkan karbon secara lebih efisien untuk pertumbuhan dan pembentukan biomassa (Guo et al., 2019).

Nilai biomassa karbon mikroba pada agroforestri sederhana lebih rendah dibandingkan agroforestri kompleks, namun masih lebih tinggi dibandingkan monokultur kakao. Hal ini diduga disebabkan oleh masih adanya komponen pohon penabung yang mampu mempertahankan pasokan bahan organik dan memperbaiki kondisi iklim mikro tanah. Akan tetapi, jumlah spesies pohon yang lebih sedikit menyebabkan produksi serasah dan variasi kualitas bahan organik lebih rendah dibandingkan agroforestri kompleks. Akibatnya, jumlah karbon yang tersedia sebagai sumber energi bagi komunitas mikroba juga lebih terbatas sehingga biomassa karbon mikroba menjadi lebih rendah.

Sebaliknya, biomassa karbon mikroba terendah ditemukan pada monokultur kakao. Sistem monokultur umumnya menghasilkan masukan bahan organik yang lebih sedikit dan lebih homogen sehingga pasokan karbon ke dalam tanah menjadi terbatas. Selain itu, struktur tajuk yang lebih sederhana menyebabkan suhu tanah meningkat dan kelembapan tanah menurun sehingga aktivitas metabolisme mikroorganisme kurang optimal. Berkurangnya kandungan karbon organik tanah juga mengurangi kemampuan tanah dalam mempertahankan biomassa mikroba.

Besarnya biomassa karbon mikroba pada agroforestri kompleks juga menunjukkan bahwa sebagian besar karbon organik yang masuk ke dalam tanah tidak hanya terakumulasi sebagai bahan organik, tetapi juga dimanfaatkan oleh komunitas mikroorganisme sebagai sumber energi dan penyusun biomassa sel. Mikroorganisme berperan penting dalam proses dekomposisi serasah, mineralisasi unsur hara, pembentukan agregat tanah, serta penyimpanan karbon jangka panjang melalui pembentukan bahan organik yang lebih stabil. Dengan demikian, peningkatan biomassa karbon mikroba tidak hanya mencerminkan tingginya

aktivitas biologis tanah, tetapi juga menunjukkan meningkatnya fungsi ekosistem dalam mendukung siklus karbon dan kesuburan tanah.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa tingkat kompleksitas sistem penggunaan lahan memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap kualitas biologis tanah di kawasan penyangga Taman Nasional Lore Lindu. Agroforestri kompleks secara konsisten menunjukkan populasi bakteri tanah, populasi fungi tanah, dan biomassa karbon mikroba yang lebih tinggi dibandingkan agroforestri sederhana maupun monokultur kakao. Temuan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kompleksitas vegetasi, semakin besar kemampuan suatu sistem penggunaan lahan dalam menyediakan bahan organik, mempertahankan kondisi mikroklimat tanah, dan mendukung aktivitas komunitas mikroorganisme tanah. Sebaliknya, penyederhanaan vegetasi pada sistem monokultur kakao menyebabkan berkurangnya keragaman sumber karbon dan kualitas habitat mikroba sehingga populasi bakteri, populasi fungi, dan biomassa karbon mikroba mengalami penurunan.

Saran

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengelolaan agroforestri yang mempertahankan keragaman vegetasi perlu diprioritaskan sebagai strategi konservasi kualitas biologis tanah pada kawasan penyangga Taman Nasional Lore Lindu. Upaya mempertahankan atau meningkatkan jumlah dan keragaman pohon penayang dalam kebun kakao diharapkan dapat menjaga keberlanjutan fungsi ekosistem tanah melalui peningkatan masukan bahan organik, stabilitas mikroklimat, serta aktivitas mikroorganisme.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh mahasiswa Fakultas Kehutanan Universitas Tadulako yang telah berpartisipasi dan memberikan bantuan selama pelaksanaan penelitian, mulai dari pengambilan sampel di lapangan hingga pengolahan data. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Laboran Laboratorium Ilmu Kehutanan, Fakultas Kehutanan Universitas Tadulako, atas bantuan teknis, fasilitasi penggunaan laboratorium, serta pendampingan selama proses analisis sampel. Dukungan dan kerja sama yang diberikan telah berkontribusi terhadap kelancaran dan penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

- Agbangba, C. E., Sacla Aide, E., Honfo, H., & Glèlè Kakai, R. (2024). On the use of post-hoc tests in environmental and biological sciences: A critical review. *Heliyon*, 10, e25131. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25131>
- Baldrian, P., López-Mondéjar, R., & Kohout, P. (2023). Forest microbiome and global change. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 487–501. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00876-4>
- Banerjee, S., Baah-Acheamfour, M., Carlyle, C. N., Bissett, A., Richardson, A. E., Siddique, T., & Chang, S. X. (2016). Determinants of bacterial communities in Canadian agroforestry systems. *Environmental Microbiology*, 18(6), 1807–1820. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12986>
- Ben-David, A., & Davidson, C. E. (2014). Estimation method for serial dilution experiments. *Journal of Microbiological Methods*, 107, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2014.08.023>
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, 31, 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
- Berkelmann, D., Schneider, D., Engelhaupt, M., Heinemann, M., Christel, S., Wijayanti, M., & Daniel, R. (2018). How rainforest conversion to agricultural systems in Sumatra (Indonesia) affects active soil bacterial communities. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2381. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02381>
- Beule, L., Corre, M. D., Schmidt, M., Göbel, L., Veldkamp, E., & Karlovsky, P. (2019). Conversion of monoculture cropland and open grassland to agroforestry alters the abundance of soil bacteria, fungi and soil-N-cycling genes. *PLoS ONE*, 14(6), e0218779. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218779>
- Butler, O. M., Manzoni, S., & Warren, C. R. (2023). Community composition and physiological plasticity control microbial carbon storage across natural and experimental soil fertility gradients. *The ISME Journal*, 17(12), 2157–2168. <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01527-5>
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B. G., Dupraz, C., & Chenu, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>
- Das, S., Deb, S., Sahoo, S. S., & Sahoo, U. K. (2023). Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 43, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.12.007>
- Dodino-Gutiérrez, C. A., Santiago-Galvis, J. M., Rabelo-Florez, R. A., & Cubillos-Hinojosa, J. G. (2023). Application of molecular techniques in soil microbiology for the identification of bacteria with agricultural potential: A review and bibliometric analysis. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(2). <https://doi.org/10.17584/rcch.2023v17i2.16096>
- Eddy, W. C., & Yang, W. H. (2022). Improvements in soil health and soil carbon sequestration by an agroforestry for food production system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 333, 107945. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107945>

- Guo, J., Wang, G., Wu, Y., Shi, Y., Feng, Y., & Cao, F. (2019). Ginkgo agroforestry practices alter the fungal community structures at different soil depths in Eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21534–21543. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05293-w>
- Hapid, A., & Zulkaidhah. (2019). Keanekaragaman jenis rayap pada lahan agroforestri dan kebun kemiri di Desa Bakubakulu Kecamatan Palolo Kabupaten Sigi. *Biocелеbes*, 13(2).
- Harahap, Y. F. (2019). Analisis kehilangan karbon organik tanah pada Daerah Aliran Sungai Deli (DAS Deli) Provinsi Sumatera Utara. *Tunas Geografi*, 8(1). <https://doi.org/10.24114/tgeo.v8i1.13481>
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Kim, N., Zabaloy, M. C., Guan, K., & Villamil, M. B. (2020). Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. *Soil Biology and Biochemistry*, 142, 107701. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107701>
- Lukita, S. Y., Rahayu, E., & Parwati, W. D. U. (2023). Pengaruh aplikasi cocopeat pada media tanam dan penyiraman air leri terhadap pertumbuhan bibit kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) di pre nursery. *AGROFORETECH*, 1(1), 202–209.
- Martini, K. M., Boddu, S. S., Nemenman, I., & Vega, N. M. (2024). Maximum likelihood estimators for colony-forming units. *Microbiology Spectrum*, 12(9). <https://doi.org/10.1128/spectrum.03946-23>
- Mishra, A. K., Yadav, P., Sharma, S., & Maurya, P. (2024). Comparison of microbial diversity and community structure in soils managed with organic and chemical fertilization strategies using amplicon sequencing of 16S and ITS regions. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1444903. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1444903>
- Muhardi, & Effendy. (2017). Cocoa farming patterns for sustainability of Indonesia Lore Lindu National Park (LLNP). *Australian Journal of Crop Science*, 11(8). <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.08.pne34>
- Nahon, S. M. R., Trindade, F. C., Yoshiura, C. A., Martins, G. C., Costa, I. R. C. da, Costa, P. H. de O., & Valadares, R. B. da S. (2024). Impact of agroforestry practices on soil microbial diversity and nutrient cycling in Atlantic Rainforest cocoa systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11345. <https://doi.org/10.3390/ijms252111345>
- Radhakrishnan, S., & Mohan, V. (2016). Status of microbial diversity in agroforestry systems in Tamil Nadu, India. *Journal of Basic Microbiology*, 56(6), 651–660. <https://doi.org/10.1002/jobm.201500639>
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703–707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- Wang, B., An, S., Liang, C., Liu, Y., & Kuzyakov, Y. (2021). Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 162, 108422. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>

- Wang, C., & Kuzyakov, Y. (2024). Mechanisms and implications of bacterial-fungal competition for soil resources. *The ISME Journal*, 18(1), wræ073. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae073>
- Wu, B., Zhang, M., Zhai, Z., Dai, H., Yang, M., & Zhang, Y. (2024). Soil organic carbon, carbon fractions, and microbial community under various organic amendments. *Scientific Reports*, 14, 25431. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75771-w>
- Zhang, Z. Y., Li, X., Chen, W. H., Liang, J. D., & Han, Y. F. (2023). Culturable fungi from urban soils in China II, with the description of 18 novel species in Ascomycota (Dothideomycetes, Eurotiomycetes, Leotiomycetes and Sordariomycetes). *MycoKeys*, 98, 1–39. <https://doi.org/10.3897/mycokeys.98.102816>
- Zhou, J., Sun, T., Shi, L., Kurganova, I., Lopes de Gerenyu, V., Kalinina, O., & Kuzyakov, Y. (2023). Organic carbon accumulation and microbial activities in arable soils after abandonment: A chronosequence study. *Geoderma*, 435, 116496. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116496>
- Zulkaidhah, Z., Malik, A., Hapid, A., Hamka, H., Ariyanti, A., & Rahman, N. (2021). The diversity of termite species on natural forest and agroforestry land in Sulawesi tropical forests in Indonesia. *Annals of Silvicultural Research*, 46(2). <https://doi.org/10.12899/asr-2228>
- Zulkaidhah, Z., Wardah, W., Saleh, S., Satriawan, W., Hapid, A., Wulandari, R., & Hamka, H. (2022). Soil macrofauna diversity and litter decomposition rate in the buffer zone of Lore Lindu Biosphere Reserve Indonesia. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 17(5). <https://doi.org/10.18280/ijdne.170513>