

Emisi Karbon Dioksida Tanah di Bawah Penggunaan Lahan Hutan dan Pertanian di Daerah Aliran Sungai Tanralili

Soil Carbon Dioxide Emissions under Forest and Agricultural Land Uses in the Tanralili Watershed

Marselianti^{1*}, Rismaneswati², Hazairin Zubair²

¹Program Studi Konservasi Sumberdaya Alam, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia

²Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

*Corresponding email: marselianti@uts.ac.id

ABSTRACT

The conversion of forests into agricultural land has the potential to increase soil CO₂ emissions due to changes in soil properties, microbial activity, and land management practices. This study aimed to analyze CO₂ emissions under different land uses in the Tanralili Watershed and their relationship with microbial respiration activity and environmental factors. Soil CO₂ emissions were measured using the chamber method across eight land-use types during three observation periods. Heterotrophic respiration was analyzed through soil incubation, while the relationships between CO₂ emissions and soil temperature, soil moisture, air temperature, and air humidity were analyzed using Pearson correlation analysis. The results showed that the highest CO₂ emissions were found in intensive agricultural land, namely PJ1 at 28.92 t ha⁻¹ yr⁻¹ and PH at 25.01 t ha⁻¹ yr⁻¹, while the lowest emissions were found in the mixed garden (PK) at 16.15 t ha⁻¹ yr⁻¹, and forest land (HP, HS, and HPK) ranged from 9.94–12.2 ton ha⁻¹ yr⁻¹. The emission pattern followed the plant growth stages, with high emissions during the vegetative stage after fertilization, decreasing during the generative stage, and increasing again during the maturation stage. Heterotrophic respiration showed a decreasing trend with increasing soil depth, in line with the decline in soil organic carbon content. CO₂ emissions were positively correlated with soil temperature and air temperature and negatively correlated with air humidity, whereas soil moisture showed no significant relationship with CO₂ emissions. The results indicate that land management, microbial activity, and environmental conditions play important roles in controlling soil CO₂ emissions. Land management should therefore be directed toward low-emission agricultural practices through efficient fertilizer use, increasing soil organic matter, and implementing agroforestry systems to reduce carbon emissions and enhance carbon sequestration.

Keywords: agriculture, CO₂ emissions, environmental variables, forest, heterotrophic respiration Tanralili Watershed

ABSTRAK

Konversi hutan menjadi lahan pertanian berpotensi meningkatkan emisi CO₂ tanah akibat perubahan sifat tanah, aktivitas mikroorganisme, dan pengelolaan lahan. Penelitian ini bertujuan menganalisis emisi CO₂ pada berbagai penggunaan lahan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Tanralili serta hubungannya dengan aktivitas respirasi mikroba dan faktor lingkungan. Pengukuran emisi CO₂ dilakukan menggunakan metode sungkup pada delapan tipe penggunaan lahan selama tiga periode pengamatan. Respirasi heterotrofik dianalisis melalui inkubasi tanah, sedangkan hubungan emisi CO₂ dengan suhu tanah, kelembaban tanah, suhu udara, dan kelembaban udara dianalisis menggunakan korelasi Pearson. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi CO₂ tertinggi terdapat pada lahan pertanian intensif, yaitu PJ1 sebesar 28,92 ton/ha/tahun dan PH sebesar 25,01 ton/ha/tahun, sedangkan emisi terendah terdapat pada kebun campuran (PK) sebesar 16,15 ton/ha/tahun, dan lahan hutan (HP, HS, dan HPK) berkisar 9,94–12,72 ton/ha/tahun. Pola emisi mengikuti fase pertumbuhan tanaman, yaitu tinggi pada fase vegetatif setelah pemupukan, menurun pada fase generatif, dan kembali meningkat pada fase pematangan. Respirasi heterotrofik menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya kedalaman tanah, sejalan dengan penurunan kandungan karbon organik. Emisi CO₂ berkorelasi positif

dengan suhu tanah dan suhu udara, serta berkorelasi negatif dengan kelembaban udara, sedangkan kelembaban tanah tidak menunjukkan hubungan yang signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan lahan, aktivitas mikroba, dan kondisi lingkungan berperan penting dalam mengendalikan emisi CO₂ tanah. Pengelolaan lahan perlu diarahkan pada praktik pertanian rendah emisi melalui efisiensi penggunaan pupuk, peningkatan bahan organik tanah, serta penerapan agroforestri untuk menekan emisi karbon dan meningkatkan penyimpanan karbon.

Kata kunci: pertanian, emisi CO₂, variabel lingkungan, hutan, respirasi heterotrofik, DAS Tanralili

1. PENDAHULUAN

Salah satu tantangan utama dalam pengelolaan sumber daya lahan adalah menciptakan mekanisme pembangunan berkelanjutan yang dapat menyeimbangkan pemanfaatan sumber daya alam dengan keberlanjutannya. Seiring dengan bertambahnya aktivitas manusia untuk memenuhi kebutuhan hidup, pemanfaatan lahan juga semakin meningkat. Lahan, sebagai bagian dari lingkungan hidup, memainkan peran penting dalam memenuhi berbagai kebutuhan manusia, dan perannya terus berkembang seiring dengan meningkatnya tuntutan terhadap sumber daya alam (Mensah, 2019).

Tanah dapat berperan sebagai penyerap atau penghasil gas rumah kaca, seperti CO₂, CH₄, dan N₂O, tergantung pada cara penggunaan dan pengelolaannya (Widiatmaka et al., 2012). Pelepasan karbon ke atmosfer memberikan dua efek utama terhadap lingkungan. Pertama, kualitas dan produktivitas tanah menurun, yang menyebabkan efisiensi penggunaan bahan organik berkurang, hasil pertanian menurun, dan kerawanan pangan meningkat (Tahat et al., 2020). Kedua, konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer bertambah, sehingga mempercepat proses pemanasan global (Dahal et al., 2010). *Land Use, Land-Use Change, and Forestry* (LULUCF) menjadi salah satu sektor penyumbang emisi terbesar di Indonesia, mencapai 63% dari total emisi (Sidik et al., 2017). Aktivitas konversi lahan dan pengelolaan tanah berperan besar terhadap dinamika karbon tanah. Sebanyak 14% emisi gas rumah kaca global berasal dari sektor pertanian, termasuk emisi gas CO₂, N₂O, dan CH₄, sementara di tingkat nasional angkanya mencapai 7% (Ariani et al., 2015).

Konversi lahan menjadi area pertanian sering kali menyebabkan berkurangnya karbon tanah akibat meningkatnya dekomposisi bahan organik di lapisan tanah atas, yang menghasilkan emisi CO₂ melalui proses respirasi tanah (Verchot et al., 2020). Penurunan karbon tanah ini dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu tingkat intensitas penggunaan lahan pertanian dan metode pengelolaannya, seperti pengolahan tanah, rotasi tanaman, dan pemberian

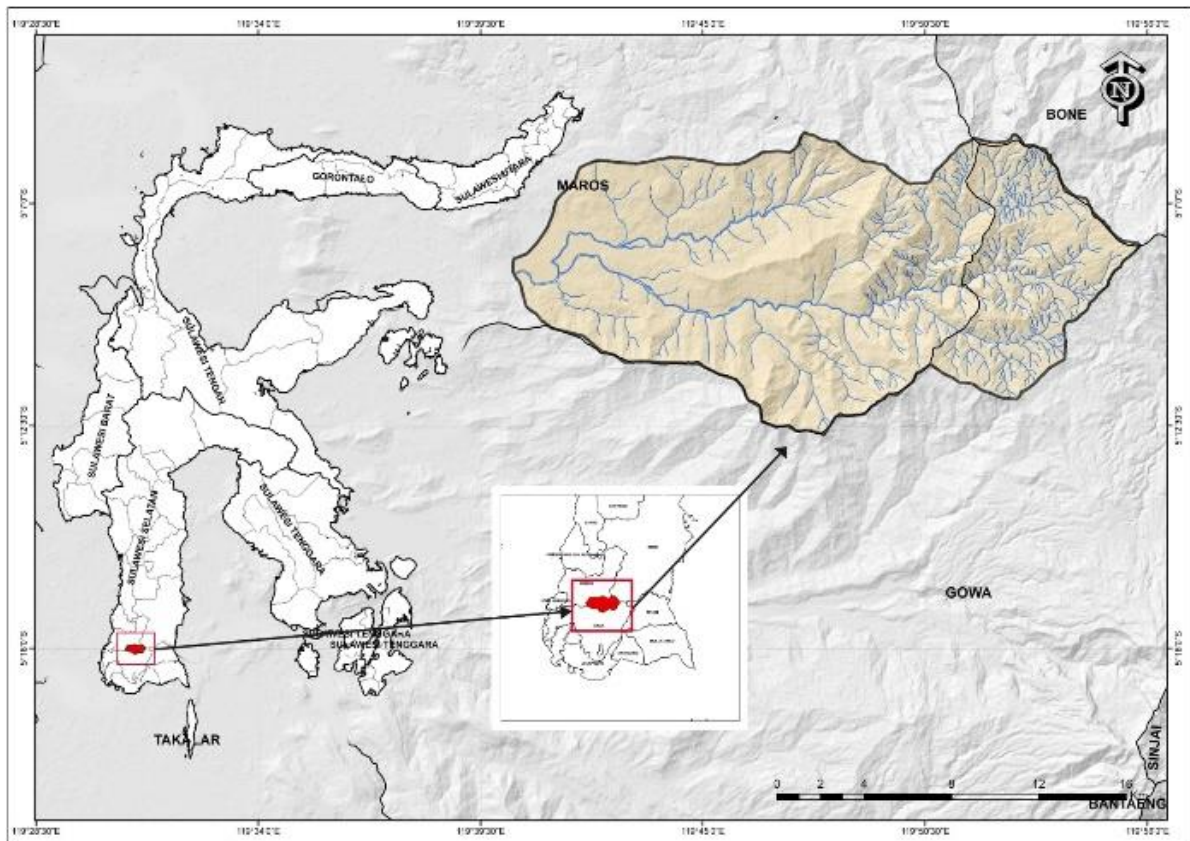
pupuk, yang secara langsung memengaruhi dinamika cadangan karbon dalam tanah (Bellamy et al., 2005).

Kebutuhan lahan di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) terus meningkat seiring dengan pertumbuhan kebutuhan manusia. Namun, eksploitasi sumber daya alam yang tidak terkendali telah menyebabkan penurunan fungsi dan daya dukung lahan serta lingkungan (He et al., 2018). Di DAS Tanralili, alih fungsi hutan menjadi lahan pertanian berdampak signifikan pada penurunan tutupan vegetasi. Penelitian yang dilakukan oleh (Hasnawir et al., 2017) di DAS Tanralili menunjukkan bahwa pada tahun 2000, tutupan lahan dengan vegetasi rapat mencapai 8548 ha (33,28%), namun jumlah ini menurun drastis menjadi 2329 ha (9,07%) pada tahun 2013, yang menunjukkan pengurangan sebesar 24,21% atau 6219 ha. Selain itu, luas hutan tanaman industri di wilayah ini juga berkurang sebesar 126,81 ha dalam rentang waktu 2010 hingga 2020 (Surahman, 2021). Penurunan ini berpotensi meningkatkan emisi CO₂, sehingga penelitian dilakukan untuk menganalisis lebih lanjut dampak perubahan penggunaan lahan terhadap emisi karbon di wilayah ini.

2. METODOLOGI

2.1. Deskripsi Lokasi

Lokasi penelitian berada di wilayah Sub-DAS Tanralili, yang merupakan bagian dari DAS Maros (Gambar 1). Wilayah ini mencakup Kabupaten Maros (Kecamatan Tompobulu) dan Kabupaten Gowa (Kecamatan Tombolo Pao) di Sulawesi Selatan, dengan luas sebesar 27.838,90 ha. Secara geografis, Sub-DAS Tanralili terletak pada koordinat 5°5' - 5°12' LS dan 119°40' - 119°55' BT. Sub DAS Tanralili memiliki peran penting sebagai sumber utama pasokan air bersih untuk kebutuhan air minum masyarakat di bagian timur dan utara Kota Makassar. Selain fungsi hidrologis, Sub DAS Tanralili menjadi sumber daya lahan untuk berbagai kegiatan seperti pertanian, hortikultura, perkebunan, dan pengelolaan hutan bagi masyarakat di wilayah hulu, tengah, dan hilirnya.



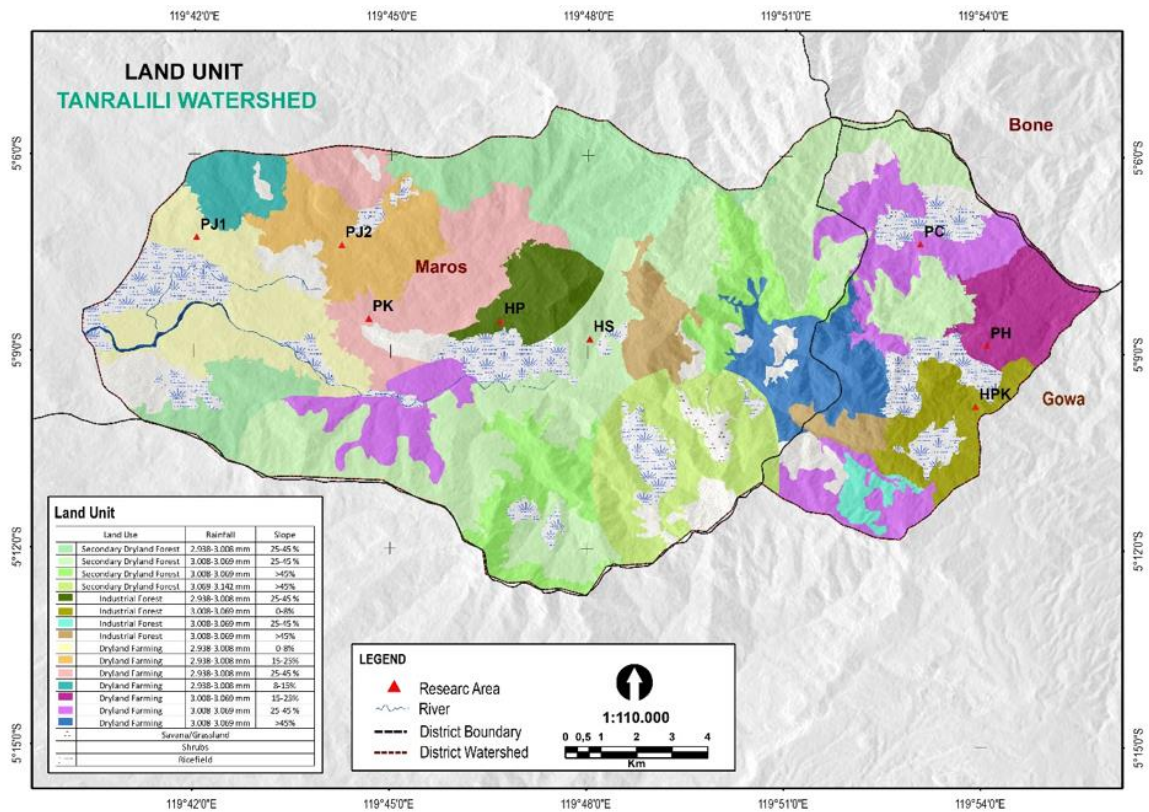
Gambar 1. Lokasi Sub-DAS Tanralili

2.2. Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengambilan sampel gas secara purposif berdasarkan peta satuan lahan untuk mengukur emisi gas CO₂ dari berbagai jenis penggunaan lahan. Selain itu, data primer juga mencakup pengukuran suhu udara dan tanah serta kelembaban udara dan tanah di lokasi pengamatan. Sementara itu, data sekunder terdiri dari data spasial dan data iklim. Data spasial mencakup Peta DAS Tanralili, Peta Tutupan Lahan DAS Tanralili, Peta Kemiringan DAS Tanralili dan Data Curah Hujan selama 10 tahun terakhir (2011–2021).

2.3. Penentuan Lokasi Pengamatan

Penentuan lokasi pengamatan dilakukan dengan cara overlay peta, antara lain Peta Tutupan Lahan Sub DAS Tanralili, Peta Kemiringan Sub DAS Tanralili dan Peta curah hujan wilayah Sub DAS Tanralili selama 10 tahun terakhir (2011-2021), sehingga membentuk peta satuan lahan (Gambar 2).



Gambar 2. Peta Satuan DAS Tanralili

Penentuan lokasi pengambilan sampel berdasarkan keterwakilan satuan lahan hasil *overlay* dan aksesibilitas lokasi. Penelitian ini memiliki batasan ruang pengamatan yaitu hanya dilakukan pada satuan lahan dengan penggunaan lahan pertanian lahan kering dan hutan. Lokasi pengamatan untuk daerah pertanian lahan kering dipilih berdasarkan daerah yang terdapat aktivitas pertanian yaitu pertanian pangan dan hortikultura di wilayah tersebut. Terdapat delapan lokasi yang dipilih berdasarkan satuan lahan yang dianggap mewakili (Tabel 1).

Tabel 1. Lokasi perwakilan pengamatan

No	Penggunaan Lahan	Curah Hujan	Kemiringan Lereng	Vegetasi	Simbol Unit
1	Pertanian Lahan Kering	2.938-3.008 mm	0-8%	Kebun Jagung	PJ1
2	Pertanian Lahan Kering	2.938-3.008 mm	15-25%	Kebun Jagung	PJ2
3	Pertanian Lahan Kering	2.938-3.008 mm	25-45 %	Kebun Campuran	PK
4	Hutan Tanaman Industri	2.938-3.008 mm	25-45 %	Hutan Pinus	HP
5	Hutan Kering Sekunder	3.008-3.069 mm	25-45 %	Pohon Campuran	HS

Tabel 1. Lokasi perwakilan pengamatan (*lanjutan*)

No	Penggunaan Lahan	Curah Hujan	Kemiringan Lereng	Vegetasi	Simbol Unit
6	Pertanian Lahan Kering	3.008-3.069 mm	25-45 %	Kebun Cengkeh	PC
7	Pertanian Lahan Kering	3.008-3.069 mm	15-25%	Kebun Hortikultura	PH
8	Hutan Tanaman Industri	3.008-3.069 mm	0-8%	Hutan Pinus, Kebun Kopi	HPK

2.4. Pengamatan Lapangan

Pada penelitian ini, pengambilan sampel gas dilakukan dengan menggunakan metode *chamber-based* atau sungkup, yang digunakan untuk memantau dan mengambil sampel gas dari pertukaran CO₂ antara permukaan tanah dan atmosfer. Metode ini telah menjadi teknik utama dalam memantau pertukaran CO₂ antara tanah dan atmosfer. Metode *chamber based* pertama kali diperkenalkan oleh Henrik Lundegårdh, yang secara umum dianggap sebagai ilmuwan pertama yang mengukur respirasi tanah di lapangan (Pavelka et al., 2018). Sejak itu, metode ini terus mengalami penyempurnaan serta diintegrasikan dengan analisis gas modern seperti Gas Kromatografi sehingga kini menjadi standar dalam pengukuran fluks karena kesederhanaan serta kemudahan penggunaannya di berbagai kondisi lapangan.

Saat melakukan pengamatan dilapangan, *chamber base* atau sungkup diletakkan di tiga titik berbeda pada setiap lokasi pengamatan, dengan metode *purposive sampling*. Penempatan ini dilakukan untuk memastikan hasil pengukuran dapat mewakili kondisi sebenarnya di setiap lokasi. Pada lahan pertanian, *chamber base* ditempatkan di area guludan, baik di baris tanam maupun di antara guludan. Sementara itu, pada lahan hutan, *chamber base* ditempatkan di lokasi yang dianggap representatif terhadap kondisi hutan.

Pengambilan contoh gas dilakukan pada masing-masing lokasi pengamatan antara pukul 09.00 hingga 11.00 WITA. Sampel gas diambil sebanyak tiga kali dengan interval waktu lima menit, yaitu pada menit ke-5, ke-10, dan ke-15. Sampel gas diambil menggunakan jarum suntik (*syringe*), kemudian dimasukkan ke dalam botol vial yang memiliki tutup karet dan telah divakum sebelumnya. Selain pengambilan gas, dilakukan juga pengukuran suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, dan kelembaban tanah di lokasi pengamatan.

Sampel tanah terganggu juga diambil pada lokasi yang sama dengan titik pengambilan gas untuk mengidentifikasi respirasi heterotrofik secara sederhana. Pengambilan dilakukan pada beberapa interval kedalaman, yaitu 0–10 cm, 10–20 cm, dan 20–30 cm. Sampel yang diperoleh kemudian dianalisis di laboratorium. Selain itu, wawancara juga dilakukan dengan

pemilik lahan pertanian untuk mengetahui informasi mengenai praktik pertanian yang mereka terapkan.

2.5. Analisis Laboratorium

Sampel gas dianalisis mengacu pada IRRI dan *US-Environmental Protection Agency Nations* (1995), menggunakan alat kromatografi gas Micro GC CP-4900. Sampel gas dimasukkan dalam *syringe* kemudian diinjeksi kedalam Micro GC CP-4900. Sampel akan masuk kedalam *column* dan dipisahkan dengan senyawa lain, kemudian selanjutnya akan diidentifikasi kedalam komputer dalam bentuk *peak*. Selanjutnya akan diinterpretasikan dalam bentuk angka. Analisis sampel tanah untuk mengetahui c-organik menggunakan metode Walkley & Black, dan respirasi tanah menggunakan metode inkubasi.

2.6. Pengukuran Fluks CO₂

Pengukuran fluks CO₂ dilakukan untuk memperkirakan jumlah emisi CO₂ dari tanah yang dilepaskan ke atmosfer. Perhitungan fluks CO₂ dilakukan menggunakan persamaan (Hu et al., 2004) berikut:

$$F = \rho + \frac{V}{A} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273+T} \times \alpha \quad (1)$$

dimana: F = fluks CO₂ (g/m²/menit), ρ = densitas CO₂ (1.96 g/m³), V = volume chamber (m³), A = luas alas chamber (m²), Δc (m³) = perubahan konsentrasi CO₂ dalam chamber selama periode perubahan waktu Δt (menit), T (o^C) = suhu udara, α = faktor konversi untuk C ke CO₂ (12/44).

2.7. Analisis Statistik

Analisis korelasi Pearson menggunakan SPSS untuk melihat hubungan fluks CO₂ dengan variabel lingkungan (suhu tanah, kelembaban tanah, suhu udara dan kelembaban udara). Nilai koefisien korelasi yang diperoleh nantinya, menginformasikan tingkat keeretaan hubungan antar variabel tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Emisi CO₂ Berdasarkan Penggunaan Lahan

Pengukuran emisi CO₂ dalam penelitian ini dilakukan dengan metode sungkup, yang diperoleh dari respirasi tanah. Emisi tersebut berasal dari respirasi autotrof dan heterotrof, yang dilepaskan dari bawah permukaan tanah ke atmosfer (Rankin et al., 2023). Respirasi heterotrofik berasal dari dekomposisi bahan organik dalam tanah dan serasah tanaman, proses

ini bergantung pada aktivitas komunitas mikroba dalam tanah dan ketersediaan substrat yang tidak stabil (Ding et al., 2015). Respirasi autotrofik terdiri dari respirasi akar dan pasokan fotosintesis dari tanaman (Li et al., 2022).

Emisi CO₂ yang terukur pada berbagai penggunaan lahan merupakan hasil respirasi tanah. Secara umum, respirasi tanah merupakan gabungan respirasi autotrof yang berasal dari sistem perakaran tanaman dan respirasi heterotrof yang dilakukan oleh mikroorganisme tanah dalam proses dekomposisi bahan organik (Li et al., 2022; Ding et al., 2015). Dalam penelitian ini kedua komponen tersebut tidak dipisahkan pengukurannya sehingga nilai emisi CO₂ yang diperoleh merepresentasikan total respirasi tanah. Besarnya emisi CO₂ dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme, respirasi akar, kandungan bahan organik, kelembapan, suhu tanah, serta karakteristik vegetasi pada setiap penggunaan lahan (Raichkin et al., 2023). Oleh karena itu, perbedaan kondisi penggunaan lahan dapat menghasilkan laju emisi CO₂ yang berbeda. Nilai emisi CO₂ pada masing-masing penggunaan lahan selama tiga kali pengamatan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Emisi CO₂ pada setiap penggunaan lahan berdasarkan periode pengamatan

Lokasi Pengamatan	Emisi CO ₂ (g/m ² /hari)			Jumlah emisi CO ₂ (ton/ha/tahun)
	Pengamatan 1	Pengamatan 2	Pengamatan 3	
PJ1	8,46	6,42	8,89	28,92
PJ2	6,81	5,80	7,41	24,36
PK	4,39	4,2	4,68	16,15
HP	3,03	2,86	3,18	11,04
HS	2,71	2,44	3,01	9,94
PC	3,63	4,01	3,77	13,89
PH	7,04	7,63	5,89	25,01
HPK	3,01	4,05	3,40	12,72

Keterangan: PJ = pertanian jagung, PK = pertanian kebun campuran, HP = hutan tanaman industri pinus, HS = hutan sekunder, PC = pertanian cengkeh, PH = pertanian hortikultura, HPK = hutan tanaman industri pinus campur kopi.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dalam tiga kali pengukuran pada masing-masing jenis penggunaan lahan, rata-rata harian emisi CO₂ tertinggi ditemukan pada lahan pertanian, yaitu PJ1 sebesar 7,92 g/m²/hari atau setara dengan 28,92 ton/ha/tahun, PH sebesar 6,85 g/m²/hari atau setara 25,01 ton/ha/tahun, PJ2 sebesar 6,67 g/m²/hari atau setara 24,36 ton/ha/tahun, PK sebesar 4,42 g/m²/hari atau setara 16,15 ton/ha/tahun, PC sebesar 3,81

g/m²/hari atau setara 13,89 ton/ha/tahun, kemudian pada hutan HPK sebesar 3,41 g/m²/hari atau setara dengan 12,72 ton/ha/tahun, HP sebesar 3,03 g/m²/hari atau setara 11,04 ton/ha/tahun, dan HS sebesar 2,72 g/m²/hari atau setara 9,94 ton/ha/tahun. Besaran emisi yang dihasilkan dari lahan pertanian melebihi batas nilai yang disarankan IPCC (1997) sebesar 20 ton/ha/tahun untuk lahan ditanami tanaman pertanian.

Lahan pertanian dengan emisi CO₂ tertinggi adalah PJ1, PJ2, dan PH. Tingginya emisi CO₂ di ketiga lokasi ini disebabkan oleh pengelolaan lahan secara intensif, termasuk pemberian pemupukan anorganik berupa pupuk urea dan NPK setiap musim tanam. Pengaruh pemupukan ini dapat meningkatkan respirasi akar, sehingga menghasilkan emisi CO₂ yang lebih tinggi. Ketika urea diaplikasikan ke tanah, akan cepat terhidrolisis oleh enzim urease, kemudian terurai menjadi NH₃ dan CO₂ (Chakrabarti et al., 2024). Proses hidrolisis urea ini memberikan kontribusi signifikan terhadap volume CO₂ yang dilepaskan (Wang et al., 2020).

Berdasarkan hasil wawancara dengan pemilik lahan atau petani, dalam satu musim tanam, pemupukan pada lokasi PJ1 dilakukan ketika jagung berumur 15 HST dan 30 HST, dengan dosis pupuk yang sama, yaitu Urea sebanyak 100 kg dan NPK sebanyak 50 kg untuk lahan seluas 0,5 hektar. Pada lokasi PJ2, pemupukan dilakukan saat jagung berumur 15 HST dan 40 HST, dengan dosis pupuk yang sama, yaitu Urea sebanyak 50 kg dan NPK sebanyak 25 kg untuk lahan seluas 0,5 hektare. Sementara itu, lokasi PH merupakan lahan hortikultura dengan beberapa tanaman yang dirotasi. Pada lokasi ini, terdapat pengolahan tanah yaitu pada saat persiapan lahan dimana lahan diolah dengan cara dicangkul dan dibajak untuk membuat bedengan. Pupuk diberikan saat persiapan lahan, berupa pupuk kandang sebanyak 200 kg, sementara pupuk Urea dan NPK diberikan pada saat tanaman berumur 20 HST dan 45 HST, dengan dosis masing-masing 25 kg per jenis pupuk untuk setiap periode pemupukan, pada setiap luasan 10 are.

Pada pengamatan pertama, ketiga lokasi telah memasuki fase vegetatif dan telah menerima pemupukan. Di lokasi PJ1, tanaman jagung berumur 35 HST, di PJ2 tanaman jagung berumur 45 HST, sedangkan di PH merupakan lahan hortikultura dengan beberapa jenis tanaman yang dirotasi dan berumur sekitar 33 HST. Peningkatan respirasi tanah setelah aplikasi nitrogen pada lahan pertanian telah dilaporkan oleh Morell et al. (2010), sedangkan Chen et al. (2017) menyatakan bahwa penambahan nitrogen juga dapat meningkatkan respirasi autotrof melalui peningkatan pertumbuhan dan aktivitas fisiologis tanaman. Kondisi tersebut didukung oleh hasil penelitian Misbahuddin et al. (2018) yang menunjukkan bahwa fluks CO₂ pada fase

vegetatif lebih tinggi dibandingkan fase generatif. Tingginya fluks CO₂ pada fase vegetatif diduga karena tanaman masih berada pada tahap pertumbuhan awal sehingga jumlah daun belum berkembang secara optimal. Kondisi ini menyebabkan penyerapan karbon melalui proses fotosintesis masih relatif rendah, sehingga emisi CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer menjadi lebih tinggi.

Pada pengamatan kedua, di lokasi PJ1 dan PJ2, tanaman telah memasuki fase generatif dan mengalami penurunan emisi CO₂. Sebaliknya, di lahan PH, emisi CO₂ justru mengalami kenaikan sebesar 0,59 g/m²/hari, yaitu dari 7,04 menjadi 7,63 g/m²/hari. Penurunan emisi CO₂ di PJ1 dan PJ2 disebabkan pada kedua lokasi tersebut, lahan tidak lagi menerima pemupukan. Sementara itu, di lokasi PH, pemupukan masih dilakukan, sehingga emisi CO₂ relatif lebih tinggi pada pengamatan ini.

Pada pengamatan ketiga, tanaman jagung di lokasi PJ1 dan PJ2, telah memasuki fase pematangan buah. Sementara itu, tanaman hortikultura di lokasi PH berada pada fase pertumbuhan yang bervariasi akibat sistem rotasi tanam, mulai dari fase vegetatif hingga fase reproduktif. Pada pengamatan ini, emisi CO₂ di lokasi PJ1 dan PJ2 menunjukkan peningkatan, sedangkan di lokasi PH terjadi penurunan emisi CO₂. Menurut Liu et al., (2017), fluks CO₂ cenderung meningkat secara bertahap setelah pembuahan, sebagai akibat meningkatnya respirasi akar selama pertumbuhan aktif tanaman. Selain dipengaruhi oleh fase pertumbuhan tanaman, besarnya emisi CO₂ juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti kelembapan tanah, perubahan musim, aktivitas mikroorganisme, dan proses mineralisasi karbon (Curtin et al., 2000).

Pada penggunaan lahan kebun campuran (PK) dan kebun cengkeh (PC), tidak dilakukan pemupukan selama penelitian. Sementara itu pada penggunaan lahan hutan, yaitu hutan tanaman industri pinus (HP), hutan sekunder (HS), dan hutan tanaman industri pinus campur kopi (HPK), merupakan area alami tanpa perlakuan khusus. Kelima penggunaan lahan tersebut (PK, PC, HP, HS, dan HPK) memiliki kesamaan dalam struktur vegetasi yang relatif serupa, didominasi oleh pepohonan dengan tajuk lebat dan kerapatan tinggi. Struktur ini berbeda dengan lahan pertanian intensif seperti PJ1, PH, dan PJ2, yang memiliki vegetasi lebih terbuka.

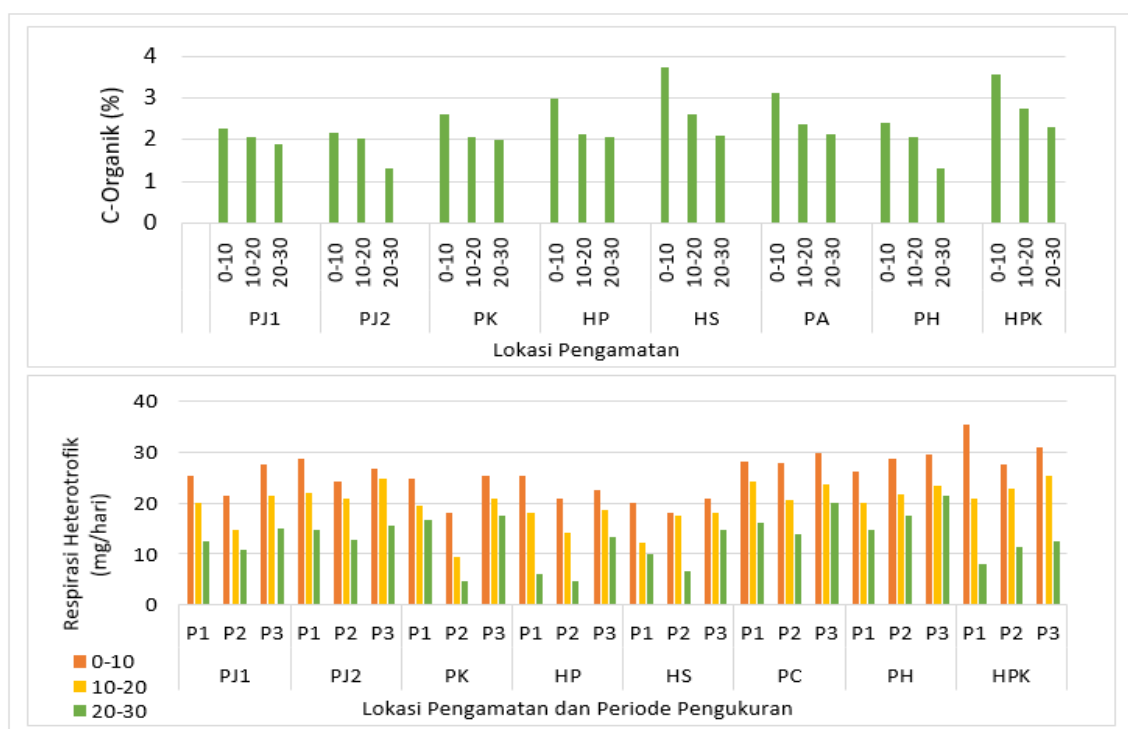
Emisi yang dihasilkan dari lokasi PK, HP, HS, PC, dan HPK cenderung lebih rendah dan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Kondisi ini diduga berkaitan dengan tidak adanya pemberian pupuk selama penelitian serta karakteristik vegetasi yang relatif seragam, yaitu didominasi oleh pepohonan bertajuk rapat dengan sistem perakaran yang telah

berkembang. Pada penggunaan lahan tersebut, emisi CO₂ yang terukur merupakan akumulasi respirasi tanah yang berasal dari aktivitas mikroorganisme (respirasi heterotrof) dan respirasi akar (respirasi autotrof). Namun, kontribusi respirasi akar diperkirakan tidak seluruhnya terdeteksi karena sebagian besar sistem perakaran tanaman berkayu berada pada lapisan tanah yang lebih dalam. Pengukuran menggunakan metode sungkup pada permukaan tanah umumnya hanya mengukur fluks gas yang keluar dari lapisan tanah bagian atas, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan emisi yang berasal dari lapisan tanah yang lebih dalam. Hal ini sejalan dengan Button et al. (2023) yang menyatakan bahwa pengukuran fluks gas rumah kaca menggunakan metode bilik tertutup di permukaan tanah memiliki keterbatasan dalam menangkap emisi yang berasal dari lapisan tanah yang lebih dalam.

3.2. Kontribusi respirasi mikroba (heterotrofik) terhadap emisi CO₂

Respirasi mikroba (heterotrofik) merupakan salah satu komponen utama dalam siklus karbon tanah, yang berkontribusi signifikan terhadap emisi CO₂ ke atmosfer (Bardgett et al., 2008). Proses ini melibatkan dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah, menghasilkan CO₂ sebagai produk akhir. Kontribusi respirasi mikroba terhadap emisi CO₂ dapat bervariasi tergantung pada jenis penggunaan lahan, yang memengaruhi ketersediaan bahan organik, kelembaban tanah, suhu tanah, dan aktivitas biologis mikroorganisme (Sushko et al., 2023).

Pengamatan terhadap respirasi mikroba (heterotrofik) pada berbagai jenis penggunaan lahan pada lokasi penelitian memberikan gambaran mengenai kontribusi aktivitas mikroorganisme tanah terhadap emisi CO₂. Perbedaan emisi CO₂ yang dihasilkan dari respirasi mikroba pada masing-masing penggunaan lahan dapat dilihat pada Gambar 3.



Keterangan: P1 = pengamatan pertama, P2 = pengamatan kedua, P3 = pengamatan ketiga

Gambar 3. C-organik (a) dan respirasi heterotrofik (b) pada lokasi pengamatan

Grafik menunjukkan bahwa konsentrasi karbon organik dan respirasi heterotrofik tanah menurun seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah. Hal ini mengindikasikan bahwa CO₂ lebih banyak dihasilkan dari dekomposisi bahan organik di lapisan tanah atas. Penggunaan lahan seperti pertanian intensif, hutan, dan padang rumput memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal input bahan organik, tingkat gangguan, dan kelembaban tanah, yang selanjutnya memengaruhi aktivitas mikroba (Gangwar et al., 2022). Mikroba tanah berperan penting dalam menguraikan bahan organik dan mendaur ulang unsur hara, termasuk karbon (Khatoon et al., 2017). Kandungan karbon organik dalam tanah menjadi sumber energi bagi mikroba untuk menjalankan proses dekomposisi, yang menghasilkan CO₂ (Menti et al., 2020).

Penurunan dekomposisi bahan organik terjadi karena jumlah bahan organik semakin berkurang dengan bertambahnya kedalaman tanah. Lokasi dengan penggunaan lahan hutan cenderung memiliki respirasi tanah heterotrofik yang lebih tinggi dibandingkan lahan pertanian, karena kandungan bahan organik di hutan lebih banyak (Wei et al., 2010). Selain itu, pada lahan hutan, mikoriza dan akar tanaman ditemukan lebih dalam dibandingkan pada lahan pertanian, yang umumnya memiliki sistem perakaran dangkal (Oehl et al., 2010). Perbedaan karakteristik perakaran tersebut menyebabkan kontribusi respirasi autotrofik pada lahan hutan juga berpotensi lebih besar. Dengan demikian, respirasi tanah pada berbagai penggunaan lahan

merupakan hasil interaksi antara respirasi heterotrofik yang berasal dari aktivitas mikroorganisme dan respirasi autotrofik yang berasal dari aktivitas akar tanaman. Kontribusi kedua komponen tersebut dipengaruhi oleh ketersediaan bahan organik, distribusi akar, serta eksudat akar yang menjadi sumber karbon bagi mikroorganisme tanah, sehingga bersama-sama menentukan besarnya emisi CO₂ yang dihasilkan (Stuart Chapin et al., 2011).

3.3. Hubungan Antara Emisi CO₂ dengan Variabel Lingkungan

Variabel lingkungan dalam penelitian ini meliputi data suhu tanah, kelembaban tanah, suhu udara dan kelembaban udara diukur secara langsung di lapangan. Analisis korelasi pengaruh variabel lingkungan terhadap emisi CO₂ ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Uji korelasi antara emisi CO₂ dengan suhu tanah, kelembaban tanah, suhu udara dan kelembaban udara

Uji Korelasi		Suhu Tanah	Kelembaban Tanah	Suhu Udara	Kelembaban Udara
Emisi CO ₂	R	.559**	-.016	.480*	-.571**
	Sig.	0.005	0.939	0.018	0.004

Keterangan : n = 24, r = koefisien korelasi / pearson correlation, Sig. = signifikasi, * = signifikan (<0.05), ** = sangat signifikan (<0.01).

Pada Tabel 3 menunjukkan suhu tanah dan suhu udara berkorelasi positif terhadap terhadap emisi CO₂ sedangkan kelembaban udara berkorelasi negatif terhadap emisi CO₂. Suhu tanah dan udara cenderung berfluktuasi akibat perbedaan vegetasi serta morfologi pada setiap jenis penggunaan lahan. Pada lahan pertanian, suhu tanah dan udara tercatat lebih tinggi dibandingkan dengan lahan hutan pada ketiga periode pengukuran. Kondisi ini terjadi karena permukaan tanah di lahan pertanian relatif lebih terbuka, sehingga fluktuasi suhu dan rezim kelembaban tanah menjadi lebih besar. Sebaliknya, secara morfologi, hutan memiliki tegakan yang rapat dengan tajuk daun yang rimbun. Kondisi ini berperan penting dalam membentuk iklim mikro, terutama dalam mengatur suhu udara dan suhu tanah di sekitar tanaman (Rumbang, 2015). Lahan yang tidak memiliki tutupan tajuk yang lebat cenderung mengalami suhu yang lebih tinggi, terutama di wilayah beriklim tropis. Tajuk pohon yang rapat mampu menciptakan naungan yang mengurangi intensitas radiasi matahari yang mencapai permukaan tanah. Akibatnya, suhu udara dan suhu tanah di bawahnya menjadi lebih rendah, sementara kelembaban tanah tetap terjaga karena berkurangnya penguapan (Anokye et al., 2021).

Perbedaan vegetasi antara lahan hutan dan lahan pertanian ini pada akhirnya memengaruhi kondisi iklim mikro, yang ditunjukkan oleh variasi suhu udara, suhu tanah, serta kelembaban tanah dan udara. Perbedaan tersebut turut berkontribusi terhadap peningkatan

pelepasan karbon di lahan pertanian (Toma & Hatano, 2007). Suhu yang lebih tinggi secara umum akan meningkatkan laju reaksi kimia, termasuk proses dekomposisi bahan organik oleh mikroba tanah. Dalam proses ini, mikroorganisme memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi melalui respirasi dan melepaskan CO₂ sebagai hasil metabolisme. Oleh karena itu, peningkatan suhu tanah cenderung mempercepat aktivitas mikroorganisme sehingga laju dekomposisi bahan organik dan respirasi tanah meningkat. Respons mikroba terhadap variasi kondisi tanah dan lingkungan menyebabkan fluks CO₂ yang dihasilkan menjadi bervariasi. Selain itu, laju respirasi juga dapat berbeda meskipun berada pada kondisi suhu dan tingkat kelembaban yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara suhu dan kelembaban diduga berperan penting dalam memengaruhi jumlah CO₂ yang dihasilkan melalui respirasi mikroba tanah.

4. KESIMPULAN

Konversi hutan menjadi lahan pertanian di DAS Tanralili meningkatkan emisi CO₂ tanah. Emisi tertinggi ditemukan pada lahan pertanian intensif sebesar 24,36–28,92 ton/ha/tahun, sedangkan emisi terendah terdapat pada lahan hutan sebesar 9,94 ton/ha/tahun. Pada lahan pertanian intensif, emisi CO₂ cenderung meningkat pada fase vegetatif setelah pemupukan, menurun pada fase generatif, dan kembali meningkat pada fase pematangan. Emisi CO₂ juga meningkat seiring dengan kenaikan suhu tanah dan suhu udara, tetapi menurun pada kondisi kelembaban udara yang lebih tinggi, sedangkan kelembaban tanah tidak menunjukkan hubungan yang signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi emisi CO₂ tanah dipengaruhi oleh interaksi antara perubahan penggunaan lahan, pengelolaan lahan, fase pertumbuhan tanaman, dan kondisi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anokye, J., Logah, V., & Opoku, A. (2021). A Soil Carbon Stock and Emission: Estimates from Three Land-Use Systems in Ghana. *Ecological Processes*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00279-w>.
- Ariani, M., Setyanto, P., & Ardiansyah, M. (2015). Marginal Abatement Cost of Green House Gas Emission from Agricultural Sector. *International Journal of Social Science, Education, Communication and Economics (SINOMICS JOURNAL)*, 33(2), 91–104.
- Bardgett, R. D., Freeman, C., & Ostle, N. J. (2008). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2(8), 805–814. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.58>.

- Bellamy, P. H., Loveland, P. J., Bradley, R. I., Lark, R. M., & Kirk, G. J. D. (2005). Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature*, 437(7056), 245–248. <https://doi.org/10.1038/nature04038>.
- Button, E. S., Marshall, M., Sánchez-Rodríguez, A. R., Bland, A., Abadie, M., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2023). Greenhouse gas production, diffusion and consumption in a soil profile under maize and wheat production. *Geoderma*, 430, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116310>.
- Chakrabarti, B., Bhatia, A., Sharma, S., Tomer, R., Sharma, A., Paul, A., Kumar, V., & Sutton, M. A. (2024). Nitrification and urease inhibitors reduce gaseous N losses and improve nitrogen use efficiency in wheat exposed to elevated CO₂ and temperature. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1460994>
- Chen, Z., Xu, Y., Fan, J., Yu, H., & Ding, W. (2017). Soil autotrophic and heterotrophic respiration in response to different N fertilization and environmental conditions from a cropland in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 110, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.011>.
- Curtin, D., Wang, H., Selles, F., McConkey, B. G., & Campbell, C. A. (2000). Tillage Effects on Carbon Fluxes in Continuous Wheat and Fallow–Wheat Rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2080–2086. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462080x>.
- Dahal, K., Adhikari, B., & Basnet, K. (2010). Nitrogen management in zero-tillage cum surface seeded wheat at Rampur, Chitwan, Nepal. *Agronomy Journal of Nepal*, 1, 85–93. <http://dx.doi.org/10.3126/aj.n.v1i0.7547>.
- Ding, J., Fu, L., Ding, Z. W., Lu, Y. Z., Cheng, S. H., & Zeng, R. J. (2015). Environmental evaluation of coexistence of denitrifying anaerobic methane-oxidizing archaea and bacteria in a paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 439–446. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6986-2>.
- Gangwar, R. K., Makádi, M., Bresilla, B., Zain, M., Weldmichael, T. G., Demeter, I., Táncsics, A., Cserhádi, M., & Szegi, T. A. (2022). Effects of land uses and soil types on microbial activity and community structure. *International Agrophysics*, 36(4), 323–336. <https://doi.org/10.31545/intagr/155096>.
- Hasnawir, Kubota, T., Sanchez-Castillo, L., & Soma, A. S. (2017). The influence of land use and rainfall on shallow landslides in tanralili sub-watershed, Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 62(1), 171–176.
- He, L., Shen, J., & Zhang, Y. (2018). Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management. *Journal of Environmental Management*, 206, 1115–1125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.059>.
- Hu, R., Hatano, R., Kusa, K., Sawamoto, T., Kusa, K., & Sawamoto, T. (2004). Soil respiration and net ecosystem production in an onion field in Central Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1), 27–33. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408449>.
- Khatoon, H., Solanki, P., Narayan, M., Tewari, L., & Rai, J. (2017). Role of microbes in organic carbon decomposition and maintenance of soil ecosystem. *International Journal of*

- Chemical Studies*, 5(6), 1648–1656.
<https://www.researchgate.net/publication/327051620>.
- Li, H., Zhang, D., Bai, J., Lu, W., Yu, X., & Jia, G. (2022). CO₂ exchange of the ecosystem–atmosphere in a mountain forest ecosystem: Combining stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) and soil respiration measurements. *Ecological Indicators*, 139, 108947.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108947>.
- Liu, S., Wang, J. J., Tian, Z., Wang, X., & Harrison, S. (2017). Ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical wheat field under different nitrogen fertilization strategies. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 196–210.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.02.014>.
- Mensah, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, 5(1), 1–21.
<https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531>.
- Menti, Y., Yusnaini, S., Buchari, H., & Niswati, A. (2020). Respirasi Tanah Akibat Sistem Olah Tanah dan Aplikasi Mulsa In Situ pada Pertanaman Kacang Hijau (*Vigna radiata* L.) di Laboratorium Lapang Terpadu, Universitas Lampung. *Jurnal Agrotek Tropika*, 8(2), 365–373. <https://doi.org/10.23960/jat.v8i2.3911>.
- Misbahuddin, M., Aryanti, E., Purnamasari, E., Permanasari, I., Irfan, M., & Arminudin, A. T. (2018). Emisi CO₂ pada Perkebunan Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* jacq.) yang Ditumpangsarikan dengan Tanaman Pangan Fase Berbeda di Tanah Mineral. *Jurnal Agroteknologi*, 8(2), 31–36. <https://doi.org/10.24014/ja.v8i2.4237>.
- Morell, F. J., Álvaro-Fuentes, J., Lampurlanés, J., & Cantero-Martínez, C. (2010). Soil CO₂ fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Effects of tillage systems and nitrogen fertilization. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(1–2), 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.07.015>.
- Oehl, F., Laczko, E., Bogenrieder, A., Stahr, K., Bösch, R., van der Heijden, M., & Sieverding, E. (2010). Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 724–738.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.006>.
- Pavelka, M., Acosta, M., Kiese, R., Altimir, N., Brümmer, C., Crill, P., Darenova, E., Fuß, R., Gielen, B., Graf, A., Klemetsson, L., Lohila, A., Longdoz, B., Lindroth, A., Nilsson, M., Jiménez, S. M., Merbold, L., Montagnani, L., Peichl, M., ... Kutsch, W. (2018). Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems. *International Agrophysics*, 32(4), 569–587.
<https://doi.org/10.1515/intag-2017-0045>.
- Rankin, T., Roulet, N., Humphreys, E., Peichl, M., & Järveoja, J. (2023). Partitioning autotrophic and heterotrophic respiration in an ombrotrophic bog. *Frontiers in Earth Science*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1263418>.
- Rumbang, N. (2015). A Study of Carbon Dioxide Emission in Different Types of Peatland Use in Kalimantan. *Ilmu Pertanian*, 18(1), 9–17. <https://doi.org/10.22146/ipas.6170>.

- Sidik, F., Supriyanto, B., & Lugina, M. (2017). *Perhitungan karbon tanah mangrove (soil pool) dalam inventarisasi gas rumah kaca*. Pusat Penelitian Dan Pengembangan Sosial Ekonomi Kebijakan Dan Perubahan Iklim.
- Stuart Chapin, F., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>.
- Surahman, S. (2021). *Sustainable Watershed Management Based On Land Use With The Fuzzy Multi Attribute Decision Making (FMADM) Method: A Case Study Of The Tanralili Sub Watershed, South Sulawesi Province*. In Pascasarjana Universitas Hasanuddin. Universitas Hasanuddin.
- Sushko, S., Ovsepyan, L., Gavrichkova, O., Yevdokimov, I., Komarova, A., Zhuravleva, A., Blagodatsky, S., Kadulin, M., & Ivashchenko, K. (2023). Contribution of microbial activity and vegetation cover to the spatial distribution of soil respiration in mountains. *Frontiers in Microbiology*, 14(June), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1165045>.
- Tahat, M. M., Alananbeh, K. M., Othman, Y. A., & Leskovar, D. I. (2020). Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859. <https://doi.org/10.3390/su12124859>.
- Toma, Y., & Hatano, R. (2007). Effect of Crop Residue C:N Ratio on N₂O Emissions from Gray Lowland Soil in Mikasa, Hokkaido, Japan: Original Article. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53(2), 198–205. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00125.x>.
- Verchot, L. V., Dannenmann, M., Kengdo, S. K., Njine-Bememba, C. B., Rufino, M. C., Sonwa, D. J., & Tejedor, J. (2020). Land-use change and Biogeochemical controls of soil CO₂, N₂O and CH₄ fluxes in Cameroonian forest landscapes. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 17(3), 45–67. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2020.1779092>.
- Wang, H., Köbke, S., & Dittert, K. (2020). Use of urease and nitrification inhibitors to reduce gaseous nitrogen emissions from fertilizers containing ammonium nitrate and urea. *Global Ecology and Conservation*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00933>.
- Wei, W., Weile, C., & Shaopeng, W. (2010). Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(8), 1236–1244. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.013>.
- Widiatmaka, Ardiansyah, M., & Ambarwulan, W. (2012). Perubahan Cadangan Karbon Organik Tanah Dalam Konteks Perubahan Penggunaan Lahan Selama 2 Dekade: Studi Kasus Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat. *Globe*, 14(2), 170–177.