

**PENGEMBANGAN MODEL RESPIRASI TANAH DI LINGKUNGAN
PERKEBUNAN NANAS: KONTRIBUSI BAGI AKUNTANSI GRK
MENUNJANG IMPLEMENTASI PERDAGANGAN KARBON SEKTOR
PERTANIAN**

Oleh:

IMRON

DISERTASI



**PROGRAM PENDIDIKAN STRATA 3
PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**PENGEMBANGAN MODEL RESPIRASI TANAH DI LINGKUNGAN
PERKEBUNAN NANAS: KONTRIBUSI BAGI AKUNTANSI GRK
MENUNJANG IMPLEMENTASI PERDAGANGAN KARBON SEKTOR
PERTANIAN**

Oleh:

IMRON

DISERTASI

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar

DOKTOR ILMU LINGKUNGAN

pada

Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan

Pascasarjana Multidisiplin Universitas Lampung



**PROGRAM PENDIDIKAN STRATA 3
PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGEMBANGAN MODEL RESPIRASI TANAH DI LINGKUNGAN PERKEBUNAN NANAS: KONTRIBUSI BAGI AKUNTANSI GRK MENUNJANG IMPLEMENTASI PERDAGANGAN KARBON SEKTOR PERTANIAN

**Oleh:
Imron**

Respirasi tanah merupakan salah satu komponen utama fluks karbon dioksida (CO₂) dari sistem pertanian ke atmosfer dan berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), khususnya di wilayah tropis. Pada perkebunan nanas, praktik pengelolaan tanah yang intensif berpotensi mengubah kondisi fisik-kimia tanah dan aktivitas biologis tanah, yang pada akhirnya memengaruhi besarnya respirasi tanah. Namun, pendekatan akuntansi GRK di sektor pertanian masih didominasi oleh pendekatan berbasis praktik dan input, tanpa pemahaman yang memadai mengenai mekanisme proses yang menghubungkan pengelolaan tanah dengan emisi karbon tanah. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model respirasi tanah berbasis proses melalui pendekatan empiris berjenjang yang memisahkan secara eksplisit jalur kausal antara *soil management*, *soil properties*, *soil biota*, dan *soil respiration*. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pengendali langsung dan tidak langsung respirasi tanah, sehingga memperkuat dasar ilmiah akuntansi GRK berbasis proses dan mendukung kredibilitas implementasi perdagangan karbon di sektor pertanian. Urgensi penelitian ini semakin meningkat mengingat kebutuhan akan indikator biologis tanah yang terukur dan sensitif dalam sistem *Measurement, Reporting, and Verification* (MRV) karbon pertanian tropis. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) Menetapkan sensitivitas parameter dari *soil tillage* dan *soil amelioran* (compost, biochar, Vermist dan mikroorganism) terhadap *soil properties* (temperatur, kadar air, pH); (2) Menetapkan Sensitivitas parameter *soil properties* terhadap *soil biota improvement*; (3) Merancang persamaan simultan respirasi tanah sebagai fungsi dari *soil biota* dan *soil properties* sebagai fungsi dari *Soil Management*. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan model regresi linier berjenjang (*recursive regression models*) yang terdiri atas tiga kelompok model. Model I [A,B,C] menganalisis pengaruh *soil management* terhadap pH tanah, kadar air tanah, dan suhu tanah. Model II [A,B,C] menguji pengaruh *soil properties* terhadap mesofauna tanah, biomassa mikroba tanah (C-mik), dan cacing tanah. Model III menganalisis pengaruh biota

tanah terhadap respirasi tanah. Seluruh pengujian statistik dilakukan pada tingkat kepercayaan 90%.

Model IA menunjukkan (TIME) berpengaruh positif dan sangat signifikan terhadap pH tanah ($\alpha = 0,0057$; $p < 0,001$), artinya setiap kenaikan satu satuan waktu diikuti oleh peningkatan pH tanah sebesar 0,0057 unit. Penerapan vermikompos berasosiasi dengan peningkatan pH tanah sebesar 0,2057 unit ($p = 0,039$), sedangkan inokulan bakteri menunjukkan pengaruh yang lebih kuat dengan peningkatan pH tanah sekitar 0,25 unit ($p = 0,012$). **Model IB** (TIME) memiliki pengaruh negatif yang signifikan terhadap kadar air tanah ($\beta = -0,0327$; $p = 0,004$), yang menunjukkan penurunan kadar air tanah sebesar 0,0327 unit untuk setiap kenaikan satu satuan waktu. Perlakuan biochar menunjukkan pengaruh negatif terhadap kadar air tanah dengan koefisien sebesar $-1,6775$ ($p = 0,083$), yang mengindikasikan penurunan kadar air tanah sekitar 1,68 unit. Pengaruh serupa juga ditunjukkan oleh vermikompos, dengan koefisien $-1,6811$ ($p = 0,082$). **Model IC** menunjukkan TIME berpengaruh negatif dan sangat signifikan terhadap suhu tanah ($\lambda = -0,0163$; $p < 0,001$), kenaikan satu satuan waktu pengamatan diikuti oleh penurunan suhu tanah sebesar $0,0163$ °C, sedangkan vermikompos secara signifikan menurunkan suhu tanah dengan koefisien $-0,8333$ ($p = 0,039$), dan inokulan bakteri menunjukkan pengaruh yang lebih besar dengan penurunan suhu tanah sebesar $1,1111$ °C ($p = 0,012$). **Model IIA** menunjukkan bahwa suhu tanah berpengaruh positif dan signifikan terhadap kelimpahan mesofauna ($\alpha = 2,2600$; $p = 0,038$), yang berarti bahwa peningkatan suhu tanah diikuti oleh peningkatan mesofauna sebesar 2,26 unit. Kadar air tanah juga berpengaruh positif terhadap mesofauna ($\alpha = 0,5611$; $p = 0,050$). Sebaliknya, pH tanah menunjukkan pengaruh negatif yang signifikan ($\alpha = -6,5580$; $p = 0,040$), yang mengindikasikan bahwa peningkatan pH tanah diikuti oleh penurunan kelimpahan mesofauna. **Model IIB** suhu tanah berpengaruh positif signifikan terhadap (C_MICR) ($\beta = 0,4603$; $p = 0,034$) menunjukkan bahwa setiap kenaikan satu satuan suhu tanah diikuti oleh peningkatan biomassa mikroba sebesar 0,46 unit, pH tanah menunjukkan pengaruh positif yang sangat signifikan dengan koefisien sebesar $2,7805$ ($p < 0,001$), setiap kenaikan satu unit pH tanah diikuti oleh peningkatan biomassa mikroba tanah sebesar 2,78 unit. **Model IIC** pH tanah berpengaruh negatif signifikan terhadap populasi cacing tanah (E_WORM) ($\beta = -0,1204$; $p = 0,028$), yang berarti bahwa setiap kenaikan satu unit pH tanah diikuti oleh penurunan populasi cacing tanah sebesar 0,1204 unit. **Model III** biomassa mikroba tanah (C_MICR) menunjukkan pengaruh positif terhadap respirasi tanah (RESP) dengan koefisien sebesar 0,1692 pada tingkat kepercayaan 90% ($p = 0,075$) artinya setiap peningkatan satu unit biomassa mikroba tanah diikuti oleh peningkatan respirasi tanah sebesar 0,1692 unit. Hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan biomassa mikroba tanah berasosiasi dengan peningkatan respirasi tanah, sementara variabel biota tanah lainnya tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa respirasi tanah di perkebunan nanas dikendalikan terutama oleh komponen mikroba tanah, dan pengelolaan tanah memengaruhi emisi karbon secara tidak langsung melalui perubahan sifat fisik–kimia tanah dan respon biota tanah. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan akuntansi GRK berbasis proses serta mendukung implementasi perdagangan karbon yang lebih kredibel dan berbasis ilmiah di sektor pertanian.

Kata Kunci: *biochar, carbon accounting, MRV, soil microbial biomass, soil management, soil property, soil biota, soil water content, tillage.*

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A SOIL RESPIRATION MODEL IN PINEAPPLE PLANTATION SYSTEMS: CONTRIBUTIONS TO GREENHOUSE GAS ACCOUNTING IN SUPPORT OF CARBON TRADING IMPLEMENTATION IN THE AGRICULTURAL SECTOR

**By:
Imron**

Soil respiration is one of the major components of carbon dioxide (CO₂) fluxes from agricultural systems to the atmosphere and contributes significantly to greenhouse gas (GHG) emissions, particularly in tropical regions. In pineapple plantations, intensive soil management practices have the potential to alter soil physicochemical conditions and biological activity, thereby influencing the magnitude of soil respiration. However, GHG accounting approaches in the agricultural sector are still predominantly based on management practices and input-oriented methods, with limited understanding of the process-based mechanisms linking soil management to soil carbon emissions. The novelty of this study lies in the development of a process-based soil respiration model using a hierarchical empirical approach that explicitly disentangles the causal pathways among soil management, soil properties, soil biota, and soil respiration. This approach enables the identification of both direct and indirect controls of soil respiration, thereby strengthening the scientific basis of process-based GHG accounting and enhancing the credibility of carbon trading implementation in the agricultural sector. The urgency of this research is further emphasized by the growing need for measurable and sensitive soil biological indicators within Measurement, Reporting, and Verification (MRV) systems for tropical agricultural carbon accounting.

This study aimed to: (1) determine the sensitivity of soil tillage and soil amelioration parameters (compost, biochar, vermicompost, and microorganisms) to soil properties (temperature, soil water content, and pH); (2) assess the sensitivity of soil properties to soil biota improvement; and (3) Designing a system of simultaneous equations in which soil respiration is modeled as a function of soil biota, and soil biota is modeled as a function of soil properties, which in turn are functions of soil management. The research employed a quantitative approach using recursive linear regression models comprising three

groups of models. Model I [A, B, C] analyzed the effects of soil management on soil pH, soil water content, and soil temperature. Model II [A, B, C] examined the effects of soil properties on soil mesofauna, soil microbial biomass (C-mic), and earthworms. Model III analyzed the effects of soil biota on soil respiration. All statistical tests were conducted at a 90% confidence level.

Model IA showed that time (TIME) had a positive and highly significant effect on soil pH ($\alpha = 0.0057$; $p < 0.001$), indicating that each one-unit increase in time was associated with an increase in soil pH of 0.0057 units. Vermicompost application was associated with an increase in soil pH of 0.2057 units ($p = 0.039$), while bacterial inoculation exhibited a stronger effect, increasing soil pH by approximately 0.25 units ($p = 0.012$). In Model IB, TIME had a significant negative effect on soil water content ($\beta = -0.0327$; $p = 0.004$), indicating a decrease of 0.0327 units in soil water content for each one-unit increase in time. Biochar application showed a negative effect on soil water content with a coefficient of -1.6775 ($p = 0.083$), corresponding to a reduction of approximately 1.68 units. A similar effect was observed for vermicompost, with a coefficient of -1.6811 ($p = 0.082$). Model IC indicated that TIME had a highly significant negative effect on soil temperature ($\lambda = -0.0163$; $p < 0.001$), meaning that each one-unit increase in observation time was associated with a decrease in soil temperature of 0.0163 °C. Vermicompost significantly reduced soil temperature by 0.8333 °C ($p = 0.039$), while bacterial inoculation resulted in a larger reduction of 1.1111 °C ($p = 0.012$).

Model IIA demonstrated that soil temperature had a positive and significant effect on mesofauna abundance ($\alpha = 2.2600$; $p = 0.038$), indicating that a one-unit increase in soil temperature was associated with an increase in mesofauna abundance of 2.26 units. Soil water content also exerted a positive effect on mesofauna ($\alpha = 0.5611$; $p = 0.050$). In contrast, soil pH showed a significant negative effect ($\alpha = -6.5580$; $p = 0.040$), indicating that increasing soil pH was associated with a reduction in mesofauna abundance. In Model IIB, soil temperature had a significant positive effect on soil microbial biomass (C-mic) ($\beta = 0.4603$; $p = 0.034$), indicating that each one-unit increase in soil temperature resulted in an increase of 0.46 units in microbial biomass. Soil pH exhibited a highly significant positive effect, with a coefficient of 2.7805 ($p < 0.001$), indicating that each one-unit increase in soil pH was associated with an increase of 2.78 units in soil microbial biomass. Model IIC showed that soil pH had a significant negative effect on earthworm populations (E-WORM) ($\beta = -0.1204$; $p = 0.028$), indicating that each one-unit increase in soil pH was associated with a decrease of 0.1204 units in earthworm abundance.

In Model III, soil microbial biomass (C-mic) had a positive effect on soil respiration (RESP), with a coefficient of 0.1692 at the 90% confidence level ($p = 0.075$), indicating that each one-unit increase in microbial biomass was associated with an increase in soil respiration of 0.1692 units. These results indicate that

increases in soil microbial biomass are associated with higher soil respiration, while other soil biota variables did not show significant effects.

Overall, this study confirms that soil respiration in pineapple plantations is primarily controlled by soil microbial components, and that soil management influences carbon emissions indirectly through changes in soil physicochemical properties and soil biota responses. These findings provide an important contribution to the development of process-based GHG accounting and support the implementation of more credible and scientifically grounded carbon trading mechanisms in the agricultural sector.

Keywords: biochar; carbon accounting; MRV; soil microbial biomass; soil management; soil properties; soil biota; soil water content; tillage.

Judul Disertasi : **PENGEMBANGAN MODEL RESPIRASI TANAH DI LINGKUNGAN PERKEBUNAN NANAS: KONTRIBUSI BAGI AKUNTANSI GRK MENUNJANG IMPLEMENTASI PERDAGANGAN KARBON SEKTOR PERTANIAN**

Nama Mahasiswa : **Imron**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2030011005

Program Studi : Doktor Ilmu Lingkungan

Fakultas : Program Pascasarjana Multidisiplin

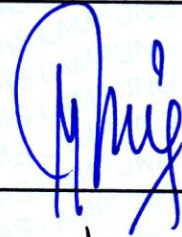
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si.
NIP. 196105051987031002



Dr. Nuning Nurcahyani, M.Sc.
NIP. 196603051991032001



Hari Kaskoyo, S.Hut., M.P., Ph.D.
NIP. 196906011998021002



**2. Koordinator Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
Universitas Lampung**



Prof. Drs. Tugiyono, M.Si., Ph.D.
NIP. 196411191990031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

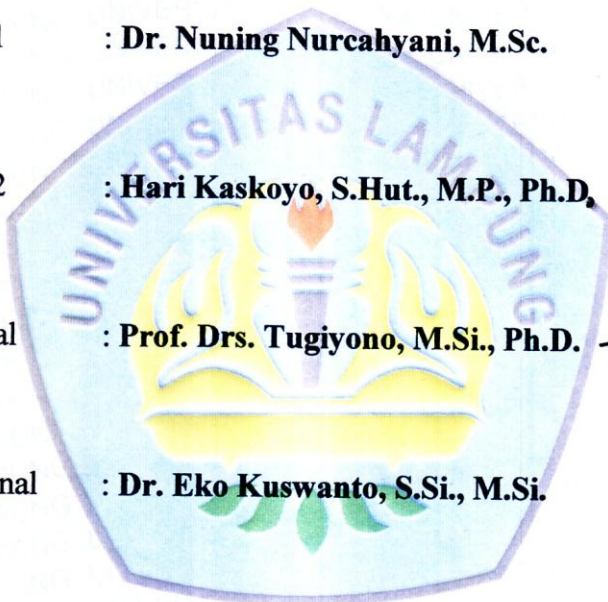
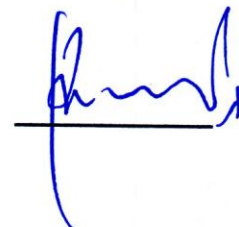
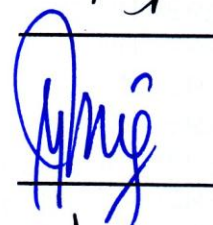
Promotor : **Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si.**

Co-Promotor 1 : **Dr. Nuning Nurcahyani, M.Sc.**

Co-Promotor 2 : **Hari Kaskoyo, S.Hut., M.P., Ph.D.**

Penguji Internal : **Prof. Drs. Tugiyono, M.Si., Ph.D.**

Penguji Eksternal : **Dr. Eko Kuswanto, S.Si., M.Si.**



2. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Disertasi : 13 April 2026

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Disertasi dengan judul: **“PENGEMBANGAN MODEL RESPIRASI TANAH DI LINGKUNGAN PERKEBUNAN NANAS: KONTRIBUSI BAGI AKUNTANSI GRK MENUNJANG IMPLEMENTASI PERDAGANGAN KARBON SEKTOR PERTANIAN”** adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya orang lain dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut plagiarism.
2. Hak intelektual atas karya ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila di kemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya, saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung,
Yang membuat pernyataan,



IMRON
NPM 2030011005

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Terate, Sirah Pulau Padang Kabupaten Ogan Komering Ilir, Sumatera Selatan tanggal 15 Desember 1989, merupakan anak pertama dari dua bersaudara, Putra Bapak Amrullah dan Ibu Dapana.

Pendidikan Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN 5 Sirah Pulau Padang, Ogan Komering Ilir pada tahun 2000, Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan di SMPN 1 Sirah Pulau Padang, Ogan Komering Ilir pada tahun 2003, melanjutkan ke Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Sirah Pulau Padang, Ogan Komering Ilir dan diselesaikan pada tahun 2006.

Pada tahun 2006 penulis diterima sebagai mahasiswa baru di Program Studi Pendidikan Biologi FKIP Universitas Muhammadiyah Palembang. Penulis meraih gelar sarjana Pendidikan pada tahun 2010. Pada tahun 2011 penulis menjadi Guru di SMK Negeri 3 Kayuagung sampai dengan 2019. Disela-sela bekerja sebagai Guru pada tahun 2015 penulis melanjutkan Kuliah S2 di Program Pascasarjana Magister Ilmu Lingkungan Universitas Lampung yang diselesaikan pada tahun 2018. Pada tahun 2019 penulis diterima sebagai Dosen Yayasan di Fakultas Teknik Program Studi Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Universitas Indo Global Mandiri. Selanjutnya tahun 2020 penulis melanjutkan Pendidikan S3 pada Program Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana Universitas Lampung.

Karya kecil ini kupersembahkan untuk:

1. Istriku tercinta *Paraditha Purnamasari, S.T.*,
2. Anakku tersayang *Musa Akbar Ramadhan*
3. Kedua Orang Tuaku tersayang, *Amrullah dan Dapana*
4. Kedua Mertuaku tersayang, *AKBP (Purn) Suparman dan Dra. Dewi Rita*
5. Adik-adikku yang kusayangi, *Winna, Terri, Aldo, Shela, Karin, Bowo, Dhea*
6. Keponakanku yang kusayangi, *Nara, Umay, Al dan Khalid.*

SANWACANA

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan disertasi dengan judul “PENGEMBANGAN MODEL RESPIRASI TANAH DI LINGKUNGAN PERKEBUNAN NANAS: KONTRIBUSI BAGI AKUNTANSI GRK MENUNJANG IMPLEMENTASI PERDAGANGAN KARBON SEKTOR PERTANIAN” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor Ilmu Lingkungan di Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa disertasi ini tidak dapat terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Penulis mengucapkan terimakasih kepada.

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.IPM, ASEAN Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Dr. Marzuki Alie, Pemilik Yayasan Indo Global Mandiri dan Rektor Universitas Indo Global Mandiri
3. M. Fadhiel Alie, S.Kom., B.Inf.Tech., M.T.I., Selaku Ketua Yayasan Indo Global Mandiri
4. Dr. Asmawati, Selaku Pembina Yayasan Indo Global Mandiri
5. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
6. Dr. Candra Perbawati, S.H., M.H., selaku wakil Direktur Program Pascasarjana Bidang Akademik, Kemahasiswaan dan Alumni Universitas Lampung.
7. Dr. Fitra Dharma, S.E., M.Si. selaku Wakil Direktur Program Pascasarjana Bidang Umum Universitas Lampung.
8. Prof. Drs. Tugiyono, M.S., Ph. D., selaku Ketua Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Multidisiplin Universitas Lampung dan sekaligus penguji internal yang telah memberikan masukan, saran dan kritik atas penyempurnaan penulisan Disertasi.
9. Prof. Dr. Ir. Samsul Bakri, M.Si., selaku Promotor utama penulis yang telah bersedia membimbing, mengarahkan, memberikan saran, masukan, waktu, serta tenaganya dalam proses menyelesaikan disertasi ini.

10. Dr. Nuning Nurcahyani, M.Sc. selaku Co-Promotor 1 yang telah memberikan arahan, nasihat, dukungan, serta motivasi dalam penulisan disertasi ini.
11. Hari Kaskoyo, S.Hut., M.P., Ph.D., selaku Co-Promotor 2 yang telah memberikan arahan, nasihat, dukungan, serta motivasi dalam penulisan disertasi ini.
12. Dr. Eko Kuswanto, S.Si., M.Si. Selaku Penguji Eksternal dari Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung.
13. Prof. Dermiyati, Prof. Slamet Budi Yuwono, Prof. Sri Yusnaini, selaku Dosen yang selalu memberikan arahan, masukan, saran membangun dalam menyempurnakan disertasi ini.
14. Pihak PT. GGP Lampung Tengah
15. Kepala Laboratorium Ilmu Tanah Universitas Lampung
16. Angkatan penulis Doktor Ilmu Lingkungan 2020 Kak Cici, Bude Yayuk, Ko Yoseb, Om Alay, Bu Dewi, Pak Komar.
17. Teman-teman Dosen di Fakultas Teknik Universitas Indo Global Mandiri
18. Teman-teman di Lampung dan di Palembang yang sudah banyak membantu, Dr (c) Zenal Mutaqin, S.T., M.Si., Dr (c) Agung Bahari, S.T., M.Si., Febriansyah Wardanah, S.T., Dr. Melya Riniarti, Dr. Duryat, Heri, Virgus Ari Sondang, S.T., M.Eng.
19. Tim admin Doktor Ilmu Lingkungan dan Program Pascasarjana Universitas Lampung atas arahan, bantuan, dan segala macam keperluan penulis selama menjalani perkuliahan hingga wisuda penulis. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan disertasi ini jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis akan menerima saran dan kritik yang bersifat membangun agar disertasi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak

Bandar Lampung, April 2026

Penulis

Imron

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	vi
LEMBAR PERSETUAN	ix
LEMBAR PENGESAHAN	x
SANWANCANA	xiv
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR GAMBAR	xx
DAFTAR TABEL	xxi
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan Penelitian	6
1.4 .Manfaat Penelitian	6
1.5. Kebaruan	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. <i>Public Good</i> dalam Perkebunan Nanas: Kontribusi Positif Perekonomian	15
2.2 <i>Public Bad</i> dalam Perkebunan Nanas: Dampak Negatif pada Pemanasan Global	22
2.3. <i>Improvement Soil Properties</i> dalam Manajemen Sumberdaya Lahan di Perkebunan Nanas	25
2.3.1. <i>Soil Tillage Treatment</i> pada Perkebunan Nanas	28
2.3.2. <i>Soil Amandement</i> dan Dampaknya pada Perkebunan Nanas ..	32
2.4 <i>Improvement Soil Biota Stimulated by Soil Properties</i>	47
2.4.1 <i>Effect of Soil pH on Soil Biota</i>	48
2.4.2 <i>Effect of Soil Warter Content on Soil Biota</i>	50

2.4.3 <i>Effect of Soil Temperatur on Soil Biota</i>	52
2.5 <i>Soil Biota as Major Determinan in Soil Respiration</i>	53
2.6 <i>Contribution Soil Respiration from Agriculture Sector on Green House Gas (GHG) Accumulation</i>	57
2.7 <i>Contribution of Soil Respiration on Carbon Accounting in Agricultural Sector</i>	59
2.8. Perkebunan Nanas sebagai Sistem Pertanian Tropis dan Implikasinya terhadap Dinamika Karbon Tanah	61

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian	65
3.2. Alat dan Bahan	66
3.3. Rancangan Penelitian	66
3.4. Pelaksanaan Penelitian	67
3.5. Variabel Penelitian	68
3.5.1. <i>Soil Biota</i>	68
3.5.2. <i>Soil Properties</i>	70
3.6. Pendekatan dan Desain Penelitian	71
3.7. Analisis data	73

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Hasil Analisis	77
4.2. Pengaruh Pengelolaan Tanah terhadap Sifat Fisik–Kimia Tanah ...	83
4.2.1. Perubahan pH Tanah	83
4.2.2. Dinamika Kadar Air Tanah	85
4.2.3. Dinamika Suhu Tanah	87
4.3. Respon Biota Tanah terhadap Sifat Fisik dan Kimia Tanah	90
4.3.1. Respon Mesofauna Tanah Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Tanah	90
4.3.2. Respon Biomassa Mikroba Tanah Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Tanah	93
4.3.3. Respon Populasi Cacing Tanah Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Tanah	96
4.4. Respon Respirasi Tanah Terhadap Biota Tanah	99
4.5. Peran Respirasi Tanah Terhadap Perubahan Iklim	104
4.6. Pengelolaan Karbon Tanah Berbasis Proses di Pertanian Tropis	106
4.7. Respirasi Tanah, Biomassa Mikroba, dan Tantangan Akuntansi Karbon di Pertanian Tropis	108
4.8. Mitigasi Emisi Karbon melalui Pengendalian Jalur Biologis Tanah..	111
4.9. Implikasi Kebijakan Mitigasi Karbon	113
4.10. Kontribusi Bagi Akuntansi Gas Rumah Kaca (GRK) Dalam Menunjang Implementasi Perdagangan Karbon Sektor Pertanian ...	123

4.11. Implikasi Terhadap Sistem MRV Dan Implementasi Perdagangan Karbon Sektor Pertanian	142
4.12. Rekomendasi Pengembangan Sistem MRV Nasional Berbasis Sensitivitas Sifat Fisik–Kimia Tanah	145
4.13. Rekomendasi Pengembangan Indikator Biologis Dalam Sistem MRV Nasional Sektor Pertanian	148
4.14. Rekomendasi Desain Proyek Perdagangan Karbon Pertanian Indonesia Berbasis Respirasi Tanah	150
4.15. Peta Jalan Kebijakan Perdagangan Karbon Sektor Pertanian Indonesia Berbasis Proses Tanah dan Penguatan Kelembagaan	152
4.16. Pembahasan kausal kuantitatif	158
4.16.1. Pembahasan Dinamika Kenaikan dan Penurunan pH Tanah antar Variabel Pengelolaan	158
4.16.2. Pembahasan Dinamika Kenaikan dan Penurunan Kadar Air Tanah) antar Variabel Pengelolaan	160
4.16.3. Pembahasan Dinamika Kenaikan dan Penurunan Suhu Tanah antar Variabel Pengelolaan	162
4.16.4. Pembahasan Dinamika Respon Mesofauna Tanah terhadap Perubahan Sifat Tanah	163
4.16.5. Pembahasan Dinamika Respon Biomassa Mikroba Tanah (C-mik) terhadap Perubahan Sifat Tanah	165
4.16.6. Pembahasan Dinamika Respon Cacing Tanah terhadap Perubahan Sifat Tanah	166
4.16.7. Pembahasan Dinamika Respon Respirasi Tanah terhadap Komponen Biota Tanah	168
4.16.8. Sintesis Model I–III: Jalur Kausal Pengelolaan Tanah, Lingkungan Mikro, Biota Tanah, dan Respirasi Tanah	170
4.16.9. Sintesis Model I: Pengelolaan Tanah sebagai Pengendali Lingkungan Mikro	170
4.1.10. Sintesis Model II: Diferensiasi Respon Biota Tanah terhadap Lingkungan Mikro	171
4.16.11. Sintesis Model III: Mikroorganisme sebagai Pengendali Utama Respirasi Tanah	171
4.16.12. Pembahasan Jalur Kausal Terintegrasi Pengelolaan Tanah hingga Respirasi Tanah (CO ₂)	172
4.16.13. Hubungan Antar Variabel dalam Model Kausal Sistem Tanah	176
4.16.14. Implikasi Kebijakan MRV dan Perdagangan Karbon Berbasis Jalur Kausal Tanah	179
4.16.15. Keterkaitan Hasil Penelitian dengan Akuntansi GRK dan Peran Sektor AFOLU	181
4.17. Keterkaitan Penelitian dengan Tujuan	

Pembangunan Berkelanjutan (<i>SDGs</i> 2, 13, 15, dan 17).....	185
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	188
5.2. Saran	189
DAFTAR PUSTAKA	190
LAMPIRAN.....	211

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Hal
1. <i>Network Visualization</i>	7
2. <i>Overlay Visualization</i>	8
3. <i>Density Visualization</i>	9
4. Peta Lokasi Penelitian	65
5. Desain Letak Penelitian	67
6. Diagram alur bertingkat (<i>hierarchical causal pathway</i>)	175

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 1.1. Summary VosViewer	10
Tabel 4.1. Ringkasan Regresi Bertingkat Hubungan Pengelolaan Tanah, Lingkungan, Biota, dan Respirasi Tanah	79
Tabel 4.2. Regresi Faktor Pengelolaan Tanah terhadap pH Tanah	83
Tabel 4.3. Regresi Faktor Pengelolaan Tanah terhadap Kadar Air Tanah	86
Tabel 4.4. Regresi Faktor Pengelolaan Tanah terhadap Suhu Tanah	87
Tabel 4.5. Regresi Pengaruh Mesofauna Tanah terhadap Sifat Fisik dan Kimia Tanah	90
Tabel 4.6. Regresi Respon Biomassa Mikroba Tanah Terhadap Pengaruh Sifat Fisik dan Kimia Tanah	93
Tabel 4.7. Regresi Respon Cacing Tanah Terhadap Pengaruh Sifat Fisik dan Kimia Tanah	96
Tabel 4.8. Regresi Akhir Respirasi Tanah	100

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkebunan nanas merupakan salah satu subsektor hortikultura yang memberikan kontribusi nyata terhadap perekonomian nasional, terutama dalam aspek perolehan devisa, penyerapan tenaga kerja, dan pertumbuhan ekonomi berbasis agribisnis. Data dari Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa nilai ekspor nanas Indonesia pada tahun 2023 mencapai sekitar USD 250–300 juta per tahun, dengan volume ekspor lebih dari 200 ribu ton, yang menempatkan Indonesia sebagai salah satu eksportir utama nanas olahan di dunia. Selain itu, menurut Food and Agriculture Organization, produksi nanas Indonesia mencapai lebih dari 3 juta ton per tahun, sehingga menempatkan Indonesia dalam tiga besar produsen nanas dunia bersama Filipina dan Thailand. Kondisi ini menunjukkan bahwa komoditas nanas memiliki peran penting dalam mendukung kinerja ekspor sektor hortikultura.

Dari sisi ketenagakerjaan, perkebunan nanas memiliki karakteristik padat karya yang mampu menyerap puluhan ribu tenaga kerja dalam kegiatan budidaya dan pengolahan. Hal ini didukung oleh laporan industri dari *Great Giant Foods* sebagai salah satu perusahaan pengolahan nanas terbesar di Indonesia yang beroperasi di Lampung. Selain itu, data Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa subsektor hortikultura, termasuk nanas, berkontribusi signifikan dalam penyerapan tenaga kerja di sektor pertanian. Selain itu peningkatan produksi dan ekspor komoditas hortikultura berkontribusi terhadap peningkatan pendapatan rumah tangga petani serta penciptaan lapangan kerja di wilayah pedesaan (FAO, 2017; Barrett, *et al.*, 2020).

Dalam perspektif makroekonomi, kontribusi perkebunan nanas terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) terjadi melalui subsektor hortikultura dan agroindustri. Data nasional menunjukkan bahwa subsektor hortikultura menyumbang sekitar 1,5–2,0% terhadap PDB nasional, dan nanas menjadi salah satu komoditas utama di dalamnya. Selain itu, peningkatan ekspor nanas terbukti memiliki hubungan positif dengan pertumbuhan ekonomi, khususnya dalam meningkatkan nilai tambah melalui industri pengolahan seperti nanas kaleng dan jus. Hal ini sejalan dengan temuan *World Bank* yang menyatakan bahwa pengembangan agroindustri berbasis komoditas ekspor mampu mendorong pertumbuhan ekonomi inklusif dan berkelanjutan di negara berkembang.

Dengan demikian, meskipun kontribusi devisa dari nanas masih lebih kecil dibandingkan komoditas perkebunan utama seperti kelapa sawit, namun secara kuantitatif dan struktural komoditas ini tetap memiliki peran strategis, dengan nilai ekspor mencapai ratusan juta dolar, produksi jutaan ton per tahun, serta kemampuan menyerap puluhan ribu tenaga kerja. Oleh karena itu, pengembangan perkebunan nanas yang terintegrasi dengan industri pengolahan dan pasar ekspor memiliki potensi besar untuk terus ditingkatkan dalam mendukung pembangunan ekonomi nasional berbasis agribisnis berkelanjutan.

Pertumbuhan dan pengembangan perkebunan nanas yang memberikan kontribusi signifikan terhadap devisa, penyerapan tenaga kerja, dan pertumbuhan ekonomi nasional tidak dapat dilepaskan dari implikasi lingkungannya, khususnya dalam konteks emisi karbon dari sistem pertanian. Intensifikasi dan ekspansi lahan pertanian, termasuk komoditas hortikultura seperti nanas, berpotensi memengaruhi keseimbangan karbon melalui perubahan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Oleh karena itu, di tengah meningkatnya peran strategis sektor pertanian dalam perekonomian, muncul kebutuhan untuk memastikan bahwa praktik budidaya yang dilakukan tidak hanya produktif secara ekonomi, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis. Hal ini menjadi semakin penting mengingat sektor pertanian juga berperan sebagai sumber sekaligus penyerap karbon,

sehingga pengelolaannya harus mempertimbangkan aspek mitigasi perubahan iklim secara terintegrasi.

Perubahan iklim global yang ditandai oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca telah menjadi tantangan lingkungan yang memerlukan strategi mitigasi efektif di berbagai sektor, termasuk sektor pertanian tropis. Pertanian merupakan salah satu kontributor utama emisi gas rumah kaca global, khususnya melalui dinamika tanah sebagai sumber dan penyerap karbon. Respirasi tanah menjadi jalur utama pelepasan karbon ke atmosfer, yang didorong oleh aktivitas mikroba dan akar tanaman dalam proses dekomposisi bahan organik (Basheer, *et al.*, 2024; Bond-Lamberty, *et al.*, 2024; Azevedo, *et al.*, 2024; Verma, *et al.*, 2026).

Pengendalian emisi karbon dari sistem pertanian tropis merupakan salah satu tantangan utama dalam mitigasi perubahan iklim berbasis lahan, karena tanah pertanian berperan sebagai sumber sekaligus penyimpan karbon dalam siklus karbon global. Sektor pertanian berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), terutama melalui emisi karbon dioksida (CO₂) dari permukaan tanah, namun pada saat yang sama memiliki potensi strategis untuk meningkatkan stok karbon tanah melalui pengelolaan lahan yang tepat (Paustian, *et al.*, 2016; Lal, 2020).

Laporan penilaian iklim oleh IPCC (2021) secara eksplisit menyatakan bahwa salah satu sumber ketidakpastian terbesar dalam inventarisasi dan akuntansi emisi GRK sektor pertanian berasal dari dinamika karbon tanah, termasuk respirasi tanah dan perubahan cadangan karbon organik tanah, yang sangat dipengaruhi oleh praktik pengelolaan lahan. Pernyataan ini diperkuat oleh FAO (2021) yang menegaskan bahwa variabilitas proses biologis tanah dan responsnya terhadap pengelolaan merupakan faktor kunci penyebab tingginya ketidakpastian estimasi emisi dan serapan karbon pada sistem pertanian, khususnya di wilayah tropis. Dengan demikian, pemahaman berbasis proses mengenai hubungan antara pengelolaan tanah, dinamika biota tanah, dan fluks karbon tanah menjadi prasyarat penting untuk meningkatkan akurasi akuntansi GRK dan mendukung pengembangan mekanisme mitigasi berbasis lahan.

Respirasi tanah merupakan komponen penting dalam siklus karbon terestrial karena proses ini merefleksikan aktivitas biologis tanah pada rantai dekomposisi bahan organik. Sifat fisik–kimia tanah dan dinamika biota tanah berinteraksi secara kompleks dalam mengatur laju respirasi tanah, sehingga perubahan dalam kondisi tanah akibat praktek pengelolaan seperti pengolahan tanah dan aplikasi amelioran organik dapat memengaruhi emisi karbon tanah (Bai, *et al.*, 2025).

Amelioran organik tanah seperti *biochar*, kompos, dan vermikompos telah mendapat perhatian intensif sebagai bahan pembenah tanah untuk meningkatkan kualitas tanah dan potensi mitigasi emisi gas rumah kaca. Meta-analisis global menunjukkan bahwa penggunaan *biochar* dapat secara signifikan menurunkan emisi metana (CH_4) dan nitrous oxide (N_2O) sambil meningkatkan biomassa mikroba, meskipun respon terhadap emisi CO_2 bervariasi bergantung pada kondisi tanah, dosis aplikasi, dan interaksi dengan pupuk nitrogen (Bai, *et al.*, 2025).

Penelitian Duan, *et al.* (2024), Lin, *et al.* (2024), serta Ren, *et al.* (2025) menunjukkan bahwa co-aplikasi *biochar* dengan kompos atau sumber bahan organik lainnya menghasilkan respons yang kompleks terhadap emisi gas rumah kaca. *Biochar* dilaporkan mampu menurunkan emisi N_2O melalui perubahan sifat fisik tanah, peningkatan pH, serta modulasi aktivitas mikroba yang terlibat dalam proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Namun demikian, pada kondisi tertentu, terutama ketika tersedia karbon labil dalam jumlah tinggi, aplikasi *biochar* justru dapat meningkatkan emisi CO_2 akibat percepatan mineralisasi bahan organik yang mudah terdekomposisi. Dengan demikian, respons tanah terhadap praktik pengelolaan ini bersifat konteks-spesifik dan bergantung pada sifat awal tanah, jenis amandemen yang digunakan, serta struktur komunitas mikroba tanah.

Hassan, *et al.* (2024) serta Bai, *et al.* (2025) menunjukkan bahwa meskipun berbagai penelitian eksperimental telah mengkaji pengaruh amelioran organik terhadap sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, pemahaman mengenai hubungan kausal yang berlangsung secara simultan di antara variabel-variabel tersebut masih terbatas, terutama pada sistem perkebunan tropis yang rentan terhadap gangguan akibat praktik budidaya intensif. Dalam konteks ini, amandemen seperti

biochar dan kompos tidak hanya berperan dalam memperbaiki sifat tanah, termasuk kapasitas pertukaran kation, pH, dan retensi air, tetapi juga memodulasi aktivitas mikroba tanah yang mengendalikan proses biogeokimia. Perubahan ini secara langsung memengaruhi respirasi tanah dan pada akhirnya menentukan dinamika emisi gas rumah kaca khususnya CO₂, dengan respons yang bersifat kontekstual tergantung pada kondisi tanah, dosis aplikasi, serta interaksi dengan input organik lainnya.

Pemahaman yang sangat terbatas atas hubungan sebab-akibat antarvariabel ini menghambat pengembangan strategi pengelolaan yang holistik dan berbasis bukti untuk mengendalikan respirasi tanah tanpa mengorbankan produktivitas tanaman pertanian termasuk nanas. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu pendekatan analitis yang mampu menangkap keterkaitan kompleks antara pengelolaan tanah, sifat tanah, biota tanah, dan laju respirasi tanah dalam satu kerangka model simultan. Pendekatan ini memungkinkan untuk identifikasi sensitivitas beberapa parameter model terhadap berbagai perlakuan serta interaksi langsung dan tidak langsung antarvariabel, sehingga dapat digunakan sebagai basis ilmiah dalam perumusan strategi pengendalian emisi karbon di perkebunan nanas dan agroekosistem tropis lainnya.

Penelitian ini antara lain diarahkan untuk menjawab kebutuhan tersebut dengan mengembangkan model persamaan simultan yang mampu merumuskan hubungan kausal antara perlakuan olah tanah dan aplikasi amelioran organik terhadap perubahan sifat tanah, dinamika biota tanah, dan laju respirasi tanah, sebagai dasar akuntansi dan pengendalian emisi karbon yang efektif pada sistem perkebunan tropis.

1.2. Rumusan Masalah:

1. Apakah *soil Management* berperan nyata dalam mengontrol *soil properties*?
2. Apakah *soil properties* dapat mengontrol kelimpahan *soil biota*?
3. Apakah *soil Biota* dapat mengontrol laju *soil respiration*?

1.3. Tujuan Penelitian:

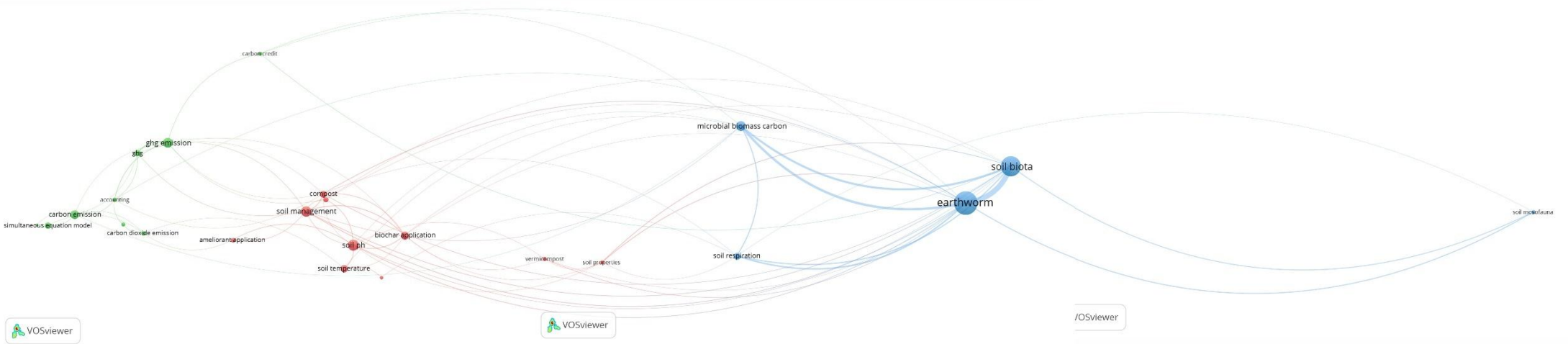
1. Menetapkan sensitivitas parameter dari *soil tillage* dan *soil amelioran* (compost, biochar, Vermist dan mikroorganism) terhadap *soil properties* (temperatur, kadar air, pH).
2. Menetapkan Sensitivitas parameter *soil properties* terhadap *soil biota improvement*
3. Merancang persamaan simultan respirasi tanah sebagai fungsi dari *soil biota* dan *soil biota* sebagai fungsi dari *Soil properties* yang merupakan fungsi dari *Soil Management*.

1.4. Manfaat hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai:

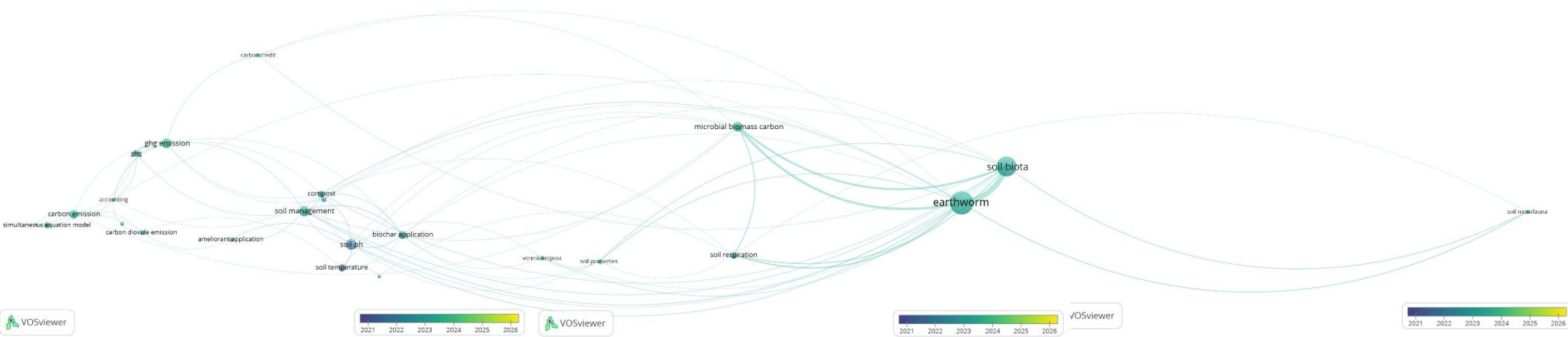
1. Pedoman *improvement soil properti*,
2. Pedoman *improvement performa soil biota* dan,
3. Pedoman pengendalian respirasi tanah dalam mereduksi tingkat emisi CO₂ di perkebunan nanas.
4. Kontribusi pada akuntansi GRK dalam rangka MRV perdagangan karbon di sektor AFOLU.

1.5. Kebaharuan

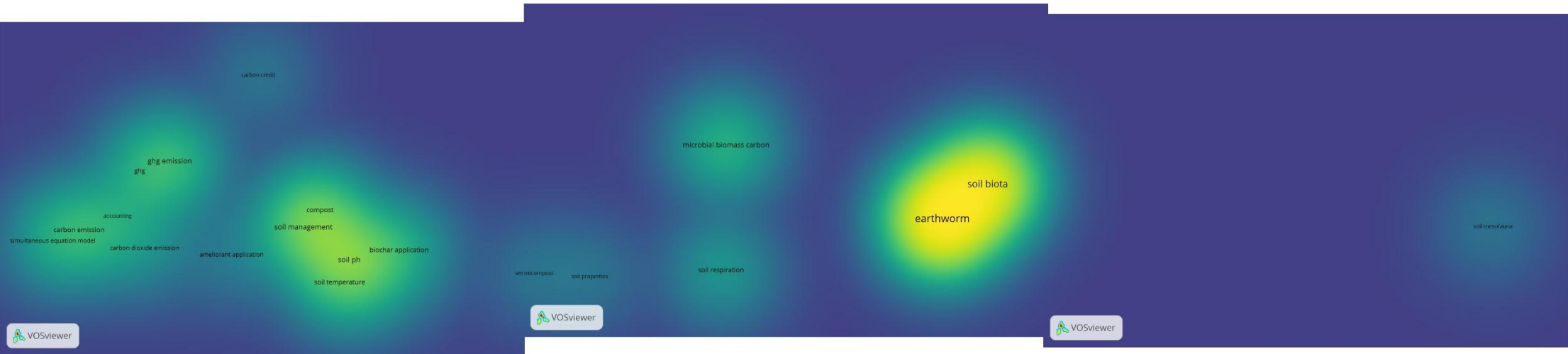
Berdasarkan hasil analisis bibliometrik sebanyak 3997 paper dengan menggunakan VOSviewer, penelitian ini mengidentifikasi pola keterkaitan, kepadatan, serta perkembangan temporal topik-topik penelitian yang berkaitan dengan pengelolaan tanah, sifat tanah, biota tanah, respirasi tanah, dan implikasinya terhadap emisi gas rumah kaca serta perdagangan karbon. Visualisasi yang digunakan meliputi *network visualization*, *overlay visualization*, dan *density visualization*, yang secara bersama-sama memberikan gambaran komprehensif mengenai posisi dan kebaruan penelitian ini dalam lanskap keilmuan global pada gambar 1.



Gambar 1. *Network Visualization*



Gambar 2. *Overlay Visualization*



Gambar 3. *Density Visualization*

Berdasarkan hasil dari VOSviewer dapat disimpulkan bahwa novelty yang di hasilkan adalah :

1. Belum terdapat penelitian yang secara eksplisit mengembangkan jalur kausal bertingkat (*hierarchical causal pathway*) yang menjelaskan bagaimana pengelolaan tanah memengaruhi respirasi tanah melalui mekanisme tidak langsung yang dimediasi oleh sifat fisik–kimia tanah dan biota tanah, termasuk pada sistem perkebunan nanas.
2. Belum ada penelitian yang menggunakan respirasi tanah sebagai dasar perhitungan emisi CO₂ dan akuntansi karbon sebagai sumber *income* lainnya di perkebunan nanas dalam perdagangan karbon.

Tabel 1.1. Summary VOSviewer

No	VOSviewer	Summary
1.	Network Visualization	<p>Hasil <i>network visualization</i> menunjukkan bahwa variabel-variabel penelitian terkelompok ke dalam beberapa klaster warna, di mana variabel dalam satu klaster warna memiliki keterkaitan konseptual yang kuat dan sering dibahas dalam topik penelitian yang sama. Pada peta jaringan yang dihasilkan, terdapat tiga klaster utama yaitu:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Klaster hijau merupakan klaster dominan yang mencakup variabel-variabel terkait pengelolaan tanah dan intervensi teknis, seperti <i>soil management, soil ameliorant, compost, dan biochar amendment</i>. Dominasi klaster ini menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada praktik pengelolaan tanah sebagai strategi utama dalam pengendalian karbon tanah, namun masih menitikberatkan pada pendekatan berbasis input dan praktik, bukan pada mekanisme proses yang terjadi di dalam tanah. 2. Klaster merah mencakup variabel sifat fisik dan kimia

tanah, terutama *soil temperature* dan *soil water content*, serta keterkaitannya dengan *soil microbial biomass carbon*. Klaster ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan mikro tanah telah banyak dikaji sebagai faktor yang memengaruhi dinamika karbon tanah. Namun, keterkaitan klaster ini dengan respirasi tanah dan emisi karbon masih bersifat parsial dan belum membentuk jalur kausal yang terintegrasi.

3. Klaster biru mencakup variabel biota tanah dan respirasi tanah, seperti *soil biota*, *earthworm*, *soil mesofauna*, dan *soil respiration*. Posisi klaster ini relatif terpisah dari klaster pengelolaan tanah, yang mengindikasikan bahwa penelitian yang secara langsung menghubungkan biota tanah dengan respirasi tanah masih terbatas. Semakin jauh jarak antar klaster, semakin menunjukkan bahwa hubungan antar variabel tersebut belum banyak dikaji secara terpadu, sehingga membuka ruang kebaruan untuk penelitian lanjutan.

Semakin jauh jarak garis antar warna *cluster* artinya belum banyak penelitian yang membahas hubungan antar variabel-variabel tersebut sehingga masih ada ruang sebagai penelitian baru. Sedangkan semakin dekat jarak antar warna *cluster* artinya sudah banyak penelitian yang menghubungkan variabel-variabel tersebut. Secara keseluruhan, *network visualization* menegaskan bahwa hingga saat ini belum banyak penelitian yang mengintegrasikan pengelolaan tanah, sifat tanah, biota tanah, dan respirasi tanah dalam satu kerangka jalur kausal bertingkat (*hierarchical causal pathway*).

-
2. **Overlay Visualization** Hasil *overlay visualization* menunjukkan dinamika temporal perkembangan penelitian berdasarkan tahun publikasi. Warna yang lebih gelap pada node variabel mengindikasikan bahwa topik tersebut telah banyak diteliti pada periode yang lebih awal, sedangkan warna yang lebih terang menunjukkan topik penelitian yang relatif baru dan berkembang dalam beberapa tahun terakhir.
- Variabel seperti *soil temperature*, *soil water content*, dan *biochar amendment* didominasi oleh warna yang lebih gelap, menandakan bahwa topik ini telah lama menjadi fokus penelitian. Sebaliknya, variabel *soil biota*, *earthworm*, *carbon credit*, dan *GHG emission* ditandai dengan warna yang lebih terang, yang menunjukkan bahwa penelitian terkait peran biota tanah dalam konteks emisi gas rumah kaca dan perdagangan karbon merupakan topik yang relatif baru dan masih berkembang.
- Pola ini mengindikasikan adanya pergeseran fokus penelitian global dari pendekatan berbasis pengelolaan dan kondisi fisik tanah menuju pendekatan yang lebih menekankan peran biologis tanah dan implikasinya terhadap kebijakan iklim. Namun demikian, keterkaitan antara respirasi tanah dan sistem akuntansi karbon masih belum banyak dibahas secara eksplisit dalam literatur. Semakin gelap warna bulatan cluster artinya penelitian tersebut sudah diteliti pada tahun sebelumnya atau sudah lama. Sedangkan semakin terang warna clusternya artinya semakin baru tahun penelitian tersebut.
-
3. **Density Visualization** Hasil *density visualization* menunjukkan tingkat intensitas penelitian berdasarkan kecerahan warna pada masing-
-

masing variabel. Variabel dengan warna kuning terang menunjukkan bahwa topik tersebut telah banyak diteliti, sedangkan warna yang lebih gelap menunjukkan variabel yang relatif jarang dibahas.

Variabel *soil management* dan *soil biota* memiliki tingkat kecerahan yang tinggi, menandakan tingginya intensitas penelitian pada topik tersebut. Sebaliknya, *soil respiration* dan *soil microbial biomass carbon* menunjukkan tingkat kecerahan yang lebih rendah, meskipun kedua variabel ini merupakan komponen kunci dalam pengendalian fluks karbon tanah. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian, khususnya dalam mengkaji respirasi tanah sebagai fungsi sistem biologis tanah yang terintegrasi.

Dengan demikian, berdasarkan *density visualization*, variabel respirasi tanah dan biomassa mikroba tanah memiliki potensi kebaruan yang tinggi untuk diteliti lebih lanjut, terutama dalam konteks pengembangan model pengendalian emisi karbon berbasis proses.

Semakin berwarna kuning terang maka semakin banyak penelitian yang membahas variabel-variabel tersebut. Sedangkan semakin gelap/tidak terlalu cerah maka semakin sedikit penelitian yang membahas variabel-variabel tersebut. Maka jika ingin meneliti variabel-variabel yang jarang dibahas maka disebut kebaruan penelitian.

Sumber: olah data peneliti, 2026

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan yang kuat dengan mengintegrasikan hasil analisis bibliometrik global dan pendekatan empiris berbasis data lapangan untuk mengembangkan model respirasi tanah berbasis

proses. Model ini diharapkan dapat memperkuat dasar ilmiah akuntansi gas rumah kaca dan mendukung implementasi perdagangan karbon di sektor pertanian tropis termasuk di perkebunan nanas.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam setiap kegiatan manusia hampir selalu tidak pernah terlepas dari motif ekonomi yang berawal mulai untuk pemenuhan kebutuhan dasar sampai pada kebutuhan yang aspiratif. Jenis kebutuhan dasar (*human need*) umumnya dapat dibatasi. Tetapi tidak untuk kebutuhan aspirasi, yang sering disebut dengan keinginan (*want*). Dalam rangka untuk memenuhi kebutuhan aspiratif tersebut setiap individu dalam masyarakat senantiasa untuk melakukan segala bentuk eksploitasi sumberdaya yang ada di lingkungan sekitarnya. Eksploitasi tersebut di satu sisi dapat memberikan dampak positif berupa peningkatan kesejahteraan masyarakat (*public good*) termasuk peningkatan pendapatan, kesehatan, keamanan dsb. Di sisi lain setiap kegiatan senantiasa juga tidak pernah lepas membangkitkan dampak negatif kepada lingkungan (*public bad*) termasuk polusi padatan atau limbah, polusi perairan, dan polusi udara. Klimak dari polusi udara terutama yang disebabkan oleh emisi GRK adalah pada pemanasan global dan perubahan iklim.

2.1 *Public Good* dalam Perkebunan Nanas: Kontribusi Positif Perekonomian

Perkebunan nanas (*Ananas comosus*) merupakan salah satu komoditas hortikultura tropis bernilai ekonomi tinggi. Secara botani, tanaman ini pertama kali dideskripsikan secara ilmiah oleh Carl Linnaeus pada tahun 1753 dalam *Species Plantarum* dengan nama *Bromelia ananas*, yang kemudian direvisi menjadi *Ananas comosus* oleh Merrill. Sejumlah studi menunjukkan bahwa budidaya nanas memberikan tingkat profitabilitas yang kompetitif bagi petani kecil dan menengah, terutama ketika didukung oleh praktik agronomi yang efisien dan akses pasar yang baik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa budidaya nanas merupakan usaha hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan mampu memberikan keuntungan yang positif bagi petani. Analisis ekonomi pada

berbagai sistem produksi nanas menunjukkan bahwa komoditas ini dapat memberikan pendapatan yang stabil bagi petani kecil serta mendukung pengembangan ekonomi pedesaan di wilayah tropis (Altendorf, 2019; Bartholomew, *et al.*, 2003).

Pada penelitian di Malaysia menunjukkan bahwa usahatani nanas memiliki tingkat kelayakan ekonomi yang baik dan mampu memberikan pendapatan yang menarik bagi petani kecil. Analisis biaya dan pendapatan menunjukkan bahwa produksi nanas dapat menghasilkan keuntungan yang positif serta berkontribusi terhadap peningkatan kesejahteraan rumah tangga petani di wilayah pedesaan (Muhamad, *et al.*, 2022). Penelitian mengenai daya saing komoditas nanas di Asia Tenggara menunjukkan bahwa posisi Malaysia dalam perdagangan nanas internasional masih relatif lemah dibandingkan Thailand dan Filipina. Analisis menggunakan indeks *Revealed Comparative Advantage* (RCA) menunjukkan bahwa Malaysia belum memiliki keunggulan komparatif dalam ekspor nanas selama periode 2001–2020 (Mohamad, *et al.*, 2022).

Selain itu, analisis rantai nilai di Ghana menegaskan bahwa pendapatan dari nanas tidak hanya berasal dari penjualan buah segar, tetapi juga meningkat secara signifikan melalui kegiatan pengolahan seperti produk kaleng, jus, dan produk bernilai tambah lainnya, yang memperkuat kontribusi ekonomi lokal dan distribusi manfaat di sepanjang rantai nilai (Boakye, *et al.*, 2025). Akses terhadap pasar yang terorganisir, fasilitas pengolahan, serta dukungan kelembagaan terbukti menjadi faktor kunci dalam meningkatkan nilai ekonomi komoditas ini dan mengurangi kerentanan petani terhadap fluktuasi musiman. Lebih lanjut, berbagai penelitian menunjukkan adanya hubungan erat antara insentif ekonomi dan adopsi praktik pertanian berkelanjutan, di mana petani yang memperoleh manfaat ekonomi nyata dari usaha tani nanas cenderung lebih bersedia berinvestasi dalam amelioran tanah, praktik konservasi, dan pendekatan produksi berkelanjutan. Studi tentang intensifikasi berkelanjutan dan sistem budidaya nanas menunjukkan bahwa peningkatan pendapatan dan akses terhadap inovasi mendorong adopsi praktik pengelolaan lahan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Wuepper, *et al.*, 2017; Gunawardena & Lokupitiya, 2024). Dengan

demikian, manfaat ekonomi dari budidaya nanas dapat dipandang sebagai *public good* yang berperan penting dalam mendorong transisi menuju pengelolaan tanah yang berkelanjutan.

Produksi nanas berkontribusi signifikan terhadap penyerapan tenaga kerja baik musiman maupun permanen di sepanjang rantai nilai, mulai dari kegiatan penanaman, pemeliharaan, panen, hingga pengolahan, pengepakan, dan distribusi. Studi-studi rantai nilai hortikultura tropis menunjukkan bahwa sektor pasca-panen, termasuk pemrosesan dan pengemasan, menciptakan peluang usaha mikro dan lapangan kerja non-pertanian di pedesaan, serta memiliki peran penting dalam meningkatkan partisipasi kerja perempuan dan pemuda (Maertens & Swinnen, 2015; Boakye, *et al.*, 2025). Literatur nilai-rantai modern menegaskan bahwa peningkatan koordinasi vertikal dan horizontal antara pelaku rantai nilai seperti koperasi petani, layanan penyuluhan, dan perusahaan pengolahan serta investasi pada infrastruktur pendukung seperti *cold chain*, logistik, dan akses pasar berbasis digital, secara signifikan meningkatkan nilai tambah yang tertahan di tingkat komunitas produsen (Reardon, *et al.*, 2019; Gereffi & Fernandez-Stark, 2016).

Pengalaman di sektor nanas Afrika dan Asia menunjukkan bahwa penguatan hilirisasi dan tata kelola rantai nilai mampu mentransformasi perkebunan nanas dari sekadar sumber bahan baku komoditas menjadi pusat pertumbuhan ekonomi pedesaan yang berkelanjutan, dengan dampak positif terhadap penciptaan lapangan kerja, inklusi sosial, dan ketahanan ekonomi lokal (Wuepper, *et al.*, 2017). Intervensi manajemen tanah yang terbukti meningkatkan produktivitas, seperti aplikasi biochar dan kompos, tidak hanya berdampak pada peningkatan hasil dan kualitas buah nanas, tetapi juga memiliki implikasi ekonomi tidak langsung. Peningkatan volume dan mutu buah mendorong bertambahnya aktivitas pascapanen—termasuk sortasi, pengolahan, dan pengemasan yang pada akhirnya memperluas penyerapan tenaga kerja di tingkat lokal. Dengan demikian, perbaikan sifat-sifat tanah (*soil properties*) dapat dipahami sebagai penyedia *public good* ekonomi, karena manfaatnya tidak hanya dirasakan oleh petani di

tingkat produksi, tetapi juga oleh pelaku lain di sepanjang rantai nilai dan komunitas pedesaan secara lebih luas. (Hanyabui, *et al.*, 2024)

Pengembangan produk turunan dari buah dan limbah nanas, seperti sirup, produk olahan, enzim bromelain, pakan ternak, serta biochar yang dihasilkan dari ampas dan daun nanas, berpotensi memperpanjang rantai nilai dan mengurangi tekanan harga pada produk mentah. Literatur mutakhir tentang *agricultural waste valorization* dan bioekonomi sirkular menekankan bahwa pemanfaatan limbah agroindustri merupakan pendekatan kunci untuk mengubah residu pertanian menjadi sumber nilai ekonomi baru sekaligus menekan dampak lingkungan melalui peningkatan efisiensi sumber daya (Geissdoerfer, *et al.*, 2017). Dalam kerangka ini, pemanfaatan limbah biomassa perkebunan sebagai produk bernilai tambah atau input produksi dipandang sebagai strategi penting untuk mendukung keberlanjutan ekonomi dan lingkungan sistem pertanian tropis.

Pemanfaatan limbah nanas sebagai kompos atau biochar dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya dalam sistem pertanian sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal seperti pupuk kimia. Selain meningkatkan kesuburan tanah dan daur ulang unsur hara, pengolahan limbah pertanian menjadi produk bernilai tambah juga berpotensi menurunkan biaya produksi serta membuka peluang pendapatan tambahan bagi petani dan pelaku usaha kecil di pedesaan (Lehmann & Joseph, 2015; Agegnehu, *et al.*, 2015). Selain itu, ekstraksi bromelain dari limbah nanas telah banyak dilaporkan memiliki nilai ekonomi tinggi untuk industri pangan, farmasi, dan kesehatan, sehingga membuka peluang diversifikasi usaha berbasis agroindustri lokal (Arshad, *et al.*, 2014; Ketnawa, *et al.*, 2012).

Studi-studi regional dan global tentang pengelolaan limbah agroindustri menunjukkan bahwa komersialisasi biomassa pertanian—termasuk konversi residu tanaman menjadi biochar atau pemanfaatannya sebagai pakan ternak—berpotensi meningkatkan ketahanan ekonomi sistem perkebunan sekaligus memperkuat prinsip keberlanjutan lingkungan dan ekonomi wilayah. Literatur bioekonomi sirkular menegaskan bahwa pengalihan limbah dari sistem produksi

linier menuju pemanfaatan bernilai merupakan mekanisme penting untuk menciptakan nilai tambah, mengurangi tekanan lingkungan, dan memperluas basis pendapatan di wilayah pedesaan (D'Amato, *et al.*, 2017; Velenturf & Purnell, 2021). Dengan demikian, *valorization* limbah pertanian termasuk dalam konteks perkebunan nanas dapat dipahami sebagai kerangka transformasi menuju sistem bioekonomi sirkular yang lebih tangguh dan bernilai tambah tinggi. Integrasi pemanfaatan limbah sebagai amelioran (biochar/kompos) langsung menghubungkan aspek ekonomi (pengurangan biaya, sumber pendapatan tambahan) dengan tujuan penelitian: pengendalian respirasi tanah melalui perbaikan sifat tanah (Hanyabui, *et al.*, 2024).

Praktik agronomi konservatif, seperti olah tanah minimum (*reduced tillage*), penggunaan tanaman penutup tanah (*cover crops*), serta peningkatan input bahan organik, telah terbukti mampu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, termasuk struktur tanah, kapasitas menahan air, dan stabilitas agregat, sekaligus mendukung kesehatan dan aktivitas biota tanah (Bongiorno, *et al.*, 2019; Blanco-Canqui, *et al.*, 2015). Aplikasi amelioran organik seperti kompos, biochar, dan vermikompos secara konsisten dilaporkan meningkatkan kandungan karbon organik tanah, biomassa mikroorganisme, serta menciptakan kondisi mikrohabitat yang lebih stabil bagi fauna tanah, yang pada banyak kasus berimplikasi pada peningkatan produktivitas tanaman (Agegnehu, *et al.*, 2016). Ulasan mutakhir menunjukkan bahwa praktik-praktik pengelolaan tersebut berkontribusi terhadap peningkatan retensi karbon tanah dan stabilisasi karbon jangka menengah hingga panjang, meskipun besaran efek bersihnya terhadap emisi karbon jangka panjang sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim lokal, jenis tanah, serta interaksi mikroba–substrat yang kompleks (Paustian, *et al.*, 2016). Oleh karena itu, strategi pengelolaan tanah yang secara simultan mendukung produktivitas pertanian dan pemulihan fungsi tanah memberikan manfaat publik ganda, yaitu manfaat ekonomi melalui peningkatan hasil dan pendapatan petani, serta jasa ekosistem berupa peningkatan penyimpanan karbon tanah, pengendalian erosi, dan perbaikan kualitas air (Lal, 2020; FAO, 2021).

Pengujian (kompos, biochar, vermikompos) relevan tidak hanya secara agronomi tetapi juga untuk penciptaan *public goods* lingkungan-ekonomi. (Narayanan, *et al.*, 2024) Meski tanaman tahunan besar (pohon) sering diulik dalam studi sequester karbon, literatur terbaru menunjukkan bahwa praktik manajemen pertanian (konservasi tanah, penambahan biochar, pengembalian residu) dapat meningkatkan stok karbon tanah di lahan perkebunan dan sistem hortikultura. Beberapa tinjauan menegaskan bahwa meskipun potensi absolut bervariasi, intervensi agronomi yang meningkatkan input bahan organik dan mengurangi gangguan tanah dapat berkontribusi pada mitigasi GRK skenario lokal/region. Pada konteks perkebunan nanas, penambahan biochar/kompos dari residu memperbaiki stok karbon organik tanah sekaligus meningkatkan kesuburan memberi manfaat ganda bagi petani dan iklim (Gelaye & Getahun, 2024).

Adopsi praktik yang meningkatkan kualitas tanah (mis. aplikasi amelioran) memerlukan biaya awal dan pengetahuan teknis; oleh karena itu, insentif ekonomi (akses pasar premium, subsidi input, pembayaran jasa ekosistem/karbon) mendorong pelaku untuk menerapkan praktik tersebut. Studi implementasi skema pembayaran jasa lingkungan dan proyek karbon pertanian menunjukkan bahwa bila insentif ekonomi memadai dan mekanisme verifikasi sederhana tersedia, petani lebih cenderung mengadopsi praktik pencegahan degradasi dan peningkatan stok karbon. Untuk perkebunan nanas, pengembangan insentif berbasis hasil/efisiensi (mis. premium untuk produk rendah jejak karbon, atau dukungan untuk pengolahan limbah) dapat mempercepat transisi manajemen berbasis *public good* (Nadhirah, *et al.*, 2025).

Model regresi bertingkat memungkinkan peneliti menganalisis hubungan antara faktor sosial-ekonomi dan biofisik secara bertahap dalam satu kerangka analisis. Dalam pendekatan ini, variabel ekonomi seperti pendapatan, akses pasar, dan insentif dapat dimasukkan sebagai variabel eksogen yang memengaruhi keputusan petani dalam mengadopsi praktik pengelolaan tanah. Pendekatan analitis seperti ini memungkinkan identifikasi jalur pengaruh tidak langsung antara faktor ekonomi, praktik pengelolaan lahan, dan respons ekologi seperti respirasi tanah

sehingga hasil penelitian menjadi lebih relevan bagi perumusan kebijakan pengelolaan lahan (Gelman & Hill, 2007; Wooldridge, 2016).

Beberapa studi lapangan di Ghana, Indonesia, dan Afrika Barat menunjukkan bagaimana kombinasi penambahan kompos/biochar dan peningkatan koordinasi rantai nilai meningkatkan hasil, mengurangi biaya input, dan membuka usaha hilirisasi skala mikro. Eksperimen aplikatif pada nanas juga menunjukkan bahwa aplikasi biochar dan kompos dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan hasil, sekaligus menyediakan bahan baku untuk usaha olahan lokal (mis. pembuatan pupuk organik komersial). Hasil seperti ini mendukung argumentasi bahwa praktik manajemen tanah yang baik dapat diperdagangkan menjadi *public good* ekonomi di tingkat komunitas (Hanyabui, *et al.*, 2024).

Walaupun banyak manfaat, ada *trade-offs* yang perlu dicermati: aplikasi bahan organik yang berlebihan tanpa perencanaan dapat meningkatkan pelepasan CO₂ jangka pendek; biochar berkualitas rendah dapat membawa polutan; dan skema hilirisasi yang tidak berkelanjutan dapat menciptakan pasar yang *volatile*. Oleh karenanya, kebijakan pendorong harus mencakup: pedoman teknis aplikasi, mekanisme verifikasi (*monitoring soil C*), dukungan kapasitas kelembagaan (koperasi, pelatihan), dan akses pembiayaan untuk investasi awal. Kajian kebijakan modern menekankan kombinasi pendekatan pasar (nilai tambah, akses ekspor) dan instrumen lingkungan (insentif karbon/agro-environmental payments) (Narayan, *et al.*, 2024).

Perkebunan nanas dapat menghasilkan *public good* ekonomi yang nyata (pendapatan, lapangan kerja, nilai tambah), sambil berpotensi menyediakan jasa ekosistem jika dikelola dengan praktik yang mendukung kualitas tanah. Untuk merealisasikan sinergi ekonomi-lingkungan, intervensi harus menyatukan: (a) teknologi agronomi berbasis bukti (kompos, biochar, vermikompos), (b) penguatan rantai nilai dan akses pasar, (c) kebijakan insentif dan verifikasi lingkungan, serta (d) dukungan hilirisasi dan *circular economy* untuk pemanfaatan limbah. Kombinasi ini memosisikan perkebunan nanas sebagai unit produksi

yang dapat secara simultan mendukung kesejahteraan ekonomi lokal dan mitigasi iklim (Hanyabui, *et al.*, 2024).

2.2. *Public Bad* dalam Perkebunan Nanas: Dampak Negatif pada Pemanasan Global

Konsep *public bad* merujuk pada dampak negatif aktivitas ekonomi yang biayanya ditanggung oleh masyarakat luas, bukan hanya oleh pelaku produksi. Dalam konteks pertanian intensif, *public bad* muncul dalam bentuk degradasi tanah, pencemaran air, kehilangan keanekaragaman hayati, serta emisi gas rumah kaca (GRK). Perkebunan nanas sebagai sistem monokultur tropis intensif memiliki potensi menghasilkan *public bad* lingkungan yang signifikan apabila pengelolaannya tidak memperhatikan keseimbangan ekologi tanah dan lanskap. Hal ini menjadi krusial karena biaya eksternal berupa emisi GRK berkontribusi langsung terhadap pemanasan global dan perubahan iklim (IPCC, 2021). Secara struktural, sistem monokultur cenderung meningkatkan tekanan terhadap tanah melalui gangguan fisik berulang, input eksternal tinggi, dan rendahnya diversitas biologis. Kondisi ini mempercepat laju mineralisasi karbon tanah dan menjadikan tanah sebagai sumber bersih CO₂ ke atmosfer, sehingga menciptakan *public bad* yang melampaui batas kebun dan wilayah produksi.

Respirasi tanah merupakan jalur utama pelepasan karbon dioksida (CO₂) dari tanah ke atmosfer dan menyumbang porsi terbesar dari fluks karbon terestrial global. Pada sistem pertanian tropis, laju respirasi tanah umumnya lebih tinggi dibandingkan wilayah temperate akibat suhu dan kelembapan yang mendukung aktivitas mikroba sepanjang tahun. Sejumlah kajian global menunjukkan bahwa sistem pertanian dapat menjadi salah satu sumber penting emisi CO₂ ke atmosfer, terutama ketika praktik pengelolaan lahan mempercepat dekomposisi bahan organik tanah dan meningkatkan aktivitas mikroba heterotrof. Intensifikasi pengolahan tanah dan perubahan pengelolaan residu tanaman diketahui dapat meningkatkan mineralisasi karbon tanah sehingga memperbesar fluks respirasi tanah ke atmosfer (Chen, *et al.*, 2019; Jian, *et al.*, 2021; Paustian, *et al.*, 2016).

Dalam perkebunan nanas, respirasi tanah didominasi oleh respirasi heterotrofik yang berasal dari mikroorganisme tanah. Aktivitas ini meningkat seiring

terganggunya struktur tanah dan meningkatnya ketersediaan substrat karbon yang mudah terdekomposisi. Akibatnya, karbon yang semula tersimpan dalam tanah dilepaskan kembali ke atmosfer dalam bentuk CO₂, memperkuat efek rumah kaca dan pemanasan global.

Olah tanah intensif merupakan salah satu sumber utama *public bad* dalam sistem perkebunan. Praktik pengolahan tanah intensif dapat meningkatkan aerasi tanah, memecah agregat tanah, dan membuka perlindungan fisik karbon organik yang sebelumnya terlindungi di dalam agregat tanah (Zhu, *et al.*, 2023). Gangguan struktur tanah tersebut meningkatkan akses mikroorganisme terhadap bahan organik tanah sehingga mempercepat proses dekomposisi karbon. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa gangguan tanah berulang dapat meningkatkan respirasi tanah dalam jangka pendek hingga menengah, serta berkontribusi terhadap penurunan stok karbon tanah dalam jangka panjang (Six, *et al.*, 2004; Haddaway, *et al.*, 2020).

Pada perkebunan nanas, olah tanah sering dilakukan untuk persiapan lahan, pengendalian gulma, dan pemeliharaan tanaman. Jika tidak dikombinasikan dengan strategi konservasi, praktik ini berkontribusi terhadap pelepasan karbon yang sebelumnya stabil, sehingga memperbesar *carbon debt* sistem pertanian tersebut. Dalam perspektif pemanasan global, hal ini berarti bahwa keuntungan ekonomi jangka pendek diperoleh dengan mengorbankan stabilitas iklim jangka panjang.

Pemberian bahan organik seperti kompos dan residu tanaman sering direkomendasikan untuk memperbaiki kesuburan tanah. Namun, dalam konteks tertentu, input organik juga dapat meningkatkan emisi CO₂ melalui stimulasi aktivitas mikroba (*priming effect*). Studi menunjukkan bahwa penambahan karbon organik yang mudah terdekomposisi dapat merangsang aktivitas mikroorganisme tanah dan mempercepat mineralisasi karbon tanah yang telah ada melalui mekanisme *priming effect*. Proses ini meningkatkan dekomposisi bahan organik lama dan pada akhirnya dapat meningkatkan respirasi tanah secara keseluruhan

(Kuzyakov, 2010; Huo, *et al.*, 2017). Pada perkebunan nanas, penggunaan bahan organik tanpa pengelolaan yang tepat berpotensi menciptakan paradoks lingkungan: meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus meningkatkan emisi karbon. Kondisi ini menegaskan bahwa *public bad* tidak selalu muncul akibat ketiadaan input, tetapi juga akibat ketidaktepatan strategi pengelolaan input organik.

Biota tanah berperan penting dalam mengatur keseimbangan karbon tanah melalui efisiensi penggunaan karbon mikroba (*microbial carbon use efficiency*). Pada sistem monokultur intensif, keragaman dan fungsi biota tanah sering menurun akibat gangguan fisik, penggunaan agrokimia, dan homogenisasi habitat. Penurunan keragaman ini mengurangi kemampuan tanah dalam menstabilkan karbon dan meningkatkan fraksi karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ (Crowther, *et al.*, 2019; Thakur, *et al.*, 2020; Geisen, *et al.*, 2019). Dalam konteks perkebunan nanas, degradasi biota tanah menghilangkan mekanisme regulasi alami respirasi tanah. Tanah menjadi sistem yang “bocor karbon”, di mana sebagian besar karbon yang masuk segera dilepaskan kembali ke atmosfer. Dampak ini bersifat *public bad* karena konsekuensinya dirasakan secara global melalui peningkatan konsentrasi GRK.

Meskipun emisi karbon dari satu unit perkebunan nanas mungkin tampak kecil, akumulasi emisi dari jutaan hektar sistem pertanian tropis menghasilkan dampak global yang signifikan. IPCC (2021) menegaskan bahwa sektor pertanian dan penggunaan lahan merupakan kontributor utama emisi antropogenik GRK, dengan tanah sebagai komponen yang paling sulit dikendalikan karena kompleksitas biologisnya. Dari sudut pandang ekonomi lingkungan, emisi karbon tanah merupakan *externality* negatif klasik: pelaku produksi tidak menanggung biaya sosial dari emisi tersebut. Akibatnya, tanpa intervensi kebijakan dan inovasi pengelolaan, sistem perkebunan cenderung beroperasi pada tingkat emisi yang lebih tinggi dari tingkat sosial-optimal.

Salah satu tantangan utama dalam pengendalian *public bad* adalah ketidakpastian dalam pengukuran dan akuntansi emisi karbon tanah. Model faktor emisi konvensional sering gagal menangkap variasi spasial dan temporal respirasi tanah,

khususnya di wilayah tropis. Ketidakpastian ini berisiko menyebabkan underestimation emisi dari sistem perkebunan, sehingga kebijakan mitigasi menjadi kurang efektif (Smith, *et al.*, 2020; Paustian, *et al.*, 2016). Dalam konteks perkebunan nanas, ketiadaan model berbasis proses biologis memperbesar risiko salah arah kebijakan. Sistem yang tampak produktif secara ekonomi dapat secara simultan menjadi penyumbang signifikan terhadap pemanasan global. Berdasarkan uraian tersebut, jelas bahwa perkebunan nanas tidak hanya menghasilkan *public good* ekonomi, tetapi juga *public bad* lingkungan berupa emisi karbon tanah yang berkontribusi terhadap pemanasan global. *Public bad* ini bersumber dari kombinasi olah tanah intensif, input organik yang tidak terkelola, degradasi biota tanah, dan ketiadaan pendekatan pengendalian berbasis proses.

2.3. Improvement Soil Properties dalam Manajemen Sumberdaya Lahan di Perkebunan Nanas

Tanah merupakan modal alam (*natural capital*) yang menentukan keberlanjutan sistem pertanian tropis, termasuk perkebunan nanas. Dalam kerangka pembangunan berkelanjutan, kualitas tanah tidak hanya dipandang sebagai faktor produksi, tetapi juga sebagai pengatur utama fungsi ekosistem seperti siklus karbon, air, dan nutrisi. Penurunan kualitas sifat fisik, kimia, dan biologis tanah akan menurunkan produktivitas jangka panjang serta meningkatkan emisi gas rumah kaca (GRK) dari tanah, terutama melalui peningkatan respirasi heterotrofik (Lal, 2004; Paustian, *et al.*, 2016).

Pada sistem perkebunan nanas yang dikelola secara intensif, tanah sering mengalami tekanan berupa gangguan mekanik berulang, rendahnya input bahan organik berkualitas, serta perubahan mikroklimat tanah. Kondisi ini menyebabkan degradasi *soil properties* yang berimplikasi langsung pada peningkatan emisi karbon tanah dan penurunan efisiensi penggunaan sumberdaya lahan. Oleh karena itu, perbaikan sifat tanah (*improvement soil properties*) menjadi strategi kunci dalam manajemen sumberdaya lahan perkebunan nanas.

Sifat tanah mencakup komponen fisik, kimia, dan biologis yang saling berinteraksi secara simultan dalam mengendalikan proses-proses biogeokimia.

Dalam konteks respirasi tanah, beberapa sifat utama yang berperan dominan meliputi suhu tanah, kadar air, reaksi tanah (pH), serta kandungan karbon organik. Interaksi antar faktor tersebut tidak bersifat sederhana, melainkan membentuk respons yang kompleks dan kontekstual melalui keterlibatan biota tanah. Studi mutakhir menunjukkan bahwa variasi kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, pH, dan karbon organik dapat memodulasi aktivitas dan biomassa mikroba sehingga menghasilkan respons respirasi tanah yang tidak linier terhadap perubahan lingkungan (Yang, *et al.*, 2023; Bond-Lamberty *et al.*, 2024). Hal ini menegaskan bahwa *soil properties* tidak dapat diperlakukan sebagai variabel independen tunggal, melainkan sebagai sistem terintegrasi yang harus dikelola secara holistik.

Sifat fisik tanah, terutama struktur agregat, porositas, dan kapasitas menahan air, berperan penting dalam mengatur difusi oksigen dan karbon dioksida di dalam tanah. Pada tanah yang terdegradasi, agregat tanah mudah pecah sehingga meningkatkan aerasi berlebihan dan mempercepat mineralisasi karbon organik. Peningkatan stabilitas agregat tanah melalui penambahan bahan organik dan pengurangan intensitas olah tanah dapat memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kapasitas tanah dalam mempertahankan kelembapan. Kondisi ini cenderung menurunkan fluktuasi kelembapan tanah dan menstabilkan aktivitas mikroorganisme, sehingga dapat mengurangi lonjakan respirasi tanah pada kondisi basah–kering ekstrem (Six, *et al.*, 2004; Lal, 2018). Dalam perkebunan nanas, perbaikan sifat fisik tanah ini berimplikasi ganda, yaitu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi kehilangan karbon tanah.

Suhu tanah merupakan faktor pengendali langsung laju reaksi biokimia di dalam tanah. Pada ekosistem tropis, suhu tanah relatif tinggi sepanjang tahun sehingga aktivitas mikroorganisme berlangsung intensif. Kondisi ini menjadikan tanah tropis sangat sensitif terhadap gangguan pengelolaan. Studi eksperimental menunjukkan bahwa praktik pengelolaan yang meningkatkan penutupan permukaan tanah, seperti pengembalian residu tanaman dan aplikasi mulsa organik, dapat memodifikasi mikroklimat tanah dengan menurunkan amplitudo fluktuasi suhu dan mempertahankan kelembapan tanah. Kondisi mikroklimat yang

lebih stabil tersebut dapat mengurangi fluktuasi respirasi tanah harian serta memperlambat laju dekomposisi bahan organik (Jian, *et al.*, 2021; Lal, 2020). Dengan demikian, pengelolaan suhu tanah melalui perbaikan sifat fisik tanah merupakan strategi penting dalam mengendalikan emisi karbon dari perkebunan nanas.

Reaksi tanah (pH) mengontrol aktivitas enzim mikroba dan ketersediaan nutrisi, yang pada akhirnya memengaruhi efisiensi penggunaan karbon oleh mikroorganisme. Tanah dengan pH ekstrem cenderung memiliki komunitas mikroba yang kurang efisien dalam mengasimilasi karbon, sehingga proporsi karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ meningkat. Perubahan pH tanah diketahui memiliki pengaruh kuat terhadap aktivitas dan struktur komunitas mikroorganisme tanah. Perbaikan pH menuju kisaran optimal dapat meningkatkan aktivitas mikroba serta efisiensi penggunaan karbon mikroba (*microbial carbon use efficiency*, CUE), sehingga proporsi karbon yang diasimilasi menjadi biomassa meningkat relatif terhadap karbon yang dilepaskan melalui respirasi tanah (Rousk, *et al.*, 2010; Liang, *et al.*, 2017). Dalam perkebunan nanas, pengelolaan pH melalui amelioran organik dan biologis berpotensi menjadi instrumen pengendalian emisi karbon berbasis tanah.

Aplikasi amelioran organik seperti kompos, biochar, dan vermikompos merupakan pendekatan utama dalam perbaikan sifat tanah. Amelioran ini berfungsi meningkatkan kandungan karbon organik tanah, memperbaiki struktur tanah, serta menyediakan substrat dan habitat bagi biota tanah. Meta-analisis global menunjukkan bahwa aplikasi kombinasi kompos dan biochar secara konsisten meningkatkan kapasitas menahan air, stabilitas agregat, dan ketersediaan nutrisi, sekaligus menurunkan laju respirasi tanah jangka panjang dibandingkan aplikasi bahan organik mudah terdekomposisi saja (Agegnehu, *et al.*, 2015; Lehmann, *et al.*, 2021). Temuan ini sangat relevan untuk sistem perkebunan nanas yang membutuhkan keseimbangan antara produktivitas dan pengendalian emisi karbon.

Perbaikan sifat tanah tidak hanya berdampak langsung pada respirasi tanah, tetapi juga berperan sebagai mediator utama dalam hubungan antara pengelolaan tanah

dan dinamika biota tanah. Sifat tanah yang lebih stabil secara fisik dan kimia menciptakan lingkungan mikro yang kondusif bagi perkembangan mikroorganisme dan fauna tanah yang efisien dalam penggunaan karbon. Perbaikan sifat fisik dan kimia tanah dapat meningkatkan kualitas habitat mikroba sehingga komunitas mikroba mampu memanfaatkan sumber karbon secara lebih efisien. Dalam kondisi tersebut, sebagian karbon hasil dekomposisi dialokasikan untuk pembentukan biomassa mikroba dan residu mikroba (*microbial necromass*) yang berkontribusi pada pembentukan bahan organik tanah yang stabil, sementara proporsi karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ melalui respirasi menjadi relatif lebih kecil (Liang, *et al.*, 2019; Sokol, *et al.*, 2022).

Perbaikan sifat tanah merupakan titik kendali strategis dalam manajemen sumberdaya lahan perkebunan nanas. Sifat tanah berfungsi sebagai penghubung antara praktik pengelolaan lahan dan respons biologi tanah, sekaligus menentukan arah dan besaran respirasi tanah. Pendekatan yang hanya berfokus pada peningkatan hasil tanpa memperhatikan kualitas *soil properties* berisiko memperbesar *public bad* berupa emisi karbon. Sebaliknya, pengelolaan tanah yang berorientasi pada perbaikan sifat fisik–kimia tanah membuka peluang untuk menekan respirasi tanah dan mengonversi sistem perkebunan nanas menjadi sistem dengan *climate co-benefits*. Kerangka ini menjadi dasar ilmiah bagi penggunaan model persamaan simultan dalam penelitian ini, di mana *soil properties* diposisikan sebagai variabel penghubung kunci antara manajemen tanah dan emisi karbon

2.3.1. Soil Tillage Treatment pada Perkebunan Nanas

Olah tanah (*soil tillage*) merupakan salah satu praktik manajemen paling awal dan paling menentukan dalam sistem perkebunan nanas. Secara agronomis, olah tanah bertujuan menyiapkan media tanam, mengendalikan gulma, memperbaiki aerasi awal, serta memfasilitasi pertumbuhan perakaran. Namun, dari perspektif ekologi tanah dan perubahan iklim, olah tanah juga merupakan sumber gangguan (*disturbance*) utama yang mengubah struktur fisik tanah, dinamika karbon, dan aktivitas biota tanah. Dalam sistem pertanian tropis, termasuk perkebunan nanas,

intensitas pengolahan tanah sering kali relatif tinggi karena kebutuhan penyiapan lahan, penanaman berulang, serta pengendalian gulma secara mekanis.

Praktik pengolahan tanah tersebut bertujuan untuk memperbaiki kondisi fisik tanah pada awal musim tanam dan memfasilitasi pertumbuhan tanaman, namun pada saat yang sama dapat mengganggu struktur tanah dan mempengaruhi dinamika bahan organik tanah (Lal, 2018; FAO, 2017). Literatur menunjukkan bahwa gangguan tanah yang berulang dapat mempercepat dekomposisi karbon organik tanah melalui peningkatan aerasi tanah dan terbukanya bahan organik yang sebelumnya terlindungi dalam agregat tanah. Kondisi ini meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah dan respirasi tanah, sehingga dalam jangka panjang dapat berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) dari tanah ke atmosfer (Six, *et al.*, 2004; Haddaway, *et al.*, 2020; Zhu, *et al.*, 2023).

Secara umum, sistem olah tanah dalam perkebunan nanas dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama:

1. Olah Tanah Intensif (*Conventional Tillage*) Melibatkan pembalikan dan penghancuran tanah secara menyeluruh. Sistem ini meningkatkan aerasi tanah secara drastis dan memecah agregat tanah, sehingga meningkatkan ketersediaan substrat karbon bagi mikroorganisme.
2. Olah Tanah Minimum (*Minimum Tillage*) Mengurangi intensitas gangguan tanah dengan mempertahankan sebagian struktur tanah dan residu tanaman di permukaan.
3. Olah Tanah Konservatif (*Conservation / Reduced Tillage*) Menekankan minimalisasi gangguan tanah dan mempertahankan penutup tanah, sering dikombinasikan dengan input bahan organik.

Beberapa penelitian global menunjukkan bahwa pergeseran dari olah tanah intensif ke sistem konservatif secara konsisten meningkatkan stok karbon tanah dan menurunkan respirasi tanah jangka panjang, meskipun respons awal dapat bervariasi tergantung kondisi iklim dan tanah (Haddaway, *et al.*, 2020; Paustian, *et al.*, 2016).

Olah tanah secara langsung memengaruhi sifat fisik tanah, khususnya struktur agregat, porositas, dan stabilitas makroagregat. Pada olah tanah intensif, agregat tanah pecah dan perlindungan fisik karbon organik terhadap dekomposisi mikroba berkurang. Kondisi ini meningkatkan difusi oksigen dan mempercepat mineralisasi karbon organik tanah. Sebaliknya, sistem olah tanah konservatif mempertahankan agregat tanah dan meningkatkan fraksi karbon terlindungi secara fisik (Zhu, *et al.*, 2023).

Stabilitas agregat tanah memainkan peran penting dalam mengontrol dekomposisi bahan organik tanah. Karbon organik yang terlindungi secara fisik di dalam agregat tanah menjadi lebih sulit diakses oleh mikroorganisme dan enzim dekomposer, sehingga memperlambat proses mineralisasi karbon dan menurunkan laju respirasi tanah (Six, *et al.*, 2002; Lehmann & Joseph, 2015). Dalam konteks perkebunan nanas, perbaikan sifat fisik tanah melalui pengurangan intensitas olah tanah menjadi strategi penting untuk menekan kehilangan karbon tanah tanpa mengorbankan fungsi produksi.

Gangguan tanah akibat olah tanah juga memengaruhi rezim suhu dan kelembapan tanah. Tanah yang terbuka akibat olah tanah intensif mengalami fluktuasi suhu harian yang lebih besar dan kehilangan air yang lebih cepat melalui evaporasi. Fluktuasi ini menciptakan kondisi yang merangsang respirasi mikroba, terutama pada fase re-wetting setelah periode kering. Penelitian menunjukkan bahwa sistem pengelolaan tanah dengan gangguan minimal dan penutup residu yang lebih tinggi cenderung menciptakan kondisi iklim mikro tanah yang lebih stabil, sehingga fluktuasi suhu tanah menjadi lebih rendah dan dinamika respirasi tanah lebih stabil dibandingkan pada tanah yang mengalami pengolahan intensif (Lal, 2018; Haddaway, *et al.*, 2017; Jian, *et al.*, 2021). Kondisi ini sangat relevan di wilayah tropis, di mana suhu dan kelembapan tinggi mempercepat respons mikroba terhadap gangguan tanah.

Olah tanah tidak hanya memengaruhi sifat fisik dan kimia tanah, tetapi juga secara langsung mengganggu habitat biota tanah. Mikroorganisme, mesofauna, dan makrofauna tanah sangat sensitif terhadap perubahan struktur dan kelembapan

tanah. Gangguan mekanis akibat olah tanah intensif dapat menurunkan biomassa mikroorganisme tanah, mengurangi populasi fauna tanah seperti cacing, serta menyederhanakan struktur komunitas biota tanah. Penurunan keanekaragaman organisme tanah dapat mengganggu stabilitas proses dekomposisi serta menurunkan efisiensi penggunaan karbon oleh komunitas mikroba. Berkurangnya keragaman biota tanah dapat mengubah struktur komunitas serta interaksi trofik dalam tanah sehingga proses transformasi bahan organik menjadi kurang efisien. Kondisi tersebut menyebabkan lebih banyak karbon dimineralisasi dan dilepaskan ke atmosfer sebagai CO₂ dibandingkan yang disimpan dalam biomassa mikroba atau bahan organik tanah yang stabil (Thakur, *et al.*, 2020; Geisen, *et al.*, 2019).

Berbagai studi eksperimental dan meta-analisis melaporkan bahwa olah tanah intensif meningkatkan respirasi tanah secara signifikan, terutama pada fase awal setelah gangguan. Peningkatan ini dikaitkan dengan peningkatan aerasi, meningkatnya kontak mikroba dengan substrat karbon dan aktivasi komunitas mikroba oportunistik. Sebaliknya, sistem olah tanah konservasi umumnya menurunkan respirasi tanah dalam jangka menengah hingga panjang karena gangguan fisik tanah berkurang dan dekomposisi bahan organik berlangsung lebih lambat. Namun demikian, peningkatan respirasi tanah secara sementara dapat terjadi pada fase awal transisi dari sistem olah tanah intensif menuju sistem konservasi sebagai respons terhadap perubahan kondisi fisik dan biologis tanah (Jian, *et al.*, 2021; Haddaway, *et al.*, 2017). Temuan ini menunjukkan bahwa efek olah tanah terhadap respirasi tanah bersifat dinamis dan bergantung pada interaksi dengan faktor lain, seperti bahan organik dan biota tanah.

Dari perspektif ekonomi lingkungan, praktik olah tanah intensif dapat menghasilkan eksternalitas negatif dalam bentuk emisi karbon dari tanah yang tidak tercermin dalam biaya produksi yang ditanggung oleh pelaku usaha. Karena emisi karbon merupakan bentuk dampak lingkungan yang biaya sosialnya ditanggung oleh masyarakat luas, praktik pengelolaan lahan yang mempercepat dekomposisi bahan organik tanah berpotensi meningkatkan emisi CO₂ tanpa memberikan sinyal harga yang memadai bagi produsen. Dalam kondisi tanpa regulasi atau insentif kebijakan, pelaku usaha cenderung memilih praktik

pengolahan tanah yang lebih murah secara finansial dalam jangka pendek meskipun menimbulkan biaya lingkungan yang lebih besar dalam jangka panjang (Jian, *et al.*, 2021; Khanna, 2024).

IPCC (2021) dan Paustian, *et al.* (2016) menekankan bahwa perubahan praktik pengelolaan tanah, termasuk pengurangan intensitas olah tanah, merupakan salah satu opsi mitigasi berbasis lahan yang paling *cost-effective*. Dalam konteks perkebunan nanas, adopsi olah tanah konservatif berpotensi menurunkan emisi CO₂ tanah sekaligus mempertahankan produktivitas bila dikombinasikan dengan amelioran organik. Olah tanah merupakan pedang bermata dua dalam sistem perkebunan nanas. Di satu sisi, praktik ini mendukung produksi dan efisiensi operasional; di sisi lain, olah tanah intensif mempercepat kehilangan karbon tanah dan meningkatkan emisi CO₂, sehingga memperbesar *public bad* lingkungan. Perbaikan sistem olah tanah menuju pendekatan konservatif, khususnya bila dikombinasikan dengan amelioran organik dan pengelolaan biota tanah, merupakan fondasi penting dalam strategi pengendalian respirasi tanah dan mitigasi perubahan iklim berbasis lahan.

2.3.2. Soil Amandement dan Dampaknya pada Perkebunan Nanas

Soil amendment didefinisikan sebagai bahan yang ditambahkan ke tanah untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah sehingga fungsi produktif dan ekologis tanah meningkat. Dalam sistem perkebunan nanas yang dikelola secara intensif, penggunaan *soil amendment* menjadi semakin penting karena tanah sering mengalami degradasi struktur, penurunan kandungan karbon organik, serta ketidakseimbangan aktivitas biota tanah akibat gangguan mekanik dan input kimia jangka panjang. Literatur mutakhir menegaskan bahwa *soil amendment* organik dan biologis berperan ganda: (i) meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas tanaman, serta (ii) memodulasi dinamika karbon tanah dan respirasi tanah sebagai komponen emisi karbon (Paustian, *et al.*, 2106; Agegnehu, *et al.*, 2016). Dengan demikian, *soil amendment* menjadi instrumen strategis untuk menekan *public bad* lingkungan tanpa mengorbankan *public good* ekonomi dari perkebunan nanas.

Pengaruh *soil amendment* terhadap respirasi tanah bekerja melalui beberapa mekanisme utama, yaitu: peningkatan kandungan karbon organik tanah, perbaikan struktur dan stabilitas agregat, perubahan ketersediaan nutrisi dan reaksi tanah (pH), modifikasi habitat dan aktivitas biota tanah. Respons respirasi tanah terhadap *soil amendment* bersifat non-linier dan sangat bergantung pada kualitas bahan, tingkat dekomposisi, serta interaksinya dengan kondisi iklim dan biota tanah. Kualitas bahan organik merupakan salah satu faktor penting yang mengontrol dinamika respirasi tanah. Bahan organik yang mudah terdekomposisi umumnya meningkatkan aktivitas mikroorganisme dan respirasi tanah dalam jangka pendek, sedangkan bahan organik yang lebih resisten cenderung berkontribusi pada stabilisasi karbon tanah dalam jangka panjang melalui pembentukan residu mikroba dan asosiasi karbon dengan mineral tanah (Cotrufo, *et al.*, 2013; Liang, *et al.*, 2017).

Dalam perkebunan nanas, pemilihan jenis *soil amendment* menentukan arah keseimbangan karbon tanah apakah tanah berfungsi sebagai sumber (*carbon source*) atau penyerap (*carbon sink*). Kompos merupakan *soil amendment* organik yang kaya akan karbon dan nutrisi dengan tingkat dekomposisi relatif cepat. Aplikasi kompos pada perkebunan nanas terbukti meningkatkan kesuburan tanah, kapasitas menahan air, dan aktivitas mikroorganisme tanah, yang pada gilirannya meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman. Namun demikian, Sejumlah penelitian menunjukkan adanya *trade-off* karbon pada aplikasi kompos. Karbon organik yang mudah terdekomposisi dalam kompos dapat merangsang aktivitas mikroorganisme tanah dan meningkatkan respirasi tanah pada fase awal aplikasi melalui mekanisme *priming effect*, di mana penambahan karbon baru mempercepat mineralisasi bahan organik tanah yang telah ada (Kuzyakov, 2010; Huo, *et al.*, 2017). Meskipun demikian, dalam jangka menengah, kompos dapat meningkatkan fraksi karbon partikulat tanah yang berkontribusi terhadap pembentukan agregat dan stabilisasi karbon bila dikombinasikan dengan praktik pengelolaan tanah yang tepat (Agegnehu, *et al.*, 2015).

Pada perkebunan nanas, aplikasi kompos perlu dirancang secara strategis, baik dari segi dosis maupun waktu aplikasi, agar manfaat agronomisnya tidak

diimbangi oleh peningkatan emisi CO₂ yang berlebihan. Biochar merupakan bahan karbon pirolitik yang bersifat relatif stabil dan resisten terhadap dekomposisi mikroba. Dalam konteks pengelolaan karbon tanah, biochar dipandang sebagai *soil amendment* yang memiliki potensi mitigasi iklim paling besar dibandingkan bahan organik lainnya. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa aplikasi biochar meningkatkan stabilitas agregat tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, menurunkan fluktuasi suhu tanah dan meningkatkan efisiensi penggunaan karbon mikroba.

Efektivitas *soil amendment* sangat dipengaruhi oleh sistem olah tanah yang diterapkan. Olah tanah intensif dapat mengurangi manfaat biochar dan vermikompos dengan mempercepat fragmentasi agregat dan meningkatkan oksidasi karbon. Sebaliknya, sistem olah tanah konservatif memperkuat efek positif *soil amendment* terhadap stabilisasi karbon dan perbaikan habitat biota tanah (Haddaway, *et al.*, 2020; Paustian, *et al.*, 2016). Dalam perkebunan nanas, interaksi antara *soil amendment* dan *soil tillage* merupakan faktor kunci yang menentukan arah respirasi tanah dan keseimbangan karbon tanah.

Dari perspektif mitigasi perubahan iklim, *soil amendment* berfungsi sebagai instrumen pengendalian *public bad* berupa emisi karbon tanah. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada jenis bahan, dosis, dan kombinasi dengan praktik pengelolaan lainnya. IPCC (2021) dan Paustian, *et al.*, (2016) menekankan bahwa praktik berbasis tanah seperti aplikasi biochar dan peningkatan bahan organik berkualitas tinggi merupakan bagian penting dari portofolio mitigasi GRK berbasis lahan, khususnya di wilayah tropis. *Soil amendment* merupakan instrumen kunci dalam manajemen sumberdaya lahan perkebunan nanas yang berkelanjutan. Aplikasi kompos, biochar, vermikompos, dan amelioran biologis memiliki mekanisme dan implikasi yang berbeda terhadap respirasi tanah dan keseimbangan karbon.

2.3.2.1 Aplikasi Amelioran Kompos

Kompos merupakan amelioran organik yang mengandung fraksi karbon labil hingga semi-stabil serta nutrisi makro–mikro dalam bentuk yang relatif mudah

tersedia. Pada sistem perkebunan nanas, aplikasi kompos berfungsi sebagai pemasok karbon reaktif yang merangsang aktivitas mikroorganisme tanah, memperbaiki struktur agregat, dan meningkatkan kapasitas menahan air. Studi eksperimental dan meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa kompos secara konsisten meningkatkan kandungan karbon organik tanah (SOC), nitrogen tersedia, serta aktivitas enzim tanah yang terkait dengan siklus C dan N, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan pertumbuhan dan hasil tanaman hortikultura tropis (Agegnehu, *et al.*, 2016; EL-Mogy, *et al.*, 2024).

Peningkatan respirasi tanah setelah aplikasi kompos terutama dikendalikan oleh respons cepat komunitas mikroba terhadap ketersediaan substrat karbon mudah terdekomposisi. Fenomena ini dikenal sebagai *priming effect*, di mana masukan karbon segar tidak hanya dimineralisasi, tetapi juga menstimulasi mineralisasi karbon tanah yang lebih tua. Besarnya *priming effect* dalam tanah dipengaruhi oleh kualitas bahan organik yang ditambahkan, khususnya rasio C:N dan tingkat stabilitas atau humifikasi bahan tersebut. Faktor lingkungan seperti kelembapan tanah serta ketersediaan nutrisi awal juga berperan penting dalam mengendalikan arah dan intensitas *priming effect* selama proses dekomposisi karbon tanah (Zhang, *et al.*, 2017; Chen, *et al.*, 2014). Pada tanah tropis yang hangat dan lembap, respons respirasi ini cenderung lebih kuat dibandingkan tanah temperate, sehingga risiko peningkatan emisi CO₂ jangka pendek menjadi lebih besar.

Meskipun aplikasi kompos meningkatkan respirasi tanah pada fase awal, sejumlah studi lima tahun terakhir menegaskan bahwa sebagian karbon kompos berkontribusi pada pembentukan fraksi karbon partikulat (*particulate organic carbon, POC*) yang berperan penting dalam pembentukan dan stabilisasi agregat tanah. Fraksi POC ini menjadi prekursor bagi pembentukan karbon terasosiasi mineral (*mineral-associated organic carbon, MAOC*) dalam jangka menengah, khususnya bila didukung oleh struktur tanah yang stabil dan gangguan mekanik minimal (Cotrufo, *et al.*, 2019; Agegnehu, *et al.*, 2016). Dengan demikian, kompos dapat berperan ganda: sebagai pemicu respirasi jangka pendek sekaligus fondasi penyimpanan karbon jangka menengah.

Efektivitas kompos dalam menekan kehilangan karbon sangat ditentukan oleh interaksinya dengan sifat fisik dan kimia tanah. Peningkatan kapasitas menahan air akibat aplikasi kompos dapat menstabilkan kondisi kelembapan tanah, mengurangi fluktuasi ekstrem basah–kering yang diketahui memicu lonjakan respirasi tanah. Selain itu, kompos cenderung memperbaiki reaksi tanah (pH) menuju kisaran optimal bagi mikroorganisme, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan karbon mikroba (*microbial carbon use efficiency, CUE*). Studi terkini menunjukkan bahwa peningkatan CUE berkorelasi dengan penurunan proporsi karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ relatif terhadap karbon yang diasimilasi ke dalam biomassa mikroba (Wieder *et al.*, 2015; Tao, *et al.*, 2022; Liang, *et al.*, 2017).

Pada perkebunan nanas, aplikasi kompos sering dilakukan untuk mengimbangi rendahnya bahan organik tanah akibat olah tanah intensif dan pemindahan biomassa hasil panen. Namun, tanpa pengaturan dosis dan waktu aplikasi yang tepat, kompos dapat memperbesar *carbon loss window* pada fase awal musim tanam. Literatur menunjukkan bahwa strategi aplikasi kompos yang diselaraskan dengan fase pertumbuhan tanaman dan kondisi iklim dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan organik dalam sistem pertanian. Aplikasi kompos pada periode dengan ketersediaan air yang cukup serta dikombinasikan dengan praktik olah tanah konservatif dapat meningkatkan kualitas tanah, memperbaiki struktur tanah, serta memaksimalkan manfaat agronomis sambil mengurangi kehilangan karbon melalui respirasi tanah (Lal, 2018; Agegnehu, *et al.*, 2015).

Aplikasi kompos pada perkebunan nanas harus dipandang sebagai intervensi dengan efek kausal berlapis: (i) efek langsung terhadap respirasi tanah melalui peningkatan substrat karbon labil, dan (ii) efek tidak langsung melalui perbaikan sifat tanah dan peningkatan efisiensi biota tanah dalam jangka menengah. Kerangka ini menjustifikasi penggunaan model persamaan simultan dalam penelitian Anda, di mana kompos diposisikan sebagai variabel eksogen yang memengaruhi *soil properties* dan *soil biota*, serta secara simultan mengendalikan laju respirasi tanah. Dengan pendekatan ini, manfaat agronomis kompos dapat dioptimalkan tanpa meningkatkan *public bad* berupa emisi CO₂ yang berlebihan.

2.3.2.2 Aplikasi Amelioran Biochar

Biochar merupakan bahan karbon pirolitik yang dihasilkan dari pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen. Berbeda dengan kompos, biochar dicirikan oleh struktur aromatik yang stabil, luas permukaan tinggi, dan porositas mikro–meso yang besar. Sifat-sifat ini menjadikan biochar relatif resisten terhadap dekomposisi mikroba, sehingga berpotensi meningkatkan stabilisasi karbon tanah jangka panjang. Literatur mutakhir menempatkan biochar sebagai salah satu *soil amendment* dengan potensi mitigasi iklim tertinggi di sektor pertanian karena mampu menambah stok karbon tanah tanpa memicu lonjakan respirasi tanah yang besar (Lehmann, *et al.*, 2021; Paustian, *et al.*, 2016).

Stabilisasi karbon akibat aplikasi biochar terjadi melalui tiga mekanisme utama. Pertama, perlindungan fisik, di mana karbon biochar terinkorporasi dalam agregat tanah yang stabil sehingga sulit diakses mikroorganisme. Kedua, asosiasi kimia, yakni adsorpsi senyawa organik dan mikroba pada permukaan biochar yang bermuatan dan kaya gugus fungsional. Ketiga, Regulasi biologis juga berperan dalam dinamika respirasi tanah melalui perubahan aktivitas mikroorganisme tanah. Aplikasi biochar diketahui dapat meningkatkan efisiensi penggunaan karbon mikroba (*microbial carbon use efficiency*, CUE), sehingga proporsi karbon yang diasimilasi ke biomassa mikroba meningkat relatif terhadap karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ melalui respirasi tanah (Lehmann & Joseph, 2015; Wang, *et al.*, 2015).

Penelitian lima tahun terakhir menunjukkan bahwa sebagian besar karbon biochar tetap berada dalam tanah selama dekade waktu, bahkan pada kondisi tropis, sehingga berkontribusi pada pembentukan fraksi karbon terasosiasi mineral (*mineral-associated organic carbon*, MAOC) yang sangat stabil (Lehmann, *et al.*, 2021). Berbeda dengan kompos, aplikasi biochar tidak selalu meningkatkan respirasi tanah. Banyak studi melaporkan penurunan atau tidak adanya perubahan signifikan pada laju respirasi tanah setelah aplikasi biochar, terutama pada skala waktu menengah hingga panjang. Penurunan ini dikaitkan dengan berkurangnya

ketersediaan karbon labil serta peningkatan stabilitas agregat tanah (Agegnehu, *et al.*, 2015).

Namun demikian, literatur juga mencatat adanya respons respirasi yang bervariasi pada fase awal aplikasi biochar, khususnya bila biochar mengandung fraksi karbon volatil atau diaplikasikan bersama input organik lain. Berbagai meta-analisis menunjukkan bahwa efek biochar terhadap respirasi tanah sangat bervariasi dan dipengaruhi oleh karakteristik biochar serta kondisi lingkungan. Faktor seperti bahan baku biochar, suhu pirolisis, dosis aplikasi, dan kondisi tanah serta iklim setempat dapat menentukan apakah biochar menekan atau justru meningkatkan respirasi tanah (Lehmann & Joseph, 2015; Wang, *et al.*, 2015). Biochar dapat memodifikasi habitat mikroba melalui peningkatan porositas dan retensi air, yang pada beberapa kondisi menstimulasi aktivitas mikroba. Akan tetapi, stimulasi ini tidak selalu diterjemahkan menjadi peningkatan respirasi tanah, karena mikroorganisme pada tanah berbiochar cenderung menunjukkan efisiensi metabolik yang lebih tinggi. Dengan kata lain, karbon lebih banyak diinvestasikan ke biomassa mikroba dan produk turunan stabil daripada dilepaskan sebagai CO₂ (Wieder, *et al.*, 2015).

Studi eksperimental terbaru menunjukkan bahwa biochar dapat menekan *positive priming* dan bahkan memicu *negative priming*, yaitu penurunan mineralisasi karbon tanah lama setelah penambahan biochar. Fenomena ini memperkuat peran biochar sebagai agen stabilisasi karbon tanah karena sifatnya yang relatif resisten terhadap dekomposisi serta kemampuannya meningkatkan perlindungan fisik dan kimia bahan organik tanah, sehingga cenderung menekan mineralisasi karbon dibandingkan meningkatkan respirasi tanah (Lehmann & Joseph, 2015; Wang, *et al.*, 2015).

Pada perkebunan nanas, tanah umumnya mengalami gangguan mekanik dan kehilangan karbon akibat olah tanah intensif. Biochar yang diaplikasikan pada sistem ini berpotensi berfungsi sebagai penyangga karbon yang mengimbangi kehilangan karbon akibat respirasi heterotrofik. Selain itu, biochar dapat meningkatkan kapasitas menahan air dan menstabilkan suhu tanah, sehingga mengurangi fluktuasi ekstrem yang diketahui memicu peningkatan respirasi tanah

di wilayah tropis (Lehmann & Joseph, 2015; Jeffery, *et al.*, 2011; Wang, *et al.*, 2015).

Pemanfaatan residu tanaman nanas sebagai bahan baku biochar juga membuka peluang *circular economy*, di mana limbah perkebunan dikonversi menjadi input tanah bernilai tinggi yang sekaligus berfungsi sebagai instrumen mitigasi iklim. Meskipun berpotensi besar, aplikasi biochar tidak bebas risiko. Biochar berkualitas rendah atau dosis berlebihan dapat memengaruhi ketersediaan nutrisi dan interaksi mikroba secara negatif. Selain itu, biaya produksi biochar masih relatif tinggi di beberapa wilayah tropis, sehingga manfaat ekonominya sangat bergantung pada skala produksi dan integrasi dengan sistem pengelolaan limbah pertanian. Literatur terbaru menekankan pentingnya desain biochar spesifik lokasi untuk memaksimalkan manfaat stabilisasi karbon dan meminimalkan risiko agronomis (Paustian, *et al.*, 2016; Lehmann, *et al.*, 2021).

Secara konseptual, biochar dapat diposisikan sebagai *soil amendment* yang menggeser keseimbangan karbon tanah dari respirasi menuju stabilisasi. Dalam kerangka model persamaan simultan penelitian ini, biochar berfungsi sebagai variabel eksogen yang: secara langsung meningkatkan stok karbon stabil tanah dan secara tidak langsung menurunkan respirasi tanah melalui perbaikan *soil properties* dan peningkatan efisiensi biota tanah. Pendekatan ini memungkinkan pemisahan yang jelas antara efek stabilisasi karbon biochar dan respons respirasi tanah, sehingga memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi strategi pengendalian emisi karbon pada perkebunan nanas.

2.3.2.3 Aplikasi Amelioran Vermikompos

Vermikompos merupakan hasil transformasi bahan organik melalui interaksi sinergis antara cacing tanah dan komunitas mikroorganisme, yang menghasilkan bahan organik dengan tingkat humifikasi lebih tinggi, kandungan nutrisi seimbang, serta populasi mikroba aktif yang stabil. Berbeda dengan kompos konvensional yang didominasi fraksi karbon labil, vermikompos dicirikan oleh dominasi senyawa humik dan fulvik yang relatif lebih resisten terhadap mineralisasi cepat. Karakteristik tersebut menjadikan vermikompos sebagai soil

amendment yang tidak hanya meningkatkan ketersediaan unsur hara, tetapi juga memperbaiki aktivitas biologis tanah melalui peningkatan biomassa mikroba dan aktivitas enzimatis yang mendukung transformasi bahan organik. Dengan demikian, aplikasi vermikompos berpotensi meningkatkan efisiensi metabolik komunitas mikroba dalam memanfaatkan karbon di dalam tanah (Domínguez, *et al.*, 2009; Lim, *et al.*, 2015; EL-Mogy, *et al.*, 2024).

Dalam sistem perkebunan nanas tropis yang rentan terhadap degradasi biologi tanah akibat olah tanah intensif, vermikompos memiliki potensi strategis sebagai instrumen pemulihan fungsi biologi tanah tanpa memicu lonjakan respirasi tanah yang berlebihan. Efisiensi biota tanah dalam konteks siklus karbon merujuk pada kemampuan komunitas mikroba dan fauna tanah untuk mengasimilasi karbon ke dalam biomassa dan produk turunan stabil, alih-alih melepaskannya sebagai CO₂ melalui respirasi. Literatur mutakhir menunjukkan bahwa vermikompos meningkatkan efisiensi ini melalui beberapa mekanisme utama. Pertama, vermikompos menyediakan substrat karbon dengan rasio C:N rendah hingga sedang yang mendukung pertumbuhan mikroba tanpa mendorong respirasi berlebihan. Kedua, kandungan senyawa humik dalam vermikompos meningkatkan stabilitas lingkungan mikro, sehingga mikroorganisme cenderung mengalokasikan karbon ke sintesis biomassa daripada respirasi pemeliharaan. Ketiga, Vermikompos mengandung komunitas mikroorganisme yang terbentuk selama proses dekomposisi bahan organik oleh aktivitas cacing tanah. Proses vermikomposting menghasilkan komunitas mikroba yang aktif secara metabolik serta kaya akan mikroorganisme fungsional yang berperan dalam transformasi bahan organik dan peningkatan aktivitas biologis tanah. Komunitas mikroba tersebut umumnya lebih stabil dan berfungsi lebih efektif dibandingkan mikroorganisme oportunistik yang sering mendominasi tanah yang mengalami degradasi (Domínguez, *et al.*, 2009; Lim, *et al.*, 2015).

Berbeda dengan kompos segar, respons respirasi tanah terhadap vermikompos cenderung lebih moderat dan stabil. Sejumlah studi eksperimental lima tahun terakhir melaporkan bahwa aplikasi vermikompos meningkatkan biomassa

mikroorganisme tanah dan aktivitas enzim, namun tidak diikuti oleh peningkatan respirasi tanah secara proporsional. Hal ini menunjukkan terjadinya peningkatan *microbial carbon use efficiency (CUE)*, di mana karbon yang diasimilasi mikroorganisme lebih banyak tersimpan dalam biomassa dan senyawa stabil tanah sehingga berkontribusi terhadap retensi karbon jangka panjang (Tao, *et al.*, 2023; Liang, *et al.*, 2017; EL-Mogy, *et al.*, 2024).

Aplikasi vermikompos dalam sistem pertanian berkelanjutan diketahui mampu meningkatkan biomassa mikroorganisme tanah sekaligus memperbaiki efisiensi pemanfaatan karbon oleh komunitas mikroba. Peningkatan aktivitas biologis tersebut berkaitan dengan kemampuan mikroorganisme dalam memanfaatkan bahan organik secara lebih efektif sehingga sebagian karbon yang dihasilkan selama proses dekomposisi lebih banyak tersimpan dalam biomassa mikroba. Kondisi ini umumnya tercermin dari nilai respirasi mikroba yang relatif lebih rendah dibandingkan tanah yang hanya menerima bahan organik konvensional, yang menunjukkan bahwa proporsi karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ menjadi lebih kecil dibandingkan karbon yang dimanfaatkan untuk pertumbuhan mikroba (Domínguez, *et al.*, 2009; Lim, *et al.*, 2015).

Salah satu keunggulan utama vermikompos dibandingkan amelioran organik lain adalah keterkaitannya yang kuat dengan fauna tanah, khususnya cacing tanah dan mesofauna. Vermikompos menyediakan habitat mikro yang mendukung kolonisasi fauna tanah, yang berperan sebagai *ecosystem engineers* dalam tanah. Fauna tanah meningkatkan fragmentasi bahan organik dan redistribusi mikroba, namun pada sistem yang stabil, aktivitas ini tidak selalu meningkatkan respirasi tanah. Sebaliknya, fauna tanah pada tanah yang diaplikasi vermikompos cenderung meningkatkan stabilisasi karbon melalui pembentukan agregat mikro dan peningkatan asosiasi karbon–mineral. Studi terkini menunjukkan bahwa kehadiran fauna tanah seperti cacing tanah, nematoda, dan mikroarthropoda dapat memengaruhi dinamika respirasi tanah melalui interaksi trofik dengan komunitas mikroba. Aktivitas pemangsa dan penggembalaan mikroba oleh fauna tanah dapat mengubah struktur komunitas mikroba serta memodifikasi laju dekomposisi

bahan organik. Melalui mekanisme ini, fauna tanah berperan dalam pengendalian top-down terhadap komunitas mikroba yang pada akhirnya mempengaruhi aliran karbon dan respirasi tanah (Thakur, *et al.*, 2020; Wagg, *et al.*, 2014).

Efek vermikompos terhadap respirasi tanah tidak dapat dilepaskan dari perannya dalam memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah. Aplikasi vermikompos terbukti meningkatkan stabilitas agregat, porositas, serta kapasitas menahan air, sehingga memperbaiki struktur tanah dan ketersediaan habitat mikro bagi mikroorganisme. Kondisi ini menciptakan lingkungan mikro yang lebih stabil dan homogen, serta mengurangi fluktuasi ekstrem suhu dan kelembapan tanah yang diketahui dapat memicu peningkatan respirasi tanah, khususnya pada ekosistem tropis (Edwards *et al.*, 2011; Lazcano & Domínguez, 2011; Davidson & Janssens, 2006). Selain itu, vermikompos cenderung memperbaiki reaksi tanah (pH) menuju kisaran optimal bagi mikroorganisme, sehingga meningkatkan efisiensi metabolisme mikroba. Peningkatan efisiensi ini berkorelasi dengan penurunan fraksi karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ relatif terhadap karbon yang diasimilasi (Cotrufo, *et al.*, 2022).

Pada perkebunan nanas, degradasi biologi tanah sering terjadi akibat rendahnya input bahan organik berkualitas dan tingginya gangguan mekanik. Vermikompos menawarkan solusi berbasis biologi dengan memperkuat *soil food web* dan meningkatkan efisiensi biota tanah. Studi aplikatif pada sistem hortikultura tropis menunjukkan bahwa vermikompos dapat meningkatkan pertumbuhan akar, efisiensi serapan nutrisi, dan hasil tanaman tanpa meningkatkan emisi CO₂ tanah secara signifikan. Hal ini menjadikan vermikompos sebagai amelioran yang relevan untuk sistem perkebunan nanas yang menargetkan keseimbangan antara produktivitas dan mitigasi perubahan iklim (EL-Mogy, *et al.*, 2024; Paustian, *et al.*, 2016).

Meskipun memiliki banyak keunggulan, aplikasi vermikompos juga memiliki keterbatasan. Produksi vermikompos memerlukan waktu dan manajemen biologis yang lebih intensif dibandingkan kompos biasa. Selain itu, kualitas vermikompos

sangat bergantung pada bahan baku dan spesies cacing yang digunakan. Literatur terbaru menekankan bahwa efektivitas vermikompos dalam meningkatkan efisiensi biota tanah sangat kontekstual dan dipengaruhi oleh interaksi dengan sistem olah tanah, iklim, dan jenis tanah. Oleh karena itu, aplikasi vermikompos perlu dirancang secara kontekstual, khususnya dalam sistem tropis dengan suhu dan kelembapan tinggi (Paustian, *et al.*, 2016; Tao, *et al.*, 2023).

Dari perspektif mitigasi perubahan iklim, vermikompos berfungsi sebagai *soil amendment* yang mengalihkan fungsi biologi tanah dari sistem “boros karbon” menjadi sistem “efisien karbon”. Dengan meningkatkan efisiensi biota tanah, vermikompos menekan pelepasan CO₂ tanpa mengurangi aktivitas biologi tanah yang esensial bagi produktivitas tanaman. Pendekatan ini sejalan dengan kerangka *climate-smart soils* yang menekankan peningkatan fungsi biologis tanah sebagai strategi mitigasi emisi GRK berbasis lahan (Paustian, *et al.*, 2016).

Dalam kerangka model persamaan simultan penelitian ini, vermikompos diposisikan sebagai variabel eksogen yang meningkatkan efisiensi biota tanah (biomassa mikroba dan fauna tanah), memodulasi sifat fisik dan kimia tanah, secara tidak langsung menekan respirasi tanah melalui peningkatan efisiensi metabolik.

Pendekatan simultan memungkinkan pemisahan yang jelas antara peningkatan aktivitas biologi dan peningkatan emisi karbon, yang sering tidak dapat dibedakan dalam analisis regresi linier tunggal. vermikompos merupakan amelioran organik–biologis yang menempati posisi unik di antara kompos dan biochar. Vermikompos tidak semata-mata menambah karbon tanah, tetapi meningkatkan efisiensi biota tanah dalam mengelola karbon, sehingga respirasi tanah dapat ditekan relatif terhadap peningkatan aktivitas biologis. Dalam konteks perkebunan nanas tropis, vermikompos menawarkan jalur transisi dari sistem pengelolaan tanah yang menghasilkan *public bad* berupa emisi karbon menuju sistem produksi dengan *biological climate co-benefits*. Sub-sub-bab ini memperkuat landasan ilmiah untuk memasukkan variabel *soil biota efficiency* sebagai mediator kunci dalam model persamaan simultan yang dikembangkan dalam disertasi ini.

2.3.2.4 Aplikasi *Amelioran Bacteria*

Amelioran bakteri atau inokulan mikroba didefinisikan sebagai introduksi mikroorganisme fungsional terpilih ke dalam tanah untuk memperbaiki proses biokimia tanah, meningkatkan efisiensi siklus nutrisi, serta memodulasi dinamika karbon tanah. Berbeda dengan amelioran organik yang menambah substrat karbon secara langsung, inokulan mikroba bekerja terutama melalui perubahan jalur metabolik dan efisiensi proses dalam *soil microbial loop*. Pendekatan ini semakin mendapat perhatian dalam lima tahun terakhir sebagai strategi *precision soil biology* untuk meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menekan emisi gas rumah kaca (GRK) dari tanah (Tao, *et al.*, 2023; Paustian, *et al.*, 2016).

Dalam konteks perkebunan nanas tropis, inokulan mikroba menawarkan solusi yang relatif rendah input karbon namun berpotensi tinggi dalam mengoptimalkan fungsi biota tanah, terutama pada tanah yang telah terdegradasi secara biologis akibat olah tanah intensif dan penggunaan input kimia jangka panjang. Inokulan mikroba umumnya terdiri atas satu atau kombinasi beberapa kelompok bakteri fungsional, antara lain: bakteri dekomposer dan *carbon-transforming bacteria*, bakteri pelarut fosfat (*phosphate-solubilizing bacteria*), bakteri penambat nitrogen non-simbiotik, bakteri penghasil fitohormon dan pengatur rizosfer.

Literatur mutakhir menunjukkan bahwa keberhasilan inokulan mikroba sangat bergantung pada kesesuaian fungsi bakteri dengan kendala utama tanah sasaran. Pada tanah tropis yang miskin bahan organik stabil, bakteri dengan efisiensi penggunaan karbon tinggi dan kemampuan berasosiasi dengan mineral tanah menjadi kunci dalam menekan respirasi tanah relatif terhadap peningkatan biomassa mikroba (Tao, *et al.*, 2023).

Efisiensi mikroba tanah, yang sering direpresentasikan oleh *microbial carbon use efficiency (CUE)*, merupakan rasio antara karbon yang diasimilasi ke biomassa mikroba terhadap total karbon yang diproses. Inokulan mikroba dapat meningkatkan CUE melalui beberapa mekanisme utama. Pertama, introduksi mikroba dengan jalur metabolik efisien mengurangi kehilangan karbon melalui

respirasi pemeliharaan. Kedua, mikroba inokulan dapat menggeser struktur komunitas mikroba tanah dari dominasi spesies oportunistik (ber-CUE rendah) menuju komunitas yang lebih stabil dan efisien. Ketiga, Aktivitas mikroorganisme tanah juga berperan dalam pembentukan fraksi karbon tanah yang lebih stabil. Beberapa mikroorganisme menghasilkan metabolit dan residu mikroba yang dapat berasosiasi dengan mineral tanah dan membentuk karbon terasosiasi mineral (*mineral-associated organic carbon*, MAOC), sehingga mempercepat transfer karbon ke dalam fraksi karbon tanah yang lebih stabil (Cotrufo, *et al.*, 2013; Lavalley, *et al.*, 2020).

Dengan demikian, inokulan mikroba berpotensi mengurangi respirasi tanah per unit karbon yang masuk, tanpa menurunkan aktivitas biologis tanah. Berbeda dengan aplikasi kompos, respons respirasi tanah terhadap inokulan mikroba umumnya tidak menunjukkan lonjakan tajam pada fase awal aplikasi. Hal ini karena inokulan mikroba tidak menambah karbon labil secara langsung, melainkan mengoptimalkan pemanfaatan karbon yang telah tersedia dalam tanah. Studi eksperimental lima tahun terakhir melaporkan bahwa aplikasi inokulan mikroba sering kali meningkatkan biomassa mikroorganisme dan aktivitas enzim tanah, namun respirasi tanah tetap stabil atau bahkan menurun relatif terhadap kontrol. Fenomena ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi metabolisme mikroba, bukan peningkatan intensitas respirasi (Tao, *et al.*, 2023). Namun demikian, literatur juga menegaskan bahwa respons respirasi sangat kontekstual dan dipengaruhi oleh kondisi awal tanah. Pada tanah yang sangat miskin karbon, inokulan mikroba dapat memicu peningkatan respirasi terbatas akibat aktivasi komunitas mikroba, meskipun efek ini umumnya bersifat sementara.

Keberhasilan inokulan mikroba sangat bergantung pada sifat fisik dan kimia tanah. pH tanah, kelembapan, dan ketersediaan nutrisi merupakan faktor pembatas utama kolonisasi mikroba inokulan. Tanah dengan pH ekstrem atau fluktuasi kelembapan yang tinggi umumnya menunjukkan persistensi inokulan mikroba yang rendah, karena kondisi tersebut membatasi kelangsungan hidup dan aktivitas mikroorganisme yang diperkenalkan. Berbagai studi menunjukkan

bahwa efektivitas inokulan mikroba sangat bergantung pada kondisi lingkungan tanah dan akan meningkat ketika dikombinasikan dengan perbaikan sifat tanah melalui amelioran organik atau praktik pengelolaan konservatif. Kombinasi ini menciptakan habitat mikro yang lebih stabil, meningkatkan retensi air, serta menyediakan substrat yang mendukung kolonisasi dan aktivitas mikroba, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi penggunaan karbon mikroba (microbial carbon use efficiency, CUE) dan potensi penurunan respirasi tanah (van der Heijden et al., 2008; Liang et al., 2017; Paustian, *et al.*, 2016).

Pada perkebunan nanas, inokulan mikroba memiliki potensi strategis karena sistem perakaran nanas relatif dangkal dan sangat bergantung pada aktivitas mikroba rizosfer untuk penyediaan nutrien. Inokulan mikroba yang diformulasikan untuk meningkatkan ketersediaan fosfor dan nitrogen dapat memperbaiki pertumbuhan tanaman tanpa meningkatkan input pupuk kimia. Literatur hortikultura tropis menunjukkan bahwa inokulan mikroba mampu meningkatkan efisiensi serapan nutrien dan biomassa akar, yang secara tidak langsung meningkatkan alokasi karbon ke tanah melalui eksudat akar. Namun, peningkatan ini tidak selalu diikuti oleh peningkatan respirasi tanah, karena karbon eksudat sebagian besar diasimilasi ke biomassa mikroba dan fraksi karbon stabil (Tao, *et al.*, 2023).

Meskipun menjanjikan, aplikasi inokulan mikroba juga menghadapi sejumlah keterbatasan. Salah satu tantangan utama adalah kompetisi dengan mikroba indigenus yang telah beradaptasi dengan kondisi lokal. Banyak studi melaporkan bahwa keberhasilan inokulan menurun seiring waktu apabila tidak didukung oleh habitat tanah yang sesuai. Selain itu, efektivitas inokulan sangat bergantung pada kesesuaian spesies mikroba dengan kondisi pedoklimatik dan praktik pengelolaan lahan. Oleh karena itu, pendekatan *one-size-fits-all* dalam penggunaan inokulan mikroba sering kali tidak efektif. Literatur lima tahun terakhir menekankan pentingnya pendekatan berbasis lokasi dan integrasi dengan manajemen tanah secara keseluruhan (Paustian, *et al.*, 2016; Tao, *et al.*, 2023).

Dari perspektif mitigasi perubahan iklim, inokulan mikroba menawarkan pendekatan yang unik: mengurangi emisi karbon tanah tanpa menambah stok karbon labil. Dengan meningkatkan efisiensi penggunaan karbon mikroba, inokulan dapat menekan respirasi tanah relatif terhadap input karbon, sehingga berkontribusi pada pengurangan *carbon leakage* dari tanah ke atmosfer.

Pendekatan ini sangat relevan bagi sistem perkebunan nanas yang memerlukan solusi mitigasi berbasis proses biologis, bukan sekadar penambahan input organik. Dalam kerangka model persamaan simultan penelitian ini, inokulan mikroba diposisikan sebagai variabel eksogen yang memengaruhi struktur dan efisiensi komunitas mikroba tanah, memodulasi sifat kimia dan biologis tanah dan secara tidak langsung mengendalikan respirasi tanah. Model simultan memungkinkan pemisahan antara peningkatan aktivitas mikroba dan peningkatan emisi CO₂, yang sering tidak dapat dibedakan dalam analisis linier konvensional.

Aplikasi amelioran bakteri atau inokulan mikroba merupakan strategi perbaikan biologi tanah yang berorientasi pada efisiensi, bukan intensifikasi respirasi. Dalam konteks perkebunan nanas tropis, inokulan mikroba berpotensi meningkatkan produktivitas tanaman dan efisiensi siklus karbon tanah tanpa memperbesar *public bad* berupa emisi karbon.

2.4 Improvement Soil Biota Stimulated by Soil Properties

Soil biota mencakup mikroorganisme (bakteri, archaea, dan fungi), mesofauna (misalnya collembola dan enchytraeids), serta makrofauna (seperti cacing tanah dan arthropoda besar) yang berperan sebagai penggerak utama proses dekomposisi bahan organik, mineralisasi hara, dan pelepasan CO₂ melalui respirasi tanah. Interaksi antar komponen biotik ini membentuk jaring makanan tanah yang mengatur transformasi karbon dan nutrisi dalam ekosistem darat. Namun demikian, komposisi, aktivitas, dan efisiensi komunitas biota tanah sangat dikendalikan oleh kondisi abiotik mikro-lokal, terutama pH tanah, kelembapan, suhu, serta ketersediaan karbon, yang secara langsung memengaruhi distribusi dan aktivitas mikroba maupun fauna tanah (Zhang, *et al.*, 2024). Studi terbaru

menunjukkan bahwa respirasi tanah sangat sensitif terhadap variasi suhu dan kadar air, dengan respons yang berbeda antara respirasi mikroba (heterotrofik) dan respirasi akar, sehingga faktor lingkungan menjadi pengendali utama dinamika emisi karbon tanah (Kim, *et al.*, 2025). Selain itu, perubahan sifat tanah seperti degradasi atau perubahan pH dapat menggeser regulasi respirasi dari kontrol suhu menuju keterbatasan kelembapan dan faktor biokimia, yang pada akhirnya memengaruhi aktivitas biota tanah secara keseluruhan (Yang, *et al.*, 2026). Oleh karena itu, pemahaman hubungan kausal antara soil properties dan soil biota menjadi kunci dalam merancang intervensi pengelolaan (misalnya ameliorasi, pengolahan tanah, dan penggunaan inokulan) yang mampu menekan respirasi tanah tanpa mengorbankan fungsi produktivitas. Pendekatan ini sangat relevan dalam sistem perkebunan tropis seperti nanas, di mana dinamika karbon tanah lebih ditentukan oleh interaksi antara kondisi lingkungan dan aktivitas mikroba dibandingkan kontribusi langsung fauna tanah.

Mikroba mengurai substrat organik, melepaskan CO₂ melalui respirasi dan mengubah sebagian karbon menjadi biomassa mikroba dan metabolit yang bisa terikat dalam agregat dan pada mineral. Besarnya alokasi ini disebut CUE. Komunitas mikroba yang “efisien” (CUE tinggi) menyimpan lebih banyak karbon jangka pendek–menengah. Fauna tanah (cacing, arthropoda, mesofauna) mempercepat fragmentasi bahan organik, mengubah ketersediaan substrat dan struktur pori, serta memediasi interaksi mikroba–substrat (memperbesar kontak atau justru menimbulkan oksigenasi). Efek fauna bisa mempercepat mineralisasi (lebih CO₂) atau, bila kondisinya mendukung pembentukan agregat, membantu stabilisasi karbon.

2.4.1 *Effect of Soil pH on Soil Biota*

Soil pH merupakan salah satu faktor paling dominan dalam menentukan komposisi, keragaman, dan aktivitas komunitas mikroba tanah. Analisis global terhadap komunitas bakteri menunjukkan bahwa pH tanah menjelaskan variasi yang jauh lebih besar dalam komposisi bakteri dibandingkan faktor geografi atau iklim eksternal lainnya, karena setiap taksa bakteri memiliki preferensi pH yang

berbeda untuk pertumbuhan dan metabolisme. Bakteri tanah menunjukkan toleransi yang berbeda terhadap kondisi pH, sehingga perubahan pH tanah dapat menyebabkan pergeseran komposisi komunitas mikroba. Pada kondisi pH yang lebih tinggi, beberapa taksa bakteri yang toleran terhadap kondisi alkali cenderung meningkat kelimpahannya, sementara kelompok lain yang kurang toleran terhadap perubahan pH akan tertekan. Dengan demikian, perubahan pH berperan sebagai faktor seleksi lingkungan yang menentukan struktur komunitas bakteri tanah (Shen, *et al.*, 2019; Wongkiew, *et al.*, 2022).

pH tanah memengaruhi kelarutan nutrisi (P, Fe, Al), aktivitas enzim, dan gradien ion yang mempengaruhi membran sel mikroba. Secara fisiologis, banyak kelompok bakteri memiliki nisbah pH optimal yang berbeda dari fungi; umumnya bakteri lebih unggul di pH netral-sedang, sedangkan fungi mentolerir kisaran yang lebih asam. Oleh karena itu, perubahan pH memicu pergeseran komposisi komunitas (bakteri ↔ fungi) dan memodulasi jaringan interaksi trofik pada fauna tanah. Bukti empiris menunjukkan pH sebagai salah satu variabel lingkungan yang paling menjelaskan variasi struktur komunitas mikroba di berbagai ekosistem (Xiong, *et al.*, 2024). Perubahan pH yang menuju netral cenderung meningkatkan diversitas bakteri dan aktivitas enzim yang berkaitan dengan mineralisasi karbon dan nitrogen; sebaliknya, kondisi sangat asam atau sangat basa cenderung memfilter komunitas menjadi spesies yang lebih toleran tapi dengan potensi fungsional berbeda. Studi eksperimental terkini menunjukkan bahwa pengapuran atau pengoreksian pH pada tanah asam mengubah komposisi rhizosphere secara dramatis dan meningkatkan proses mineralisasi tertentu implikasinya: perubahan pH dapat meningkatkan atau menurunkan laju respirasi bergantung pada arah dan derajat perubahan pH serta kebiasaan biologis komunitas asal (Xiong, *et al.*, 2024).

Fauna tanah (mesofauna, cacing) juga dipengaruhi pH baik secara langsung (ketidaksukaan fisiologis) maupun tidak langsung (melalui perubahan makanan/mikrohabitat). Contoh: pH sangat rendah dapat menekan demografi cacing, yang kemudian mengubah fragmentasi bahan organik dan akses substrat

oleh mikroba. Penurunan fauna pemroses menyebabkan pergeseran jalur dekomposisi yang dapat mempercepat atau memperlambat respirasi tergantung pada mekanisme lokal. Bukti terbaru menunjukkan pola konteks-spesifik: beberapa taxa fauna toleran asam dapat menggantikan fungsi tetapi sering dengan efisiensi karbon yang berbeda.

pH tanah juga memainkan peran penting dalam komunitas fauna tanah, termasuk nematoda, enchytraeid, dan cacing tanah, yang merupakan bagian penting dari jaringan makanan tanah: Banyak fauna tanah menunjukkan preferensi pH tertentu (misalnya, banyak arthropoda dan mikrofauna lebih umum di pH >5, sementara beberapa invertebrata toleran asam dapat bertahan di pH yang lebih rendah). Variasi pH menciptakan gradient habitat yang kuat yang pada akhirnya mengubah distribusi komunitas fauna tanah. *earthworms* (cacing tanah) juga menunjukkan distribusi yang dipengaruhi oleh pH tanah, di mana banyak spesies lebih melimpah di tanah dengan pH netral sampai sedikit asam, dan cenderung menurun atau masuk fase diapause pada pH terlalu rendah. Interaksi antara pH dan fauna tanah sering kompleks karena fauna besar (misalnya cacing tanah) juga dapat mengubah struktur mikroba melalui kegiatan pakan dan bioturbasi mereka, sehingga memengaruhi komunitas mikroba secara tidak langsung.

2.4.2 *Effect of Soil Water Content on Soil Biota*

Kadar air tanah mengontrol transport substrat (dissolved organic carbon, DOC), difusi gas (O_2 / CO_2), dan konektivitas mikrohabitat. Pada tingkat kelembapan yang rendah, difusi O_2 meningkat tetapi aktivitas biokimia menurun karena keterbatasan substrat terlarut dan stres osmotik. Pada tingkat kelembapan sangat tinggi (tergenang), kondisi anaerob muncul, merombak jalur respirasi (fermentasi, denitrifikasi) dan mengubah komunitas mikroba. Oleh karena itu, variasi kelembapan menyebabkan pergeseran fungsi mikroba yang berdampak langsung pada laju respirasi dan jenis gas yang dilepas (CO_2 vs CH_4 vs N_2O) (Milici, *et al.*, 2025). Studi mutakhir menunjukkan bahwa kadar air tanah sering kali menjadi pengendali utama aktivitas biologis jangka pendek, bahkan lebih responsif dibandingkan suhu, terutama pada sistem pertanian dan perkebunan tropis yang

mengalami fluktuasi kelembapan tinggi. Pengaruh ini umumnya mencapai tingkat optimum yang ditandai oleh peningkatan respirasi mikroba, aktivitas enzimatik, dan efisiensi penggunaan karbon (*carbon use efficiency, CUE*). Kondisi ini memungkinkan dekomposisi bahan organik berlangsung efektif tanpa menyebabkan kehilangan karbon yang berlebihan sebagai CO₂. Pada kondisi tersebut, dekomposisi bahan organik dapat berlangsung secara efektif tanpa menyebabkan kehilangan karbon yang berlebihan dalam bentuk CO₂. Penelitian berbasis gradien kelembapan menunjukkan bahwa biomassa karbon mikroba dan CUE meningkat seiring bertambahnya kadar air hingga mencapai titik optimum, sebelum akhirnya menurun akibat keterbatasan difusi oksigen pada kondisi tanah yang terlalu jenuh air (Domeignoz-Horta, *et al.*, 2021). Sebaliknya, pada kondisi kekeringan, penurunan kadar air tanah membatasi difusi substrat dan nutrisi, meningkatkan stres osmotik, serta mendorong banyak mikroorganisme memasuki fase dormansi. Dampaknya adalah penurunan respirasi tanah dan perlambatan mineralisasi bahan organik. Namun, fase kering yang diikuti oleh pembasahan ulang (*rewetting*) sering memicu lonjakan respirasi tanah yang dikenal sebagai *Birch effect*, akibat lisis sel mikroba dan pelepasan karbon mudah terdekomposisi. Fenomena ini memiliki implikasi penting terhadap dinamika karbon tanah di wilayah dengan pola hujan musiman atau sistem irigasi tidak stabil (Borken & Matzner, 2022).

Pada kondisi tanah jenuh air atau *waterlogging*, keterbatasan difusi oksigen menyebabkan pergeseran komunitas mikroba dari dominasi aerob ke anaerob, seperti denitrifier dan metanogen. Pergeseran jalur metabolisme ini umumnya menurunkan respirasi CO₂ aerobik, tetapi dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca lain seperti N₂O dan CH₄. Kadar air tanah merupakan salah satu faktor lingkungan utama yang mengontrol respirasi tanah serta komposisi gas yang dilepaskan dari tanah ke atmosfer. Perubahan kelembapan tanah tidak hanya mempengaruhi laju respirasi tanah tetapi juga menentukan proporsi gas yang dihasilkan melalui proses mikroba, sehingga berperan penting dalam mengatur keseimbangan emisi karbon dan nitrogen dari tanah (Davidson & Janssens, 2006; Schimel, *et al.*, 2007).

Pengaruh kadar air tanah juga meluas hingga komunitas fauna tanah. Mesofauna seperti Collembola dan Acari sangat sensitif terhadap kondisi kekeringan karena keterbatasan mekanisme pengendalian kehilangan air tubuh, sedangkan makrofauna seperti cacing tanah memerlukan tingkat kelembapan minimum untuk mempertahankan aktivitas makan, pergerakan, dan reproduksi. Variasi kelembapan tanah dapat mengubah distribusi dan aktivitas fauna tanah, yang selanjutnya memengaruhi struktur pori dan stabilitas agregat melalui proses bioturbasi. Perubahan ini secara tidak langsung membentuk habitat mikroba dan memodulasi aktivitas biologis tanah secara keseluruhan, termasuk proses dekomposisi dan respirasi tanah (Lavelle, *et al.*, 2006; Brussaard, *et al.*, 2007; Bardgett & van der Putten, 2014).

Kelembapan juga menentukan aktivitas fauna tanah: banyak mesofauna dan cacing tanah lebih aktif pada kelembapan menengah hingga tinggi; namun, jika saturasi berlangsung lama, fauna aerobik menurun. Aktivitas fauna mempengaruhi fragmentasi dan pencampuran bahan organik, sehingga memodulasi akses mikroba ke substrat. Dengan kata lain, kelembapan bekerja pada dua level: langsung pada metabolisme mikroba dan tidak langsung melalui pengaruh pada fauna yang memediasi struktur fisik substrat.

Perkebunan nanas di daerah tropis dengan pola hujan/kemarau memerlukan pengelolaan kelembapan (mulsa, penutup tanah, perbaikan kapilaritas) untuk meratakan siklus basah–kering. Mengurangi amplitudo rewetting pulses (mis. dengan mulch atau input organik yang meningkatkan kapasitas menahan air) dapat menekan puncak respirasi musiman.

2.4.3 Effect of Soil Temperatur on Soil Biota

Suhu tanah mengatur laju enzimatik, pertumbuhan mikroba, dan rentang toleransi fisiologis. Umumnya, laju respirasi meningkat eksponensial dengan kenaikan suhu hingga mencapai titik optimum, setelah itu aktivitas menurun atau komunitas bergeser karena stres termal. Sensitivitas ini dapat diwakili oleh parameter Q10 (faktor kenaikan laju respirasi per 10°C) tetapi Q10 bukanlah konstan dan dipengaruhi oleh ketersediaan substrat, adaptasi komunitas, dan interaksi dengan

kelembapan. Bukti menunjukkan bahwa sensitivitas respirasi tanah terhadap suhu cenderung menurun pada kondisi tanah yang lebih hangat, yang mengindikasikan adanya proses aklimatisasi mikroba atau keterbatasan substrat karbon, khususnya pada ekosistem tropis (Carey et al., 2016; Bradford et al., 2008; Davidson & Janssens, 2006).

Kenaikan suhu sering mendorong komunitas mikroba menuju spesies yang lebih cepat berputar (*fast-cycling*), meningkatkan respirasi per unit biomassa tetapi tidak selalu menambah sink karbon jika CUE turun. Sebaliknya, pemanasan kronis dapat mengubah rasio bakteri:fungi dan menurunkan stabilitas keanekaragaman, yang berimplikasi pada penurunan kapasitas penyimpanan jangka panjang. Eksperimen pemanasan lapangan (*warming experiments*) menunjukkan bahwa respons awal umumnya berupa peningkatan respirasi tanah akibat percepatan aktivitas mikroba, yang kemudian diikuti oleh proses aklimatisasi mikroba atau penurunan ketersediaan substrat karbon, sehingga laju peningkatan respirasi menjadi teredam dalam jangka menengah hingga panjang (Bradford et al., 2008; Melillo et al., 2017; Carey et al., 2016). Suhu tidak bekerja sendiri: pada tanah tropis hangat, keterbatasan substrat dan kelembapan seringkali menjadi pembatas yang menambah kompleksitas respons. Misalnya, pemanasan pada tanah kering mungkin tidak meningkatkan respirasi karena keterbatasan air; sebaliknya, pada tanah lembap pemanasan dapat memicu peningkatan respirasi besar. Oleh karena itu, pendekatan pemodelan kausal perlu menempatkan suhu dalam interaksi erat dengan kelembapan dan pH tanah untuk memprediksi perubahan komunitas biota tanah serta dinamika respirasi secara lebih akurat, mengingat ketiga faktor ini secara bersama-sama mengendalikan aktivitas mikroba, ketersediaan substrat, dan sensitivitas respirasi terhadap perubahan lingkungan (Davidson & Janssens, 2006; Schimel & Schaeffer, 2012; Wang et al., 2023). Suhu adalah pemacu kuat laju respirasi tetapi efek bersihnya bergantung pada interaksi dengan kelembapan dan substrat. Di daerah tropis, strategi pengurangan fluktuasi suhu mikro (mulsa, biochar) efektif untuk mengurangi emisi jangka pendek dan menstabilkan komunitas biota yang efisien.

2.5 Soil Biota as Major Determinan in Soil Respiration

Soil biota — yang mencakup mikroorganisme (bakteri, archaea, fungi), mesofauna (misalnya *collembola* dan *achari*), serta makrofauna tanah (seperti cacing tanah dan arthropoda besar) memainkan peran sentral dalam proses respirasi tanah (*soil respiration*), yaitu pelepasan CO₂ ke atmosfer yang berasal dari respirasi organisme hidup di dalam tanah dan degradasi bahan organik. Respirasi tanah merupakan komponen terbesar dari *fluks* karbon ekosistem darat dan dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara komposisi komunitas biota tanah, ketersediaan substrat organik, dan kondisi lingkungan abiotik. Dalam dekade terakhir, berbagai studi dalam ekologi mikroba dan tanah menunjukkan bahwa biota tanah tidak hanya merespons perubahan sifat fisik dan kimia tanah, tetapi juga dapat menjadi pengendali utama tingkat serta pola respirasi tanah melalui berbagai mekanisme biologis langsung maupun tidak langsung. Interaksi trofik dalam jaringan makanan tanah serta perubahan komposisi komunitas mikroorganisme diketahui mampu memodulasi aktivitas dekomposisi dan aliran karbon dalam tanah, sehingga memengaruhi dinamika respirasi tanah (Thakur, *et al.*, 2020; Tamang, *et al.*, 2024).

Mikroorganisme tanah, terutama bakteri dan fungi, merupakan kontributor terbesar dalam respirasi heterotrofik, yaitu respirasi yang berasal dari degradasi bahan organik yang sudah ada di tanah. Bakteri cenderung memiliki tingkat pertumbuhan dan respirasi yang cepat terhadap substrat yang mudah terdekomposisi, sedangkan fungi sering mendominasi degradasi bahan organik kompleks seperti lignin dan selulosa karena kemampuan enzimatisnya yang luas. Perbedaan strategi enzimatis tersebut menciptakan pembagian peran fungsional yang secara kolektif menentukan laju respirasi tanah: dominasi bakteri sering dikaitkan dengan respons cepat terhadap input organik baru, sedangkan dominasi fungi sering terkait dengan respirasi yang lebih stabil dan berkelanjutan terhadap bahan organik yang lebih resisten (Six *et al.*, 2006; Strickland & Rousk, 2010; Chen, *et al.*, 2019).

Selain itu, penelitian terbaru menunjukkan bahwa struktur komunitas mikroba juga memengaruhi efisiensi penggunaan karbon (*carbon use efficiency, CUE*) dan pembentukan biomassa mikroba, yang secara langsung berdampak pada jumlah

karbon yang dilepaskan sebagai CO₂ versus yang disimpan dalam bentuk biomassa. Komunitas mikroba dengan nilai *carbon use efficiency* (CUE) yang tinggi cenderung mengalokasikan proporsi karbon yang lebih besar ke dalam pembentukan biomassa mikroba, sehingga menghasilkan respirasi tanah yang relatif lebih rendah. Sebaliknya, komunitas dengan CUE yang rendah akan melepaskan proporsi karbon yang lebih besar sebagai CO₂ melalui respirasi mikroba (Manzoni, *et al.*, 2012; Sinsabaugh, *et al.*, 2013).

Fauna tanah seperti collembola, nematoda, dan cacing tanah berperan sebagai *ecosystem engineers* yang memediasi respirasi tanah melalui beberapa mekanisme. Pertama, aktivitas pakan dan pergerakan fauna tanah mempercepat fragmentasi dan pemrosesan bahan organik sehingga meningkatkan area permukaan substrat yang tersedia bagi mikroba, yang kemudian meningkatkan aktivitas mikroba dan respirasi CO₂. Kedua, Bioturbasi oleh fauna tanah berukuran besar seperti cacing tanah berperan penting dalam pembentukan struktur tanah melalui pembentukan pori dan saluran tanah. Struktur tersebut meningkatkan aerasi tanah dan difusi gas di dalam profil tanah, sehingga memperbaiki ketersediaan oksigen bagi mikroorganisme aerobik dan mendukung peningkatan aktivitas respirasi mikroba (Lavelle, *et al.*, 1997; Blouin, *et al.*, 2013; Scheu, 2003).

Interaksi antara fauna tanah dan mikroba sering bersifat simbiosis fungsional. Misalnya, Nematoda pemakan bakteri dapat memodulasi komposisi komunitas bakteri melalui aktivitas grazing yang menurunkan dominasi beberapa taksa bakteri dan mendorong regenerasi komunitas mikroba dengan karakteristik fungsional yang berbeda. Perubahan struktur komunitas tersebut dapat meningkatkan proporsi bakteri yang lebih efisien dalam memanfaatkan substrat organik. Interaksi trofik antara nematoda dan mikroorganisme ini diketahui berperan penting dalam mengatur dinamika karbon tanah serta memengaruhi pola respirasi tanah melalui mekanisme pengendalian top-down dalam jaringan makanan tanah (Shi, *et al.*, 2023; Tamang, *et al.*, 2024).

Ada beberapa mekanisme kausal utama yang menjelaskan bagaimana soil biota menjadi penentu utama respirasi tanah: Respirasi tanah sangat bergantung pada

ketersediaan substrat organik terlarut yang tersedia bagi mikroba. Fauna tanah meningkatkan aksesibilitas substrat dengan menghancurkan agregat tanah dan memfasilitasi pelepasan senyawa organik larut, sehingga mikroba dapat dengan cepat memetabolisme substrat tersebut dan menghasilkan CO₂. Komposisi komunitas biota tanah dipengaruhi oleh faktor abiotik seperti pH, kelembapan, dan suhu memengaruhi laju respirasi karena berbagai taksa memiliki preferensi fisiologis dan strategi penggunaan karbon berbeda. Misalnya, komunitas yang didominasi oleh bakteri copiotrofik (yang cepat tumbuh pada substrat kaya nutrisi) cenderung menghasilkan laju respirasi yang lebih tinggi dibanding komunitas oligotrofik yang tumbuh lambat pada substrat yang lebih miskin nutrisi (Fierer, *et al.*, 2022; Xu, *et al.*, 2024).

Respirasi tanah tidak berdiri sendiri; respirasi juga merupakan *indikator* bagaimana bahan organik tanah mengalami degradasi dan transformasi. Komunitas mikroba yang efisien dalam degradasi bahan organik kompleks akan mempercepat laju respirasi, tetapi juga dapat meningkatkan pembentukan humus yang lebih stabil tergantung pada jalur metabolik yang dipilih. Dengan demikian, Respirasi tanah merupakan proses biogeokimia yang muncul dari interaksi dinamis antara aktivitas mikroorganisme dalam mendekomposisi bahan organik, transformasi bahan organik tanah, pembentukan humus, serta kondisi fisik tanah yang memengaruhi ketersediaan substrat dan aktivitas mikroba. Melalui proses metabolisme tersebut, karbon dari bahan organik dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber energi dan sebagian dilepaskan kembali ke atmosfer dalam bentuk CO₂ (Qu, *et al.*, 2023)

Perubahan iklim dan praktik manajemen tanah seperti pengolahan tanah, penggunaan pupuk, dan irigasi juga memengaruhi respirasi tanah melalui perubahan komunitas biota. Misalnya, pengolahan tanah yang sering dapat mengurangi komunitas fungi yang dominan dalam degradasi bahan organik kompleks, sehingga pada beberapa kasus menurunkan respirasi jangka panjang tetapi meningkatkan variabilitasnya. Demikian pula, perubahan pola curah hujan akibat perubahan iklim dapat meningkatkan frekuensi siklus kering-basah pada tanah. Siklus tersebut sering memicu lonjakan respirasi tanah (*respiration pulses*)

ketika tanah yang kering kembali dibasahi, suatu fenomena yang dikenal sebagai *Birch effect*. Lonjakan respirasi ini terjadi karena stres kekeringan diikuti oleh reaktivasi komunitas mikroba serta peningkatan ketersediaan substrat karbon yang mudah dimineralisasi setelah proses pembasahan kembali (Barnard, *et al.*, 2020; Singh, *et al.*, 2023)

Secara keseluruhan, bukti empiris mutakhir dari studi mikrobiologi tanah dan ekologi tanah menunjukkan bahwa soil biota bukan hanya agen pasif yang dipengaruhi oleh sifat tanah, tetapi berperan sebagai penentu utama tingkat respirasi tanah melalui kontribusi langsung mikroba terhadap respirasi heterotrofik, modifikasi struktural dari fauna tanah, serta interaksi yang memediasi ketersediaan substrat organik dan efisiensi penggunaan karbon. Oleh karena itu, memahami struktur dan fungsi komunitas biota tanah merupakan kunci untuk memprediksi respirasi tanah dan siklus karbon di berbagai ekosistem darat, termasuk dalam konteks perubahan iklim dan perubahan penggunaan lahan.

2.6 Kontribusi Soil Respiration from Agriculture Sector on Green House Gas (GHG) Accumulation

Sektor pertanian merupakan salah satu kontributor utama emisi gas rumah kaca (*greenhouse gases* – GRK) di tingkat global, menyumbang sekitar 10–14 % dari total emisi antropogenik GHG, terutama dalam bentuk karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan *nitrous oxide* (N₂O) yang berasal dari berbagai proses biologis tanah dan praktik agronomis yang intensif. CO₂ yang dilepaskan melalui respirasi tanah (*soil respiration*)—kombinasi respirasi mikroba heterotrofik, respirasi akar tanaman, dan proses dekomposisi bahan organik—merupakan salah satu komponen penting dari total emisi pertanian, karena tanah pertanian sering mengalami peningkatan dekomposisi bahan organik akibat pengolahan lahan, penggunaan pupuk nitrogen, dan perubahan vegetasi yang memengaruhi laju respirasi dan pelepasan karbon ke atmosfer (De Silva, *et al.*, 2026). GHG yang dilepaskan dari tanah pertanian mencerminkan kontribusi kompleks dari berbagai jalur biogeokimia. Misalnya, respirasi heterotrofik tanah mempercepat pelepasan CO₂ ketika mikroorganisme memecah sisa tanaman dan bahan organik tanah, yang sering meningkat pada tanah yang sering dibajak atau diberi pupuk berat.

Sementara itu, tanah sawah yang tergenang dapat menjadi sumber utama CH_4 karena kondisi anaerobik yang mendukung aktivitas metanogenik, dan aplikasi pupuk nitrogen memperbesar emisi N_2O melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi bakteri soil.

Studi eksperimental menunjukkan bahwa modifikasi praktik pengelolaan, seperti penggunaan mulsa dan pengaturan rezim irigasi, dapat secara signifikan memengaruhi fluks CO_2 dan N_2O dari tanah pertanian, yang mencerminkan bagaimana praktik agrikultur memodulasi kontribusi tanah terhadap emisi gas rumah kaca (GRK) (Butterbach-Bahl, *et al.*, 2013; Oertel, *et al.*, 2016). Analisis global menunjukkan bahwa emisi CO_2 dari respirasi tanah tidak hanya dikendalikan oleh aktivitas mikroba yang dipengaruhi suhu dan kelembapan, tetapi juga oleh sifat fisik tanah, terutama struktur dan stabilitas agregat yang mengatur difusi oksigen serta perlindungan karbon organik (Bond-Lamberty, *et al.*, 2018; Lavalley, *et al.*, 2020). Stabilitas agregat tanah sangat dipengaruhi oleh kandungan bahan organik dan praktik pengelolaan, di mana sistem tanpa olah tanah (*no-tillage*) dan peningkatan input bahan organik meningkatkan agregasi dan perlindungan karbon, sehingga dapat menekan laju dekomposisi serta fluks CO_2 dan N_2O dibandingkan sistem olah tanah intensif (Six, *et al.*, 2004). Temuan ini menegaskan bahwa tanah pertanian bukan hanya sumber emisi, tetapi merupakan sistem biogeokimia dinamis yang sangat responsif terhadap perubahan praktik pengelolaan, sehingga memiliki peran strategis dalam mitigasi perubahan iklim berbasis pengelolaan tanah.

Selain itu, pengembangan teknik pengukuran GRK yang lebih akurat di lahan pertanian menguatkan pemahaman tentang kontribusi respirasi tanah terhadap akumulasi GRK. Metode otomatisasi dalam pengukuran fluks gas menunjukkan bahwa emisi CO_2 dan N_2O dari tanah pertanian sering kali terlalu diremehkan jika hanya diukur dengan metode konvensional, menunjukkan bahwa kontribusi nyata dari soil respiration terhadap GRK global mungkin jauh lebih tinggi dari estimasi sebelumnya. Hal ini penting karena seringkali respon temporal (misalnya setelah pemupukan atau pascapanen) menciptakan pulsa emisi yang intens selama

periode pendek namun signifikan secara kumulatif terhadap akumulasi GRK tahunan (Franco-Luesma, *et al.*, 2025).

Secara keseluruhan, sementara sektor pertanian tetap vital untuk ketahanan pangan global, respirasi tanah sebagai bagian integral dari siklus karbon tanah memberikan kontribusi signifikan terhadap akumulasi gas rumah kaca, terutama CO₂ yang dilepaskan melalui dekomposisi bahan organik yang dipercepat oleh aktivitas agrikultur dan interaksi mikroba-tanaman. Dalam konteks mitigasi perubahan iklim, pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana respirasi tanah berkontribusi terhadap emisi GRK memberikan dasar ilmiah bagi strategi pengelolaan tanah yang lebih berkelanjutan—seperti pengurangan intensitas olah tanah, penggunaan pupuk yang lebih tepat, peningkatan bahan organik tanah, dan penerapan praktik agronomi yang mempertahankan karbon dalam tanah yang dapat menurunkan jejak karbon dari sistem pertanian secara keseluruhan (De Silva, *et al.*, 2026)

2.7 Contribution of Soil Respiration on Carbon Accounting in Agricultural Sector

Kontribusi respirasi tanah terhadap perhitungan karbon (*carbon accounting*) di sektor pertanian merupakan aspek penting dalam memahami neraca karbon pertanian dan dampaknya terhadap akumulasi gas rumah kaca di atmosfer. Respirasi tanah mencerminkan fluks CO₂ yang dilepaskan dari konversi bahan organik tanah melalui aktivitas mikroba heterotrofik, respirasi akar, dan fauna tanah, sehingga menjadi salah satu komponen terbesar dalam siklus karbon ekosistem pertanian. Emisi CO₂ dari respirasi tanah tidak hanya mencerminkan pelepasan karbon dari dekomposisi, tetapi juga berperan dalam perhitungan neraca karbon bersih (*net carbon budget*) di lahan pertanian karena fluks ini harus diperhitungkan dalam evaluasi apakah suatu penggunaan lahan bertindak sebagai *sumber* atau *sink* karbon. Dalam kerangka audit karbon dan kebijakan mitigasi perubahan iklim, ketidakakuratan dalam estimasi respirasi tanah dapat menyebabkan kesalahan signifikan dalam inventarisasi GRK di bawah mekanisme internasional seperti UNFCCC dan perjanjian iklim lainnya, terutama ketika

agrikultur mulai memasuki pasar karbon dan skema kompensasi emisi (Francioni, *et al.*, 2025).

Secara kuantitatif, soil respiration merupakan komponen penting dalam neraca karbon karena memengaruhi cadangan karbon organik tanah (*soil organic carbon*) yang merupakan salah satu reservoir karbon terbesar di daratan dunia, menyimpan jauh lebih banyak karbon dibandingkan atmosfer dan vegetasi. Perubahan manajemen tanah seperti pengolahan tanah, rotasi tanaman, pengaplikasian pupuk, dan penggunaan amandemen organik berdampak langsung pada laju respirasi dan, oleh karena itu, berdampak pada kehilangan atau penyimpanan karbon di tanah. Dalam banyak sistem pertanian konvensional yang intensif, peningkatan laju respirasi heterotrofik cenderung mengurangi stok karbon organik tanah, yang pada gilirannya melepaskan lebih banyak CO₂ ke atmosfer dan memperbesar jejak karbon sektor pertanian secara keseluruhan. Studi-studi terbaru menegaskan bahwa respirasi tanah harus dimasukkan secara eksplisit dalam perhitungan neraca karbon karena *fluks* CO₂ dari tanah mencerminkan interaksi antara kondisi tanah, komunitas biota tanah, dan praktik manajemen yang dapat memodulasi akumulasi vs. pelepasan karbon, terutama di musim tanam dan masa fallow (Francioni, *et al.*, 2025).

Selain itu, integrasi fluks respirasi tanah dalam mekanisme *carbon accounting* menjadi semakin penting ketika pertanian dipandang tidak hanya sebagai sumber emisi GRK tetapi juga sebagai potensial serapan karbon melalui praktik seperti pertanian konservasi, no-tillage, penggunaan mulsa, rotasi tanaman, dan amandemen biochar. Penerapan pendekatan ini dapat menurunkan respirasi heterotrofik relatif terhadap input karbon tanaman, meningkatkan stabilisasi SOC, dan meningkatkan kemampuan tanah untuk menyimpan karbon dalam jangka panjang. Dengan demikian, respirasi tanah bukan sekadar komponen emisi, tetapi juga bagian dari strategi pengelolaan karbon yang dapat memperbaiki keseimbangan karbon melalui peningkatan penyimpanan karbon total di tanah. Pendekatan modern terhadap *carbon accounting* agrikultur juga menggabungkan data dari sensor lapangan dan model dinamik seperti *carbon budget models*, yang memungkinkan estimasi yang lebih akurat terhadap perubahan stok karbon tanah

akibat respirasi tanah serta input dan keluaran karbon yang lain (Ghimirey, *et al.*, 2025).

Pemahaman yang mendalam tentang kontribusi respirasi tanah pada neraca karbon pertanian tidak hanya relevan untuk penilaian inventarisasi GRK nasional dan internasional, tetapi juga penting ketika pertanian berupaya memasuki skema carbon credits dan carbon markets. Akurasi dalam pengukuran dan pemodelan respirasi tanah memungkinkan penetapan baseline karbon tanah yang valid serta penilaian peningkatan penyerapan karbon sebagai *offset* yang diakui secara kredibel. Oleh karena itu, dalam konteks mitigasi perubahan iklim, pertanian harus memadukan monitoring respirasi tanah yang sistematis sebagai bagian dari perhitungan karbon untuk meningkatkan kredibilitas laporan emisi dan strategi mitigasi sektor ini, serta untuk memanfaatkan potensi pertanian sebagai bagian dari solusi perubahan iklim (Basheer, *et al.*, 2024)

2.8. Perkebunan Nanas sebagai Sistem Pertanian Tropis dan Implikasinya terhadap Dinamika Karbon Tanah

Perkebunan nanas (*Ananas comosus*) merupakan salah satu sistem pertanian tropis yang berkembang luas di wilayah Asia Tenggara, Amerika Latin, dan Afrika, dengan karakteristik pengelolaan lahan yang intensif dan berbasis monokultur. Dalam konteks agroekosistem tropis, sistem budidaya nanas umumnya melibatkan pengolahan tanah berulang, penggunaan input organik dan anorganik dalam jumlah besar, serta minimnya diversifikasi tanaman penutup tanah. Karakteristik tersebut menjadikan perkebunan nanas sebagai sistem yang memiliki implikasi signifikan terhadap dinamika sifat fisik, kimia, dan biologis tanah (Guo, *et al.*, 2021; Lal, 2020).

Secara fisiologis, nanas tergolong tanaman dengan mekanisme fotosintesis CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*), yang memungkinkan efisiensi penggunaan air lebih tinggi dibandingkan tanaman C_3 dan C_4 . Meskipun mekanisme ini memberikan keuntungan adaptif bagi tanaman pada kondisi tropis, berbagai studi menunjukkan bahwa keunggulan fisiologis tanaman nanas tidak selalu berbanding lurus dengan keberlanjutan fungsi tanah pada sistem budidayanya. Sistem

monokultur yang berlangsung dalam jangka panjang dapat menyebabkan penurunan kualitas tanah apabila tidak diimbangi dengan pengelolaan bahan organik yang memadai. Pada sistem pertanian intensif, termasuk sistem monokultur hortikultura, penurunan kandungan bahan organik tanah dan perubahan struktur komunitas mikroorganisme tanah sering dilaporkan terjadi akibat rendahnya input residu tanaman dan tingginya gangguan tanah (Lal, 2018).

Dalam konteks siklus karbon, perkebunan nanas sering dikategorikan sebagai sistem pertanian dengan fluks karbon dioksida tanah yang relatif tinggi. Kondisi iklim tropis yang hangat dan lembap, dikombinasikan dengan input residu organik yang mudah terdekomposisi serta gangguan fisik tanah, menciptakan lingkungan yang kondusif bagi aktivitas mikroba tanah dan respirasi heterotrofik. Bond-Lamberty dan Thomson (2010) menunjukkan bahwa pada agroekosistem tropis intensif, respirasi tanah dapat menjadi komponen dominan dalam neraca karbon, bahkan lebih sensitif terhadap perubahan pengelolaan dibandingkan perubahan stok karbon jangka panjang.

Berbagai studi empiris pada sistem hortikultura tropis menunjukkan bahwa respirasi tanah sangat dipengaruhi oleh dinamika biomassa mikroba dan kondisi lingkungan mikro, seperti suhu, kadar air, dan pH tanah. Chen, *et al.* (2019) melaporkan bahwa intensifikasi pertanian hortikultura di wilayah tropis secara signifikan meningkatkan aktivitas mikroba tanah dan fluks CO₂, terutama ketika pengelolaan tanah meningkatkan ketersediaan substrat karbon tanpa disertai pengendalian lingkungan mikro. Temuan serupa dilaporkan oleh Schimel & Schaeffer, (2012); Bond-Lamberty *et al.*, (2018), yang menunjukkan bahwa variasi respirasi tanah pada sistem pertanian intensif lebih banyak dijelaskan oleh respons mikroba tanah dibandingkan oleh jenis praktik pengelolaan semata.

Penggunaan amelioran organik, seperti kompos, biochar, dan vermikompos, merupakan praktik umum dalam perkebunan nanas untuk meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman. Namun, literatur mutakhir menegaskan bahwa efektivitas amelioran organik dalam konteks mitigasi karbon sangat bergantung pada bagaimana input tersebut memengaruhi efisiensi penggunaan karbon oleh mikroorganisme tanah. Manzoni, *et al.* (2017)

menjelaskan bahwa penambahan bahan organik yang meningkatkan ketersediaan karbon tanpa memperbaiki efisiensi metabolisme mikroba dapat meningkatkan respirasi tanah dan mempercepat pelepasan karbon sebagai CO₂. Oleh karena itu, peningkatan input bahan organik pada perkebunan nanas tidak secara otomatis berimplikasi pada penurunan emisi karbon tanah.

Dari perspektif biologi tanah, sistem perkebunan nanas juga dicirikan oleh struktur komunitas biota tanah yang relatif sederhana. Sistem monokultur dan intensifikasi pengelolaan cenderung menguntungkan mikroorganisme dengan laju pertumbuhan dan metabolisme tinggi, sementara peran fauna tanah seperti mesofauna dan cacing tanah sering kali bersifat terbatas dan sangat kontekstual. Pada sistem pertanian tropis intensif, kontribusi fauna tanah terhadap respirasi tanah umumnya bersifat tidak dominan karena aktivitas respirasi lebih banyak dikendalikan oleh komunitas mikroba tanah. Dalam kondisi ini, peran fauna tanah cenderung tersamarkan oleh tingginya aktivitas dekomposer mikroba yang secara langsung memineralisasi karbon organik, sehingga kontribusinya terhadap emisi karbon lebih bersifat tidak langsung melalui interaksi trofik dan modifikasi lingkungan mikro (Schimel & Schaeffer, 2012; Kuzyakov, 2010).

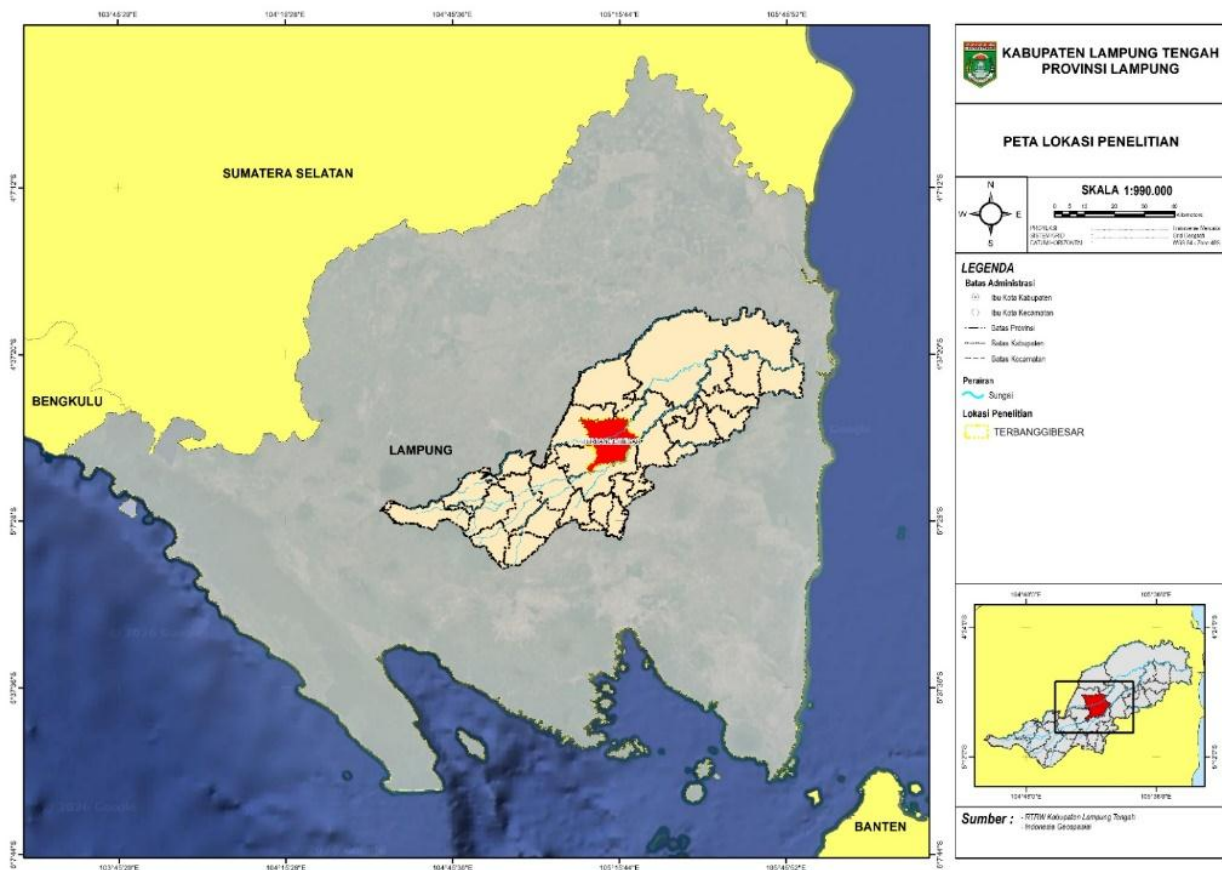
Dalam konteks mitigasi perubahan iklim dan akuntansi karbon, karakteristik perkebunan nanas menjadikannya sistem yang relevan untuk kajian berbasis proses. IPCC (2021) menegaskan bahwa ketidakpastian terbesar dalam inventarisasi emisi sektor pertanian berasal dari dinamika karbon tanah yang sangat dipengaruhi oleh proses biologis dan lingkungan mikro. Smith, *et al.* (2020) juga menekankan bahwa pendekatan berbasis proses lebih representatif untuk sistem pertanian tropis dibandingkan pendekatan berbasis stok karbon semata. Oleh karena itu, perkebunan nanas dapat dipandang sebagai model agroekosistem tropis yang penting dalam pengembangan kerangka MRV karbon berbasis proses. perkebunan nanas merupakan sistem pertanian tropis yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan pengelolaan tanah dan kondisi lingkungan mikro. Literatur secara konsisten menunjukkan bahwa dinamika karbon tanah pada sistem ini lebih banyak dikendalikan oleh proses biologis tanah, khususnya aktivitas mikroba dan respirasi tanah, dibandingkan oleh

perubahan stok karbon jangka panjang. Sintesis ini memberikan landasan teoretis yang kuat bagi penelitian disertasi ini untuk memfokuskan analisis pada hubungan antara pengelolaan tanah, biota tanah, dan respirasi tanah dalam konteks mitigasi karbon dan perdagangan karbon sektor pertanian.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Waktu penelitian dilaksanakan dari bulan Februari 2024 hingga Juni 2024, dari mulai pengambilan sampel tanah pada hingga analisis di Laboratorium. Tempat penelitian yaitu di Perkebunan Nanas PT *Great Giant Pineapple* dan Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Lokasi Penelitian dapat di lihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian
Sumber olah citra satelit (2026)

3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat-alat yang dipakai pada penelitian ini yaitu: cangkul, sekop, plastik bening, pipa paralon sebagai ring sampel tanah, desikator, toples, botol sampel, cawan petri, pipet tetes, buret, gelas beaker, Erlenmeyer, gelas ukur, botol plastik, aluminium foil, *Berlese Tullgren*, pH meter tanah, Thermometer tanah, label kertas, pensil, mistar, buku, spidol permanen, *Box*, *Ice box*, mikroskop, kaca objek, kaca penutup, kamera, drone, sedangkan bahan bahan yang digunakan adalah akuades, alkohol 70%, KOH, kloroform, HCl, sampel tanah, kompos, biochar, vermikompos, konsorsium mikroba LOB.

3.3. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan perlakuan berupa sistem olah tanah serta pemberian bahan pembenah tanah, yaitu kompos, biochar, vermikompos, dan konsorsium mikroba. Dengan rincian detailnya Rancangan petak terbagi (*split plot*) yang terdiri dari 8 perlakuan dengan dua faktor dan tiga kelompok.

Faktor perlakuan petak utama yaitu olah tanah yang terdiri dari

- L0= bajak tanah kedalaman 30 cm + cacah serasah nanas kasar
- L1= bajak tanah kedalaman 40 cm + cacah serasah nanas halus

Faktor perlakuan anak petak yaitu aplikasi kompos yang terdiri dari

P0= Kompos GGP 50 ha⁻¹ (98,25% kompos + 1,75% biochar)

P1= Kompos GGP 40 ha⁻¹ (98,25% kompos + 1,75% biochar) + biochar 10 t ha⁻¹

P2= Kompos premium GGP 50 t ha⁻¹ (96,75% kompos+ 1,75% biochar +1,5% vermikompos)

P3= P2= Kompos premium GGP 50 t ha⁻¹ (96,75% kompos+ 1,75% biochar +1,5% vermikompos) + konsorsium mikroba LOB dengan dosis 40 l ha⁻¹

Kompos yang digunakan adalah limbah kotoran sapi, limbah ampas kulit, dan bromelin Biochar yang digunakan adalah biochar bambu. Vermikompos yang digunakan adalah buah jambu biji busuk. Desain tata letak penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.

U3		U2		U1	
L1	L0	L1	L0	L1	L0
P0	P3	P3	P2	P1	P0
P1	P2	P0	P3	P2	P1
P2	P1	P2	P1	P3	P2
P3	P0	P1	P0	P0	P3

Gambar 5 Desain Letak Penelitian

3.4. Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dimulai dari persiapan lahan, penanaman, pemupukan daun, pemeriharaan dan pengambilan sampel tanah. Sampel tanah diambil untuk menganalisis C-mik, respirasi tanah, mesofauna, cacing tanah dan kadar air pada pagi sampai siang hari. Sampel, C-mik dan (respirasi tanah), sampel tanah yang sudah diambil dimasukkan ke dalam plastik bening dan kemudian disimpan dalam *cool box* yang sudah disiapkan dengan tujuan agar mikroorganisme di dalam tanah tersebut tidak mati, sedangkan mesofauna yang ada pada ring sampel dimasukkan ke dalam *box* yang suhunya relatif stabil. Setelah itu, tanah dibawa ke laboratorium untuk dianalisis atau tanah disimpan di dalam kulkas jika analisis tidak dilakukan secara langsung setelah pengambilan contoh tanah. Pada pengambilan sampel cacing dilakukan penggalian tanah, setelah diperoleh cacing tersebut dibersihkan dan ditimbang dengan menggunakan timbangan mini, kemudian dimasukkan ke dalam botol sampel yang telah diisi dengan alkohol 70%. Pengukuran sifat-sifat tanah berupa pH tanah dan suhu tanah diukur langsung di lapangan. Waktu pengambilan sampel tanah (75 HST), 120 HST, dan 150 HST (Hari Setelah Tanam).

3.5. Variabel Pengamatan

Variabel pengamatan pada penelitian ini terdiri dari biologi tanah, fisik tanah dan kimia tanah

3.5.1. *Soil Biota* :

a. C-organik mikroba (C-mik)

Karbon mikroba tanah dianalisis menggunakan metode fumigasi–inkubasi sebagaimana dikembangkan oleh Jenkinson dan Powlson (1976). Metode ini didasarkan pada prinsip bahwa fumigasi kloroform menyebabkan lisis sel mikroorganisme tanah, sehingga karbon dari biomassa mikroba dilepaskan dan kemudian dimineralisasi menjadi CO₂ selama proses inkubasi. Selisih CO₂ antara tanah yang difumigasi dan tidak difumigasi digunakan untuk mengestimasi karbon mikroba tanah.

Prosedur Analisis yaitu: Sebanyak ±25 g tanah segar (setara bobot kering) ditimbang dan dibagi menjadi dua perlakuan, yaitu sampel fumigasi dan sampel non-fumigasi (kontrol). Sampel fumigasi ditempatkan dalam desikator tertutup bersama kloroform bebas etanol selama 24 jam pada suhu kamar. Setelah proses fumigasi selesai, sisa kloroform dihilangkan dengan aerasi. Selanjutnya, baik sampel fumigasi maupun kontrol diinkubasi dalam wadah kedap udara pada suhu konstan 25 °C. Di dalam wadah inkubasi ditempatkan vial berisi larutan NaOH sebagai penangkap CO₂. Inkubasi dilakukan selama 10 hari. CO₂ yang dihasilkan selama inkubasi ditentukan secara titrimetri dengan HCl standar setelah penambahan BaCl₂ untuk mengendapkan karbonat.

Perhitungan karbon mikroba tanah dihitung menggunakan persamaan:

$$C_{mik} = \frac{(CO_{2-fumigasi} - CO_{2-kontrol})}{k_C}$$

(Jenkinson dan Powlson, 1976)

Keterangan:

CO₂-fumigasi = CO₂ -C dari tanah fumigasi (mg kg⁻¹),

CO₂-kontrol = CO₂ -C dari tanah non-fumigasi (mg kg⁻¹),

k_C = faktor konversi biomassa mikroba (0,45).

Hasil analisis dinyatakan sebagai mg C-mik kg⁻¹ tanah.

b. Respirasi tanah

Respirasi tanah ditentukan berdasarkan jumlah CO₂ yang dilepaskan oleh aktivitas mikroorganisme tanah selama inkubasi, yang mencerminkan intensitas dekomposisi bahan organik dan aktivitas biologis tanah (Jenkinson & Powlson, 1976).

Prosedur Analisis yaitu: Sebanyak ±50 g tanah segar (setara bobot kering) dimasukkan ke dalam wadah inkubasi tertutup. Kadar air tanah disesuaikan hingga mendekati 60% kapasitas lapang untuk menciptakan kondisi optimal bagi aktivitas mikroba. Larutan NaOH ditempatkan di dalam wadah sebagai penangkap CO₂. Inkubasi dilakukan pada suhu 25 °C selama periode pengamatan. Setelah inkubasi, larutan NaOH dititrasi menggunakan HCl standar untuk menentukan jumlah CO₂ yang dilepaskan.

$$\text{Respirasi Tanah} = \frac{(V_{\text{blanko}} - V_{\text{sampel}}) \times N \times 12}{W \times t}$$

(Jenkinson dan Powlson, 1976; Tan, 2005)

dengan:

V = volume titran (mL)

N = normalitas HCl

W = bobot tanah kering (g)

t = waktu inkubasi (hari)

Hasil dinyatakan sebagai mg CO₂ -C kg⁻¹ tanah hari⁻¹

c. Jumlah mesofauna tanah (ind/100 g tanah)

Mesofauna tanah dianalisis melalui tahapan pengambilan sampel, ekstraksi, dan identifikasi. Sampel tanah diambil menggunakan ring sampel sampel silinder dari pipa paralon yang berdiameter 6,5 cm dan tinggi 8 cm, kemudian segera diproses untuk meminimalkan perubahan aktivitas fauna tanah. Ekstraksi mesofauna dilakukan menggunakan aparatus Berlese–Tullgren dengan sumber panas berupa lampu pijar kuning 20-25 watt selama 2 hari atau 48 jam tanpa henti, lampu di gantung pada sebuah tempat yang sudah didesain agar berada tepat di atas tanah,

sehingga didapatkan suhu yang akan membuat mesofauna melakukan pergerakan aktif ke lapisan bawah alat ekstraksi, pada bagian bawah tersebut sudah disiapkan wadah yang berisi alkohol 70% untuk mendapatkan mesofauna yang jatuh ke bawah.

Mesofauna hasil ekstraksi diidentifikasi menggunakan mikroskop stereo berdasarkan pengamatan ciri morfologi eksternal seperti bentuk tubuh, segmentasi, jumlah kaki, dan keberadaan struktur khas. Proses identifikasi dilakukan melalui pemilahan bertahap ke dalam kelompok taksonomi utama dan dibatasi hingga tingkat ordo. Penentuan taksonomi mengacu pada deskripsi dan kunci identifikasi fauna tanah yang disajikan dalam literatur klasik, terutama Wall, *et al.*, (1970) untuk pengelompokan mesofauna tanah secara umum serta Balogh (1972) dan Hopkin (1997) untuk kelompok Acari dan Collembola. Jumlah individu tiap kelompok dicatat dan digunakan untuk menghitung kepadatan serta menggambarkan struktur komunitas mesofauna tanah.

d. Populasi cacing tanah (ind/m²)

Pengambilan sampel cacing tanah dilakukan dengan menentukan petak contoh berukuran 25 × 25 cm hingga kedalaman 20 cm. Tanah digali secara bertahap pada dua lapisan kedalaman, yaitu 0–10 cm dan 10–20 cm. Pengamatan populasi cacing tanah dilakukan menggunakan metode *hand sorting* pada masing-masing kedalaman tersebut. Cacing tanah yang diperoleh dibersihkan dari sisa tanah dengan pencucian menggunakan air, kemudian ditimbang dan diawetkan dalam botol berisi alkohol 70%. Identifikasi cacing tanah dilakukan menggunakan kunci determinasi yang tercantum dalam buku *Biologi Tanah* (Hanafiah, *et al.*, 2014), berdasarkan karakter morfologi tubuh seperti setae, tipe mulut, dan klitelum.

3.5.2. Soil Properties:

a) pH tanah

Pengukuran pH tanah dilakukan secara in situ di lapangan menggunakan pH meter tanah. Elektroda pH meter ditancapkan langsung ke dalam tanah hingga kedalaman yang ditentukan, kemudian dibiarkan beberapa saat hingga pembacaan

stabil. Nilai pH tanah yang tertera pada layar alat selanjutnya dicatat sebagai pH aktual tanah pada lokasi pengamatan (ISO 10390 (2005)).

b) Kadar Air Tanah (%)

Kadar air tanah dianalisis menggunakan metode gravimetri, yaitu berdasarkan perbedaan bobot tanah sebelum dan sesudah pengeringan pada suhu tinggi. Sampel tanah basah ditimbang, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam. Setelah pengeringan, sampel didinginkan dalam desikator dan ditimbang kembali untuk memperoleh bobot kering.

Persentase kadar air tanah dihitung berdasarkan selisih bobot tanah sebelum dan sesudah pengeringan menggunakan rumus gravimetri standar.

$$Kadar\ Air\ (\%) = \frac{(Berat\ basah - Berat\ kering)}{Berat\ kering} \times 100$$

Black, (1965); Kim H. Tan (2005); ISO (1993)

Untuk menjamin ketelitian hasil analisis, seluruh pengukuran dilakukan minimal dua ulangan. Blanko inkubasi disertakan pada setiap seri analisis respirasi tanah dan C-mik. Suhu inkubasi, waktu fumigasi, serta kadar air tanah dijaga konstan untuk meminimalkan variabilitas hasil.

c) Suhu Tanah (°C)

Suhu tanah diukur menggunakan **termometer tanah** dengan cara menancapkan ujung sensor termometer ke dalam tanah pada kedalaman yang sama dengan pengukuran pH. Termometer dibiarkan hingga menunjukkan nilai suhu yang stabil, kemudian suhu tanah dibaca dan dicatat dalam satuan derajat Celsius (°C). Soil Survey Staff. (2014).

3.6. Pendekatan dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan **kuantitatif eksplanatori** dengan tujuan menjelaskan hubungan kausal antara praktik pengelolaan tanah, perubahan sifat fisik–kimia tanah, dinamika biota tanah, dan respons respirasi tanah pada sistem perkebunan nanas. Pendekatan eksplanatori dipilih karena penelitian ini tidak

hanya bertujuan mendeskripsikan fenomena, tetapi juga menguji hipotesis kausal berbasis teori ekologi tanah dan siklus karbon.

Desain penelitian disusun dalam kerangka hierarki proses tanah, di mana pengelolaan tanah diposisikan sebagai variabel eksogen yang memengaruhi sifat tanah, selanjutnya sifat tanah memengaruhi biota tanah, dan pada tahap akhir biota tanah menentukan besaran respirasi tanah sebagai komponen utama fluks karbon ke atmosfer. Struktur ini memungkinkan identifikasi pengaruh langsung dan tidak langsung antarvariabel dalam satu sistem analisis yang terintegrasi.

Variabel penelitian dikelompokkan ke dalam empat komponen utama:

1. Variabel Pengelolaan Tanah (*Soil Management*) Meliputi waktu pengamatan (TIME), sistem olah tanah (TILLG), serta perlakuan amelioran organik berupa biochar, vermikompos, dan konsorsium bakteri (D1_BIOCH, D1_VERM, D1_BACT). Variabel ini diperlakukan sebagai variabel eksogen karena ditentukan secara eksperimental.
2. Variabel Sifat Tanah (*Soil Properties*) Terdiri atas suhu tanah (TEMP), kadar air tanah (WATER), dan reaksi tanah (pH) yang berfungsi sebagai mediator antara pengelolaan tanah dan respons biologis.
3. Variabel Biota Tanah (*Soil Biota*) Meliputi kelimpahan mesofauna tanah (M_FAU), karbon biomassa mikroorganisme (C_MICR), dan populasi cacing tanah (E_WORM), yang mencerminkan aktivitas dan struktur komunitas biologis tanah.
4. Variabel Respon Lingkungan Respirasi tanah (RESPI) sebagai indikator utama fluks karbon tanah dan emisi CO₂ dari sistem perkebunan nanas.

Kerangka analisis disusun mengikuti prinsip kontrol bertingkat (hierarchical control) dalam ekologi tanah, yaitu: *soil management* → *soil properties* → *soil biota* → *soil respiration*

Struktur ini mencerminkan bahwa respirasi tanah tidak dikendalikan secara langsung oleh praktik pengelolaan, melainkan melalui perubahan kondisi fisik–kimia tanah dan respons biota tanah sebagai penggerak utama proses dekomposisi dan respirasi.

3.7. Analisis data

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan pemodelan regresi linier dengan metode Ordinary Least Squares (OLS). Seluruh pengujian statistik dilakukan pada tingkat kepercayaan 90% ($\alpha = 0,10$), yang lazim digunakan dalam studi ekologi tanah untuk menangkap sensitivitas proses biologis yang bersifat dinamis. Model dibagi ke dalam tiga kelompok utama, yaitu :

Model I (*soil management* → *soil properties*),

Model II (*soil properties* → *soil biota*) dan

Model III (*soil biota* → *soil respiration*).

Ketiga model ini bukan model terpisah, melainkan rangkaian sistem kausal (*recursive system*) yang menggambarkan bagaimana intervensi pengelolaan tanah akhirnya bermuara pada pengendalian emisi karbon (CO_2) melalui mekanisme biologis tanah.

Model I menjelaskan bahwa Sifat fisik dan kimia tanah (*soil properties*) dipengaruhi langsung oleh pengelolaan tanah (*soil management*).

Model II menjelaskan bahwa biota tanah (*soil biota*). dipengaruhi langsung oleh Sifat fisik dan kimia tanah (*soil properties*)

Model III menjelaskan bahwa respirasi tanah (*soil respiration*) dipengaruhi langsung oleh biota tanah (*soil biota*).

Berdasarkan kerangka konseptual penelitian yang menyatakan bahwa pengelolaan tanah memengaruhi sifat fisik–kimia tanah, sifat tanah memengaruhi biota tanah, dan biota tanah selanjutnya mengendalikan respirasi tanah, maka hubungan kausal tersebut diformalkan ke dalam serangkaian model empiris yang disusun secara berjenjang. Setiap kelompok model dirancang untuk menguji pengaruh langsung pada masing-masing tahap proses, sehingga mekanisme pengendalian respirasi tanah dapat dianalisis secara sistematis dan terukur.

Untuk menguji pengaruh langsung pengelolaan tanah terhadap sifat fisik dan kimia tanah, maka Kelompok Model I disusun dengan menjadikan variabel pengelolaan tanah sebagai variabel penjelas, dan sifat fisik dan kimia tanah sebagai variabel respon. Model ini bertujuan memastikan bahwa perubahan pH, kadar air, dan dinamika suhu tanah merupakan konsekuensi dari perlakuan pengelolaan tanah yang diterapkan, bukan semata akibat variasi alami.

Kelompok Model I

Sejalan dengan konsep bahwa sifat kimia tanah dipengaruhi langsung oleh praktik pengelolaan tanah, Model I A disusun untuk menguji pengaruh waktu pengamatan, sistem olah tanah, serta pemberian biochar, vermikompos, dan bakteri terhadap pH tanah. Model ini bertujuan menilai apakah variasi pH yang diamati merupakan respon langsung dari perlakuan pengelolaan tanah yang diterapkan. Oleh karena itu, hipotesis nol menyatakan bahwa seluruh variabel pengelolaan tanah tidak berpengaruh terhadap pH tanah, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan adanya pengaruh signifikan dari satu atau lebih perlakuan tersebut.

Model I A :

$$[\text{pH}]_i = \alpha_1 + \alpha_2[\text{TIME}]_i + \alpha_3[\text{TILLG}]_i + \alpha_4[\text{D}_1\text{-BIOCH}]_i + \alpha_5[\text{D}_1\text{-VERM}]_i + \alpha_6[\text{D}_1\text{-BACT}]_i + \xi_i$$

$$H_0 \quad \mathbf{I.A} : \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0$$

$$H_1 \quad \mathbf{I.A} : \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq \alpha_5 \neq \alpha_6 \neq 0$$

Berdasarkan asumsi bahwa pengelolaan tanah memengaruhi kemampuan tanah dalam menahan dan mengatur air, Model I B dirumuskan untuk menguji pengaruh waktu, sistem olah tanah, serta pemberian biochar, vermikompos, dan bakteri terhadap kadar air tanah. Model ini digunakan untuk memastikan bahwa perbedaan kadar air tanah yang terukur merupakan konsekuensi dari perlakuan pengelolaan tanah, bukan semata variasi alami. Dengan demikian, hipotesis nol menyatakan tidak adanya pengaruh variabel pengelolaan terhadap kadar air tanah, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan adanya pengaruh yang signifikan.

Model I B :

$$[\text{WATER}]_i = \beta_1 + \beta_2[\text{TIME}]_i + \beta_3[\text{TILLG}]_i + \beta_4[\text{D}_1\text{-BIOCH}]_i + \beta_5[\text{D}_1\text{-VERM}]_i + \beta_6[\text{D}_1\text{-BACT}]_i + e_i$$

$$H_0 \quad \mathbf{I.B} : \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$$

$$H_1 \quad \mathbf{I.B} : \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6 \neq 0$$

Model I C disusun untuk mengevaluasi pengaruh langsung pengelolaan tanah terhadap dinamika suhu tanah. Dalam model ini, waktu pengamatan, sistem olah

tanah, serta pemberian amelioran diperlakukan sebagai faktor yang berpotensi mengubah kondisi iklim tanah. Tujuan model ini adalah untuk menguji apakah perubahan suhu tanah yang terjadi dapat dijelaskan oleh praktik pengelolaan tanah yang diterapkan. Hipotesis nol menyatakan bahwa variabel pengelolaan tanah tidak memengaruhi suhu tanah, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan adanya pengaruh signifikan.

Model I C :

$$[\text{TEMP}]_i = \lambda_1 + \lambda_2[\text{TIME}]_i + \lambda_3[\text{TILLG}]_i + \lambda_4[\text{D}_1\text{-BIOCH}]_i + \lambda_5[\text{D}_1\text{-VERM}]_i + \lambda_6[\text{D}_1\text{-BACT}]_i + \varepsilon_i$$

$$H_0 \quad \text{I.C} : \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 0$$

$$H_1 \quad \text{I.C} : \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq \lambda_4 \neq \lambda_5 \neq \lambda_6 \neq 0$$

Kelompok Model II

Setelah pengaruh pengelolaan tanah terhadap sifat fisik–kimia tanah dianalisis, Model II A disusun untuk menguji pengaruh suhu tanah, kadar air, dan pH terhadap kelimpahan mesofauna tanah. Model ini didasarkan pada asumsi bahwa mesofauna tanah merespons kondisi lingkungan mikro yang terbentuk di dalam tanah. Oleh karena itu, hipotesis nol menyatakan bahwa variasi sifat tanah tidak berpengaruh terhadap mesofauna tanah, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan bahwa satu atau lebih sifat tanah berpengaruh secara signifikan.

Model II A :

$$[\text{M_FAU}]_i = \alpha_1 + \alpha_2[\text{TEMP}]_i + \alpha_3[\text{WATER}]_i + \alpha_4[\text{pH}]_i + u_i$$

$$H_0 \quad \text{II.A} : \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$$

$$H_1 \quad \text{II.A} : \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq 0$$

Model II B dirancang untuk menguji pengaruh langsung sifat fisik–kimia tanah, khususnya suhu tanah, kadar air, dan pH, terhadap biomassa mikroba tanah (C-mik). Model ini bertujuan menilai sejauh mana kondisi lingkungan tanah mengendalikan keberadaan dan aktivitas mikroorganisme. Dengan demikian, hipotesis nol menyatakan bahwa sifat tanah tidak berpengaruh terhadap C-mik,

sedangkan hipotesis alternatif menyatakan adanya pengaruh signifikan dari variabel sifat tanah tersebut.

Model II B :

$$[C_MICR]_i = \beta_1 + \beta_2[TEMP]_i + \beta_3[WATER]_i + \beta_4[pH]_i + \eta_i$$

$$H_0 \quad \mathbf{II.B} : \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1 \quad \mathbf{II.B} : \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$$

Untuk melengkapi analisis respon biota tanah, Model II C disusun guna menguji pengaruh suhu tanah, kadar air, dan pH terhadap populasi cacing tanah. Model ini didasarkan pada anggapan bahwa cacing tanah sangat dipengaruhi oleh stabilitas kondisi fisik-kimia tanah. Hipotesis nol menyatakan bahwa sifat fisik dan kimia tanah tidak berpengaruh terhadap populasi cacing tanah, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan adanya pengaruh signifikan dari satu atau lebih variabel sifat tanah

Model II C :

$$[E_WORM]_i = \lambda_1 + \lambda_2[TEMP]_i + \lambda_3[WATER]_i + \lambda_4[pH]_i + \sigma_i$$

$$H_0 \quad \mathbf{II.C} : \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0$$

$$H_1 \quad \mathbf{II.C} : \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq \lambda_4 \neq 0$$

Tahap akhir analisis diformulasikan dalam Model III, yang bertujuan menguji pengaruh langsung biota tanah terhadap respirasi tanah. Dalam model ini, mesofauna tanah, biomassa mikroba, dan cacing tanah diperlakukan sebagai pengendali biologis utama respirasi tanah. Model ini digunakan untuk menguji hipotesis bahwa variasi respirasi tanah merupakan refleksi dari perubahan komponen biota tanah. Hipotesis nol menyatakan bahwa biota tanah tidak berpengaruh terhadap respirasi tanah, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan adanya pengaruh signifikan dari satu atau lebih komponen biota tanah.

Kelompok Model III :

$$[RESPI]_i = \alpha_1 + \alpha_2[M_FAU]_i + \alpha_3[C_MICR]_i + \alpha_4[E_WORM]_i + \delta_i$$

$$H_0 \quad \mathbf{III} : \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$$

$$H_1 \quad \mathbf{III} : \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq 0$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data penelitian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Menetapkan sensitivitas parameter dari *Soil management* yaitu Pengelolaan tanah menunjukkan tingkat sensitivitas yang berbeda terhadap sifat fisik–kimia tanah di perkebunan nanas. Faktor waktu merupakan parameter yang paling konsisten memengaruhi pH tanah, kadar air tanah, dan suhu tanah. Amelioran biologis seperti vermikompos dan inokulan mikroorganisme menunjukkan pengaruh signifikan dengan meningkatkan pH tanah serta menurunkan suhu tanah. Biochar hanya menunjukkan pengaruh terbatas terhadap kadar air tanah, sedangkan olah tanah konvensional tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap sifat tanah yang diamati. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan sifat tanah lebih responsif terhadap input biologis dibandingkan intervensi mekanis.
2. Sifat fisik–kimia tanah berperan penting dalam mengendalikan dinamika biota tanah. Mesofauna menunjukkan respons positif terhadap suhu dan kadar air tanah, namun respons negatif terhadap pH tanah. Biomassa mikroba tanah (C-mik) merupakan komponen biota yang paling sensitif, terutama terhadap perubahan suhu dan pH tanah. Sebaliknya, populasi cacing tanah hanya menunjukkan respons signifikan terhadap pH tanah. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa perubahan biota tanah lebih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tanah dibandingkan oleh pengelolaan tanah secara langsung.
3. Merancang persamaan simultan respirasi tanah sebagai fungsi dari *soil biota* dan *soil biota* sebagai fungsi dari *Soil properties* yang merupakan fungsi dari *Soil Management*. Penelitian ini merumuskan model

persamaan simultan yang menunjukkan bahwa pengelolaan tanah mengendalikan sifat tanah, yang selanjutnya menentukan dinamika biota tanah, dan pada akhirnya mengatur besarnya respirasi tanah. Biota tanah terbukti menjadi faktor kunci yang memediasi pengaruh sifat tanah terhadap respirasi tanah, sehingga hubungan antara variabel bersifat kausal, berjenjang, dan saling terintegrasi dalam mengendalikan emisi karbon dari tanah.

5.2. Saran

1. Pengelolaan tanah di perkebunan nanas sebaiknya lebih diarahkan pada penggunaan amelioran berbasis biologis yang terbukti mampu memperbaiki pH dan menstabilkan temperatur tanah, karena kedua parameter tersebut berperan penting dalam mengendalikan biomassa mikroba tanah dan respirasi tanah. Pendekatan mekanis melalui olah tanah konvensional perlu dievaluasi kembali karena kontribusinya terhadap perbaikan sifat tanah relatif terbatas.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan Pengukuran emisi CO₂ secara langsung agar dengan menambahkan pada model hierarkis.
3. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan pemisahan komponen respirasi tanah (*autotrof* dan *heterotrof*) serta menggunakan model hierarkis atau spasial untuk menangkap variabilitas biota tanah yang lebih kompleks. Selain itu, pengamatan jangka panjang perlu dilakukan untuk memperkuat pemahaman mengenai dinamika temporal pengaruh pengelolaan tanah terhadap proses biologis tanah.
4. Saran pengembangan akuntansi dan pengukuran emisi. Indikator biologis tanah, khususnya biomassa mikroba tanah, disarankan untuk dipertimbangkan sebagai komponen utama dalam sistem pengukuran dan pelaporan emisi karbon tanah di sektor pertanian. Pendekatan berbasis proses ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan kredibilitas estimasi emisi karbon dari sistem pertanian tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in tropical agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 543, 295–306.
- Agegnehu, G., Bird, M. I., Nelson, P. N., & Bass, A. M. (2015). The ameliorating effects of biochar and compost on soil quality and plant growth on a Ferralsol. *Soil Research*, 53(1), 1–12.
- Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London: Academic Press.
- Allison, S. D., & Vitousek, P. M. (2005). Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(5), 937–944.
- Alster, C. J., van de Laar, A., Goodrich, J. P., Arcus, V. L., Deslippe, J. R., Marshall, A. J., & Schipper, L. A. (2023). Quantifying thermal adaptation of soil microbial respiration. *Nature Communications*, 14, 5459.
- Altendorf, S. (2019). Major tropical fruits market review 2018. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Arshad, Z. I. M., Amid, A., Yusof, F., Jaswir, I., Ahmad, K., & Loke, S. P. (2014). Bromelain: An overview of industrial application and purification strategies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 7283–7297.
- Azevedo, G. M., Silva, L. R., & Pereira, M. G. (2024). Microbial contribution to soil carbon fluxes in agricultural systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48, e0230065.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik Hortikultura Indonesia 2023*. Jakarta: BPS.
- Bai, J., Moreira, B.R.D., Feng, Y., & Yadav, S. (2025). Assessing biochar's impact on greenhouse gas emissions, microbial biomass, and enzyme activities in agricultural soils through meta-analysis and machine learning. *Science of the Total Environment*. 963, 178541.

- Bakri, S. (2023). *Kelembagaan Lingkungan*, Universitas Terbuka, Tangerang, Indonesia.
- Balogh, J. (1972). *The oribatid genera of the world*. Budapest: Akademiai Kiado.
- Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511.
- Barnard, R. L., Osborne, C. A., & Firestone, M. K. (2020). Rewetting of soil: Revisiting the origin of soil CO₂ emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 148, 107880.
- Benjamin, E. J., *et al.*, (2018). Heart disease and stroke statistics—2018 update: A report from the American Heart Association. *Circulation*, 137(12), e67–e492.
- Barrett, C. B., Reardon, T., & Swinnen, J. (2022). Agri-food value chain revolutions in low- and middle-income countries. *Journal of Economic Literature*, 60 (4): 1316–1377.
- Bartholomew, D. P., Paull, R. E., & Rohrbach, K. G. (2003). *The pineapple: Botany, production and uses*. CABI Publishing.
- Basheer, S. Wang, X., Farooque, A.A., Nawaz, R.A., Pang, T., & Neokye, E.O. (2024). A review of greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Sustainability*. 16(11), 4789.
- Berlese, A. (1905). Apparecchio per raccogliere presto ed in gran numero piccoli artropodi. *Redia*, 2, 85–89.
- Beugnon, R., Du, J., Cesarz, S., Jurburg, S. D., Pang, Z., Singavarapu, B., Wubet, T., Xue, K., Wang, Y., & Eisenhauer, N. (2021). Tree diversity and soil chemical properties drive the linkages between soil microbial community and ecosystem functioning. *ISME Communications*, 1, 41.
- Black, C. A. (Ed.). (1965). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Blankinship, J. C., Niklaus, P. A., & Hungate, B. A. (2011). A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia*, 165(3), 553–565.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687–711.
- Blanco-Canqui, H. (2021). Does biochar improve all soil ecosystem services? *GCB Bioenergy*, 13 (2), 291–304.

- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, **326**, 164–200.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquis, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C.A., & Hergert, G.W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, **112**(1), 1–23.
- Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R., Dai, J., Dendooven, L., Pérès, G., Tondoh, J. E., Cluzeau, D., & Brun, J. J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, *64*(2), 161–182.
- Bongiorno, G., Bodenhausen, N., Bunemann, E. K., Brussaard, L., Geisen, S., Mader, P., Quist, C.W., Walser, J.C., & de Goede, R.G. (2019). Reduced tillage, but not organic matter input, increased soil organic carbon stocks in a long-term field experiment. *Soil and Tillage Research*, *190*, 28–38.
- Bond-Lamberty, B., Ballantyne, A., Berryman, E., Fluet-Chouinard, E., Jian, J., Morris, K. A., Rey, A., & Vargas, R. (2024). Twenty years of progress, challenges, and opportunities in measuring and understanding soil respiration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *129*, e2023JG007637.
- Bond-Lamberty, B., Bailey, V.L., Chen, M., Gough, C.M. & Vargas, R. (2018). Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. *Nature* volume 560, pages 80–83.
- Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, *464*(7288), 579–582.
- Boakye, K., Akaba, S., Awuye, S.K., Danso, H., Mensah, D. (2025). Sustainability in agricultural value chains: Evidence from the pineapple sector in Ghana. *Research on World Agricultural Economy*, *6*(2), 681–699.
- Boakye, K., Salifu, I., Danso, H., & Lee, Y.-F. (2024). Comparative analysis of the profitability of major value-added activities along the pineapple value chain in Ghana. *International Journal of Business Administration*. Vol. 15, No. 3, 78-98.
- Bradford, M. A., Davies, C. A., Frey, S. D., Maddox, T. R., Melillo, J. M., Mohan, J. E., Reynolds, J. F., Treseder, K. K., & Wallenstein, M. D. (2008). Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature. *Ecology Letters*, *11*(12), 1316–1327.

- Bradford, M. A., Wieder, W. R., Bonan, G. B., Fierer, N., Raymond, P.A., & Crowther, T.W. (2016). Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change*, *11*, 542–548.
- Brown, G. G., Edwards, C. A., & Brussaard, L. (2004). How earthworms affect plant growth: Burrowing into the mechanisms. *Pedobiologia*, *48*(5–6), 373–388.
- Bruni, E., Curiel Yuste, J., Menichetti, L., Flores, O., Guasconi, D., Guenet, B., Hereş, A. M., Lehtonen, A., Mäkipää, R., Pallandt, M., Pérez-Izquierdo, L., Richy, E., Santonja, M., Tupek, B., & Manzoni, S. (2025). Microbial biomass—not diversity—drives soil carbon and nitrogen mineralization in Spanish holm oak ecosystems. *Geoderma*, *460*, 117408.
- Brussaard, L., de Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *121*(3), 233–244.
- Bunemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mader, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, *165*, 108465.
- Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2013). Nitrous oxide emissions from soils: How well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *368*, 20130122.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1998). *An introduction to environmental biophysics* (2nd ed.). Springer.
- Campuzano, E. F., Guillén-Cruz, G., Juárez-Altamirano, R., & Flores-Rentería, D. (2025). Seasonal and land use effects on soil respiration and its controlling factors in arid lands from northeastern Mexico. *Soil Systems*, *9*(1), 12.
- Carey, J. C., Tang, J., Templer, P. H., Kroeger, K. D., Crowther, T. W., Burton, A. J., Dukes, J. S., Emmett, B., Frey, S. D., Heskell, M. A., Jiang, L., Machmuller, M. B., Mohan, J., Panetta, A. M., Phillips, R. P., Reich, P. B., Tjoelker, M. G., & Wallenstein, M. D. (2016). Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(48), 13797–13802.
- Chen, R., Senbayram, M., Blagodatsky, S., Myachina, O., Dittert, K., Lin, X., Blagodatskaya, E., & Kuzyakov, Y. (2014). Soil C and N availability determine the priming effect. *Soil Biology and Biochemistry*, *69*, 1–10.

- Chen, Z., Xu, Y., Castellano, M.J., Fontaine, S., Wang, W., Ding, W. (2019). Soil Respiration Components and their Temperature Sensitivity Under Chemical Fertilizer and Compost Application: The Role of Nitrogen Supply and Compost Substrate Quality. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124, 556–571.
- Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavellee, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Steinweg, J. M., Wallenstein, M. D., Wetterstedt, J. Å. M., & Bradford, M. A. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17(11), 3392–3404.
- Cotrufo, M. F., Ranalli, M. G., Haddix, M. L., Six, J., & Lugato, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 12(12), 989–994.
- Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K., & Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency–Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization. *Global Change Biology*, 19(4), 988–995.
- Crowther, T. W., van den Hoogen, J., Wan, J., Mayes, M.A., Keiser, A.D., Mo, L., Averlill, C., & Maynard, D.S. (2019). The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science*, 365(6455), eaav0550.
- Crowther, T. W., Thomas, S. M., Maynard, D. S., Baldrian, P., Covey, K., Frey, S.D., Van Diepen, L.T.A., & Bradford, M.A. (2015). Biotic interactions mediate soil microbial feedbacks to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(22), 7033–7038.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440, 165–173.
- Decaëns, T. (2010). Macroecological patterns in soil communities. *Global Ecology and Biogeography*, 19(3), 287–302.
- Dekemati, I., Simon, B., Vinogradov, S., & Birkas, M. (2019). The effects of various tillage treatments on soil physical properties and earthworm abundance and crop yield in Hungary. *Soil & Tillage Research*. (Review on tillage effects). Vol 194, 104334.
- De Silva, A. G. S. D., Al-Musawi, Z.K., Samuel, A., Malwalage, S.M., Ramanathan, T., Kulmány, I.M., & Molnar, Z. (2026). Greenhouse Gas Emissions in Agricultural Crops and Management Practices: The Impact of the Integrated Crop Emission Mitigation Framework on Greenhouse Gas Reduction. *MDPI. Agriculture*. 16(1).

- Dhakal, K., Parajuli, M., Jian, S., Li, J., & Nandwani, D. (2022). Responses of soil heterotrophic respiration and microbial biomass to organic and conventional production systems. *Soil Science*. Vol 2.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García Márquez, J. R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46.
- Domeignoz-Horta, L. A., Shinfuku, M., Junier, P., Poirier, S., Verrecchia, E., Sebag, D., & DeAngelis, K. M. (2021). Direct evidence for the role of microbial community composition in the formation of soil organic matter composition and persistence. *ISME Communications*, 1, Article 71.
- Domínguez, J., Aira, M., & Gómez-Brandón, M. (2009). Vermicomposting: Earthworms enhance the work of microbes. *Biology and Fertility of Soils*, 57, 1049–1060.
- Duan, T., Zhao, J., & Zhu, L. (2024). Insights into CO₂ and N₂O emissions driven by applying biochar and nitrogen fertilizers in upland soil. *Science of the Total Environment*, 929, 172439.
- D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, Leskinen J, P., Matthies B.D., Toppinen , A. (2017). Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*, 168, 716–734.
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. L. (Eds.). (2011). *Vermiculture technology: Earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC Press.
- Edwards, C. A., & Bohlen, P. J. (1996). *Biology and ecology of earthworms* (3rd ed.). Chapman & Hall.
- Edwards, C. A., & Lofty, J. R. (1977). *Biology of earthworms*. London: Chapman and Hall.
- EL-Mogy, M. M., Adly, M.A., Shahein, M.M., Hassan, H.A., Mahmoud, S.O., & Abdeldaym, E.A., (2024). Integration of Biochar with Vermicompost and Compost: effects on crop performance. *Agronomy* (MDPI). 14(11), 2603.
- FAO. (2017). *The State of Food and Agriculture: Leveraging Food Systems for Inclusive Rural Transformation*. Rome.

- FAO. (2021). *Global soil carbon sequestration potential*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. <https://www.fao.org>
- FAO. (2022). *Emissions due to agriculture: Global, regional and country trends*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fierer, N., Leff, J.W., Adams, B.J., Nielsen, U.N., Bates, S.T., Lauber, C.L., Owens, S., Gilbert, J.A., Wall, D.H., & Caporaso, J.G. (2022). Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes, *Environmental Sciences*, Vol 109(52) 21390–21395.
- Fierer, N., & Jackson, R. B. (2006). The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(3), 626–631.
- Filser, J., Faber, J. H., Tiunov, A. V., Brussaard, L., Frouz, J., De Deyn, G., Uvarov, A. V., Berg, M. P., Lavelle, P., Loreau, M., Wall, D. H., Querner, P., Eijsackers, H., & Jiménez, J. J. (2016). *Soil fauna: Key to new carbon models*. *Soil*, 2(4), 565–582.
- Filser, J. (2002). The role of Collembola in carbon and nitrogen cycling in soil: : Proceedings of the Xth international Colloquium on Apterygota, České Budějovice 2000: Apterygota at the Beginning of the Third Millennium *Pedobiologia*, 46(3–4), 234–245.
- Food and Agriculture Organization (2022). *Pineapple market and production statistics* (FAOSTAT)
- Forey, O., Sauze, J., Piel, C., Gritti, E.S., Devidal, S., Faez, A., Ravel, O., Nahmani, J., Rouch, L., Blouin, M., Peres, G., Capowicz, Y., Roy, J., & Milcu, A. (2023). Earthworms do not increase greenhouse gas emissions (CO₂ and N₂O) in an ecotron experiment simulating a three-crop rotation system. *Scientific Reports*. 13:21920.
- Francioni, M., D’Ottavio, P., Bianchini, M., Deligios, P.A., Ledda, L., Rivosecchi, C., Mammarella, F., Giampieri, A. Brunetti, G., Zenobi, S., Fiorentini, M., Di Tella, B., & Orsini, R. (2025). Soil CO₂ emissions during the winter–summer crop rotation fallow period: Influence of tillage, nitrogen fertilization, and weed growth in a long-term field trial, *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol 393, 109805, 1-10.
- Franco-Luesma, S., Alonso-Ayuso, M., Wolf, B., Latorre, B., & Álvaro-Fuentes, J. (2025). Measurement of greenhouse gas fluxes in agricultural soils with a flexible, open-design automated system, *Soil. 1*, 523–533.
- Frouz, J. (2018). Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 332, 161–172.

- Ganault, P., Nahmani, J., Capowiez, Y., Fromin, N., Shihan, A., Bertrand, I., Buatois, B., & Milcu, A. (2024). Earthworms and plants can decrease soil greenhouse gas emissions by modulating soil moisture fluctuations and soil macroporosity in a mesocosm experiment. *PLOS ONE*, *19*(2), e0289859.
- García-Palacios, P., Maestre, F. T., Kattge, J., & Wall, D. H. (2016). Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes. *Ecology Letters*, *19*(7), 759–770.
- Garnier, P., Neill, C., Mary, B., & Nunan, N. (2022). Changes in soil carbon mineralization related to earthworm activity depend on the time since inoculation and their density in soil. *Scientific Reports*, *12*, 13755.
- Geisen, S., Wall, D.H., & van der Putten, W.H. (2019). Challenges and opportunities for soil biodiversity in the Anthropocene. *Current Biology*, *29*(19), R1036–R1044.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757–768.
- Gelaye, Y., & Getahun, S. (2024). A review of the carbon sequestration potential of fruit trees and their implications for climate change mitigation: The case of Ethiopia, *Cogent Food & Agriculture*, *10*: 2294544, 1-16.
- Gelman, A., & Hill, J. (2007). *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. Cambridge University Press.
- Gereffi, G., & Fernandez-Stark, K. (2016). *Global value chain analysis: A primer* (2nd ed.). Duke Center on Globalization, Governance & Competitiveness.
- Ghimirey, V. (2025). *Understanding soil carbon sequestration: mechanistic insights for sustainable agriculture*. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*.
- Grace, J. B., Scheiner, S. M., & Schoolmaster, D. R. (2016). Structural equation modeling: Building and evaluating causal models. *Ecology*, *97*(2), 314–324.
- Great Giant Foods. (2023). *Sustainability Report*. Lampung, Indonesia.
- Griscom, B. W., et al. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, *114*(44), 11645–11650.

- Gunawardena, M. A. & Lokupitiya E. (2024). Comparison of conventionally and organically grown pineapple in Sri Lanka using life cycle assessment and externalities. *Science of the Total Environment*, 906, 167523.
- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J.L., Han, W.X., Zhang, W.F., Christie, P., Goulding, K.W.T., Vitousek, P.M., Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, **327**(5968), 1008–1010.
- Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Katterer, K., Lugato, E., Thomsen, I.K., Jorgensen, H.B., & Isberg P. (2020). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6:30, 1-48.
- Hanson, P. J., Edwards, N. T., Garten, C. T., & Andrews, J. A. (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48(1), 115–146.
- Hanyabui, E., Kwame Agyei Frimpong, K.A., Annor-Frempong, F., & Atiah, K. (2024). *Effect of pineapple waste biochar and compost application on the growth and yield of pineapple varieties in Ghana*. *Frontiers in Agronomy*.
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 103.
- Hashimoto, S., Carvalhais, N., Ito, A., Migliavacca, M., Nishina, K., & Reichstein, M. (2015). Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database. *Biogeosciences*, *12*(13), 4121–4132.
- Hassan, M.U., Huang, G., Munir, R., Khan, T.A., Noor, M.A. (2024) Biochar Co-Compost: A Promising Soil Amendment to Restrain Greenhouse Gases and Improve Rice Productivity and Soil Fertility. *Agronomy*, *14*(7), 1583.
- Huo, C., Luo, Y., & Cheng, W. (2017). Rhizosphere priming effect: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, 78–84.
- International Organization for Standardization. (1993). *ISO 11465: Soil quality Determination of dry matter and water content on a mass basis Gravimetric method*. Geneva: ISO.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IPCC. (2019). *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land*

Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch>
- Irshad, S., and Frouz, J. (2024). How the effect of earthworms on soil organic matter mineralization and stabilization is affected by litter quality and stage of soil development. *Soil Biology and Biochemistry* (Springer). 167:1425–1436
- ISO 10390 (2005). *Soil quality — Determination of pH*.
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Global Change Biology Bioenergy*, 9(6), 961–977.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187.
- Jenkinson, D. S., and D. S. Powlson. 1976. “The Effects of Biocidal Treatments on Metabolism in Soil—I. Fumigation with chloroform, *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 167–177.
- Jenkinson, D.S., & Powlson, D.S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8(3), 209–213.
- Jian, J., Du, X., Reiter, M. S., & Stewart, R. D. (2021). A meta-analysis of global cropland soil respiration responses to management practices. *Soil Biology & Biochemistry*, 160, 108341.
- Khanna, M. (2024). Economics of land-based carbon mitigation. *American Journal of Agricultural Economics*.
- Ketnawa, S., Chaiwut, P., & Rawdkuen, S. (2012). Pineapple wastes: A potential source for bromelain extractio. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 385–391.
- Kim, H., Kim, S., Woo, S., et al. (2025). Soil heterotrophic and autotrophic respiration respond differently to seasonal variations in temperature and water content. *Scientific Reports*, 15, 20554.

- KLHK. (2023). *Dokumen Kontribusi yang Ditetapkan Secara Nasional (Enhanced NDC) Republik Indonesia*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Kok, D. D., Scherer, L., de Vries, W., Trimbos, K., & van Bodegom, P. M. (2022). Relationships of priming effects with organic amendment composition and soil microbial properties. *Geoderma*, 429, 115951.
- Kudureti, A., Zhao, S., Zhakyp, D., Tian, C. (2023). Responses of soil fauna community under changing climate and land use: a review.
- Kuzyakov, Y. (2006). Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(3), 425–448.
- Kuzyakov, Y. (2010). Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1363–1371.
- Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2015). Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology and Biochemistry*, 83, 184–199.
- Lal, R. (2018) Digging Deeper: A Holistic Perspective of Factors Affecting Soil Organic Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Global Change Biology*, 24, 3285-3301.
- Lal, R. (2014). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 405, 115391.
- Lal, R. (2020). Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(1), 1–9.
- Lal, R., Negassa, W., Lorenz, K. (2015). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 49, 79–86.
- Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261–273.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O. W., & Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33(4), 159–193.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., & Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42, S3–S15.

- Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). *Soil Ecology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. Springer.
- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture. In M. Miransari (Ed.), *Soil nutrients*. Nova Science Publishers.
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J.E., Cayuela, M.L., Camps-Arbestain, M., & Whitman T. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14, 883-892.
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2021). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(10), 66–82.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). *Routledge*.
- Liang, C., Amelung, W., Lehmann, J., & Kästner, M. (2019). Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Global Change Biology*, 25(11), 3578–3590.
- Liang, C., Schimel, J. P., & Jastrow, J. D. (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2, 17105.
- Lim, S.L., Wu, T.Y., Lim, P.N., & Shak, K.P.Y. (2015). The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and plant growth. *Environmental Chemistry Letters*, 13(4), 373–393.
- Lin, F., Wang, H., Shaghaleh, H., Hamad, A.A.A., Zhang, Y., Yang, B., Hamound, Y.A. (2024). Effects of Biochar Amendment on N₂O Emissions from Soils with Different pH Levels. *Atmosphere*, 15(1), 68.
- Lin, Y., Wiegand, K. 2023. Low R² in ecology: Bitter, or B-side? *Ecological Indicators*, Vol (153) 1-4.
- Luo, Y., *et al.* (2016). Toward more realistic projections of soil carbon dynamics by Earth system models. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(1), 40–56.
- Luo, Y., Wan, S., Hui, D., & Wallace, L. L. (2001). Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 413(6856), 622–625.
- Malik, A. A., Martiny, J. B. H., Brodie, E. L., Adam C. Martiny, A.C., Treseder, K.K., & Allison, S.D. (2020). Defining trait-based microbial strategies with consequences for soil carbon cycling under climate change. *The ISME Journal*, 14, 1–9.

- Maertens, M., & Swinnen, J. F. M. (2015). Gender and modern supply chains in developing countries. *Journal of Development Studies*, 48(10), 1412–1430.
- Manning, P., van der Plas, F., Soliveres, S., Allan, E., Maestre, F. T., Mace, G., Whittingham, M. J., & Fischer, M. (2018). Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, 2(3), 427–436.
- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., & Ågren, G. I. (2012). Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196, 79–91.
- Manzoni, S., Capek, P., Mooshammer, M., Lindahl, B.D., Richter A., & Santruckova, H. (2017). Optimal metabolic regulation along resource stoichiometry gradients. *Ecology Letters*, 24, 166–178.
- Melillo, J. M., Frey, S. D., DeAngelis, K. M., Werner, W. J., Bernard, M. J., Bowles, F. P., Pold, G., Knorr, M. A., & Grandy, A. S. (2017). Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, 358(6359), 101–105.
- Mohamad, A. H. H., Ab-Rahim, R., & Mohamad, N. N. (2022). Competitiveness of pineapple: Focus on the Southeast Asian region. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 12(5), 205–214.
- Morim, A.C., Santos, M., Tarelho, L.A.C., Silva, F.C. (2024). Short-term impacts on soil biological properties after organic amendments: implications for microbial respiration and priming. *Agriculture*, 14(12), 2206.
- Moyano, F. E., Manzoni, S., & Chenu, C. (2013). Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 59, 72–85.
- Muhamad, M. Z., Abdullah, A. M., & Saad, M. S. (2022). Investigating yield variability and technical efficiency of pineapple farms in Malaysia using stochastic frontier analysis. *Sustainability*, 14(22), 15410.
- Murphy, D. J. (2024). *Carbon Sequestration by Tropical Trees and Crops: A Case Study of Oil Palm*. *Agriculture*, 14(7), 1133.
- Nadhirah. M.S., Mawaddah, A., Chua, Q. S., & Marina, M. B. (2025). *Innovative approach to anterior glottic web management: Combining blue LASER and mitomycin* [Conference poster]. Faculty of Medicine, National University of Malaysia.
- Narayanan, M., Ananth, C., Ayyandurai, M., Pugazhendhi, A., Alshehri, M.A., & Ma, Y. (2024). Sustainable strategies for enhancing soil carbon

sequestration and their beneficial impacts on soil fertility: A comprehensive review. *Applied Soil Ecology* Vol 204.

- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(12), 4459–4485.
- Ogle, S. M., Buendia, L., Butterbach-Bahl, K., Breidt, F. J., Hartman, M., Yagi, K., Nayamuth, R., Spencer, S., Wirth, T., & Smith, P. (2013). Advancing national greenhouse gas inventories for agriculture in developing countries: Improving activity data, emission factors and software technology. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015015.
- Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274, 28–34.
- Orchard, V. A., & Cook, F. (1983). Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 15(5), 447–453.
- Ortiz-Ramírez, G., Hernández, E., Pacheco, S.P., & Cuevas, E. (2024). The dynamics of soil mesofauna communities in a seasonally flooded wetland: Responses to Spatiotemporal Fluctuations in Phreatic Level and Salinity. *Arthropoda*, 2(1), 1-27.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532 (7597), 49–57.
- Pearl, J., Glymour, M., & Jewell, N. P. (2016). *Causal inference in statistics: A primer*. Wiley.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2022 Tentang : Tata Laksana Penerapan Nilai Ekonomi Karbon
- Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon untuk Pencapaian Target Kontribusi yang Ditetapkan Secara Nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca dalam Pembangunan Nasional.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 110 Tahun 2025 Tentang Penyelenggaraan Instrumen Nilai Ekonomi Karbon dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca Nasional
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 110 Tahun 2025 Tentang: Penyelenggaraan Instrumen Nilai Ekonomi Karbon Dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca Nasional

- Potapov, A. M., Tiunov, A. V., & Scheu, S. (2019). Uncovering trophic positions and food resources of soil animals using bulk stable isotope analysis. *Biological Reviews*, **95**(5), 1240–1262.
- Prescott, C. E., Grayston, S. J., Helmisaari, H.-S., Kaštovská, E., Körner, C., Lambers, H., Meier, I. C., Millard, P., & Ostonen, I. (2020). Surplus carbon drives allocation and plant–soil interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, **35**(12), 1110–1118.
- Qu, R., Liu, G., Yue, M., Wang, G., Peng, C., Wang, K., & Gao, X. (2023). Soil temperature, microbial biomass and enzyme activity are the critical factors affecting soil respiration in different soil layers in Ziwuling Mountains, China. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1105723.
- Reardon, T., Echeverria, R., Berdegué, J., Minten, B., Liverpool-Tasie, S., Tschirley, D., Zilberman, D. (2019). Rapid transformation of food systems in developing regions: Highlighting the role of agricultural research & innovations. *Agricultural Systems*, *172*, 47–59.
- Remelli, S., Ghobari, H., Filho, L.C.L.O., (2024). Editorial: The role of soil mesofauna as indicators of sustainable ecosystem management plans. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *12*, 1400232.
- Ren, J., Wang, Y., Luo, M., Zhuang, Y., Wang, J., Chai, Sen., Liu, Jun., Zhang, Z., Li, Y., Chen, P., & Wei, Q. (2025). Mitigating Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils with Biochar: A Scientometric and Visual Analysis. *Agronomy*, *15*(5), 1115.
- Rousk, J., Brookes, P. C., & Bååth, E. (2010). The microbial PLFA composition as affected by pH in an arable soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**(3), 516–520.
- Ruiz, S. A., Bickel, S., Or, D. (2021). Global earthworm distribution and activity windows based on soil hydromechanical constraints. *Communications Biology*, **4**, 612.
- Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, **48**(1), 7–20.
- Scheu, S. (2003). Effects of earthworms on plant growth: Patterns and perspectives: The 7th international symposium on earthworm ecology · Cardiff · Wales 2002, *Pedobiologia*, Vol 47, 5–6, 846-856
- Schimel, J. P., Balsler, T. C., & Wallenstein, M. (2007). Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*, **88**(6), 1386–1394.

- Schimel, J. P., & Schaeffer, S. M. (2012). Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 3, 348.
- Schneider, F. D., Fichtmueller, D., Gossner, M. M., Güntsch, A., Jochum, M., König- Ries, B., Le Provost, G., Manning, P., Ostrowski, A., Penone, C., & Simons, N. K. (2019). *Towards an ecological trait- data standard*. *Methods in Ecology and Evolution*, 10 (12), 2006–2019.
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A. J., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190120.
- Shen, C., Ni, Y., Liang, W., Wang, J., & Chu, H. (2019). Soil pH dominates elevational diversity patterns for bacteria in high-elevation soils on the Tibetan Plateau. *FEMS Microbiology Ecology*, 95(2), fiz003.
- Shi, G., Lua, Lu., Zhu, G., Zeng, Z., Zheng, J., Shi, Y., Sun, B., & Jiang, Y. (2023). Interaction between nematodes and bacteria enhances soil carbon dynamics under organic amendments. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1155088.
- Singh, S., Mayes, M. A., & Schaeffer, S. M. (2023). How the Birch effect differs in mechanisms and magnitudes due to soil texture. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol 179, 108973.
- Sinsabaugh, R. L., Manzoni, S., Moorhead, D. L., & Richter, A. (2013). Carbon use efficiency of microbial communities: Stoichiometry, methodology and modelling. *Ecology Letters*, 16(7), 930–939.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7–31.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155–176.
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Olge, S.M., Moraes-Sa, J.S.D., Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage. *Agronomie*, 22 (7-8), pp.755-775.
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., & Batten, K. M. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555–569.
- Smith, P., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E.A., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., Ravindranath, N.H., Rice, C.W., Roble

do Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F., & Tubiello, F. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Smith, P., Soussana, J.F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., Egmond, F.V., McNeill S., Kuhnert, M., ¹, Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., & Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1), 219–241.

Sofa, A., Khanghahi, M.Y., Curci, M., Reyes, F., Briones, M.J.I., Sarneel, J.M., Cardinale, D., Crecchio, C. (2023). Earthworm-driven changes in soil chemico-physical properties, soil bacterial microbiota, litter decomposition, and plant growth in a mesocosm experiment with two plant species. *Plants*, 12(6), 1216.

Soil Survey Staff. (2014). *Soil survey field and laboratory methods manual*. USDA–NRCS.

Sokol, N.W., Slessarev, E., Marschmann, G.L., Nicolas, A., Blazewicz, S.J., Brodie, E.L., Firestone, M.K., Foley, M.M., Hestrin, R., Hungate, B.A., Koch, B.J., Stone, B.W., Sullivan, M.B., Zablocki, O., & Pett-Ridge, J. (2022). Life and death in the soil microbiome: How microbial necromass contributes to soil organic carbon storage. *Nature Reviews Microbiology*, 20, 415–430

Strickland, M. S., & Rousk, J. (2010). Considering fungal:bacterial dominance in soils—Methods, controls, and ecosystem implications. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1385–1395.

Subke, J. A., & Bahn, M. (2010). On the temperature dependence of soil respiration: Can we use the immeasurable to predict the unknown? *Soil Biology and Biochemistry*, 42(11), 1869–1877.

Tamang, M., Sikorski, J., van Bommel, M., Piecha, M., Urich, T., Ruess, L., Huber, K., Neumann-Schaal, M., & Pester, M. (2024). Succession of Bacteria and Archaea Within the Soil Micro-Food Web Shifts Soil Respiration Dynamics. *Environmental Microbiology*, 26, e70007.

Tan, Kim H. 2005. *Soil Sampling, Preparation, and Analysis*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press.

Tejada-Gallardo, C., Blasco-Belled, A., Torrelles-Nadal, C., & Alsinet, C. (2020). Effects of school-based multicomponent positive psychology interventions on well-being and distress in adolescents: A systematic

review and meta-analysis. *Journal of Youth and Adolescence*, 49(10), 1943–1960.

- Tao, F., *et al.* (2023). Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*. Vol 618.
- Thakur, M.P., *et al.*, (2020). Toward an integrated understanding of soil biodiversity and ecosystem functioning. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8), 416–429.
- Tian, Z., Zhao, H., Peter, K. T., Gonzalez, M., Wetzell, J., Wu, C., Hu, X., Prat, J., Mudrock, E., Hettlinger, R., Cortina, A. E., Biswas, R. G., Kock, F. V. C., Soong, R., Jenne, A., Du, B., Hou, F., He, H., Lundeen, R., Gilbreath, A., Sutton, R., Scholz, N. L., Davis, J. W., Dodd, M. C., Simpson, A., McIntyre, J. K., & Kolodziej, E. P. (2021). A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science*, 371(6525), 185–189.
- Tsiafouli, M. A., *et al.* (2015). Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 21(2), 973–985.
- Tullgren, A. (1918). Ein sehr einfacher Ausleseapparat für terricole Tierfaunen. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 4(2), 149–150.
- Van den Bergh, S. G., Chardon, I., Leite, M. F. A., Gerard, W. Korthals, G.W., Mayer, J., Cougnon M., Reheul, D., Boer, W.d., & Bodelier, P.L.E. (2024). *Soil aggregate stability governs field greenhouse gas fluxes in agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry.*
- Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3), 296–310.
- Velenturf, A. P. M., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437–1457.
- Voroney, R. P., & Paul, E. A. (1984). Determination of k_C and k_N *in situ* for calibration of the chloroform fumigation-incubation method. *Soil Biology and Biochemistry*, 16(1), 9–14.
- Verma, S., Kumar, R., & Singh, A. (2026). Soil CO₂ flux dynamics and its role in ecosystem carbon balance. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198, 112.
- Vyas, P., Sharma, S., & Gupta, J. (2022). Vermicomposting with microbial amendment: implications for bioremediation of industrial and agricultural waste. *Biotechnologia*. (Open access; review on vermicompost and interactions).

- Wagg, C., Bender, S.F., Widmer, F., & van der Heijden, M.G.A. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14), 5266–5270.
- Wallwork, J. A. (1970). *Ecology of soil animals*. London: McGraw-Hill.
- Wall, D. H., Bardgett, R. D., Behan-Pelletier, V., Herrick, J.E., Jone, T.H., Ritz, K., Six, J., Strong, D.R. and Van der Putten, W.H. (2013). Soil ecology and ecosystem services. *Oxford University Press*.
- Wall, D. H., Bardgett, R. D., & Kelly, E. F. (2012). Biodiversity in the dark. *Oxford University Press*.
- Wall, D. H., Nielsen, U. N., & Six, J. (2015). Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528, 69–76.
- Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2015). Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 13(7), 1226–1240.
- Wasserstein, R. L., Schirm, A. L., & Lazar, N. A. (2019). Moving to a world beyond “ $p < 0.05$ ”. *The American Statistician*, 73(sup1), 1–19.
- Weil, R. R. & Brady, N. C., (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Wieder, O., Kohlbacher, S., Kuenemann, M., Garon, A., Ducrot, P., Seidel, T., & Langer, T. (2020). A compact review of molecular property prediction with graph neural networks. *Drug Discovery Today: Technologies*, 37, 1–12.
- Wieder, W. R., Grandy, A. S., Kallenbach, C. M., Taylor, P. G., & Bonan, G. B. (2015). Representing life in the Earth system with soil microbial functional traits in the MIMICS model. *Biogeochemistry*, 149, 279–297.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2022). Evaluation of nutrient characteristics and bacterial community composition in soils across pH gradients. *Scientific Reports*, 12, 5904.
- Wooldridge, J. M. (2016). *Introductory econometrics: A modern approach* (6th ed.). Cengage Learning.
- World Bank. (2020). *Agriculture and Food: Overview*. Washington, DC: World Bank.

- Wu, H., Lu, M., Lu, X., Guan, Q., & He, X. (2015). Interactions between earthworms and mesofauna has no significant effect on emissions of CO₂ and N₂ O from soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 294–297.
- Wuepper, D., Sauer, J., & Kleemann, L. (2017). Sustainable intensification amongst Ghana's pineapple farmers: The complexity of an innovation determines the effectiveness of its training. *Environment and Development Economics*, 23(1), 87–108.
- Xu, L. H., & Yuan, Y. (2017). Wealth Disparity, Social Capital and Rural Households' Accessibility of Informal Credit. *Journal of Financial Research*, No. 2, 131-146.
- Xu, S., Delgado-Baquerizo, M., Kuzyakov, Y., Wu, Y., Liu, L., Yang, Y., Yu, Y., Zhu, B., Yao, H. (2024). Positive soil priming effects are the rule at a global scale. *Global Change Biology*, 30(2), 567-580.
- Xu, M., Peng, S., Wang, G., & Zhang, W. (2016). Effects of soil moisture and temperature on soil respiration across ecosystems. *Global Change Biology*, 22(7), 2330–2342.
- Yang, J., Wang, J., Wang, S., et al. (2026). Soil degradation alters soil respiration regulation from temperature to moisture and biochemical constraints. *Journal of Soils and Sediments*, 26, 158
- Yang, L., Pan, J., Wang, J., Tian, D., Zhang, C., Zhao, X., Hu, J., Yang, W., Yan, Y., Ma, F., Chen, W., Quan, Q., Wang, P., & Niu, S. (2023). Soil microbial respiration adapts to higher and longer warming experiments at the global scale. *Environmental Research Letters*, 18, 034044.
- Zhang, H., Cai, J., et al. (2024). Soil total carbon as a key factor affects soil biota attributes and their responses to plant mixtures. *Geoderma*.
- Zhang, X., Johnston, E. R., Barberán, A., Ren, Y., Xiaotao, L., Han, X. (2017). Decreased plant productivity resulting from plant–soil feedbacks driven by soil microbial communities. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1575–1583.
- Zhou, S., Hu, J., Liu, X., Zhou, X., Xiao, L., Cao, D., Tu, L., Cui, X., Huang, C. (2023). The response of mesofauna to nitrogen deposition and precipitation change: implications for litter decomposition. *Forests*, 14(6), 1112.
- Zhu, K., Jia, W., Mei, Y., Wu, S., & Huang, P. (2023). Shift from flooding to drying enhances the respiration of soil aggregates by changing microbial community composition and keystone taxa. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1167353.

Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Smith, G. M. (2007). *Analysing ecological data*. Springer.

Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. New York: Springer.