

KONTROL KARAKTERISTIK FISIK-KIMIA TANAH TERHADAP EMISI CO₂ PADA BERBAGAI PENGGUNAAN LAHAN MINERAL TROPIS

(Control of Physical-Chemical Characteristics of Soil on CO₂ Emissions in Various Tropical Mineral Land Uses)

Wahyudi Febrianto Putra^{1*}, Risvan Anwar¹, Mega Rahma Sari¹

¹Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Prof. Dr. Hazairin, S.H., Jalan Jenderal Sudirman No. 185 Bengkulu, Indonesia

*Corresponding Author, Email: wfebri6@gmail.com

ABSTRACT

Variations in land-use types and management intensity significantly alter soil physical-chemical properties and dictate carbon dioxide (CO₂) emissions fluxes. This study aimed to model the control of soil physical-chemical characteristics on soil CO₂ emission rates across various tropical mineral land-use types in Seginim District, South Bengkulu Regency. Utilizing an observational edaphic dataset across six dominant land-use types (corn, oil palm, natural forest, vegetables, coffee, and rubber) with three replications (N=18), advanced statistical modeling via Pearson correlation and multiple linear regression was performed. Soil CO₂ emissions were measured in-situ using the modified closed-chamber method followed by alkali absorption titration, while edaphic variables (soil moisture, temperature, bulk density, and pH) were evaluated using standard laboratory procedures. Data were analyzed using Pearson correlation and multiple linear regression. The results revealed that intensive land-use types, namely corn (51.65 ± 2.31 kg/ha/day) and vegetables (43.80 ± 2.75 kg/ha/day), doubled CO₂ emissions compared to natural forest (21.87 ± 1.36 kg/ha/day). Soil moisture and bulk density acted as the master variables controlling the emissions. Soil moisture alone showed a strong negative correlation, explaining 83.72% of the emission variance ($r = -0.91$; $p < 0.01$). Integrating all edaphic components into a multivariate regression model significantly increased the predictive power to 97.22% ($R^2 = 0.9722$; $p < 0.001$), driven by the severe physical inhibition effect of bulk density ($\beta = -30.83$; $p < 0.001$). Conversely, soil temperature and pH exerted no significant partial effects due to microclimatic buffering. This study concludes that soil physical properties rigidly govern CO₂ emissions across different tropical mineral land uses. Consequently, climate change mitigation strategies must prioritize protecting soil physical structures through water management and compaction prevention rather than chemical manipulation.

Keywords: Bulk density, carbon dioxide emission, land-use types, soil moisture, tropical mineral soil.

ABSTRAK

Variasi jenis penggunaan lahan dan intensitas pengelolaan secara signifikan mengubah sifat fisik-kimia tanah dan menentukan fluks emisi karbon dioksida (CO₂). Studi ini bertujuan untuk memodelkan pengaruh karakteristik fisik-kimia tanah terhadap laju emisi CO₂ tanah di berbagai jenis penggunaan lahan mineral tropis di Kecamatan Seginim, Kabupaten Bengkulu Selatan. Dengan menggunakan dataset edafik observasional di enam jenis penggunaan lahan dominan (jagung, kelapa sawit, hutan alami, sayuran, kopi, dan karet) dengan tiga replikasi (N=18), pemodelan statistik tingkat lanjut melalui korelasi Pearson dan regresi linier berganda dilakukan. Emisi CO₂ tanah diukur secara in-situ menggunakan metode ruang

tertutup yang dimodifikasi diikuti dengan titrasi penyerapan alkali, sedangkan variabel edafik (kelembaban tanah, suhu, kerapatan curah, dan pH) dievaluasi menggunakan prosedur laboratorium standar. Data dianalisis menggunakan korelasi Pearson dan regresi linier berganda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis penggunaan lahan intensif, yaitu jagung ($51,65 \pm 2,31$ kg/ha/hari) dan sayuran ($43,80 \pm 2,75$ kg/ha/hari), menggandakan emisi CO₂ dibandingkan dengan hutan alami ($21,87 \pm 1,36$ kg/ha/hari). Kelembaban tanah dan kepadatan curah bertindak sebagai variabel utama yang mengendalikan emisi. Kelembaban tanah saja menunjukkan korelasi negatif yang kuat, menjelaskan 83,72% varians emisi ($r = -0,91$; $p < 0,01$). Mengintegrasikan semua komponen edafik ke dalam model regresi multivariat secara signifikan meningkatkan daya prediksi menjadi 97,22% ($R^2 = 0,9722$; $p < 0,001$), didorong oleh efek penghambatan fisik yang parah dari kepadatan curah ($\beta = -30,83$; $p < 0,001$). Sebaliknya, suhu tanah dan pH tidak memberikan efek parsial yang signifikan karena penyangga mikroklimat. Studi ini menyimpulkan bahwa sifat fisik tanah secara ketat mengatur emisi CO₂ di berbagai penggunaan lahan mineral tropis. Akibatnya, strategi mitigasi perubahan iklim harus memprioritaskan perlindungan struktur fisik tanah melalui pengelolaan air dan pencegahan pemadatan daripada manipulasi kimia.

Kata kunci: Emisi karbon dioksida, jenis penggunaan lahan, kepadatan curah, kelembaban tanah, tanah mineral tropis.

PENDAHULUAN

Pemanasan global dan perubahan iklim yang dipicu oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer telah menjadi tantangan lingkungan global yang paling krusial saat ini. Di antara berbagai jenis GRK, karbon dioksida CO₂ memegang peran terbesar sebagai kontributor utama antropogenik. Biosfer darat, khususnya ekosistem tanah, bertindak sebagai reservoir karbon sekaligus sumber emisi melalui proses respirasi tanah. Dinamika pelepasan karbon dari tanah ke atmosfer ini sangat sensitif terhadap alih fungsi lahan dan manajemen agronomis. Variasi karakteristik antar-tutupan lahan, seperti perbedaan kondisi antara ekosistem hutan alami dengan lahan pertanian intensif atau perkebunan monokultur, diketahui berkaitan erat dengan rendahnya cadangan karbon organik tanah sekaligus memicu pelepasan emisi CO₂ secara massif (Faradika dkk., 2026; Sigar dkk., 2025).

Di Indonesia, sebagian besar studi emisi karbon masih berfokus pada lahan

gambut. Padahal, daratan Indonesia secara spasial didominasi oleh tanah mineral tropis yang memiliki karakteristik biogeokimia jauh berbeda (Putra dkk., 2020). Pada tanah mineral kering, kapasitas retensi air, porositas, dan dekomposisi bahan organik sangat bergantung pada stabilitas struktur fisik dan kimianya (Azzahra dkk., 2023). Pada sistem pengelolaan tanah mineral sebagai lahan budidaya, intervensi mekanis seperti pengolahan tanah intensif dan manipulasi kimia melalui pemupukan nitrogen dapat merusak agregat tanah dan mempercepat laju mineralisasi karbon (Sigar dkk., 2025).

Secara ekologis, besaran emisi CO₂ permukaan tanah dikontrol secara ketat oleh faktor edafik atau karakteristik fisik-kimia di dalam matriks tanah itu sendiri. Penelitian terdahulu di ekosistem tropis mengungkapkan bahwa faktor lingkungan internal seperti kelembaban dan keasaman (pH) tanah menjadi kontrol utama aktivitas biologis mikroorganisme pengurai dibandingkan persentase tutupan kanopi

vegetasi atas (Elvira dkk., 2026). Sifat tanah seperti berat volume (*bulk density*) dan pH juga saling berinteraksi secara kompleks dalam memengaruhi akumulasi serta stabilitas karbon organik tanah mineral, di mana kondisi tanah yang lebih padat dan asam berpotensi menekan aktivitas respirasi tanah (Candra dkk., 2026).

Sebuah studi awal di wilayah Kabupaten Bengkulu Selatan telah berhasil memetakan variasi kuantitatif fluks emisi antar-lahan (Putra dkk., 2020). Namun, analisis yang disajikan masih bersifat deskriptif-komparatif umum tanpa mengupas secara mendalam kekuatan hubungan interaktif dan mekanisme kontrol kausalitas dari masing-masing parameter fisik-kimia tanah. Sebagai langkah pengembangan dan eksplorasi lebih lanjut dari dataset tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara mendalam peran kontrol karakteristik fisik-kimia tanah terhadap laju emisi CO₂ di berbagai tipe penggunaan lahan mineral tropis Kabupaten Bengkulu Selatan melalui pendekatan pemodelan statistik tingkat lanjut, yaitu analisis korelasi dan regresi multivariat.

BAHAN DAN METODE

Penelitian lapangan dilaksanakan di kawasan agroekosistem lahan kering Kecamatan Seginim, Kabupaten Bengkulu Selatan, Provinsi Bengkulu. Analisis laboratorium untuk karakterisasi sifat fisik dan kimia tanah diselesaikan di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu. Seluruh rangkaian pengambilan sampel tanah, pengujian laboratorium, dan pemantauan parameter edafik serta fluks gas diselenggarakan mulai dari bulan Februari sampai dengan April 2019.

Bahan utama yang digunakan dalam kajian ini meliputi matriks sampel tanah mineral (ordo Inceptisol) yang diambil dari berbagai tipe penggunaan lahan, larutan absorben KOH 0,1 N sebagai penangkap gas karbon dioksida, larutan standar HCl 0,1 N sebagai agen titran kimia, akuades bebas ion, indikator fenolftalein (pp), dan indikator metil jingga (mo).

Instrumen lapangan yang digunakan terdiri atas sungkup silinder statis tertutup (kompartemen kamber), cawan wadah tempat KOH, beban pemberat kamber, *stopwatch*, termometer batang kaca (untuk suhu tanah), meteran, cangkul, sekop kecil, pisau lapang, lembar pencatat data, kamera dokumentasi, kantong plastik sampel kedap udara, boks es (*coolbox*), ring sampel/silinder inti (*core sampler*) berdiameter 70 mm, serta *Global Positioning System* (GPS) untuk penentuan titik koordinat lokasi spasial. Alat analisis laboratorium yang digunakan meliputi oven pengering Memmert, timbangan analitik presisi dengan ketelitian 3 desimal, pH meter digital Metrohm, alat titrasi (buret, statif, klem), dan peralatan gelas laboratorium (erlenmeyer, gelas ukur, pipet tetes).

Desain Eksperimen dan Penarikan Sampel Spasial

Penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan observasional analitis dengan teknik *purposive sampling*. Lokasi pengamatan mencakup enam tipe penggunaan lahan mineral kering yang dominan dikelola oleh masyarakat setempat, yaitu: (1) Lahan Jagung, (2) Lahan Kelapa Sawit, (3) Hutan Alami, (4) Lahan Sayuran, (5) Lahan Kopi, dan (6) Lahan Karet. Pada masing-masing tipe penggunaan lahan, ditetapkan 3 titik lokasi representatif yang bertindak sebagai ulangan spasial, sehingga

diperoleh total 18 unit sampel pengamatan independen (N=18). Struktur pengelompokan spasial ini digunakan sebagai basis data entri utama untuk pengujian model korelasi dan regresi linear berganda.

Prosedur Pengukuran Emisi CO₂

Pengukuran laju emisi CO₂ permukaan tanah dilakukan secara *in-situ* pada masing-masing dari 18 titik ulangan menggunakan metode sungkup tertutup (*closed-chamber method*) yang dimodifikasi. Sungkup silinder statis dipasang pada permukaan tanah yang telah dibersihkan dari vegetasi penutup. Gas CO₂ yang menguap dari matriks tanah ditangkap menggunakan perangkat kimia berupa larutan KOH 0,1 N sebanyak 10 ml yang ditempatkan di dalam cawan penampung di bawah sungkup selama durasi pemantauan baku.

Pengambilan sampel fluks gas ini dikerjakan secara periodik setiap pekan sepanjang enam minggu masa pemantauan guna memperoleh representasi nilai emisi harian yang stabil pada tiap-tiap titik ulangan. Konsentrasi CO₂ yang terperangkap kemudian ditentukan kadarnya di laboratorium melalui metode titrasi asam-basa menggunakan larutan standar HCl 0,1 N, dibantu indikator fenolftalein (pp) dan metil jingga (mo) (Anderson, 1982). Nilai akhir fluks gas dikonversi dan dinyatakan dalam satuan laju emisi CO₂ (kg/ha/hari).

$$\text{Kelembaban Tanah (\%)} = \frac{\text{Berat Basah} - \text{Berat Kering}}{\text{Berat Kering}} \times 100\%$$

Variabel edafik statis berupa berat volume tanah atau *bulk density* (g/cm³) ditentukan melalui pengambilan sampel tanah tidak terganggu (*undisturbed soil sample*) menggunakan silinder inti ring (*core sampler*), yang diikuti dengan proses

Pengukuran Variabel Karakteristik Edafik

Karakteristik fisik dan kimia tanah dipantau dan diukur secara presisi pada titik koordinat yang sama di setiap 18 unit ulangan lahan. Variabel edafik dinamis berupa suhu tanah (°C) diukur langsung di lapangan menggunakan termometer batang kaca yang ditancapkan ke dalam tanah dengan kedalaman 10 cm secara berkala bersamaan dengan pengambilan sampel gas mingguan pada pukul 09.00–11.00 WIB.

Pengukuran kelembaban tanah (%) dilakukan bersamaan dengan pemantauan emisi CO₂ dengan menerapkan metode gravimetrik berdasarkan panduan Khoiri (2011). Sampel tanah diambil pada lapisan kedalaman 5–10 cm menggunakan sekop kecil, lalu segera dimasukkan ke dalam kantong plastik rapat dan disimpan di dalam *coolbox* untuk meminimalkan penguapan dini. Di laboratorium, sampel tanah langsung ditimbang untuk mendapatkan nilai berat basah (BB), kemudian dikeringkan menggunakan oven pengering pada suhu konstan 105 °C selama 24 jam hingga mencapai berat konstan. Sampel tanah kering oven ditimbang kembali untuk memperoleh nilai berat kering (BK). Persentase kadar air tanah dihitung menggunakan rumus korelasi gravimetrik:

pengeringan oven pada suhu 105 °C di laboratorium. Nilai keasaman tanah (pH) ditentukan dari sampel tanah terganggu (*disturbed soil sample*) melalui metode elektrometri menggunakan pH meter digital dalam suspensi tanah dengan akuades (rasio 1:2,5).

Analisis Data dan Pemodelan Statistik

Penelitian ini menerapkan teknik analisis statistik inferensial prediktif untuk menilai daya kontrol variabel edafik terhadap emisi CO₂. Seluruh data dari 18 unit sampel ulangan lapangan dianalisis menggunakan dua tahapan statistik melalui perangkat lunak Microsoft Excel dengan fitur *Data Analysis ToolPak*:

Analisis Korelasi Pearson

Digunakan untuk menguji kekuatan dan arah hubungan linear parsial antara masing-masing variabel bebas (X₁: Kelembaban Tanah Gravimetrik, X₂: Suhu Tanah, X₃: Berat Volume, X₄: pH) terhadap variabel terikat (Y: Emisi CO₂).

Analisis Regresi Linear Berganda

Digunakan untuk memodelkan kontribusi simultan dan pengaruh interaktif dari seluruh karakteristik fisik-kimia lingkungan. Persamaan linear multivariat yang diuji adalah:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4$$

Di mana Y adalah laju emisi CO₂, α adalah konstanta, dan b₁, b₂, b₃, b₄ merupakan koefisien regresi masing-masing parameter edafik. Keandalan model dievaluasi melalui koefisien determinasi (R²), serta pengujian signifikansi menggunakan Uji F (simultan) dan Uji t (parsial) pada taraf nyata $\alpha = 0,05$ dan $\alpha = 0,01$ (tingkat kepercayaan 99%).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Edafik dan Dinamika Emisi CO₂

Fluks pelepasan karbon dioksida (CO₂) dari permukaan tanah ke atmosfer memperlihatkan variabilitas yang kontras di sepanjang gradien intensitas pengelolaan lahan di Kecamatan Seginim (Tabel 1). Perbedaan karakteristik tutupan lahan dari ekosistem hutan alami hingga kawasan pertanian semusim secara nyata beriringan dengan variasi arsitektur fisik-kimia tanah (karakteristik edafik), yang pada gilirannya memengaruhi laju metabolisme karbon di dalam tanah.

Tabel 1. Karakteristik edafik dan fluks emisi CO₂ pada berbagai tipe penggunaan lahan (Rata-rata ± SD)

Penggunaan Lahan	Emisi CO ₂ (kg/ha/hari)	Kelembaban (%)	Suhu (°C)	BV (g/cm ³)	pH H ₂ O
Jagung	51,65 ± 2,31	19.48	29.5	1.31	5.02
Sayuran	43,80 ± 2,75	23.3	29.07	1.3	5.51
Kopi	35,72 ± 1,21	28.57	26.33	1.25	5.2
Kelapa Sawit	34,15 ± 6,70	25.98	28.4	1.47	5.67
Karet	27,05 ± 2,65	33.18	25.5	1.3	5.16
Hutan	21,87 ± 1,36	43.28	24.07	1.07	5.82

Berdasarkan data di atas, terdapat pola linear di mana ekosistem dengan intervensi antropogenik paling intensif—seperti lahan jagung (51,65 ± 2,31 kg/ha/hari) dan lahan sayuran (43,80 ± 2,75 kg/ha/hari)—mengalami eskalasi emisi karbon hampir dua kali lipat dibandingkan dengan kondisi rujukan pada hutan alami

(21,87 ± 1,36 kg/ha/hari). Pola spasial ini merepresentasikan dampak masif dari konversi lahan kering tropis terhadap pelepasan simpanan karbon bawah permukaan (*subsurface carbon stock*), sebuah fenomena global yang digaribawahi oleh Don et al. (2011) dan Houghton (2012) mengenai degradasi rosot karbon (*carbon*

sink) akibat alih fungsi lahan pertanian.

Perbedaan drastis performa edafik antar-lahan ini berakar pada hilangnya stratifikasi tajuk vegetasi pelindung. Pada lahan jagung dan sayuran, ketiadaan kanopi permanen memicu penetrasi radiasi surya secara langsung ke permukaan tanah. Akibatnya, suhu tanah melonjak hingga mencapai titik tertinggi ($29,50^{\circ}\text{C}$), yang memicu penurunan kapasitas retensi air tanah hingga menyentuh level kritis (19,48%). Kondisi kering dan panas ini bertindak sebagai stimulan termal bagi aktivitas enzimatik mikroba heterotrof. Menurut Schlesinger & Andrews (2000), penghilangan vegetasi penutup tanah tidak hanya mengubah neraca energi permukaan, tetapi juga mempercepat laju perputaran (*turnover rate*) bahan organik tanah melalui proses mineralisasi yang terakselerasi.

Sebaliknya, kemampuan ekosistem hutan dalam mempertahankan laju emisi tetap rendah menjadi indikator penting dari fungsi regulasi iklim mikro (*microclimatic buffering*). Struktur tegakan hutan yang berlapis-lapis efektif mereduksi fluktuasi suhu ekstrem ($24,07^{\circ}\text{C}$) dan mempertahankan kelembaban tanah tetap tinggi (43,28%). Rendahnya kerapatan lindak atau berat volume (BV) hutan ($1,07\text{ g/cm}^3$) mengindikasikan tingginya kandungan bahan organik dan porositas tanah yang sehat, yang menjadi penyokong utama stabilitas agregat. Struktur tanah yang tidak terganggu ini membatasi pelepasan karbon secara mendadak. Seperti yang ditekankan oleh Lal (2004), proteksi fisik karbon di dalam makro-agregat tanah pada ekosistem hutan yang tidak terganggu merupakan mekanisme pertahanan alami yang krusial dalam mencegah pelepasan gas

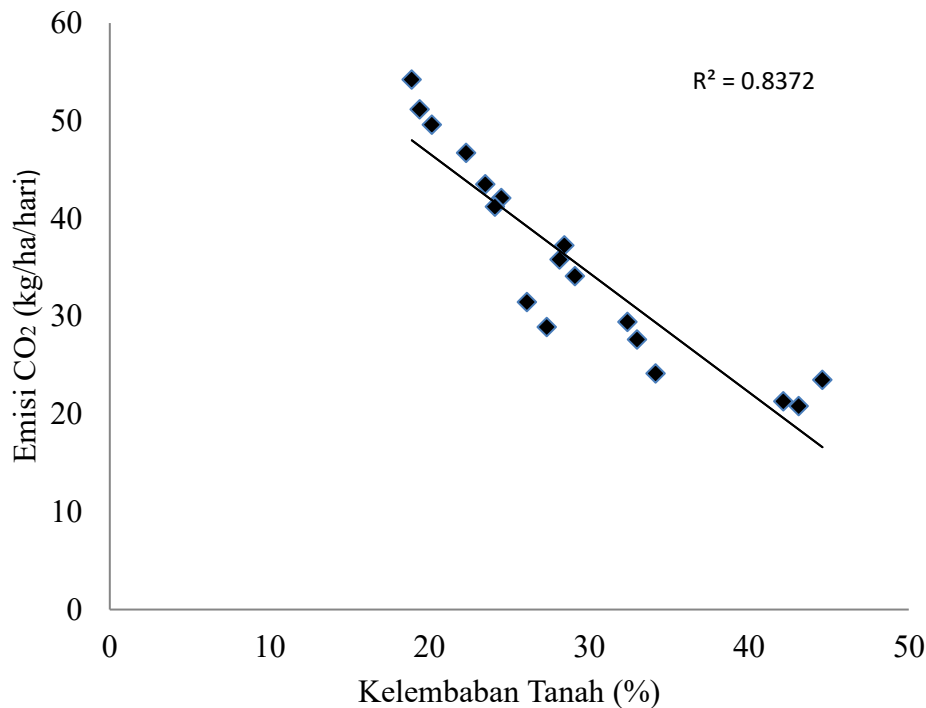
rumah kaca ke atmosfer secara masif.

Menariknya, pada kategori vegetasi tahunan seperti kopi, kelapa sawit, dan karet, nilai fluks emisi berada pada kisaran menengah (intermediet). Lahan kelapa sawit, meskipun memiliki naungan tajuk, mencatatkan nilai BV tertinggi ($1,47\text{ g/cm}^3$), yang mengindikasikan adanya tekanan fisik pada pori tanah akibat aktivitas pemeliharaan. Variasi internal data yang cukup lebar pada kelapa sawit ($SD \pm 6,70$) merepresentasikan adanya heterogenitas spasial yang tinggi di lapangan akibat aplikasi input eksternal (seperti pemupukan) dan jalur pemadatan lintasan panen yang tidak merata, sebuah dinamika yang khas pada perkebunan monokultur tropis sebagaimana diidentifikasi oleh Allen et al. (2015). Secara keseluruhan, potret deskriptif ini menegaskan bahwa gradien perbedaan tipe penggunaan lahan—dari ekosistem dengan tutupan tajuk menahun hingga pertanian semusim intensif—berasosiasi erat dengan variasi karakteristik fisik-kimia tanah yang secara sistematis membedakan tingkat pelepasan emisi karbon dari dalam tanah.

Mekanisme Kontrol Kelembaban terhadap Emisi CO₂

Analisis korelasi Pearson yang dilakukan terhadap seluruh 18 unit sampel lapangan mempertegas adanya keterkaitan fungsional yang berbanding terbalik dan sangat kuat antara kadar air tanah dengan fluks emisi CO₂ ($r = -0,91$; $P < 0,01$). Visualisasi sebaran data pada Gambar 1 (*Scatter Plot*) mengonfirmasi hubungan linear negatif tersebut dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8372. Hal ini menunjukkan bahwa secara mandiri, variasi kelembaban tanah mampu mendikte sebesar 83,72% dari total naik-turunnya pelepasan

gas CO₂ ke atmosfer di lokasi penelitian, parameter edafik lainnya. sementara 16,28% sisanya dikontrol oleh



Gambar 1. Hubungan linear negatif antara kelembaban tanah (%) dan emisi CO₂ (kg/ha/hari) berbasis 18 sampel individu di Kecamatan Seginim.

Akselerasi fluks CO₂ yang ekstrem hingga mencapai puncaknya pada lahan agrosistem semusim seperti jagung ($51,65 \pm 2,31$ kg/ha/hari) berakar pada transisi karakteristik fisik pori akibat intervensi budidaya. Ketika tanah mengalami penurunan kelembaban hingga level terendah ($19,48 \pm 1,46\%$), fraksi udara dalam ruang pori makro atau *water-filled pore space* (WFPS) berada pada kondisi optimal (di bawah 60%). Kondisi ini, menurut Luo & Zhou (2006), mengeliminasi hambatan fisik difusi gas, sehingga memicu penetrasi oksigen (O₂) atmosfer ke lapisan solum yang lebih dalam. Ketersediaan oksigen yang melimpah bertindak sebagai akseptor elektron terminal yang mempercepat metabolisme respirasi heterotrofik mikrobioma tanah (Bond-Lamberty &

Thomson, 2010).

Secara mekanistik, fenomena ini diperparah oleh rusaknya arsitektur makro-agregat tanah akibat pembajakan intensif, yang secara paksa mengekspos *subsurface carbon stock* (simpanan karbon bawah permukaan) yang sebelumnya terperangkap dalam ruang intraseluler tanah, menjadikannya substrat yang siap didegradasi secara cepat oleh enzim mikroba (Six *et al.*, 2002; Davidson & Janssens, 2006).

Sebaliknya, kemampuan ekosistem hutan alami dalam menekan pelepasan karbon hingga menyentuh titik terendah ($21,87 \pm 1,36$ kg/ha/hari) dikendalikan oleh mekanisme kejenuhan air tanah yang tinggi ($43,28 \pm 2,12\%$). Kadar air yang tinggi ini menciptakan barrier fisik (*physical barrier*)

yang mereduksi laju difusi gas O₂ hingga 10.000 kali lebih lambat dibanding fase gas (Raich & Schlesinger, 1992). Keterbatasan oksigen mengondisikan matriks bawah permukaan menjadi anoksik lokal, memicu dormansi mikroba aerobik, dan menggeser metabolisme ke jalur respirasi anaerobik yang memiliki efisiensi kinetik jauh lebih rendah dalam memproduksi gas CO₂ (Schindlbacher *et al.*, 2004). Stabilitas dekomposisi di lahan hutan ini dimungkinkan oleh bekerjanya fungsi *microclimatic buffering* (penyangga iklim mikro) dari struktur kanopi berlapis yang memotong radiasi surya langsung, menjaga fluktuasi termal tetap rendah, dan memitigasi kehilangan air tanah (De Frenne *et al.*, 2019).

Analisis Prediktif Multivariat dan Implikasi Ekologis

Meskipun analisis korelasi sederhana menunjukkan kelembaban tanah secara

mandiri telah mendominasi variasi emisi sebesar 83,72% ($R^2 = 0,8372$), pemodelan regresi linear berganda (Tabel 2) membuktikan bahwa integrasi seluruh komponen edafik secara simultan mampu mendongkrak kekuatan prediktif model secara dramatis hingga mencapai 97,22% ($R^2 = 0,9722$). Lonjakan akurasi sebesar 13,5% ini utamanya disumbang oleh keterlibatan variabel Berat Volume (X₃) yang memiliki efek penekan fisis yang sangat signifikan ($\beta = -30,83$; $P < 0,001$).

Pendekatan multivariat ini berhasil merangkum kontribusi interaktif dari seluruh parameter fisik-kimia tanah bawah permukaan ke dalam sebuah persamaan matematis struktural berikut:

$$Y = 66,60 - 1,13X_1 + 1,60X_2 - 30,83X_3 - 0,37X_4$$

Dimana: Y = Fluks Emisi CO₂, X₁ = Kelembaban Tanah, X₂ = Suhu Tanah, X₃ = Berat Volume (BV), dan X₄ = pH tanah.

Tabel 2. Hasil analisis statistik regresi linear berganda ($n = 18$)

Variabel Prediktor	Koefisien (β)	Standard Error	t-Stat	P-value	Keterangan
Intersep (Konstanta)	66.6	29.36	2.27	0.041	Signifikan
Kelembaban (X ₁)	-1.13	0.31	-3.67	0.002	Sangat Signifikan (**)
Suhu Tanah (X ₂)	1.6	1.05	1.52	0.152	Tidak Signifikan (ns)
Berat Volume (X ₃)	-30.83	4.1	-7.53	0	Sangat Signifikan (**)
pH H ₂ O (X ₄)	-0.37	2.47	-0.15	0.884	Tidak Signifikan (ns)

Keterangan: (**) = Signifikan pada taraf nyata $\alpha < 0,01$; (ns) = non-significant pada $\alpha = 0,05$. Nilai $R^2 = 0,9722$; F-hitung = 114,01; P-value Model $< 0,001$.

Tingginya nilai R^2 (97,22%) pada model gabungan ini mengonfirmasi bahwa variabilitas kontras emisi CO₂ di Kecamatan Seginim secara rigid dikendalikan oleh

interaksi keempat parameter fisik-kimia tersebut, sedangkan sisanya sebesar 2,78% dikontrol oleh faktor eksternal di luar model ($F\text{-stat} = 114,01$; $P < 0,001$). Melalui uji parsial ($t\text{-test}$), kelembaban (X_1) dan berat volume (X_3) sah bertindak sebagai *master variables* yang memberikan tekanan inhibisi secara nyata terhadap pelepasan karbon ($P < 0,01$).

Dinamika mekanistik paling menarik dalam model ini ditunjukkan oleh koefisien negatif yang sangat ekstrem pada variabel Berat Volume ($\beta = -30,83$; $P < 0,001$). Efek resistensi fisik ini mencapai signifikansi tertingginya pada penggunaan lahan kelapa sawit yang memiliki kerapatan lindak terbesar ($1,47 \text{ g/cm}^3$). Data empiris ini merepresentasikan konsekuensi logis dari gradien gangguan antropogenik berupa pemadatan tanah (*soil compaction*) akibat beban mekanisasi pertanian dan intensifnya lintas tapak pemanenan.

Secara ekologis, pemadatan fisik ini memangkas total porositas makro dan meningkatkan nilai *tortuosity* (jalur berbelit ruang pori mikro). Akibatnya, gas CO_2 yang diproduksi oleh respirasi akar dan dekomposisi mikroba terjebak secara mekanis di dalam matriks solum tanah, sehingga menghambat jalur difusinya menuju permukaan atmosfer. Fenomena restriksi fisis pertukaran gas pada tanah tropis yang mengalami tekanan mekanis ini selaras dengan observasi lapangan oleh Guillaume *et al.* (2015) pada perkebunan monokultur serta teori konduktivitas gas oleh Lipiec *et al.* (2006).

Sebaliknya, tidak signifikannya pengaruh parsial Suhu (X_2) dan pH (X_4) ($P > 0,05$) mempertegas kekuatan teori penyeragaman iklim mikro. Berjalannya fungsi *microclimatic buffering* pada sebagian

besar tutupan lahan menahun (hutan, kopi, karet, sawit) berhasil mereduksi fluktuasi termal ekstrem dan mempersempit amplitudo suhu tanah antar-lahan ($24,07 - 29,50^\circ\text{C}$). Kisaran suhu yang relatif homogen ini menyebabkan respons kinetik enzimatik intrinsik mikroba (efek Q10) tidak terekspresikan secara nyata karena tertutupi (*masked*) oleh dominasi mutlak faktor pasokan air dan restriksi fisik ruang pori tanah (Lloyd & Taylor, 1994; Davidson & Janssens, 2006).

Secara holistik, sintesis dari model prediktif multivariat ini memberikan arahan manajemen praktis yang krusial bagi mitigasi gas rumah kaca di Kabupaten Bengkulu Selatan. Strategi penurunan emisi pada berbagai tipe penggunaan lahan kering tidak perlu diprioritaskan pada manipulasi kimiawi tanah, melainkan wajib difokuskan pada perlindungan arsitektur fisik tanah. Hal ini dapat ditempuh melalui restorasi tata air lahan (*water management*) untuk menjaga kelembaban optimal serta pembatasan traksi mekanis berat guna mencegah pemadatan tanah kronis (Azzahra *et al.*, 2023).

KESIMPULAN

Perbedaan tipe penggunaan lahan dan tingkat intensitas pengelolaan antropogenik di Kecamatan Seginim secara nyata memengaruhi variabilitas pelepasan emisi CO_2 ke atmosfer. Lahan dengan intensitas pengelolaan yang tinggi, seperti agrosistem semusim (jagung dan sayuran), menunjukkan laju emisi yang jauh lebih tinggi secara signifikan jika dibandingkan dengan ekosistem rujukan berupa hutan alami. Variabilitas karakteristik antar-tutupan lahan ini berasosiasi erat dengan perbedaan performa sifat edafik, yang ditandai dengan tingginya suhu permukaan tanah serta

rendahnya kapasitas retensi air pada lahan pertanian intensif tersebut.

Secara mekanistik, variabilitas fluks emisi CO₂ di lokasi penelitian dikendalikan secara simultan dan rigid (97,22%) oleh interaksi parameter fisik tanah, dengan kelembaban tanah dan berat volume (BV) bertindak sebagai *master variables*. Kelembaban tanah secara mandiri memegang kendali utama sebesar 83,72% terhadap fluks karbon melalui pengaturan ruang pori udara tanah; kondisi kering pada lahan semusim mengeliminasi barrier difusi gas oksigen sehingga memicu respirasi heterotrofik mikroba, sedangkan kelembaban tinggi pada hutan alami mempertahankan kondisi anoksik yang menekan laju dekomposisi.

Keterlibatan variabel berat volume memberikan kontribusi prediktif tambahan yang sangat signifikan sebesar 13,5%, di mana fenomena pemadatan tanah akibat tekanan mekanisasi—terutama pada perkebunan kelapa sawit—secara fisis meningkatkan hambatan jalur pori (*tortuosity*) yang memerangkap gas CO₂ di dalam solum tanah. Di sisi lain, pengaruh suhu dan pH tanah tidak terekspresikan secara parsial sebagai akibat dari berjalan efektifnya fungsi penyangga iklim mikro (*microclimatic buffering*) pada ekosistem vegetasi menahun.

Sebagai implikasi ekologis bagi manajemen lanskap di Kabupaten Bengkulu Selatan, strategi mitigasi emisi gas rumah kaca pada berbagai tipe penggunaan lahan kering wajib menggeser fokus dari manipulasi kimiawi tanah menuju perlindungan arsitektur fisik tanah. Upaya ini dapat diimplementasikan melalui restorasi tata air lahan (*water management*) untuk mempertahankan kelembaban optimal serta

pembatasan traksi mekanis berat guna mencegah pemadatan tanah kronis.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, K., Corre, M. D., Tjoa, A., & Veldkamp, E. (2015). Soil greenhouse gas fluxes and nitrogen cycling from channels and ridges of oil palm plantations and softwood plantations in Sumatra, Indonesia. *Biogeosciences*, 12(20), 6107–6122.
- Anderson, J. P. E. (1982). Soil Respiration. In: Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, pp. 831–871.
- Azzahra, S., Pristiany, L., & Utama, R. (2023). Mitigasi emisi gas rumah kaca melalui restorasi tata air dan pengelolaan sifat fisik tanah lahan kering alih fungsi. *Jurnal Agroqua*, 21(1), 45–55.
- Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). A global database of soil respiration data. *Nature*, 464(7288), 579–582.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165–173.
- De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Jones, A. G., Hylander, K., Luoto, M., & Verheyen, K. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 3(5), 744–749.
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2011). Impact of land-use change on the soil organic carbon stocks of tropical and temperate ecosystems. *Global Change Biology*, 17(4), 1658–1670.

- Guillaume, T., Damris, M., & Kuzyakov, Y. (2015). Soil carbon loss, soil compaction, and microbial activity alterations after land-use change from forest to rubber and oil palm plantations in Sumatra, Indonesia. *Geoderma*, 249, 45–53.
- Houghton, R. A. (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6), 597–603.
- Khoiri, M. (2011). *Panduan Analisis Gravimetrik Karakteristik Sifat Fisik Tanah*. Unhas Press, Makassar.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- Lipiec, J., Wolińska, A., & Stępniewska, Z. (2006). Effect of soil compaction on gas conductivity, microbial activity and gas fluxes: a review. *International Agrophysics*, 20(3), 120–130.
- Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8(3), 315–323.
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006). *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press, San Diego, California.
- Putra, W. F., Mukhtar, Z., & Sudjatmiko, S. (2020). Emisi karbon permukaan tanah pada beberapa penggunaan lahan di daerah tropis (Kabupaten Bengkulu Selatan). *NATURALIS – Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 9(1), 55–65.
- Raich, J. W., & Schlesinger, W. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climate. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 44(2), 81–99.
- Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., & Butterbach-Bahl, K. (2004). Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from a european beech forest soil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D17), 1–12.
- Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. (2000). soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48(1), 7–20.
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., Sa, J. C. D. M., & Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 155–168.