



Jejak Pedogenesis Awal pada Inceptisol Berkembang Material Vulkanik Pulau Makian Maluku Utara

(Early Pedogenic Signatures of Inceptisols Developed from Volcanic Parent Materials on Makian Island, North Maluku)

Erwin Ladjinga^{1*}, Lily Ishak¹, Sarif Robo¹, Gunawan Hartono¹ & Iswandi Kadir¹

¹ Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Khairun, Jalan Pertamina, Kampus II Unkhair, Gambesi, Kota Ternate Selatan, Maluku Utara, 97719, Indonesia

Informasi Artikel:

Submission : 11 April 2026
Revised : 03 Juli 2026
Accepted : 28 Juli 2026
Published : 29 Agustus 2026

*Penulis Korespondensi:

Erwin Ladjinga
Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas
Pertanian, Universitas Khairun, Jalan
Pertamina, Kampus II Unkhair,
Gambesi, Kota Ternate Selatan, Maluku
Utara, 97719, Indonesia
e-mail: eladjinga@gmail.com
Telp: +62 813-4246-2229

Makila 20 (2) 2026: 308-323

DOI:
<https://doi.org/10.30598/makila.v20i2.25376>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the
[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Copyright ©2026 Author(s): Erwin Ladjinga, Lily Ishak, Sarif Robo, Gunawan Hartono & Iswandi Kadir

Journal homepage:

<https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila>

Journal e-mail: makilajournal@gmail.com

Research Article · [Open Access](#)

ABSTRACT

Volcanic island soils provide a strategic setting for examining how early pedogenic signatures emerge before diagnostic horizons are fully expressed. This study evaluates the relationship between chemical development and morphological differentiation in Inceptisols developed from volcanic parent materials on Makian Island, North Maluku, Indonesia. Two representative profiles were selected within relatively homogeneous volcanic land units but different topographic positions. Morphological properties were described using standard soil survey procedures, while texture, bulk density, porosity, infiltration rate, C-organic, C/N ratio, and cation exchange capacity (CEC) were analyzed by horizon. Linear regression and principal component analysis were applied as exploratory tools to assess intervariable patterns. The results show weak horizon differentiation (A-B-C), limited structural development, coarse texture, moderate bulk density ($1.25-1.40 \text{ g cm}^{-3}$), high porosity (47-51%), and moderate to rapid infiltration ($20-40 \text{ mm h}^{-1}$), indicating strong parent-material control over physical properties. Chemical properties showed clearer vertical gradients, with higher C-organic content (up to 2.44%) and CEC (up to $21.95 \text{ cmol(+) kg}^{-1}$) in surface horizons. C-organic and CEC had moderate linear relationships in Profile I ($R^2 = 0.56$) and Profile II ($R^2 = 0.55$), whereas other relationships were weak or inconsistent. These findings indicate pedogenic decoupling, where chemical functions develop earlier than clear morphological differentiation. The study strengthens the concept that early pedogenesis in humid tropical volcanic islands may proceed through asynchronous organo-mineral and biological processes.

KEYWORDS: Early pedogenic signatures; Inceptisols; volcanic parent material; organo-mineral interactions; soil chemical development

INTISARI

Tanah pulau vulkanik merupakan sistem alami yang strategis untuk memahami jejak pedogenesis awal sebelum horizon diagnostik berkembang jelas. Penelitian ini mengevaluasi hubungan antara perkembangan sifat kimia dan diferensiasi morfologi pada Inceptisol berbahan induk material vulkanik di Pulau Makian, Maluku Utara. Dua profil tanah representatif

dipilih pada satuan lahan vulkanik yang relatif homogen, tetapi memiliki posisi topografi berbeda. Analisis dilakukan melalui deskripsi morfologi, pengukuran sifat fisik (tekstur, bulk density, porositas, dan infiltrasi), serta sifat kimia (C-organik, rasio C/N, dan kapasitas tukar kation/KTK) pada setiap horizon. Regresi linier dan Principal Component Analysis digunakan sebagai pendekatan eksploratif untuk menilai pola hubungan antarvariabel. Hasil menunjukkan bahwa tanah berada pada tahap pedogenesis awal, ditandai oleh diferensiasi horizon lemah (A-B-C), perkembangan struktur terbatas, tekstur kasar, bulk density sedang ($1,25-1,40 \text{ g cm}^{-3}$), porositas tinggi (47-51%), dan laju infiltrasi sedang hingga cepat (20-40 mm jam^{-1}). Sebaliknya, sifat kimia memperlihatkan gradien vertikal lebih jelas, terutama C-organik hingga 2,44% dan KTK hingga $21,95 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ pada horizon permukaan. C-organik dan KTK menunjukkan hubungan linier sedang pada Profil I ($R^2 = 0,56$) dan Profil II ($R^2 = 0,55$), sedangkan hubungan lain lemah atau tidak konsisten. Temuan ini mengindikasikan decoupling pedogenesis, yaitu perkembangan fungsi kimia tanah lebih awal dibandingkan diferensiasi morfologi dan fisik. Studi ini memperkuat konsep bahwa pedogenesis awal tanah vulkanik tropis dapat berlangsung secara tidak sinkron melalui interaksi organo-mineral dan proses biologis.

KATA KUNCI: Jejak pedogenesis awal; Inceptisol; material vulkanik; interaksi organo-mineral; perkembangan kimia tanah

PENDAHULUAN

Tanah berbahan induk material vulkanik merupakan komponen penting dalam ekosistem pulau tropis karena mempunyai dinamika pelapukan, pembentukan horizon, dan penyediaan hara yang berlangsung relatif cepat dibandingkan banyak tanah mineral lainnya (Dahlgren *et al.*, 2004; Anda *et al.*, 2021). Pada fase awal pembentukan tanah, Inceptisol menjadi objek kajian yang penting karena memperlihatkan transisi dari dominasi bahan induk menuju pembentukan struktur, akumulasi bahan organik, dan perkembangan fungsi kimia tanah (Soil Survey Staff, 2022; Fiantis *et al.*, 2023). Lingkungan pulau vulkanik seperti Makian menyediakan konteks ilmiah yang kuat untuk menelusuri proses tersebut karena suplai material piroklastik, topografi lereng, drainase, dan iklim tropis lembap dapat mempercepat interaksi antara bahan organik dan mineral tanah (Churchman & Lowe, 2012; Campan *et al.*, 2024).

Kajian pedogenesis tanah vulkanik selama ini banyak menekankan stabilisasi bahan organik, kapasitas tukar kation, dan peran mineral bermuatan variabel dalam membentuk kompleks organo-mineral (Anda & Dahlgren, 2020; Rasmussen *et al.*, 2018). Akan tetapi, hubungan antara perkembangan fungsi kimia dan diferensiasi morfologi horizon belum selalu dibahas secara terpadu. Secara konseptual, perkembangan tanah sering dipahami sebagai proses bertahap dari

pelapukan bahan induk, pembentukan struktur, hingga diferensiasi horizon yang semakin jelas; namun pada tanah vulkanik muda, sifat kimia tertentu dapat lebih awal terindikasi sebelum perubahan morfologi berkembang kuat (Egli *et al.*, 2014; Matus *et al.*, 2024). Kondisi ini membuka peluang terjadinya *decoupling pedogenesis* atau ketidaksinkronan pedogenesis, yaitu ketika perubahan kimia, fisik, dan morfologi tanah tidak berlangsung secara serempak.

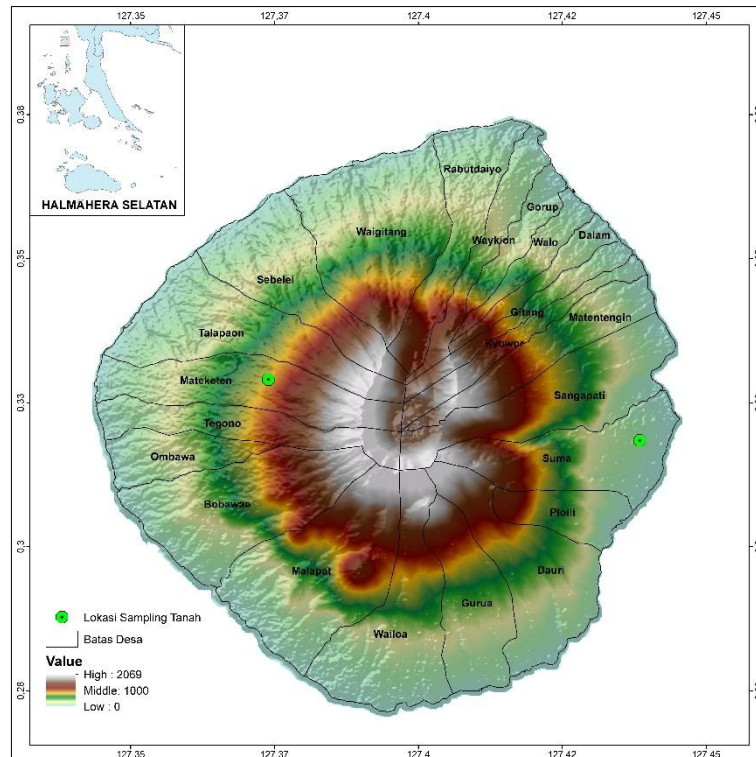
Pulau Makian di Maluku Utara merupakan pulau vulkanik aktif yang didominasi material piroklastik dan mempunyai sebaran tanah muda, sehingga relevan digunakan untuk mengevaluasi jejak pedogenesis awal pada sistem pulau tropis. Dalam konteks ini, dua profil tanah yang dikembangkan pada satuan lahan vulkanik relatif homogen dapat digunakan sebagai profil representatif untuk membaca pola vertikal morfologi, fisik, dan kimia tanah, bukan sebagai dasar generalisasi luas untuk seluruh pulau. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi deskripsi morfologi, parameter kimia-fisik, indikator pedogenesis, regresi linier eksploratif, dan PCA untuk menguji apakah fungsi kimia tanah berkembang sinkron dengan diferensiasi horizon atau menunjukkan pola perkembangan yang tidak serempak.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi hubungan antara perkembangan sifat kimia tanah dan diferensiasi morfologi pada Inceptisol berbahan induk material vulkanik di Pulau Makian, Maluku Utara. Fokus analisis diarahkan pada C-organik, rasio C/N, KTK, sifat fisik, dan indikator pedogenesis untuk mengidentifikasi jejak pedogenesis awal serta potensi *decoupling* antara fungsi kimia dan perkembangan morfologi tanah. Hasil penelitian diharapkan memperkuat pemahaman konseptual mengenai evolusi tanah vulkanik tropis, khususnya bahwa perkembangan kimia tanah pada fase awal dapat terindikasi lebih cepat dibandingkan diferensiasi morfologi horizon.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Pulau Makian (sekitar 0°19' LU dan 127°21'01,8"-127°26'24,4" BT), Provinsi Maluku Utara, Indonesia. Pulau Makian merupakan pulau vulkanik yang didominasi material piroklastik dan endapan vulkanik muda, sehingga sesuai untuk mengkaji proses pedogenesis tahap awal. Secara lingkungan, wilayah ini berada pada iklim tropis lembap dengan curah hujan tahunan tinggi dan suhu udara yang mendukung pelapukan kimia serta interaksi organo-mineral. Penyebutan kondisi iklim dalam penelitian ini digunakan sebagai konteks lingkungan umum, sedangkan interpretasi utama tetap didasarkan pada data profil tanah, sifat fisik, sifat kimia, dan indikator pedogenesis yang dianalisis pada setiap horizon.



Gambar 1. Letak lokasi penelitian

Secara spasial, lokasi penelitian mencakup bagian lereng tengah hingga bawah Pulau Makian dengan variasi topografi landai-miring dan drainase baik, yang direpresentasikan melalui peta lokasi dengan inset Halmahera Selatan dan peta utama Pulau Makian. Rentang koordinat pada peta sejalan dengan posisi profil pengamatan yang berada pada sekitar 127,35-127,44 BT. Keceragaman bahan induk vulkanik dan variasi posisi lereng memungkinkan penelitian ini mengevaluasi apakah perkembangan sifat kimia dan morfologi tanah berlangsung sinkron atau menunjukkan *decoupling pedogenesis* (ketidaksinkronan pedogenesis) pada tahap awal pembentukan tanah.

Pemilihan Profil Tanah dan Karakteristik Morfologi

Pendekatan purposive digunakan untuk memilih dua profil tanah representatif pada satuan lahan vulkanik yang relatif homogen. Kriteria pemilihan profil meliputi kesamaan bahan induk vulkanik, posisi lereng, kondisi drainase, keterwakilan horizon, dan minimnya gangguan lahan yang dapat mengaburkan sinyal pedogenesis. Dengan jumlah profil yang terbatas, kedua profil tersebut diposisikan sebagai profil representatif untuk membaca pola pedogenesis awal pada lokasi kajian, bukan sebagai basis generalisasi spasial yang luas. Setiap profil digali hingga mencapai bahan induk atau kedalaman efektif sekitar ± 150 cm. Deskripsi morfologi dilakukan mengacu pada Soil Survey Manual (Soil Survey Staff, 2017), mencakup warna tanah menggunakan Munsell Soil Color Chart, struktur, konsistensi, batas horizon, perakaran, dan fragmen batuan. Klasifikasi tanah ditetapkan berdasarkan USDA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022). Analisis difokuskan pada

horizon permukaan (A), horizon kambik awal (Bw), dan horizon C untuk menangkap transisi antara akumulasi bahan organik permukaan, perkembangan subhorizon B, dan pengaruh bahan induk.

Sampel Tanah dan Analisis Laboratorium

Sampel tanah terganggu dan tidak terganggu diambil dari setiap horizon sesuai kebutuhan analisis. Sampel tanah terganggu digunakan untuk analisis tekstur dan sifat kimia, sedangkan sampel tanah tidak terganggu digunakan untuk bulk density, particle density, dan porositas. Seluruh sampel terganggu dikeringanginkan, diayak menggunakan saringan 2 mm, dan dianalisis di laboratorium terakreditasi.

Sifat Fisik

Analisis sifat fisik tanah dilakukan untuk menggambarkan karakter struktur dan sifat hidrofisik tanah pada setiap horizon. Parameter yang dianalisis meliputi tekstur tanah, bulk density (BD), particle density (PD), porositas total, dan laju infiltrasi.

Tekstur tanah ditentukan menggunakan metode hidrometer untuk memperoleh proporsi fraksi pasir, debu, dan liat. Bulk density ditentukan melalui metode ring sampel/core method dengan membandingkan massa kering tanah terhadap volume sampel, sedangkan particle density ditentukan menggunakan metode piknometer. Porositas total dihitung menggunakan persamaan $\text{Porositas} = (1 - \text{BD}/\text{PD}) \times 100\%$. Laju infiltrasi tanah diukur menggunakan double-ring infiltrometer untuk menggambarkan kemampuan tanah meloloskan air. Seluruh parameter dianalisis per horizon untuk mengidentifikasi variasi vertikal dan hubungannya dengan perkembangan struktur tanah pada fase awal pedogenesis.

Sifat Kimia

Analisis sifat kimia tanah meliputi karbon organik (C-organik), bahan organik tanah atau Soil Organic Matter (SOM), nitrogen total (N-total), rasio C/N, dan kapasitas tukar kation (KTK). Kandungan C-organik ditentukan menggunakan metode Walkley-Black, sedangkan N-total dianalisis menggunakan metode Kjeldahl. Nilai SOM dihitung dari C-organik dengan faktor konversi Van Bemmelen melalui persamaan $\text{SOM} = \text{C-organik} \times 1,724$. Rasio C/N dihitung sebagai perbandingan antara C-organik dan N-total, sedangkan KTK ditentukan menggunakan ekstraksi amonium asetat pH 7. Parameter tersebut dipilih karena merepresentasikan perkembangan fungsi kimia tanah dan intensitas interaksi mineral-organik pada fase awal pedogenesis (Tamrat *et al.*, 2019; Wagai *et al.*, 2020).

Indikator Awal Pedogenesis

Indikator pedogenesis dihitung untuk mengevaluasi tingkat perkembangan tanah berdasarkan parameter fisik dan kimia. Rasio debu/liat digunakan sebagai proksi diferensiasi tekstur dan pelapukan mineral, rasio C/N digunakan untuk menilai dinamika bahan organik dan mineralisasi nitrogen, sedangkan rasio KTK/liat digunakan untuk mengevaluasi kontribusi relatif

fraksi liat dan bahan organik terhadap sumber muatan tanah (Six *et al.*, 2002; Egli *et al.*, 2014; Rasmussen *et al.*, 2018).

Selain itu, penelitian ini menggunakan indeks pedogenesis (PI) sebagai indeks komposit operasional, bukan indeks universal, untuk mengintegrasikan sinyal kimia tanah pada setiap horizon. Indeks tersebut dirumuskan secara simbolik sebagai berikut:

$$PI = (KTK \times C\text{-organik}) / (C/N) \quad (1)$$

Seluruh indikator dihitung pada setiap horizon dan dianalisis secara vertikal untuk menginterpretasikan pola perkembangan pedogenesis. Nilai PI digunakan hanya sebagai alat bantu interpretasi internal penelitian, sehingga tidak dimaksudkan untuk menggantikan klasifikasi tanah atau indeks pedogenesis baku pada sistem lain.

Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antarparameter tanah serta mengidentifikasi pola perbedaan sifat tanah antarhorizon. Seluruh analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak R. Hubungan antarvariabel kimia tanah, khususnya C-organik, rasio C/N, dan KTK, dianalisis menggunakan regresi linier sederhana. Karena jumlah titik data terbatas, regresi digunakan sebagai analisis eksploratif untuk membaca arah dan kekuatan hubungan linier, bukan sebagai dasar inferensi kausal.

Perbedaan antarhorizon dievaluasi menggunakan ANOVA satu arah pada data gabungan antarprofil. Namun, karena penelitian hanya menggunakan dua profil dan struktur data antarhorizon tidak sepenuhnya independen, ANOVA diperlakukan sebagai analisis eksploratif. Interpretasi utama tetap didasarkan pada pola vertikal, konsistensi pedologis, hasil regresi, dan PCA untuk menghindari risiko pseudoreplikasi.

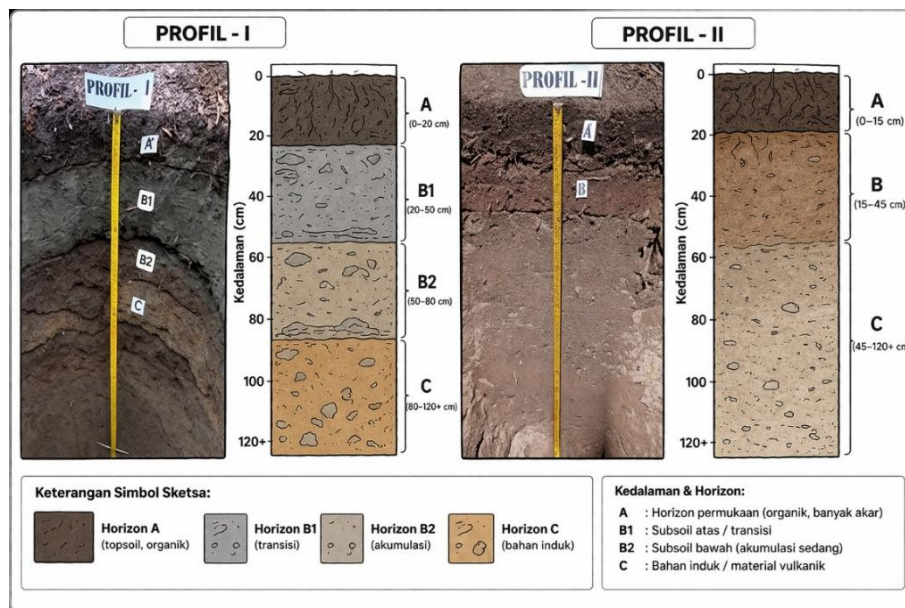
Principal Component Analysis (PCA) digunakan untuk mengidentifikasi pola keterkaitan antarvariabel dan faktor dominan yang mengontrol proses pedogenesis. Sebelum PCA, seluruh variabel numerik distandardisasi agar perbedaan satuan tidak mendominasi struktur komponen utama. PCA digunakan untuk mereduksi kompleksitas data serta mengevaluasi apakah perkembangan sifat kimia, fisik, dan biogeokimia tanah berlangsung sinkron atau menunjukkan ketidaksinkronan pedogenesis. Seluruh hasil analisis diinterpretasikan pada tingkat signifikansi 5% ($p < 0,05$), dengan penekanan pada interpretasi pedologis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan Morfologi Tanah

Dua profil tanah (P1 dan P2) berkembang dari bahan induk vulkanik pada posisi topografi yang berbeda, tetapi keduanya diklasifikasikan sebagai Inceptisol (Humic Dystrudepts). Klasifikasi tersebut menunjukkan tahap perkembangan tanah yang masih muda, dengan diferensiasi horizon yang terbatas dan belum berkembang menjadi horizon diagnostik yang kuat. Karena kedua profil

sama-sama berbahan induk vulkanik, perbedaan morfologi yang muncul lebih tepat dibaca sebagai variasi lokal yang berkaitan dengan posisi lereng, drainase, dan intensitas proses permukaan, bukan sebagai bukti tunggal dominasi topografi atas bahan induk.



Gambar 2. Profil Tanah dan Sketsa Morfologi Horizon pada Dua Lokasi Penelitian

Tanah vulkanik pada tahap awal umumnya memperlihatkan perkembangan struktur dan horizon yang belum sempurna akibat transformasi mineral dan proses pedogenetik lanjutan yang masih terbatas (Dahlgren *et al.*, 2004; Takahashi & Dahlgren, 2016). Karakteristik lokasi, topografi, dan klasifikasi tanah pada dua profil pengamatan disajikan pada **Tabel 1**, sedangkan deskripsi morfologi horizon disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik Lokasi, Topografi, dan Klasifikasi Tanah pada Profil Pengamatan

Kode Pedon	Lokasi (Desa)	Koordinat (N; E)	Elevasi (m dpl)	Kemiringan (%)	Bahan Induk	Klasifikasi Tanah
P1	Mateketen	0°19'43.00" N 127°21'01.8" E	410	8-15	Material vulkanik	Inceptisol (Humic Dystrudepts)
P2	Suma	0°19'08.6" N 127°26'24.4" E	28	15-25	Material vulkanik	Inceptisol (Humic Dystrudepts)

Sumber: Hasil Pengamatan Lapangan, 2025

Berdasarkan **Tabel 2**, kedua profil menunjukkan susunan horizon yang relatif sederhana, yaitu A-B-C, dengan Profil I memiliki diferensiasi subhorizon B1 dan B2. Diferensiasi B1 dan B2 tersebut menunjukkan awal perkembangan horizon bawah, tetapi belum dapat ditafsirkan sebagai horizon diagnostik yang matang. Horizon permukaan (A) pada kedua profil dicirikan oleh warna lebih gelap (7.5YR 2.5/1-3/1), struktur granular, serta konsistensi lekat dan plastis, yang mengindikasikan akumulasi bahan organik dan aktivitas biologis. Dominasi akar halus pada horizon ini memperkuat peran proses biologis dalam pembentukan struktur tanah. Karakteristik morfologi tanah pada kedua profil diamati untuk mengidentifikasi tingkat perkembangan pedogenesis berdasarkan diferensiasi horizon, warna tanah, struktur, konsistensi, perakaran, dan batas horizon.

Tabel 2. Karakteristik morfologi tanah pada profil pengamatan

Profil	Horizon	Kedalaman (cm)	Warna Matriks	Struktur	Konsistensi	Perakaran	Batas Horizon
I	A	0-15	7.5YR 3/1	Sedang-halus-granular	Lembap: lekat, plastis; Basah: agak lekat	Banyak akar halus	Jelas-Bergelombang
	B1	15-50	7.5YR 4/1	Sedang-sedang-subangular blocky	Lembap: lekat, plastis	Sedikit akar halus	Jelas-Bergelombang
	B2	50-70	7.5YR 3/3	Lemah-sedang-subangular blocky	Lembap: agak lekat, agak plastis	Sangat sedikit akar	Jelas-Bergelombang
	C	70-130	7.5YR 4/6	Masif (tanpa struktur nyata)	Tidak lekat, tidak plastis	Tidak dijumpai	Jelas-Rata
II	A	0-12	7.5YR 2.5/1	Sedang-halus-granular	Lembap: lekat, plastis	Banyak akar halus	Jelas-Rata
	B	12-29	7.5YR 4/4	Sedang-sedang-subangular blocky	Lembap: agak lekat, plastis	Sedikit akar	Jelas-Bergelombang
	C	29-137	7.5YR 4/2	Lemah-kasar-granular hingga masif lokal	Tidak lekat, tidak plastis	Sangat sedikit	Jelas-Tidak Teratur

Sumber: Hasil Pengamatan Lapangan, 2025

Pada horizon bawah (B/Bw), struktur berubah menjadi subangular blocky dengan jumlah akar yang semakin berkurang. Perubahan ini menunjukkan awal perkembangan struktur pedogenik dan diferensiasi vertikal sifat tanah, meskipun intensitasnya masih terbatas. Horizon C dicirikan oleh struktur masif atau granular lemah, konsistensi tidak lekat dan tidak plastis, serta akar yang sangat sedikit atau tidak dijumpai. Karakter tersebut menunjukkan bahwa lapisan bawah masih sangat dipengaruhi oleh bahan induk vulkanik dan belum mengalami proses pedogenesis intensif.

Perubahan sifat morfologi dari horizon A hingga C mencerminkan proses pedogenesis bertahap dari permukaan ke bawah (top-down process), terutama melalui akumulasi bahan organik, perkembangan struktur awal, dan penurunan intensitas perakaran. Pola ini sesuai dengan karakteristik Inceptisol yang umumnya menunjukkan perkembangan horizon lemah dan belum mengalami proses pedogenetik lanjut (Soil Survey Staff, 2014). Dengan demikian, perubahan warna, struktur, dan distribusi akar dapat dibaca sebagai jejak pedogenesis awal yang masih lebih kuat pada horizon permukaan dibandingkan horizon bawah (Schaetzl & Thompson, 2015).

Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik tanah merupakan komponen penting dalam menentukan dinamika air, struktur tanah, dan tingkat perkembangan pedogenesis. Parameter tekstur, bulk density (BD), particle density (PD), porositas, infiltrasi, dan retensi air mencerminkan interaksi antara bahan induk dan proses pembentukan tanah. Pada tanah vulkanik muda, sifat fisik sering kali belum berkembang optimal, sehingga analisis distribusi vertikalnya penting untuk mengidentifikasi tingkat diferensiasi dan intensitas pedogenesis, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik sifat fisik tanah pada setiap horizon pada dua profil tanah

Profil	Horizon	Kelas Tekstur	BD (g cm ⁻³)	PD (g cm ⁻³)	Porositas (%)	Infiltrasi (mm jam ⁻¹)	Retensi Air
I	A	Lempung berpasir	1,25 (Sedang)	2,55 (Sedang)	51,0 (Tinggi)	30 (Cepat)	Sedang
	B1	Lempung berpasir	1,30 (Sedang)	2,60 (Tinggi)	50,0 (Tinggi)	25 (Cepat)	Rendah-sedang
	B2	Pasir	1,32 (Sedang)	2,60 (Tinggi)	49,2 (Sedang-tinggi)	40 (Cepat)	Rendah
	C	Lempung berpasir	1,40 (Agak padat)	2,65 (Tinggi)	47,2 (Sedang-tinggi)	20 (Sedang-cepat)	Rendah
II	A	Pasir berlempung	1,27 (Sedang)	2,55 (Sedang)	50,2 (Tinggi)	32 (Cepat)	Sedang
	B	Pasir berlempung	1,30 (Sedang)	2,60 (Tinggi)	50,0 (Tinggi)	28 (Cepat)	Rendah-sedang
	C	Pasir berlempung	1,33 (Sedang)	2,65 (Tinggi)	49,8 (Sedang-tinggi)	24 (Sedang-cepat)	Rendah

Sumber: Hasil analisis laboratorium, 2025

Karakteristik tekstur tanah pada kedua profil yang didominasi fraksi pasir hingga lempung berpasir menunjukkan bahwa kontrol bahan induk masih kuat dan proses pembentukan mineral liat sekunder belum berkembang intensif. Kondisi ini lazim dijumpai pada tanah vulkanik muda yang masih berada pada fase awal pelapukan (Churchman & Lowe, 2012; Anda *et al.*, 2021; Fiantis *et al.*, 2023).

Nilai bulk density (BD) berkisar antara 1,25-1,40 g cm⁻³ dan cenderung meningkat ke arah horizon bawah. Pola ini mencerminkan penurunan kontribusi bahan organik serta peningkatan dominasi fraksi mineral, sehingga tanah menjadi lebih padat secara vertikal (Hassink, 1997; Wiesmeier *et al.*, 2019). Pada horizon permukaan, agregasi tanah lebih dipengaruhi oleh bahan organik dan aktivitas biologis, sedangkan pada horizon bawah struktur tanah masih relatif dikontrol oleh sifat bahan induk (Lehmann & Kleber, 2015).

Nilai particle density (PD) yang relatif stabil dan mendekati nilai mineral, yaitu sekitar 2,55-2,65 g cm⁻³, menunjukkan bahwa komposisi mineral tanah belum banyak mengalami perubahan akibat proses pedogenetik lanjut (Blake & Hartge, 1986; Matus *et al.*, 2019). Hal ini mendukung interpretasi bahwa transformasi mineral sekunder masih terbatas pada kedua profil.

Porositas tanah berkisar antara 47,2-51,0% dan tergolong sedang-tinggi hingga tinggi. Nilai porositas yang lebih tinggi pada horizon permukaan menunjukkan pengaruh aktivitas biologis dan bahan organik terhadap pembentukan ruang pori, sedangkan penurunan ke arah horizon bawah

menunjukkan bahwa diferensiasi struktur secara vertikal masih terbatas (Dexter, 2004; Rabot *et al.*, 2018).

Laju infiltrasi yang tergolong sedang hingga cepat (20-40 mm jam⁻¹) menunjukkan dominasi makropori dan tekstur kasar yang memungkinkan pergerakan air berlangsung cepat ke dalam profil tanah (Rawls *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 2021). Kondisi ini menunjukkan bahwa tanah belum memiliki lapisan pembatas aliran air yang kuat, sehingga redistribusi air masih berlangsung tanpa hambatan struktural yang jelas. Sebaliknya, kemampuan retensi air yang tergolong rendah hingga sedang mencerminkan keterbatasan fraksi liat dan bahan organik dalam menahan air, sehingga kapasitas simpan air tanah belum berkembang optimal (Hudson, 1994; Minasny & McBratney, 2018). Dengan demikian, sifat hidrofisik tanah masih menunjukkan pengaruh kuat tekstur kasar dan bahan induk.

Secara keseluruhan, kombinasi sifat fisik tanah menunjukkan bahwa pedogenesis masih berada pada tahap awal, terutama karena perkembangan struktur tanah, diferensiasi pori, dan transformasi mineral belum berlangsung kuat (Duchaufour, 1998; Egli *et al.*, 2014). Interpretasi ini menjadi dasar untuk membandingkan apakah sifat kimia tanah memperlihatkan sinyal perkembangan yang lebih jelas dibandingkan morfologi dan sifat fisik pada subbab berikutnya.

Sifat Kimia Tanah

Sifat kimia tanah berperan penting dalam mengontrol proses pedogenesis awal di lingkungan vulkanik. Parameter pH, C-organik, bahan organik tanah (SOM), N-total, rasio C/N, dan KTK mencerminkan interaksi antara input bahan organik, proses dekomposisi, dan sumber muatan tanah. Pada sistem tanah muda, parameter kimia tidak selalu berkembang serempak dengan morfologi dan sifat fisik; oleh karena itu, variasi antarhorizon digunakan untuk mengevaluasi arah perkembangan pedogenesis, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik sifat kimia tanah pada setiap horizon

Profil	Horizon	pH (H ₂ O)	C-organik (%)	Bahan Organik (%)	N-total (%)	KTK (cmol(+) kg ⁻¹)	KTK (cmol(+) kg ⁻¹)
P1	A	6,4	2,44	4,21	0,24	10,2	21,95
	B1	6,8	1,55	2,67	0,16	9,7	19,72
	B2	6,6	1,39	2,40	0,12	11,6	16,28
	C	6,5	0,81	1,40	0,09	9,0	18,25
P2	A	6,8	2,02	3,48	0,21	9,6	20,41
	B	6,8	1,57	2,71	0,19	8,3	15,22
	C	7,2	1,34	2,31	0,14	9,6	17,25

Sumber: Hasil analisis laboratorium, 2025

Nilai pH tanah pada kedua profil berkisar antara 6,4-7,2 yang menunjukkan kondisi agak masam hingga netral. Rentang ini mengindikasikan bahwa sistem tanah masih relatif moderat secara kimia dan belum memperlihatkan akumulasi keasaman atau kebasaan yang ekstrem. Pada tanah vulkanik muda, pH seperti ini dapat dipengaruhi oleh bahan induk, proses pelapukan awal, dan kapasitas penyangga yang masih berkembang (Anda *et al.*, 2021; Matus *et al.*, 2024).

Kandungan C-organik dan SOM menunjukkan pola penurunan dari horizon permukaan ke horizon bawah. Nilai tertinggi terdapat pada horizon A, yang mengindikasikan dominasi input

bahan organik dari permukaan dan aktivitas biologis yang lebih intensif. Penurunan ini menunjukkan bahwa translokasi bahan organik ke horizon bawah masih terbatas, sehingga akumulasi karbon terutama terkonsentrasi pada lapisan permukaan (Six *et al.*, 2002; Wiesmeier *et al.*, 2019).

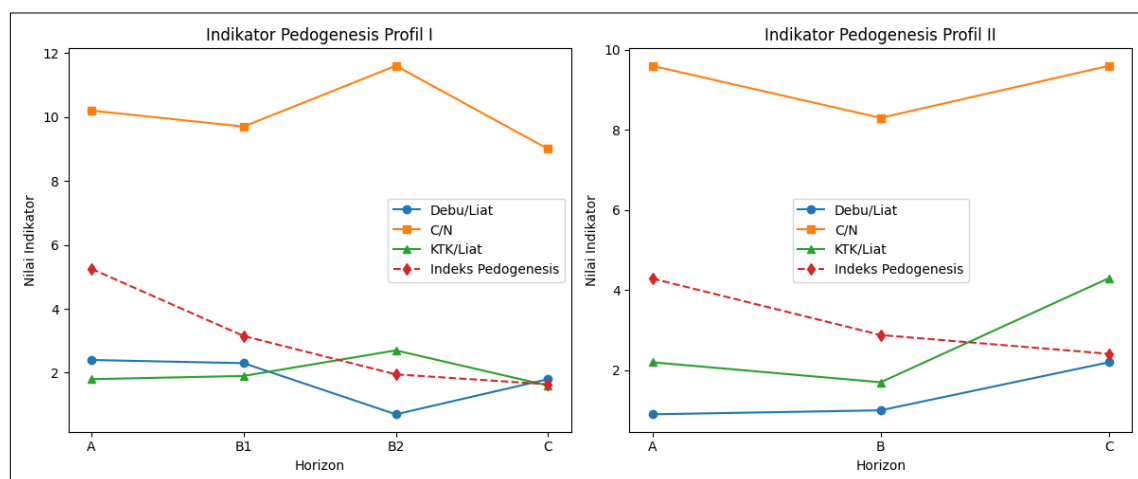
Distribusi N-total mengikuti pola yang relatif serupa dengan C-organik, sehingga nitrogen tanah pada lokasi penelitian tampak berkaitan erat dengan keberadaan bahan organik. Rasio C/N yang relatif sempit (8,3-11,6) menunjukkan bahan organik berada dalam kondisi dekomposisi aktif, meskipun stabilisasi bahan organik belum sepenuhnya seragam antarhorizon (Kirkby *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2022).

Nilai KTK berkisar antara 15,22-21,95 cmol(+) kg⁻¹ dan cenderung lebih tinggi pada horizon permukaan. Namun, nilai KTK pada horizon C yang masih relatif tinggi menunjukkan bahwa KTK tidak hanya dikontrol oleh bahan organik, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh sifat mineral vulkanik, fraksi halus, dan muatan variabel tanah. Oleh karena itu, hubungan antara KTK dan C-organik perlu dibaca sebagai indikasi keterkaitan kimia tanah, bukan sebagai bukti tunggal sumber muatan (Rasmussen *et al.*, 2018; Matus *et al.*, 2019).

Secara keseluruhan, kombinasi parameter kimia menunjukkan bahwa sinyal perkembangan kimia tanah lebih awal terindikasi dibandingkan perkembangan morfologi dan fisik yang masih terbatas. Pola ini mendukung konsep *decoupling pedogenesis*, yaitu ketidaksinkronan antara perkembangan fungsi kimia, diferensiasi morfologi, dan perkembangan sifat fisik pada fase awal pembentukan tanah vulkanik tropis.

Indikator Pedogenesis Awal

Identifikasi jejak pedogenesis awal pada tanah vulkanik tropis memerlukan pendekatan integratif yang menggabungkan indikator morfologi, fisik, dan kimia. Pada penelitian ini, indikator utama meliputi perkembangan struktur tanah, rasio C/N, KTK, rasio debu/liat, rasio KTK/liat, dan indeks pedogenesis komposit operasional. Pendekatan ini digunakan untuk membaca pola perkembangan tanah secara vertikal, bukan untuk menetapkan indeks universal pedogenesis.



Gambar 3. Variasi Nilai Indikator Pedogenesis pada Setiap Horizon Profil I dan Profil II

Pola indikator pedogenesis pada kedua profil menunjukkan ketidaksinkronan perkembangan antarparameter, yang mencerminkan bahwa proses pedogenesis masih berada pada tahap awal dan belum sepenuhnya terintegrasi secara vertikal. Pada Profil I, rasio debu/liat relatif stabil pada horizon A-B1, menurun pada horizon B2, kemudian meningkat pada horizon C. Pola ini menunjukkan bahwa distribusi fraksi halus belum sepenuhnya dikontrol oleh pelapukan in situ, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh heterogenitas material vulkanik lokal (Egli *et al.*, 2014; Fiantis *et al.*, 2023).

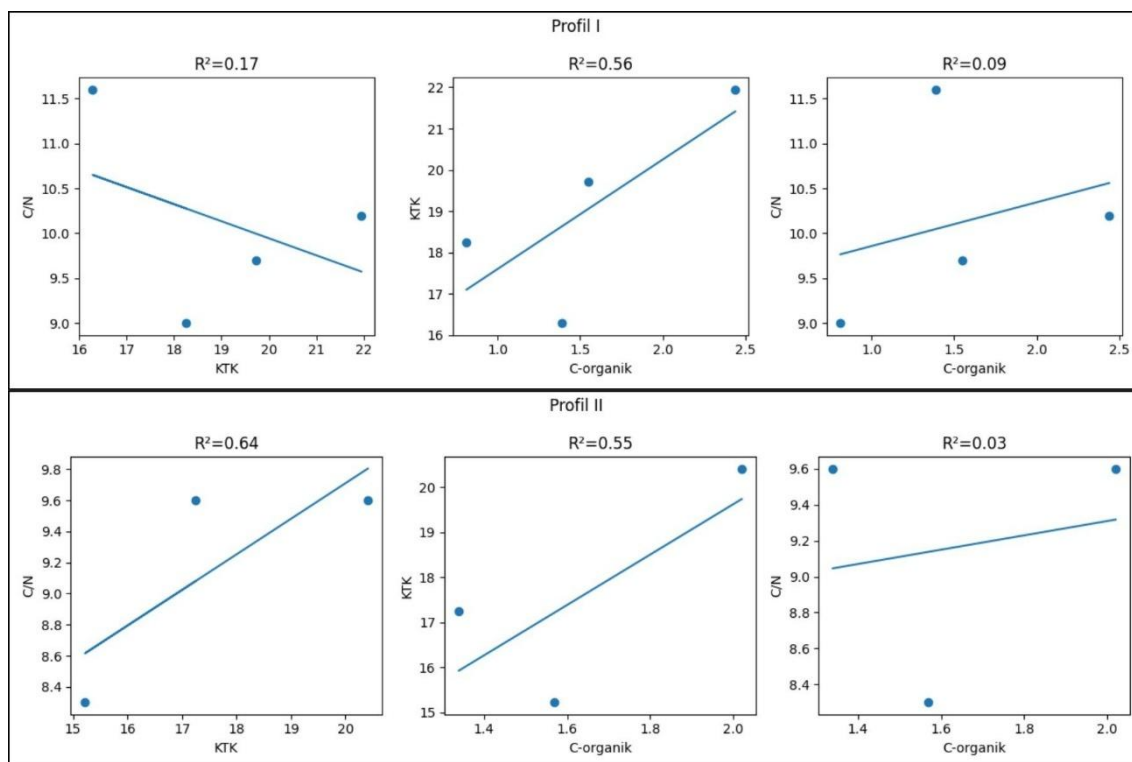
Rasio KTK/liat pada Profil I meningkat pada horizon B2, yang mengindikasikan bahwa KTK tidak semata-mata dipengaruhi oleh fraksi liat, tetapi juga oleh kontribusi bahan organik dan muatan variabel tanah. Indeks pedogenesis komposit pada Profil I menurun dari horizon A ke C, menunjukkan bahwa intensitas perkembangan tanah lebih kuat pada horizon permukaan. Pola ini mencerminkan dominasi proses top-down, terutama akumulasi bahan organik dan aktivitas biologis pada fase awal pedogenesis.

Pada Profil II, rasio debu/liat cenderung meningkat ke arah bawah, sehingga distribusi fraksi halus kemungkinan dipengaruhi oleh variasi deposisional atau perbedaan lokal material induk, bukan hanya pelapukan in situ. Rasio C/N relatif stabil dengan sedikit penurunan pada horizon B, yang mengindikasikan proses dekomposisi bahan organik lebih homogen dibandingkan Profil I. Peningkatan rasio KTK/liat pada horizon C tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai bukti mineral amorf karena penelitian ini tidak melakukan analisis XRD, alofan-imogolit, atau ekstraksi oksalat; pola tersebut lebih aman ditafsirkan sebagai indikasi adanya variasi sumber muatan yang masih perlu dikonfirmasi dengan data mineralogi.

Secara keseluruhan, perbedaan pola antarindikator dan antarprofil menunjukkan bahwa pedogenesis tidak berlangsung seragam, melainkan dikontrol oleh interaksi antara bahan induk, proses biologis, posisi lereng, dan kondisi mikro lingkungan. Ketidaksinkronan antarindikator ini menguatkan konsep *decoupling pedogenesis*, yaitu perkembangan sifat kimia, fisik, dan biogeokimia yang tidak terjadi secara bersamaan pada tanah vulkanik muda. Dengan demikian, dominasi proses biologis dan organo-mineral pada penelitian ini merupakan interpretasi berbasis indikator kimia dan morfologi, bukan kesimpulan mineralogi langsung.

Integrasi dan Analisis Statistik

Hubungan antarparameter kimia tanah tidak selalu mencerminkan keterkaitan proses pedogenetik yang terintegrasi, terutama pada tanah dengan tingkat perkembangan awal. Oleh karena itu, regresi linier digunakan secara eksploratif untuk menguji apakah C-organik, KTK, dan rasio C/N menunjukkan arah hubungan yang konsisten. Karena jumlah titik data terbatas, hasil regresi tidak diposisikan sebagai bukti kausal, tetapi sebagai pendukung interpretasi pedologis mengenai kemungkinan *decoupling pedogenesis*.



Gambar 4. Hubungan Antarparameter Kimia Tanah Berdasarkan Analisis Regresi Linier Eksploratif

Hasil analisis regresi pada Profil I menunjukkan kekuatan hubungan linier yang berbeda antarparameter kimia. Hubungan antara C-organik dan KTK menunjukkan koefisien determinasi moderat ($R^2 = 0,56$), yang mengindikasikan bahwa variasi KTK berkaitan dengan perubahan C-organik. Namun, nilai ini tidak secara otomatis membuktikan mekanisme kausal karena KTK juga dapat dipengaruhi oleh fraksi halus, sifat mineral vulkanik, dan muatan variabel tanah (Rasmussen *et al.*, 2018; Matus *et al.*, 2019).

Sebaliknya, hubungan antara KTK dan rasio C/N pada Profil I menunjukkan nilai R^2 rendah ($R^2 = 0,17$), sedangkan hubungan antara C-organik dan rasio C/N juga rendah ($R^2 = 0,09$). Pola ini menunjukkan bahwa dinamika dekomposisi bahan organik dan pembentukan muatan tanah tidak menunjukkan hubungan linier yang kuat pada tahap pedogenesis awal. Dengan demikian, peningkatan karbon organik tidak selalu diikuti perubahan rasio C/N yang konsisten, karena kualitas bahan organik, tingkat dekomposisi, dan kondisi mikro lingkungan turut memengaruhi pola tersebut (Kirkby *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2022).

Pada Profil II, hubungan C-organik dan KTK juga menunjukkan kekuatan moderat ($R^2 = 0,55$), sedangkan hubungan KTK dan rasio C/N lebih tinggi ($R^2 = 0,64$) dibandingkan Profil I. Namun, hubungan C-organik dan rasio C/N tetap sangat lemah ($R^2 = 0,03$). Perbedaan ini menegaskan bahwa hubungan antarparameter kimia tidak konsisten antarprofil, sehingga proses pedogenesis kimia belum sepenuhnya terintegrasi secara vertikal maupun spasial pada lokasi pengamatan.

Secara keseluruhan, hasil statistik menunjukkan bahwa sebagian hubungan kimia bersifat moderat, tetapi sebagian lainnya lemah atau tidak konsisten. Pola ini memperkuat interpretasi bahwa pedogenesis pada lokasi penelitian belum mencapai kondisi perkembangan yang stabil, sehingga interaksi antarparameter kimia masih parsial. Kondisi tersebut mendukung konsep *decoupling pedogenesis*, yaitu ketidaksinkronan perkembangan antara proses kimia, biogeokimia, morfologi, dan fisik tanah pada Inceptisol vulkanik muda (Egli *et al.*, 2014; Rasmussen *et al.*, 2018).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa Inceptisol berbahan induk material vulkanik di Pulau Makian, Maluku Utara masih berada pada tahap pedogenesis awal. Hal tersebut ditandai oleh diferensiasi horizon yang lemah, perkembangan struktur yang terbatas, dominasi pengaruh bahan induk terhadap sifat fisik, serta pola morfologi A-B-C yang belum menunjukkan horizon diagnostik kuat. Sebaliknya, sifat kimia tanah, terutama C-organik dan KTK, menunjukkan gradien vertikal yang lebih jelas pada horizon permukaan. Hubungan antarparameter kimia tidak menunjukkan hubungan linier yang kuat dan konsisten pada semua pasangan variabel, sehingga mengindikasikan adanya *decoupling pedogenesis* atau ketidaksinkronan pedogenesis antara perkembangan fungsi kimia, diferensiasi morfologi, dan sifat fisik tanah. Temuan ini memberikan kontribusi konseptual bahwa evolusi tanah vulkanik tropis pada fase awal tidak selalu mengikuti lintasan linier dan sinkron, tetapi dapat berkembang melalui proses organo-mineral dan biologis permukaan yang lebih cepat terindikasi dibandingkan diferensiasi horizon secara morfologis.

DAFTAR PUSTAKA

- Anda, M., & Dahlgren, R. A. (2020). Mineralogical and surface charge characteristics of Andosols experiencing long-term land-use change in West Java, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(5), 702-713. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1820758>
- Anda, M., Suryani, E., & Subardja, D. (2021). Properties and classification of volcanic soils in Indonesia. *Geoderma*, 391, 114741. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114741>
- Anindita, S., Finke, P., & Sleutel, S. (2023). Tropical Andosol organic carbon quality and degradability in relation to soil geochemistry as affected by land use. *SOIL*, 9, 443-459. <https://doi.org/10.5194/soil-9-443-2023>
- Beckford, H. O., Chang, C., & Ji, H. (2023). Elemental behavior during weathering and pedogenesis of clay-rich red soils developed in different lithologies in Java-Madura and Sulawesi in Indonesia. *Sustainability*, 15(6), 4936. <https://doi.org/10.3390/su15064936>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., pp. 377-382). ASA and SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
- Campan, P., Samouelian, A., Richard, A., Sandrine, N., Lagacherie, M., & Voltz, M. (2024). Pedological factors affecting pesticide retention in a series of tropical volcanic ash soils in the French West Indies. *Geoderma Regional*, 38, e00830. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00830>

- Chen, J., Luo, Y., Xia, J., Jiang, L., Zhou, X., & Wang, Y. (2022). Nitrogen dynamics and mineralization processes in soil ecosystems. *Science of the Total Environment*, 806, 154875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154875>
- Churchman, G. J., & Lowe, D. J. (2012). Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils derived from volcanic materials. *Clay Minerals*, 47(3), 325-347. <https://doi.org/10.1180/claymin.2012.047.3.01>
- Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., & Keller, T. (2019). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth. *European Journal of Soil Science*, 70(4), 683-695. <https://doi.org/10.1111/ejss.12749>
- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., & Ugolini, F. C. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy*, 82, 113-182. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>
- Duchaufour, P. (1998). *Handbook of Pedology: Soils, Vegetation, Environment*. A. A. Balkema.
- Egli, M., Dahms, D., Norton, K., & Fitze, P. (2014). Soil formation and weathering rates on silicate parent material. *Geoderma*, 213, 473-484. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.013>
- Fiantis, D., Nelson, M., Shamshuddin, J., Van Ranst, E., & Qafoku, N. P. (2023). Soil development and weathering processes in volcanic ash soils. *Catena*, 226, 106834. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106834>
- Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 191, 77-87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
- Hudson, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2), 189-194. <https://doi.org/10.1080/00224561.1994.12456850>
- Iqbal, P., Muslim, D., & Zakaria, Z. (2021). Tropical volcanic residual soil. In *Tropical Soil Science*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98285>
- Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Batten, G. D., Blanchard, C., & Kirkegaard, J. A. (2013). Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.012>
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528, 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Matus, F., Rumpel, C., & Neculman, R. (2019). Soil organic carbon stabilization in volcanic soils. *Geoderma*, 338, 480-490. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113912>
- Matus, F., Salazar, O., Aburto, F., Zamorano, D., Nájera, F., Jovanović, R., Guerra, C., Reyes-Rojas, L., Seguel, O., Pfeiffer, M., Dörner, J., Valle, S., Radic-Schilling, S., & Duarte, E. (2024). Perspective of soil carbon sequestration in Chilean volcanic soils. *npj Materials Sustainability*, 2(1), 38. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00038-4>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *Geoderma*, 330, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.012>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions. *Soil and Tillage Research*, 189, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W. R., Keiluweit, M., Lawrence, C. R., Berhe, A. A., Blankinship, J. C., Crow, S. E., Druhan, J. L., Hicks Pries, C. E., Marin-Spiotta, E., Plante, A. F., Schädel, C., Schimel, J. P., Sierra, C. A., Thompson, A., & Wagai, R. (2018). Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry*, 137(3), 297-306. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>
- Rawls, W. J., Ahuja, L. R., Brakensiek, D. L., & Shirmohammadi, A. (1993). Infiltration and soil water movement. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology* (pp. 5.1-5.51). McGraw-Hill.
- Schaetzl, R. J., & Thompson, M. L. (2015). *Soils: Genesis and Geomorphology* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139061803>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter. *Plant and Soil*, 241, 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed.). USDA Natural Resources Conservation Service.

- Soil Survey Staff. (2017). Soil Survey Manual. USDA Handbook No. 18. USDA Natural Resources Conservation Service.
- Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy (13th ed.). USDA Natural Resources Conservation Service.
- Takahashi, T., & Dahlgren, R. A. (2016). Nature, properties and function of aluminum-humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*, 263, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.032>
- Tamrat, W. Z., Rose, J., Grauby, O., Doelsch, E., Levard, C., Chaurand, P., Basile-Doelsch, I., & Basile-Doelsch, I. (2019). Soil organo-mineral associations formed during pedogenesis in volcanic soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 260, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.05.043>
- Wagai, R., Kajiura, M., Asano, M., & Hiradate, S. (2020). Nature of soil organo-mineral assemblage examined by sequential density fractionation and infrared spectroscopy. *Geoderma*, 361, 114056.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., Lützow, M., Marin-Spiotta, E., Wesemael, B., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage and drivers. *Global Change Biology*, 25, 113-128. <https://doi.org/10.1111/gcb.14496>
- Zhang, Y., Shao, M., & Horton, R. (2021). Soil infiltration characteristics and modeling. *Journal of Hydrology*, 593, 126192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126192>