



Morfologi dan Klasifikasi Tanah Typic Distrudept Berdasarkan Soil Taxonomy di Desa Geuntuet, Aceh Besar

R Ayu Chairunnisya^{1*}, Retno Leodita Lubis², Teti Arabia³, Laila Wijaya⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

*Corresponding Author: r.ayuchairunnisya@usk.ac.id

Riwayat Artikel

Diterima: 27/01/2026

Direvisi: 23/02/2026

Diterbitkan: 08/03/2026

Kata Kunci:

Aceh Besar, Inceptisol, Klasifikasi Tanah, Morfologi Tanah, Typic Distrudepts

Abstrak

Morfologi dan klasifikasi tanah merupakan dasar penting dalam memahami sifat tanah dan potensi sumber daya lahan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik morfologi profil tanah serta menentukan klasifikasi tanah berdasarkan Soil Taxonomy. Pengamatan dilakukan pada satu profil tanah di Desa Geuntuet, Kecamatan Lhoong, Kabupaten Aceh Besar, melalui deskripsi morfologi lapangan yang meliputi horizon tanah, warna, tekstur, struktur, konsistensi, dan sifat diagnostik lainnya. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa tanah memiliki perkembangan horizon sedang dengan tekstur lempung berliat, struktur gumpal, serta ciri khas tanah muda berkembang. Berdasarkan karakteristik tersebut, tanah diklasifikasikan ke dalam ordo Inceptisols, subordo Udepts, great group Distrudepts, dan subgroup Typic Distrudepts. Tanah ini termasuk dalam kelas ukuran butir lempung berliat halus, kelas mineralogi campuran, dengan rezim suhu isohipertermik. Secara pedogenetik, klasifikasi sebagai Typic Distrudepts mengindikasikan sifat tanah yang relatif masam dan kejenuhan basa rendah, sehingga pengelolaan lahan untuk pengembangan tanaman nilam memerlukan perhatian terhadap perbaikan reaksi tanah melalui pengapuran serta penambahan bahan organik guna meningkatkan ketersediaan hara dan efisiensi pemupukan. Hasil penelitian ini memberikan informasi dasar mengenai karakteristik tanah setempat yang dapat dimanfaatkan sebagai acuan awal dalam pengelolaan dan perencanaan pemanfaatan lahan di wilayah Aceh Besar.

Abstract

Soil morphology and classification are fundamental for understanding soil properties and land resource potential. This study aimed to identify soil profile morphological characteristics and determine soil classification based on Soil Taxonomy. Observations were conducted on a single soil profile in Geuntuet Village, Lhoong Subdistrict, Aceh Besar Regency, using field morphological descriptions including soil horizons, color, texture, structure, consistency, and other diagnostic features. The results indicate that the soil exhibits moderate horizon development, clay loam texture, blocky structure, and characteristics typical of weakly developed soils. Based on these properties, the soil was classified into the order Inceptisols, suborder Udepts, great group Distrudepts, and subgroup Typic Distrudepts. The soil belongs to the fine clay loam particle-size class, mixed mineralogy class, and has an isohyperthermic temperature regime. These findings provide baseline information on local soil characteristics that can serve as an initial reference for land management and land use planning in Aceh Besar.

Keywords: Aceh Besar, Inceptisol, soil classification, soil morphology, Typic Distrudepts

PENDAHULUAN

Tanah memiliki peranan fundamental dalam menopang keberlanjutan lingkungan, khususnya sistem pertanian, sehingga pemahaman terhadap karakteristik morfologi dan klasifikasinya menjadi prasyarat utama dalam pengelolaan lahan yang berkelanjutan. Morfologi

tanah merefleksikan integrasi sifat fisik, kimia, dan biologi yang terbentuk melalui proses pedogenesis, sedangkan klasifikasi tanah berfungsi mengelompokkan tanah secara sistematis berdasarkan sifat-sifat tersebut. Gyasi & Swarnalatha (2023) menunjukkan bahwa klasifikasi tanah yang akurat meningkatkan efektivitas pengelolaan lahan dan mendukung pengambilan keputusan agronomis yang lebih tepat. Sejalan dengan hal tersebut, studi pada lahan pertanian pesisir oleh Rahmawati & Khumairah (2023) melaporkan bahwa respons tanah terhadap amelioran sangat dipengaruhi oleh kondisi awal sifat tanah, khususnya salinitas dan reaksi tanah, yang secara langsung menentukan keberhasilan pengelolaan dan pertumbuhan tanaman. Temuan ini menegaskan bahwa pemahaman karakteristik tanah merupakan dasar penting sebelum penerapan praktik pengelolaan atau intervensi teknis di lahan pertanian.

Karakteristik morfologi tanah, seperti susunan horizon, warna, tekstur, struktur, dan konsistensi, merupakan indikator utama yang mencerminkan tingkat perkembangan serta fungsi tanah. Evaluasi morfologi memungkinkan identifikasi awal terhadap potensi dan keterbatasan tanah dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Ramadhany & Budijastuti (2021) melaporkan bahwa praktik pengelolaan tanah yang mempertimbangkan karakteristik morfologi, termasuk pemupukan yang tepat, mampu memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kesuburan. Deskripsi morfologi tanah tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga menjadi dasar analitis dalam merancang strategi pengelolaan lahan yang lebih efektif.

Selain mendukung perencanaan pengelolaan lahan, evaluasi morfologi tanah berperan penting dalam mendeteksi potensi degradasi dan penurunan kualitas tanah akibat pemanfaatan lahan yang tidak sesuai. Sari *et al.* (2024) melaporkan bahwa tanah Inceptisol yang dikelola secara berkelanjutan tanpa pendekatan pengelolaan yang tepat cenderung mengalami penurunan kesuburan, sehingga memerlukan perbaikan sifat kimia, fisik, dan biologi tanah. Hal ini menunjukkan bahwa tanah dengan tingkat perkembangan sedang memiliki kerentanan tertentu terhadap degradasi, sehingga pemahaman mendalam terhadap karakteristik morfologinya menjadi kunci dalam menjaga produktivitas dan keberlanjutan lahan pertanian. Pentingnya pemahaman sifat tanah sebagai media tumbuh juga ditunjukkan oleh penelitian pada pembibitan kelapa sawit, di mana variasi komposisi media tanam berbasis tanah pucuk yang dikombinasikan dengan bahan organik menghasilkan respons pertumbuhan yang berbeda, menegaskan bahwa karakteristik tanah awal berperan mendasar dalam mendukung keberhasilan sistem budidaya sebelum penerapan input pengelolaan lainnya (Solihin *et al.*, 2024).

Dalam kerangka tersebut, *Soil Taxonomy* yang dikembangkan oleh United States Department of Agriculture (USDA) menyediakan sistem klasifikasi tanah yang berbasis pada karakteristik morfologi, fisik, dan kimia tanah. Sistem ini mengorganisasikan tanah ke dalam hierarki taksonomi mulai dari Order hingga Series, yang mencerminkan proses pedogenesis dan tingkat keseragaman sifat tanah. Maynard *et al.* (2020) menekankan bahwa pada tingkat seri, perbedaan tanah tidak hanya didasarkan pada sifat taksonomi, tetapi juga pada implikasi pengelolaan lahan. Selain itu, Obi *et al.* (2020) menyatakan bahwa klasifikasi tanah yang sistematis memungkinkan pemisahan unit tanah yang heterogen menjadi satuan yang lebih homogen, sehingga mendukung interpretasi sifat tanah dan perencanaan pengelolaan lahan yang lebih presisi.

Desa Geunteut, Kecamatan Lhoong, Kabupaten Aceh Besar, merupakan wilayah dengan potensi pengembangan agribisnis, khususnya untuk komoditas nilam yang bernilai ekonomi

tinggi (Sahla *et al.*, 2024). Peningkatan minat terhadap budidaya nilam di wilayah ini menuntut ketersediaan informasi kesesuaian lahan yang akurat, mengingat tanaman nilam sensitif terhadap kondisi reaksi tanah, drainase, dan ketersediaan unsur hara basa. Pengembangan komoditas tanpa dukungan data pedologis yang memadai berpotensi menimbulkan ketidaksesuaian antara karakteristik tanah dan strategi pengelolaan yang diterapkan, yang pada akhirnya dapat memengaruhi produktivitas dan efisiensi input pertanian. Hingga saat ini, informasi terperinci mengenai karakteristik morfologi dan klasifikasi tanah di wilayah ini masih terbatas dan belum terdokumentasi secara sistematis. Keterbatasan data pedologis tersebut berpotensi menghambat perencanaan pengelolaan lahan yang berbasis pada potensi dan keterbatasan tanah setempat. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi relevan dan mendesak untuk menyediakan informasi pedologis awal melalui identifikasi karakteristik morfologi profil tanah serta penentuan klasifikasi tanah berdasarkan *Soil Taxonomy* sebagai landasan dalam perencanaan pengelolaan lahan yang berkelanjutan dan berbasis potensi lokal.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Desa Geunteut, Kecamatan Lhoong, Kabupaten Aceh Besar (5°15' LU; 95°15' BT) pada bulan Oktober 2025. Wilayah penelitian merupakan kawasan dengan kondisi topografi relatif beragam yang dipengaruhi oleh faktor geomorfologi setempat. Sebelum pembukaan profil utama, dilakukan survei pendahuluan melalui pengeboran tanah pada beberapa titik untuk mengidentifikasi keseragaman morfologi permukaan dan menentukan lokasi yang dianggap mewakili satuan lahan dominan di area budidaya. Profil tanah yang dipilih merupakan lokasi dengan penggunaan lahan homogen dan karakter fisiografi yang paling luas dijumpai di wilayah penelitian, sehingga secara spasial dianggap representatif terhadap kondisi tanah setempat.

Bahan yang digunakan meliputi larutan H_2O_2 untuk identifikasi keberadaan bahan organik tanah, larutan HCl untuk pengujian kandungan karbonat, serta formulir pengamatan lapangan. Peralatan yang digunakan antara lain bor tanah, cangkul, pisau, meteran, kertas penanda, spidol permanen, *Soil Munsell Color Chart*, pH meter, botol kocok untuk uji tekstur lapangan, plastik sampel, dan alat tulis.

Penelitian dilakukan melalui pembukaan satu profil tanah hingga kedalaman $\pm 1,0$ – $1,5$ m atau sampai mencapai lapisan pembatas. Pengeboran awal dilakukan pada beberapa titik hingga kedalaman ± 20 cm sebagai survei eksploratif untuk memastikan keseragaman lapisan atas sebelum penentuan lokasi profil utama. Pengamatan morfologi dilakukan secara sistematis pada setiap horizon yang teridentifikasi, meliputi ketebalan horizon, batas horizon, warna (kondisi lembap), tekstur lapangan, struktur, serta ciri diagnostik lainnya.

Sampel tanah diambil dari setiap horizon untuk keperluan dokumentasi dan analisis pendukung. Sampel yang dikumpulkan merupakan sampel terganggu (*disturbed samples*) yang digunakan untuk verifikasi tekstur lapangan dan pengamatan sifat fisik dasar. Penetapan klasifikasi tanah dilakukan berdasarkan karakteristik morfologi lapangan dengan mengacu pada *Key to Soil Taxonomy* melalui pencocokan sifat diagnostik yang teramati dengan kriteria taksonomi yang berlaku. Mengingat penelitian ini bersifat deskriptif–eksploratif berbasis karakterisasi morfologi, klasifikasi ditetapkan berdasarkan indikator morfologi dan sifat fisik yang dapat diamati secara langsung di lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

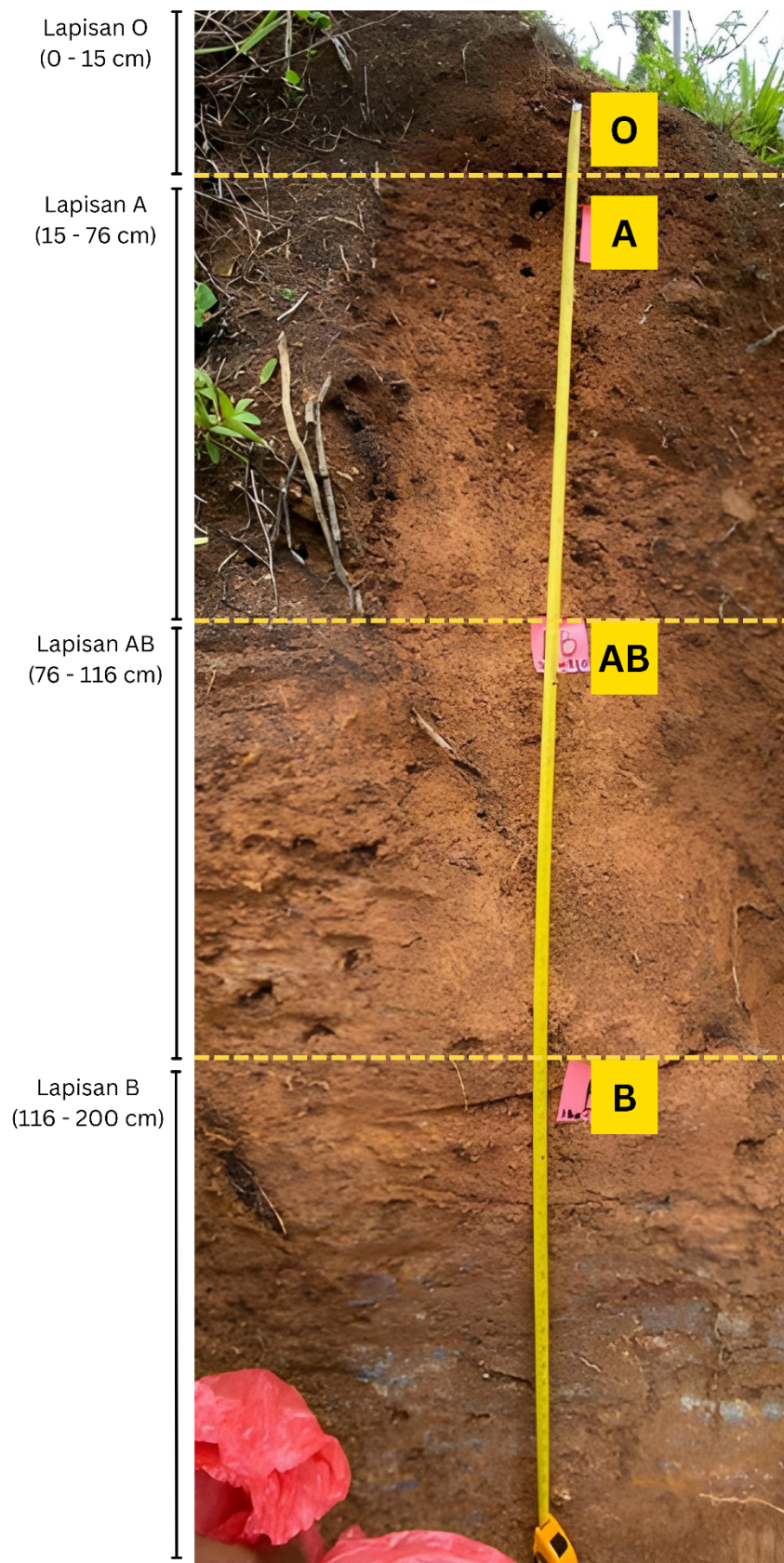
Karakteristik Morfologi Tanah

Hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa tanah di lokasi penelitian memiliki tekstur lempung dengan kelas butir berlempung halus dan struktur gumpal. Warna tanah dominan adalah 10YR 5/6 (*yellowish brown*), yang mencerminkan kondisi aerasi relatif baik dan tidak menunjukkan indikasi genangan permanen. Reaksi tanah bersifat masam dengan nilai pH sekitar 5,5, kandungan bahan organik tergolong rendah (<2%), serta tidak dijumpai keberadaan karbonat. Secara umum, sifat-sifat tersebut mencirikan tanah mineral dengan tingkat pelapukan sedang dan kapasitas penyangga hara yang relatif terbatas.

Profil tanah memperlihatkan diferensiasi horizon yang jelas antara lapisan permukaan dan lapisan bawah (Gambar 1). Keberadaan horizon bawah dengan perubahan warna dan struktur dibandingkan horizon di atasnya menunjukkan bahwa proses pedogenesis telah berlangsung, meskipun belum berkembang secara lanjut (Winarso, 2021). Kondisi ini mencerminkan tanah dengan tingkat perkembangan sedang yang umum dijumpai pada lingkungan beriklim lembap (Ferdeanty *et al.*, 2020).

Tekstur lempung dengan kelas butir berlempung halus yang dijumpai pada tanah lokasi penelitian menunjukkan dominasi fraksi halus yang berperan penting dalam kapasitas menahan air dan hara. Kombinasi tekstur tersebut dengan struktur gumpal mengindikasikan terbentuknya agregat tanah akibat proses pedogenesis, meskipun stabilitas agregatnya masih terbatas. Menurut Franzluebbers (2022) struktur gumpal umumnya berkembang pada tanah mineral dengan aktivitas biologis sedang, namun kestabilannya sangat dipengaruhi oleh kandungan bahan organik tanah. Rendahnya bahan organik pada tanah penelitian ini (<2%) berpotensi membatasi kekuatan agregat dan meningkatkan kerentanan terhadap degradasi struktur. Penelitian menunjukkan bahwa tanah dengan kandungan bahan organik yang lebih tinggi memiliki resistansi yang lebih besar terhadap disintegrasi saat terpapar air atau gangguan mekanis, seperti yang ditunjukkan oleh tingkat agregat yang stabil terhadap air yang lebih tinggi (Zhou *et al.*, 2020).

Warna tanah 10YR 5/6 (*yellowish brown*) mencerminkan kondisi aerasi tanah yang relatif baik serta dominasi proses oksidatif, khususnya pada senyawa besi. Warna kuning kecokelatan pada tanah mineral umumnya dikaitkan dengan keberadaan oksida besi berhidrat, terutama geotit, yang terbentuk melalui proses pelapukan pada lingkungan dengan drainase memadai dan kondisi aerobik yang stabil. Chiapini *et al.* (2021) menunjukkan bahwa dominasi geotit terhadap hematit sering menghasilkan warna tanah dalam rentang 10YR, yang lazim dijumpai pada tanah dengan drainase baik dan tanpa pengaruh genangan berkepanjangan. Kondisi tersebut sejalan dengan lingkungan beriklim lembap, di mana proses pelapukan intensif mendorong pembentukan mineral liat dan oksida besi tertentu yang mencerminkan stabilitas aerasi tanah (Pospíšilová *et al.*, 2020).



Gambar 1. Penampang profil tanah yang menunjukkan diferensiasi epipedon permukaan dan horizon kambik di lokasi penelitian

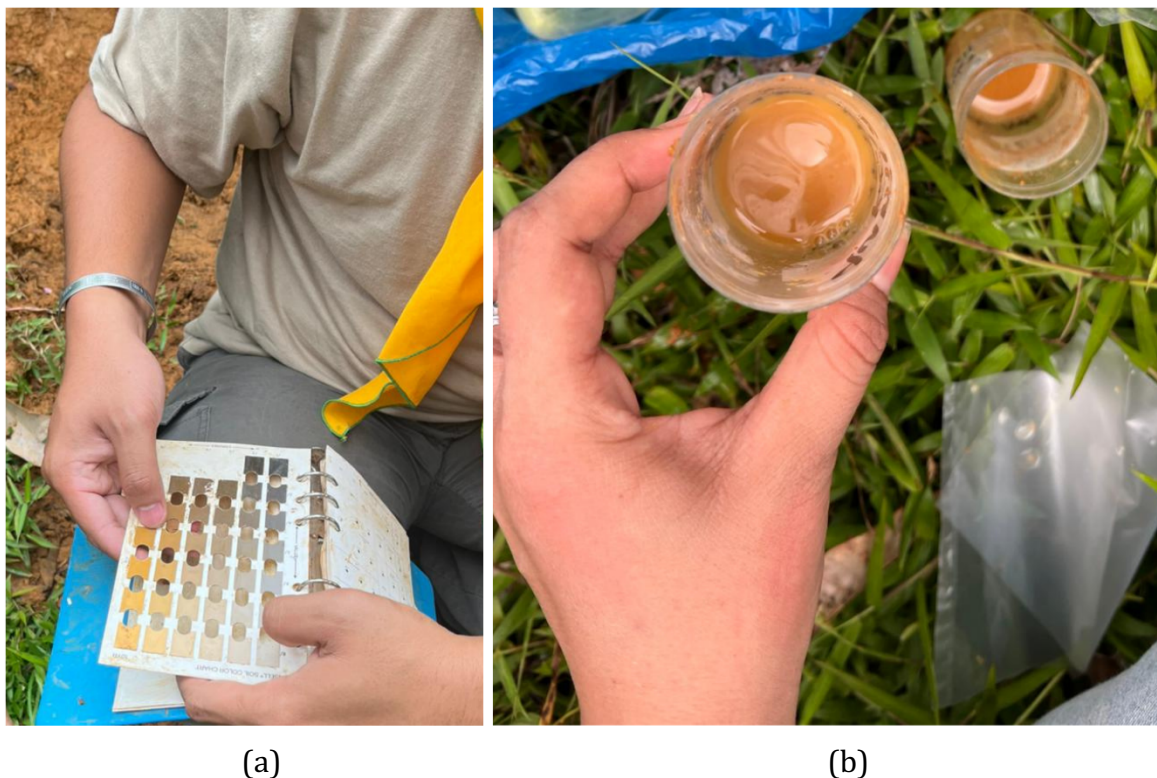
Tidak ditemukannya bercak kelabu atau karatan pada profil tanah semakin memperkuat indikasi bahwa proses hidromorfik tidak berperan dominan dalam pembentukan tanah di lokasi penelitian. Pada tanah dengan drainase buruk, reduksi–oksidasi besi umumnya menghasilkan pola warna kontras akibat akumulasi seskuioksida atau pembentukan bercak redoks, yang tidak dijumpai pada profil tanah penelitian ini. Kefas *et al.* (2020) menegaskan bahwa perbedaan warna yang jelas antar horizon, tanpa indikasi bercak hidromorfik, mencerminkan kondisi drainase yang baik dan proses oksidatif yang berkelanjutan. Kondisi drainase yang memadai tidak hanya berimplikasi pada pembentukan warna tanah, tetapi juga mendukung aktivitas biologis tanah dan respirasi aerobik, yang berkontribusi terhadap stabilitas struktur tanah dan kesehatan ekosistem tanah secara keseluruhan (Aguado-Norese *et al.*, 2023).

Reaksi tanah yang bersifat masam ($\text{pH} \pm 5,5$) mencerminkan berlangsungnya proses pelindian basa yang relatif intensif, sejalan dengan kondisi iklim lembap yang mendukung pencucian kation-kation basa seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^{+} dari profil tanah. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa proses pencucian hara pada Distrudept menyebabkan dominasi Aluminium (Al^{3+}) dan Hidrogen (H^{+}) yang dapat dipertukarkan, sehingga pH tanah umumnya berada pada kisaran masam hingga sangat masam dan berpotensi membatasi kesuburan tanah (Patra *et al.*, 2022). Temuan serupa dilaporkan pada Distrudept dan Cambisol Dystric di wilayah tropis lembap lintas benua, seperti Brasil dan Malaysia, yang secara konsisten menunjukkan pH rendah, kejenuhan basa di bawah ambang sedang, serta dominasi Al^{3+} sebagai kation pertukaran utama (Vilela *et al.*, 2019; Skorupa *et al.*, 2017; Shamshuddin *et al.*, 2017).

Tidak ditemukannya karbonat pada profil tanah penelitian ini semakin menguatkan interpretasi bahwa tanah berkembang pada lingkungan dengan proses pencucian aktif dan suplai basa yang terbatas. Meskipun variasi sifat kimia Distrudept dapat terjadi akibat perbedaan bahan induk atau praktik pengelolaan, beberapa studi menunjukkan bahwa tanpa ameliorasi berkelanjutan, sifat masam dan kejenuhan basa rendah cenderung kembali dominan akibat proses pelindian alami yang terus berlangsung pada tanah Inceptisol yang masih aktif berkembang (Patra *et al.*, 2023).

Horizon Diagnostik dan Sifat Penciri

Profil tanah yang diamati memiliki epipedon okrik pada lapisan permukaan. Epipedon ini dicirikan oleh warna relatif cerah, ketebalan terbatas, serta kandungan bahan organik rendah, sehingga tidak memenuhi kriteria epipedon molik maupun umbrik. Penentuan warna tanah dilakukan menggunakan *Soil Munsell Color Chart* dan menunjukkan warna 10YR 5/6 (*yellowish brown*), yang mengindikasikan kondisi drainase dan aerasi tanah yang relatif baik (Gambar 2a).



Gambar 2. Penentuan warna tanah menggunakan *Soil Munsell Color Chart* pada pengamatan lapangan (a) dan Pengujian lapangan kandungan bahan organik menggunakan H_2O_2 dan kandungan karbonat menggunakan HCl pada sampel tanah (b).

Keberadaan epipedon okrik pada lapisan permukaan menunjukkan bahwa tanah belum mengalami akumulasi bahan organik yang memadai untuk membentuk epipedon molik atau umbrik. Epipedon okrik umumnya dicirikan oleh warna relatif cerah, ketebalan terbatas, serta kandungan bahan organik yang rendah, sehingga mencerminkan tingkat pengayaan organik yang masih minimal. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa epipedon okrik berkembang pada tanah mineral dengan input bahan organik rendah atau laju dekomposisi yang relatif cepat, sehingga akumulasi bahan organik tidak berlangsung secara signifikan (Raziah *et al.*, 2020). Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh keterbatasan penutup vegetasi, aktivitas biologis yang tidak intensif, maupun faktor lingkungan yang membatasi penimbunan bahan organik di lapisan permukaan tanah (Kawalko *et al.*, 2021).

Selain itu, pembentukan epipedon okrik juga berkaitan erat dengan keseimbangan antara rezim kelembapan, suhu, dan dinamika bahan organik tanah. Pada lingkungan dengan suhu relatif konstan dan kelembapan tinggi, seperti wilayah tropis lembap, dekomposisi bahan organik berlangsung cepat sehingga akumulasi bahan organik di permukaan tanah menjadi terbatas meskipun produksi biomassa relatif tinggi. Beberapa studi menegaskan bahwa epipedon okrik dapat terbentuk pada kondisi di mana masukan bahan organik tidak mampu mengimbangi laju dekomposisi dan transformasi bahan organik, sehingga horizon permukaan tetap tipis dan miskin bahan organik (Nasution *et al.*, 2021; Santos & Almeida, 2021). Keberadaan epipedon okrik pada tanah penelitian ini konsisten dengan hasil pengujian lapangan yang menunjukkan kandungan bahan organik rendah dan mencerminkan tingkat perkembangan tanah yang masih awal hingga menengah.

Di bawah epipedon permukaan dijumpai horizon kambik yang dicirikan oleh perubahan struktur dan warna, namun belum menunjukkan akumulasi liat atau senyawa besi dan aluminium secara intensif. Horizon kambik yang dijumpai di bawah epipedon permukaan ditandai oleh perubahan warna dan struktur, namun belum menunjukkan adanya akumulasi liat atau oksida besi dan aluminium secara signifikan. Horizon ini merupakan indikator pedogenesis tahap awal, yang menandakan terjadinya transformasi mineral dan reorganisasi struktur tanah tanpa proses iluviasi yang kuat (Soil Survey Staff, 2014; Schaetzl & Thompson, 2015). Tidak ditemukannya horizon argilik atau kandik menegaskan bahwa tanah belum berkembang menjadi ordo yang lebih lanjut, seperti Alfisol atau Ultisol, sebagaimana dilaporkan pada berbagai studi Inceptisol di wilayah tropika (Suryani *et al.*, 2021).

Pengujian lapangan menggunakan larutan H_2O_2 menunjukkan reaksi lemah, yang mengindikasikan kandungan bahan organik rendah (<2%), sedangkan pengujian dengan HCl tidak menunjukkan adanya reaksi, menandakan ketiadaan karbonat dalam tanah (Gambar 2b). Karakteristik ini mendukung penetapan epipedon okrik dan memperkuat indikasi bahwa tanah tergolong tanah masam dengan kejenuhan basa relatif rendah. Hasil uji lapangan menggunakan H_2O_2 dan HCl berfungsi sebagai pendukung dalam identifikasi horizon diagnostik. Reaksi lemah terhadap H_2O_2 mengindikasikan kandungan bahan organik rendah, sedangkan tidak adanya reaksi dengan HCl menyingkirkan kemungkinan keberadaan karbonat. Temuan ini konsisten dengan karakteristik epipedon okrik dan tanah masam yang tercuci kuat (Soil Survey Staff, 2014).

Penetapan Klasifikasi Tanah Berdasarkan *Soil Taxonomy*

Berdasarkan hasil pengamatan morfologi serta sifat fisik–kimia tanah di lapangan, penetapan klasifikasi tanah dilakukan dengan mengacu pada *Key to Soil Taxonomy* melalui pencocokan kriteria diagnostik secara sistematis. Ringkasan karakteristik tanah dan hasil penetapan taksonomi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan karakteristik tanah dan penetapan klasifikasi berdasarkan *Soil Taxonomy*

Parameter	Hasil Pengamatan	Kriteria Diagnostik	Interpretasi
Epipedon	Okrik	BO < 2%, warna relatif cerah	Memenuhi
Horizon Bawah	Kambik	Perubahan warna dan struktur	Memenuhi
Rezim Kelembapan	Udik	Tanah lembab sebagian besar tahun	Memenuhi
Rezim Suhu	Isohipertermik	Fluktuasi suhu tanah rendah	Memenuhi
Ordo	Inceptisol	Dominasi horizon kambik	Memenuhi
Subordo	Udept	Rezim kelembapan udik	Ditetapkan
Great Grup	Distrudept	Kejenuhan basa relatif rendah	Ditetapkan
Sub Grup	Typic distrudept	Tidak ada sifat penciri khusus lainnya	Ditetapkan
Kelas Famili	Berlempung halus, Campuran	Kelas butir dan kelas mineralogi	Ditetapkan

Keberadaan horizon kambik yang jelas (Gambar 1) menjadi dasar utama penetapan tanah ke dalam ordo Inceptisol. Penetapan tanah ke dalam ordo Inceptisol didasarkan pada keberadaan horizon kambik sebagai horizon diagnostik utama, tanpa adanya horizon iluviasi atau akumulasi bahan tertentu yang menandai tingkat perkembangan lanjut. Inceptisol merepresentasikan tanah dengan tingkat perkembangan menengah, yang umum dijumpai pada bentang lahan stabil hingga semi-stabil di wilayah tropika dan subtropika (Buol *et al.*, 2011).

Rezim kelembapan udik mencerminkan kondisi iklim lembap dengan ketersediaan air tanah yang relatif mencukupi sepanjang tahun, sehingga memungkinkan berlangsungnya proses pelapukan dan transformasi mineral secara kontinu. Lingkungan dengan periode kelembapan yang panjang diketahui mendukung perkembangan tanah Inceptisol subordo Udept melalui retensi air yang stabil, pelarutan mineral primer, serta diferensiasi horizon tanah secara bertahap (Moura-Bueno *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2025). Kondisi ini konsisten dengan karakter iklim wilayah penelitian dan menjadi dasar penetapan tanah ke dalam subordo Udept sebagaimana didefinisikan dalam *Key to Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2014). Sementara itu, rezim suhu isohipertermik yang ditandai oleh fluktuasi suhu tanah yang relatif kecil sepanjang tahun merupakan ciri umum wilayah tropika lembap dan berperan dalam menjaga kestabilan proses pedogenetik tanpa pengaruh variasi suhu musiman yang ekstrem, sehingga memperkuat perkembangan tanah pada tingkat awal hingga menengah.

Reaksi tanah masam yang disertai ketiadaan karbonat dan indikasi kejenuhan basa rendah menjadi dasar penetapan tanah ke dalam great group Distrudept sesuai kriteria dalam *Key to Soil Taxonomy*. Penetapan sifat distrik pada tanah penelitian ini didasarkan pada pendekatan *field morphological evidence* yang secara kolektif berfungsi sebagai indikator tidak langsung (*proxy indicators*) kejenuhan basa rendah. Reaksi tanah masam ($\text{pH} \pm 5,5$) yang terukur di lapangan, ketiadaan karbonat yang dikonfirmasi melalui tidak adanya reaksi terhadap larutan HCl, serta reaksi lemah terhadap H_2O_2 yang mengindikasikan kandungan bahan organik rendah, merupakan sifat-sifat lapangan yang secara sinergis mencerminkan kondisi pencucian basa yang intensif dan konsisten dengan kejenuhan basa rendah. Pendekatan berbasis morfologi dan sifat lapangan dalam penetapan klasifikasi tanah merupakan praktik yang lazim diterapkan dalam survei tanah, sebagaimana digunakan oleh Suryani *et al.* (2021) dalam klasifikasi Inceptisol di Sulawesi Barat serta Nasution *et al.* (2021) dalam studi morfologi dan klasifikasi tanah di wilayah Aceh, yang menunjukkan bahwa integrasi data lapangan secara sistematis dapat mendukung penetapan taksonomi yang sah meskipun tanpa seluruh data laboratorium kuantitatif. Distrudept merupakan kelompok Inceptisol yang berkembang pada lingkungan pencucian intensif, sehingga basa-basa mudah tercuci dari profil tanah (Umbara *et al.*, 2024). Tidak ditemukannya sifat penciri tambahan, seperti kondisi akuik atau pembatas litik, menyebabkan tanah diklasifikasikan lebih lanjut ke dalam subgrup Typic Distrudept, yang merepresentasikan kondisi tipikal dari great group tersebut (Soil Survey Staff, 2014).

Pada tingkat famili, tekstur berlempung halus menunjukkan kemampuan tanah yang relatif baik dalam menahan air akibat dominasi partikel berukuran halus dengan luas permukaan spesifik yang tinggi, sehingga meningkatkan gaya adhesi dan kohesi air di dalam pori tanah. Berbagai studi menunjukkan bahwa tanah bertekstur halus, khususnya yang kaya fraksi liat, memiliki kapasitas retensi air yang lebih besar dibandingkan tanah bertekstur kasar, sebagaimana tercermin pada perbedaan kurva karakteristik tanah-air dan dinamika kelembapan tanah yang lebih stabil (Yang *et al.*, 2023; Parker *et al.*, 2022). Selain itu, penetapan mineralogi

campuran mencerminkan keragaman mineral liat yang terbentuk dari pelapukan mineral primer pada tingkat sedang atau dari variasi bahan induk, yang menunjukkan bahwa tanah berkembang melalui jalur pedogenetik yang tidak ekstrem. Keragaman mineral liat tersebut, termasuk kemungkinan keberadaan mineral liat 1:1 dan 2:1, telah dilaporkan sebagai indikator tingkat pelapukan menengah dan dinamika lingkungan yang bervariasi, yang berimplikasi pada respons tanah terhadap pengelolaan dan penggunaan lahan (Sadovski & Ivanova, 2020; Frings *et al.*, 2021). Klasifikasi tanah pada tingkat famili tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga menyediakan informasi fungsional yang penting dalam memahami perilaku fisik tanah dan implikasinya bagi pengelolaan lahan pertanian.

Implikasi Pedologis dan Pengelolaan Lahan

Karakteristik tanah Typic Distrudept bertekstur lempung halus dengan reaksi tanah masam dan kandungan bahan organik rendah menunjukkan adanya keterbatasan inheren dalam kapasitas penyangga hara dan tingkat kesuburan tanah. Kondisi ini berkaitan dengan dominasi kation asam pada kompleks pertukaran dan rendahnya kemampuan tanah dalam mempertahankan kation basa, sehingga meningkatkan risiko kehilangan hara melalui proses pencucian. Kondisi reaksi tanah masam dan kejenuhan basa rendah pada tanah Typic Distrudept berimplikasi pada rendahnya kapasitas penyangga hara dan tingginya risiko kehilangan kation basa, sehingga diperlukan strategi ameliorasi yang adaptif. Meskipun demikian, tekstur lempung halus dan struktur gumpal memberikan potensi fisik yang relatif baik dalam hal penyimpanan air dan penetrasi akar, sehingga tanah ini masih memiliki peluang pengelolaan yang cukup baik apabila diiringi dengan strategi ameliorasi yang tepat.

Berbagai hasil penelitian pada tanah masam bertekstur halus yang bersifat analog dengan Typic Distrudept menunjukkan bahwa keterbatasan kimia dan biologi tanah tersebut dapat diperbaiki melalui pendekatan pengelolaan terpadu. Ringkasan studi-studi yang relevan disajikan pada Tabel 2 sebagai dasar empiris untuk merumuskan strategi pengelolaan tanah di lokasi penelitian.

Tabel 2. Sintesis studi pengelolaan tanah masam bertekstur lempung halus dengan kandungan bahan organik rendah (analog Typic Distrudept)

No.	Penulis (Tahun)	Strategi Pengelolaan Utama	Dampak Utama
1	Simegn <i>et al.</i> (2025)	Kompos + kapur	Perbaikan pH dan sifat fisik tanah
2	Tadesse <i>et al.</i> (2025)	Kapur + vermikompos	pH naik dari $\pm 4,7$ menjadi $\pm 5,8$
3	Abreha <i>et al.</i> (2023)	Liming + pupuk organik	Efek sinergis, peningkatan hasil hingga $>200\%$
4	Kassaye <i>et al.</i> (2023)	Pengapuran berbasis <i>exchangeable acidity</i>	pH meningkat, hasil gandum meningkat
5	Chen <i>et al.</i> (2022)	Kompos kontinyu (3 tahun)	pH naik 0,49–0,75 unit
6	Crusciol <i>et al.</i> (2021)	Liming + rotasi tanaman	Efisiensi N dan hasil meningkat
7	Qaswar <i>et al.</i> (2020)	Pengapuran jangka panjang	Ca^{2+} dan Mg^{2+} meningkat, Al^{3+} menurun
8	Widowati <i>et al.</i> (2020)	Biochar + pupuk kandang	Efektif memperbaiki Inceptisol
9	Witt <i>et al.</i> (2020)	Pengapuran + pupuk P + bahan organik	Menurunkan Al dapat tukar, meningkatkan hasil jagung & kedelai
10	Silva <i>et al.</i> (2017)	<i>No-tillage</i> + rotasi tanaman	Struktur tanah lebih stabil

Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa pengapuran merupakan strategi utama dalam pengelolaan tanah masam bertekstur lempung halus karena secara konsisten meningkatkan pH tanah, menurunkan kemasaman dan aluminium dapat tukar, serta memperbaiki ketersediaan unsur hara esensial. Efektivitas pengapuran meningkat secara signifikan apabila dikombinasikan dengan penambahan bahan organik, baik berupa kompos, pupuk kandang, vermikompos, maupun biochar, yang berperan dalam meningkatkan kapasitas tukar kation, stabilitas agregat, dan kualitas fisik tanah. Pendekatan pengelolaan terpadu tersebut terbukti lebih unggul dibandingkan penerapan tunggal dan memberikan dampak positif terhadap produktivitas tanaman serta keberlanjutan sistem pertanian pada tanah-tanah Inceptisol masam.

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian tersebut, aplikasi kapur pertanian pada tanah masam umumnya berada pada kisaran moderat, yaitu sekitar 1–2 ton ha⁻¹ untuk meningkatkan pH menuju kisaran optimal pertumbuhan tanaman dan menekan aluminium dapat tukar, khususnya pada Inceptisol dengan kemasaman sedang (Qaswar *et al.*, 2020; Kassaye *et al.*, 2023). Efektivitas pengapuran tersebut semakin meningkat apabila dikombinasikan dengan penambahan bahan organik seperti kompos atau pupuk kandang pada kisaran 10–20 ton ha⁻¹, yang berperan dalam meningkatkan kapasitas tukar kation, stabilitas agregat, serta retensi hara pada tanah bertekstur lempung halus (Chen *et al.*, 2022; Widowati *et al.*, 2020).

Dalam konteks pengembangan komoditas spesifik, tanah Typic Distrudept bertekstur lempung halus dengan drainase relatif baik memiliki potensi yang cukup menjanjikan untuk pengembangan nilam (*Pogostemon cablin*), khususnya pada wilayah tropis lembap. Berbagai studi melaporkan bahwa nilam tumbuh optimal pada tanah dengan tekstur lempung hingga lempung berpasir, reaksi tanah masam hingga agak masam (pH 5,0–6,5), serta ketersediaan air yang cukup tanpa kondisi tergenang. Tanah Inceptisol dan Ultisol masam yang dikelola melalui penambahan bahan organik dan pengapuran moderat terbukti mampu mendukung pertumbuhan vegetatif nilam dan meningkatkan produksi biomassa serta kualitas minyak atsiri. Meskipun kandungan bahan organik awal pada tanah Typic Distrudept relatif rendah, berbagai penelitian menunjukkan bahwa aplikasi kompos atau pupuk kandang secara konsisten dapat memperbaiki sifat fisik tanah, meningkatkan serapan hara, dan mendukung produktivitas nilam secara berkelanjutan. Dengan demikian, tanah di lokasi penelitian menunjukkan kesesuaian bersyarat untuk pengembangan nilam, yang dapat dioptimalkan melalui pengelolaan adaptif berbasis ameliorasi kimia dan biologis.

Perlu diakui bahwa penetapan great group Distrudept dalam penelitian ini sepenuhnya didasarkan pada pendekatan morfologi dan sifat lapangan, mengingat keterbatasan ketersediaan data laboratorium kuantitatif seperti nilai kejenuhan basa, kapasitas tukar kation, dan distribusi fraksi granulometri secara analitis. Meskipun pendekatan berbasis lapangan yang diterapkan dalam penelitian ini telah didukung oleh integrasi berbagai *proxy indicators* morfologis dan kimiawi yang konsisten satu sama lain, validasi melalui analisis laboratorium tetap direkomendasikan sebagai tindak lanjut penelitian guna memperkuat akurasi dan presisi penetapan taksonomi, khususnya pada tingkat great group dan subgroup. Keterbatasan ini merupakan bagian dari transparansi ilmiah yang perlu dikomunikasikan, dan tidak mengurangi validitas kerangka interpretasi morfologi yang telah dibangun dalam penelitian ini.

KESIMPULAN

Tanah di Desa Geunteut, Kecamatan Lhoong, Kabupaten Aceh Besar menunjukkan karakteristik morfologi berupa tekstur lempung berliat halus, struktur gumpal, reaksi tanah masam ($\text{pH} \pm 5,5$), kandungan bahan organik relatif rendah, serta perkembangan horizon sedang yang ditandai oleh keberadaan epipedon okrik dan horizon kambik. Berdasarkan pencocokan indikator morfologi dan sifat fisik tanah dengan *Key to Soil Taxonomy*, tanah ini menunjukkan karakteristik yang konsisten dengan Typic Distrudept pada rezim kelembapan udik dan rezim suhu isohipertermik. Secara pedogenetik, kondisi tersebut mengindikasikan lingkungan dengan intensitas pelindian basa yang relatif tinggi, yang berimplikasi pada keterbatasan kapasitas penyangga hara, meskipun secara fisik tanah masih mendukung penyimpanan air dan penetrasi akar.

Implikasi pengelolaan menunjukkan bahwa perbaikan reaksi tanah melalui pengapuran dan peningkatan bahan organik menjadi strategi kunci untuk meningkatkan efisiensi pemupukan, khususnya pada pengembangan tanaman nilam. Berdasarkan literatur pada tanah Inceptisol masam di wilayah tropis, aplikasi kapur pertanian umumnya direkomendasikan pada kisaran $1\text{--}2 \text{ ton ha}^{-1}$ untuk menaikkan pH menuju kisaran optimal tanaman, disertai penambahan bahan organik seperti pupuk kandang matang atau kompos pada kisaran $10\text{--}20 \text{ ton ha}^{-1}$ guna memperbaiki kapasitas tukar kation dan stabilitas agregat tanah. Rekomendasi ini bersifat sebagai acuan awal dan memerlukan penyesuaian lebih lanjut melalui analisis kimia tanah secara kuantitatif. Dengan pengelolaan yang adaptif dan berbasis karakteristik pedologis, tanah di wilayah penelitian memiliki potensi pengembangan pertanian yang bersyarat dan dapat menjadi dasar perencanaan pengelolaan lahan berkelanjutan di Aceh Besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Abreha, K. B., Enyew, M., & Carlsson, A. S. (2023). Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability: A meta-analysis. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1194896. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896>
- Aguado-Norese, C., Cárdenas, V., Gaete, A., Mandaković, D., Vásquez-Dean, J., Hödar, C., ... & González, M. (2023). Topsoil and subsoil bacterial community assemblies across different drainage conditions in a mountain environment. *Biological Research*, 56(1). <https://doi.org/10.1186/s40659-023-00445-2>
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). Soil genesis and classification. John Wiley & Sons.
- Chen, L., Zhang, J., Zhao, B., Zhou, G., & Zhu, Y. (2022). Continuously applying compost for three years alleviated soil acidity and heavy metal bioavailability in a soil-asparagus lettuce system. *Frontiers in Plant Science*, 13, 972789. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.972789>
- Chiapini, M., Oliveira, J., Schellekens, J., Almeida, J., Buurman, P., & Vidal-Torrado, P. (2021). Sombric-like horizon and xanthization in polychrome subtropical soils from Southern Brazil: implications for soil classification. *Scientia Agricola*, 78(4). <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0115>
- Crusciol, C. A. C., Momesso, L., de Campos, M., Bossolani, J. W., Portugal, J. R., Moretti, L. G., Cantarella, H., Tiritan, C. S., Kuramae, E. E., Moraes, M. F., & Franzluebbers, A. J. (2021). Liming optimizes nitrogen fertilization in a maize-upland rice rotation under no-till conditions. *Agronomy*, 11(10), 2005. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102005>
- Ferdeanty, F., Sufardi, S., & Arabia, T. (2020). Karakteristik Morfologi dan Klasifikasi Tanah Andisol di Lahan Kering Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 4(4), 666-676. <https://doi.org/10.17969/jimfp.v4i4.12694>

- Franzluebbers, A. J. (2022). Soil mean-weight diameter and stability index under contrasting tillage systems for cotton production in North Carolina. *Soil Science Society of America Journal*, 86(5), 1327-1337. <https://doi.org/10.1002/saj2.20458>
- Frings, P., Oelze, M., Schubring, F., Frick, D. A., & Blanckenburg, F. v. (2021). Interpreting silicon isotopes in the Critical Zone. *American Journal of Science*, 321(8), 1164-1203. <https://doi.org/10.2475/08.2021.02>
- Gyasi, E. K., & Purushotham, S. (2023). Soil-MobiNet: A convolutional neural network model base soil classification to determine soil morphology and its geospatial location. *Sensors*, 23(15), 6709.
- Kassaye, K. T., Boulange, J., Lam, S. K., Sethupathy, S., Zewde, E., Molla, B., Stroud, L., & Tsang, D. C. W. (2023). Effect of lime rates and method of application on soil properties of acidic Luvisols and wheat (*Triticum aestivum*, L.) yields in northwest Ethiopia. *Heliyon*, 9(3), e14413. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14413>
- Kawałko, D., Jezierski, P., & Kabała, C. (2021). Morphology and Physicochemical Properties of Alluvial Soils in Riparian Forests after River Regulation. *Forests*, 12(3), 329. <https://doi.org/10.3390/f12030329>
- Kefas, P., Ali, S., Ofem, K., & Umeugokwe, C. (2020). Genesis and classification of soils along a toposequence in the teaching and research farm of Taraba State University, Jalingo, Nigeria. *Global Journal of Agricultural Sciences*, 19(1), 33-43. <https://doi.org/10.4314/gjass.v19i1.5>
- Maynard, J. J., Salley, S. W., Beaudette, D. E., & Herrick, J. E. (2020). Numerical soil classification supports soil identification by citizen scientists using limited, simple soil observations. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1675-1692.
- Nasution, R. Z., Manfarizah, M., & Zainabun, Z. (2021). Morfologi dan Klasifikasi Tanah Kebun Sere Wangi di Gayo Lues (Morphology and Soil Classification of Lemongrass Gardens in Gayo Lues). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 6(4), 671-679. <https://doi.org/10.17969/jimfp.v6i4.18332>
- Obi, J. C., Udoh, I. B., Adefila, F. R., & Brownson, U. E. (2020). Numerical classification and digital mapping of coastal plain sands of Southeastern Nigeria. *Agro-Science*, 19(2), 13-22.
- Parker, N., Kluitenberg, G. J., Redmond, C. A., & Patrignani, A. (2022). A database of soil physical properties for the Kansas Mesonet. *Soil Science Society of America Journal*, 86(6), 1495-1508. <https://doi.org/10.1002/saj2.20465>
- Patra, A., Sharma, V. K., Nath, D. J., Dutta, A., Purakayastha, T. J., Kumar, S., ... & Kumawat, C. (2023). Long-term impact of integrated nutrient management on sustainable yield index of rice and soil quality under acidic inceptisol. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(7), 1111-1128.
- Patra, A., Sharma, V. K., Nath, D. J., Purakayastha, T. J., Barman, M., Kumar, S., ... & Anil, A. S. (2022). Impact of long-term integrated nutrient management (INM) practice on aluminium dynamics and nutritional quality of rice under acidic Inceptisol. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(1), 31-43.
- Pospíšilová, Ľ., Uhlík, P., Menšík, L., Hlšíňkovský, L., Eichmeier, A., Horáková, E., ... & Vlček, V. (2020). Clay mineralogical composition and chemical properties of Haplic Luvisol developed on loess in the protected landscape area Litovelské Pomoraví. *European Journal of Soil Science*, 72(3), 1128-1142. <https://doi.org/10.1111/ejss.13041>
- Qaswar, M., Dongchu, L., Jing, H., Tianfu, H., Ahmed, W., Abbas, M., Lu, Z., Jiangxue, D., Shijing, F., Ying, H., Huimin, Z., Kailou, L., Xianjin, L., Jusheng, G., & Sehrish, A. (2020). Interaction of liming and long-term fertilization increased crop yield and phosphorus use efficiency (PUE) through mediating exchangeable cations in acidic soil

- under wheat-maize cropping system. *Scientific Reports*, 10(1), 19828. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76892-8>
- Rahmawati, A., & Khumairah, F. H. (2023). Formulasi amelioran organik untuk menurunkan kadar salinitas tanah dan meningkatkan pertumbuhan tanaman padi di lahan salin. *Composite: Jurnal Ilmu Pertanian*, 5(1), 1-8.
- Ramadhany, T. M., & Budijastuti, W. Hubungan Morfometri Tubuh dengan Organ Reproduksi Cacing Tanah *Metaphire javanica* di Kabupaten Sidoarjo.
- Raziah, R., Sufardi, S., & Arabia, T. (2020). Genesis dan Klasifikasi Tanah Ultisol di Lahan Kering Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 4(4), 637-647. <https://doi.org/10.17969/jimfp.v4i4.12686>
- Sadovski, A. and Ivanova, M. (2020). Transformation of soil texture schemes and determination of water-physical properties of soils. *Eurasian Journal of Soil Science (Ejss)*, 9(4), 306-313. <https://doi.org/10.18393/ejss.760201>
- Sahla, S., Marsudi, E., & Indra, I. (2024). Karakteristik Petani Nilam di Kecamatan Lhoong Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 9(4), 155-160.
- Santos, J. B. d. and Almeida, J. A. d. (2021). Andic properties in soils with histic horizon "O" in the highlands of Southern Brazil. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 45. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200152>
- Sari, D. M., Ilyas, I., & Jufri, Y. (2024). Pengaruh Pemberian Kombinasi Biochar Sekam Padi dan Pupuk Kotoran Kambing terhadap Beberapa Sifat Kimia Inceptisol, Pertumbuhan, dan Hasil Tanaman Sawi Hijau (*Brassica juncea* L.). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 9(2), 243-252.
- Schaetzl, R. J., & Thompson, M. L. (2015). *Soils*. Cambridge university press. New York:USA.
- Shamshuddin, J., Panhwar, Q. A., Alia, F. J., Shazana, M. A. R. S., Radziah, O., & Fauziah, C. I. (2017). Formation and Utilisation of Acid Sulfate Soils in Southeast Asia for Sustainable Rice Cultivation. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 40(2).
- Silva, V. R., Reichert, J. M., Storck, L., & Feijó, S. (2017). Soil structural quality degradation by the increase in grazing intensity in integrated crop-livestock system. *Bragantia*, 76(4), 550-556. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2016.402>
- Simegn, T., Beyene, S., & Misganaw, M. (2025). Responses of soil properties and yield of bread wheat to compost and lime application on acidic soils of Banja district Northwestern Ethiopia. *Discover Agriculture*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00181-z>
- Skorupa, A. L., Silva, S. H., Poggere, G. C., Tassinari, D., Pinto, L. C., & CURI, N. (2017). Similar soils but different soil-forming factors: converging evolution of Inceptisols in Brazil. *Pedosphere*, 27(4), 747-757.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Solihin, R., Afrida, & Badal, B. (2024). Uji komposisi media (top soil, kompos TKKS, dan arang sekam) pada pembibitan kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di tahap pre-nursery. *Jurnal Research Ilmu Pertanian*, 4(1), 66–76. <https://doi.org/10.31933/nqj04z14>
- Suryani, I., Nontji, M., & Juita, N. (2021, July). Morphological characteristics and classification of inceptisol in Mamuju regency, West Sulawesi. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 807, No. 4, p. 042043). IOP Publishing.
- Tadesse, A., Chala, A., & Amare, B. (2025). Effects of lime and vermicompost application on soil physicochemical properties and phosphorus availability in acidic soils. *Scientific Reports*, 15(1), 2053. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02053-4>
- Umbara, B., Barus, W. A., Tarigan, D. M., & Perdana, I. R. (2024). Analisis Biofertilizer dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit di Main Nursery pada Tanah Typic Dystrudepts. *AGRIUM: Jurnal Ilmu Pertanian*, 27(2), 191-201.

- Vilela, E. F., Inda, A. V., & Zinn, Y. L. (2019). Soil genesis, mineralogy and chemical composition in a steatite outcrop under tropical humid climate in Brazil. *Catena*, 183, 104234.
- Widowati, Sutoyo, Karamina, H., & Fikrinda, W. (2020). Soil amendment impact to soil organic matter and physical properties on the three soil types after second corn cultivation. *AIMS Agriculture and Food*, 5(1), 150-168. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2020.1.150>
- Wiharso, D. (2021). Changes in Soil Morphology and Properties Under Long—term Soil Management in Humid Tropical Regions of Lampung, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 20(81). <https://doi.org/10.21660/2021.81.j2081>
- Witt, C., Pasuquin, J. M. C. A., Pampolino, M. F., Buresh, R. J., & Dobermann, A. (2020). Soil fertility constraints and management to increase crop yields in the dryland farming systems of Aceh, Indonesia. *Soil Research*, 59(1), 68-86. <https://doi.org/10.1071/SR19324>
- Yang, C., Wu, J., Li, P., Wang, Y., & Yang, N. (2023). Evaluation of Soil-Water Characteristic Curves for Different Textural Soils Using Fractal Analysis. *Water*, 15(4), 772. <https://doi.org/10.3390/w15040772>
- Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Ma, X., ... & Du, W. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1>