Identifikasi Mineral Tanah Andisol Dan Implikasinya Terhadap Retensi Fosfor Di Kawasan Food Estate

Identification of Andisol Soil Minerals and Their Implications for Phosphorus Retention in Food Estate Areas

Tience Elizabet Pakpahan*[1], Zulkifli Nasution[2], Mukhlis[2], Mariani Sembiring[2]

[1]Program Doktor Ilmu Pertanian Universitas Sumatera Utara, Indonesia
[2]Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara, Indonesia, Indonesia
***e-mail korespondensi: tiencepakpahan03@gmail.com

Abstract. *Andisol which develop from volcanic ash, are known to possess favorable physical properties for agriculture. Low agricultural productivity in the Humbang Hasundutan Regency Food Estate area motivated this research, given that Andisol soils in the region possess potentially favorable physical properties. This condition suggests soil fertility constraints related to soil mineralogical characteristics, particularly the dominance of amorphous, non-crystalline, which contribute to high phosphorus retention. This study aimed to identify crystalline and non-crystalline minerals in Andisol. The study was conducted through a field survey with soil profiles, followed by mineralogy analysis using the X-ray Diffraction (XRD) method at the LPPT Gadjah Mada University (UGM) laboratory. Soil samples from each horizon were analyzed to determine the crystalline and amorphous mineral fractions. The results showed that all soil horizons were dominated by amorphous, allophane, with a range 45.2–84.5%. The crystalline fraction ranged from 15.5–54.8%, dominated by quartz. The dominance of allophane indicates a strong andic nature, which retains P, thus limiting nutrient availability. Variations in mineral distribution between horizons reflect differences in the degree of weathering and deposition of parent material within the soil profile. The results of this study confirm that soil mineralogical information can be a key consideration in food estate land management, with attention to the presence of allophane minerals through application organic matter, lime and fertilizer placement at spesific location.This needs to be folowed up withfield trials and plant response monitoring.*

Keywords: *Andisol, amorphous mineral, phosphorus retention*

Abstrak. Tanah Andisol yang berkembang dari abu vulkanik dikenal memiliki sifat fisik yang baik untuk pertanian, rendahnya produktivitas pertanian di kawasan Food Estate Kabupaten Humbang Hasundutan menjadi latar belakang dilakukannya studi ini, mengingat tanah Andisol di wilayah tersebut sebenarnya memiliki sifat fisik yang potensial. Kondisi ini memberikan petunjuk adanya kendala kesuburan tanah yang berkaitan dengan karakteristik mineralogi tanah, terutama dominasi mineral liat non-kristalin amorf yang berperan dalam retensi fosfor tinggi. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi mineral liat kristalin dan non-kristalin pada setiap horizon tanah Andisol. Penelitian dilakukan dengan survei lapangan dengan pembuatan profil tanah, diikuti analisis mineral menggunakan metode X-ray Diffraction (XRD) dilaboratorium LPPT UGM. Sampel tanah pada horizon dianalisis untuk menentukan kandungan fraksi mineral kristalin dan amorf. Hasil penelitian menginformasikan bahwa pada profil tanah semakin dalam horizon, proporsi mineral kristalin semakin besar (15,5–54,8%) namun mineral non kristalin semakin kecil (84,5-15,5%). Mineral kristalin didominasi mineral kuarsa sedangkan mineral non kristalin didomiansi mineral alofan. Variasi distribusi mineral antar horizon mencerminkan perbedaan tingkat pelapukan dan deposisi bahan induk dalam profil tanah. Implikasinya pada

pengelolaan lahan pada tanah dengan kandungan mineral liat non kristalin (amorf) yang dominan yakni perlu menerapkan pemberian bahan organik, kapur dan penempatan pupuk pada titik tertentu. Hal ini perlu dilanjutkan dengan percobaan lapangan dan respon tanaman.

Kata kunci: *Andisol; mineral kristalin, mineral non-kristalin, food estate*

PENDAHULUAN

Andisol merupakan tanah yang berasal dari pelapukan abu vulkanik yang dihasilkan letusan gunung api. Andisol banyak ditemui pada daerah yang berasosiasi dengan lingkungan vulkanik. Andisol dikenal memiliki prospek unggul untuk pengembangan pertanian karena kandungan bahan organik tinggi dan sifat fisik tanah yang mendukung pertumbuhan tanaman khususnya hortikultura.

Tanah Andisol merupakan tanah dengan potensi kesuburan fisik yang baik. Hal ini berbeda dimana terdapat informasi yang menggambarkan bahwa produktivitas tanaman yang dibudidayakan pada kawasan Food Estate (FE). Lahan FE merupakan lahan bukaan baru yang digunakan untuk budidaya tanaman hortikultura. Produktivitas yang dihasilkan dari lahan FE masih berada di bawah rata-rata nasional yaitu bawang merah 5,8 ton/ha dan bawang putih 2,7 ton/ha pada panen perdana (Kementerian Pertanian, 2023) dan kelayakan usaha tani B/C <1 pada komoditi bawang merah, bawang putih (Tampubolon et al., 2024). Kondisi ini menggambarkan adanya kendala kesuburan tanah yang belum sepenuhnya teridentifikasi dan ditemukan solusinya.

Secara teoritis, sifat tanah andisol erat kaitannya dengan dominasi mineral liat non-kristalin yang disebut amorf. Mineral amorf merupakan mineral yang tidak memiliki susunan atom yang teratur, dengan permukaan yang sangatreaktif, memiliki kemampuan menjerap P dalam jumlah yang tinggi. Dominasi mineral amorf, terutama alofan, yang memiliki kemampuan tinggi dalam mengikat fosfor mencapai 97% yang disebut retensi P. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian besar fosfor anorganik teretensi di dalam tanah sehingga tidak mudah tersedia dan diserap tanaman (Erwinda et al., 2025).

Penelitian terdahulu di lokasi *Food Estate* umumnya berfokus pada faktor pembatas kimia tanah (Erwinda et al., 2025), manajemen strategi Food estate (Syahputra et al., 2024), agriforestri di Food estate (Rambey & Elfiati, 2022). Penelitian tentang kesuburan tanah yang mengkaji tentang mineral kristal dan non kristalin masih terbatas. Proporsi relatif antara fraksi kristalin dan non-kristalin pada setiap horizon tanah sering kali belum dikaji secara mendalam dan kuantitatif. tanpa menyertakan analisis mineralogi detail berbasis difraksi sinar-X (XRD) dan pendekatan semi-kuantitatif dan kualitatif untuk membedakan fraksi kristalin dan amorf. Beberapa penelitian tentang tanah Andisol cenderung menyederhanakan karakteristik Andisol sebagai unit yang seragam dan kurang memandang hetrogenitas sifat Andisol. Heterogenitas dalam tanah bila diabaikan dapat berakibat pada penyusunan strategi manajemen lahan yang kurang akurat karena tidak mengacu pada kondisi mineralogi. Penelitian tentang khas Andisol di lokasi FE Humbang Hasundutan juga masih sangat terbatas.

Kondisi ini menunjukkan adanya celah riset yang lebar antara urgensi pengelolaan lahan presisi di area FE dengan ketersediaan data mineralogi yang

mendalam. Mengacu pada hal tersebut maka penelitian ini difokuskan untuk mengelompokkan mineral liat, baik yang bersifat kristalin maupun non-kristalin, pada tiap horizon tanah. Hal ini diharapkan muncul strategi pengelolaan lahan berdasarkan komposisi mineral kristalin dan non kristalin khususnya untuk mengoptimalkan produktivitas pada lahan dengan dominansi mineral non-kristalin.

METODE

Penelitian dilaksanakan di kawasan Food estate kabupaten Humbang dengan koordinat N 02°23'28" E 98°43'44'' pada bulan September- November 2025. Analisis mineral tanah dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) Universitas Gajah Mada.

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah tanah dari lokasi Food estate desa Siria-ria, dan bahan-bahan dalam pengujian di laboratorium. Peralatan utama dalam penelitian adalah bor tanah, cangkul, label, pisau, GPS (*Global Positioning System*), meter, timbangan analitik dan alat-alat yang digunakan pada pengujian di laboratorium.

Metode penelitian ini yaitu metode survei lapangan dan analisis mineral liat dengan menggunakan X ray diffraction (XRD) atau analisis difraksi sinar-X. XRD , XRD merupakan salah satu metode analisis yang efektif dalam mendeskripsikan batuan dan suatu senyawa kimia tertentu dalam wujud padat dengan menggunakan difraksi/pantulan sinar X. Analisis mineral liat dilakukan dengan merujuk pada pedoman kerja). Prosedur analisis mineral mengacu pada Bruker AXS Measurement Center User Manual, DOC-M88-EXX191 V7 2017,

Bruker AXS GmbH (GmbH, 2010).Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan pembuatan profil tanah, dalam hal ini yang terdapat delapan horizon. Sealnjutnya tanah pada setiap horizon dianalisis mineral tanah. Pembuatan profil tanah dilakukan dengan prosedur berikut:

1, Pembuatan Profil Tanah berdasarkan (USDA; Soil Survey Staff, 2022)

- Menetapkan beberapa titik lokasi yang terdapat pada desa ria-ria dan dengan keadaan tidak terganggu dan homogenitas sifat-sifat tanah dengan vegetasi rumput.
- Melakukan pemboran sedalam 1 meter di 2-3 tempat berjarak 1 meter sekitar lokasi/site yang akan dibuat profil untuk memeriksa homogenitas tanah
- Membuat profil berukuran panjang 2 m, lebar 1 m, dalam 1,5 m.
- Bagian sisi profil tanah yang diamati adalah sisi yang terkena sinar matahari agar tampak terang. Apabila profil terdapat pada lahan yang berlereng/miring, maka sisi profil yang diamati adalah sisi dinding di bagian atas lereng.

2. Analisis mineral tanah

Tahapan analisis mineral tanah dilakukan dengan tahapan preparasi dan pembacaan sampel tanha yang berasal dari setiap horizon tanha. Adapun prosedur kerj asebagai berikut:

a. Preparasi

- Sampel berbentuk serbuk dengan ukuran kehalusan (≤ 75 µm – mesh ≥ 200) dan homogen, jika perlu belum mencapai ukuran dapat dihaluskan dengan ball mill atau agate mortar-pestle dan lakukan pengayakan.
- Sampel dimasukkan ke specimen holder PMMA ring dan ratakan hingga tinggi permukaan sampel tepat sama dengan permukaan holder. Gunakan spesimen holder Si low background untuk sampel serbuk yang volumenya sedikit, sampel lembaran, cairan yang diuji kering.
- Dilakukan pemasangan holder ke sample cup dan masukkan ke instrumen XRD

b. Pembacaan

- Buka software aplikasi Diffrac.Measurement Center dan ditunggu hingga software siap digunakan.

- Diisi identitas sampel (nomor permintaan, nama sampel dan kode sampel) dan diatur tegangan dan arus X-Ray Generator ke mode operasi (40 kV dan 25 mA)
- Dilakukan pembacaan cepat pada sudut 2θ 5° ~ 80° untuk mendapatkan profil difraksi awal. Untuk pembacaan 2θ <5°, slit dan air scatter harus disesuaikan hingga berkas sinar X dipastikan tidak mengenai holder.
- Dilakukan pembacaan normal dengan titik awal 2θ beberapa derajat di bawah puncak pertama yang muncul pada hasil pembacaan cepat sampai pada titik dimana tidak ada puncak difraksi esensial. Default sudut pembacaan adalah 10° ~ 80°.
- Hasil pembacaan diismpan dan turunkan tegangan dan arus X-Ray Generator ke mode stand-by (20 kV dan 5 mA).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis X-ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa seluruh horizon tanah didominasi oleh mineral non-kristalin dengan proporsi berkisar antara 45,2–84,5%. Sementara itu, mineral kristalin berkisar antara 15,5–54,8% dan secara konsisten didominasi. Distribusi mineral yangterdapat pada delapan horizon tanah disajikan pada Tabel 1.

Tabel. 1 Persentase Mineral Kristalin dan Non Kristalin/Amorf.

Horizon	Mineral Kristalin	% tase	Mineral Non kristalin/Amorf	% tase
L (0-15/25 cm)	Kuarsa, Felspar, kaolinit	17,9	Alofan/imogolit	82,1
A (15/25-50/60 cm)	Kuarsa, Felspar, kalsit, kaolinit	15,5	Alofan/imogolit	84,5
Bw1 (50/60-85/95 cm)	Kuarsa, Felspar, kaolinit	18,9	Alofan/imogolit	81,1
Bw2 (85/95-105-115 cm)	Kuarsa, Felspar, kaolinit	39,5	Alofan/imogolit	60,5
Bw3 (105-115 cm - 117/120 cm)	Kuarsa, Felspar, illit dan kaolinit	54,8	Alofan/imogolit	45,2
Bw4 (117/120 -130/140 cm)	Kuarsa, Felspar, illit, kaolinit dan kristobalit	34,2	Alofan/imogolit	65,8
BC (130/140-165/170cm)	Kuarsa, Felspar, illit, kaolinit, kristobalit, dan hematit	45,4	Alofan/imogolit	54,6
C (>165/170 cm)	Kuarsa, Felspar, illit, kaolinit, kristobalit dan hallosit	46,0	Alofan/imogolit, Ferihidrit	54,0

Sumber: Data primer, 2025

Mineral Kristalin

Persentase mineral kristalin mulai dari horizon atas hingga ke bawah semakin menurun. Keberadaan mineral kristalin ditandai dengan puncak yang menjulang berwarna merah pada difaktogam Gambar 1 dan 2. Keberadaan mineral kristalin menandakan peristiwa alterasi dan mineralisasi secara kompleks (Hartiningsih, 2023). Secara umum pada setiap horizon atas hingga bawah mengandung kuarsa bahkan kuarsa sangat mendominasi.

Di seluruh profil tanah, kuarsa secara konsisten menjadi mineral yang paling dominan dalam fraksi kristalin. Puncak difraksi pada sudut 2θ ≈ 26.6°, 20.9°, dan 50.1°, menunjukkan ciri khas struktur kristal kuarsa, (Yudis et al., 2025). Kandungan kuarsa, yang tinggi memberikan informasi bahwa material piroklastik di lokasi tersebut telah melewati proses diferensiasi mekanik atau tercampur dengan sedimen silisiklastik. Fenomena menarik muncul pada horizon Bw3 dan C, di mana kadar kristalin melonjak hingga 54,8% dan 46%.

Peningkatan persentase kristalin pada) dapat diinterpretasikan sebagai refleksi dari variasi tekstural atau kontribusi bahan induk yang lebih kaya fraksi pasir (Cuéllar-cruz et al., 2025).

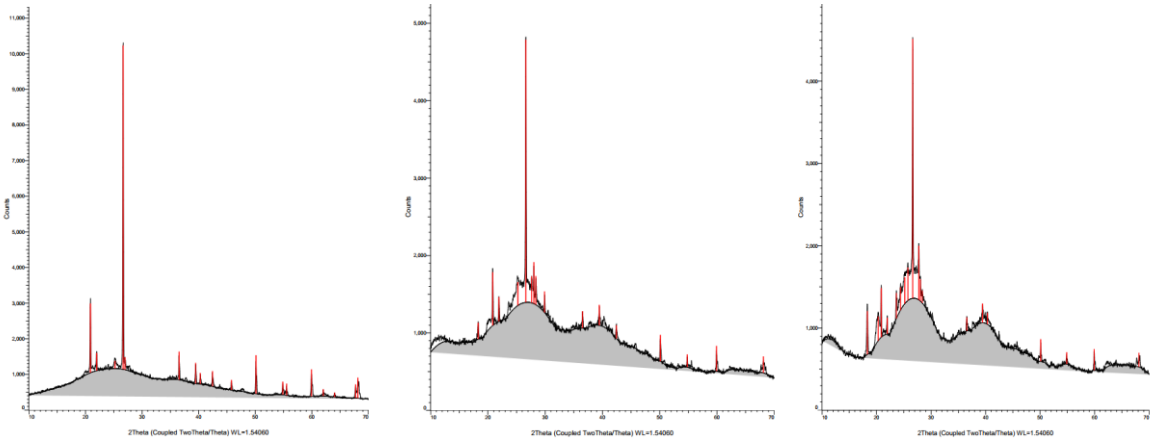
Feldspar yang teridentifikasi dalam jumlah sedikit hingga sangat sedikit menunjukkan sisa bahan primer yang belum sepenuhnya teralterasi. Mineral ini berperan sebagai sumber potensial basa dan silika dalam jangka panjang, meskipun laju pelapukannya bergantung pada kondisi kimia tanah (Arifin et al., 2022). Meskipun kuarsa dan felspar hadir sebagai sumber nutrisi jangka panjang (seperti K, Ca, dan Mg) melalui proses pelapukan, namun perannya belum cukup kuat untuk menekan karakter kimiawi yang dibentuk oleh komponen amorf tersebut. Hal ini disebabkan oleh tingginya kadar alofan yang jauh melampaui mineral-mineral sehingga reaktivitas tanah secara keseluruhan tetap dikendalikan oleh sifat fase non-kristalin. Feldspar memiliki kekerasan lebih rendah dibandingkan kuarsa sehingga lebih mudah terbawa saat terjadi erosi. Erosi ini menyebabkan dekomposisi feldspar menjadi mineral sekunder atau pengangkutan sejumlah kecil feldspar dalam jarak jauh (Al-Mahanna et al., 2025).

Mineral Non Kristalin

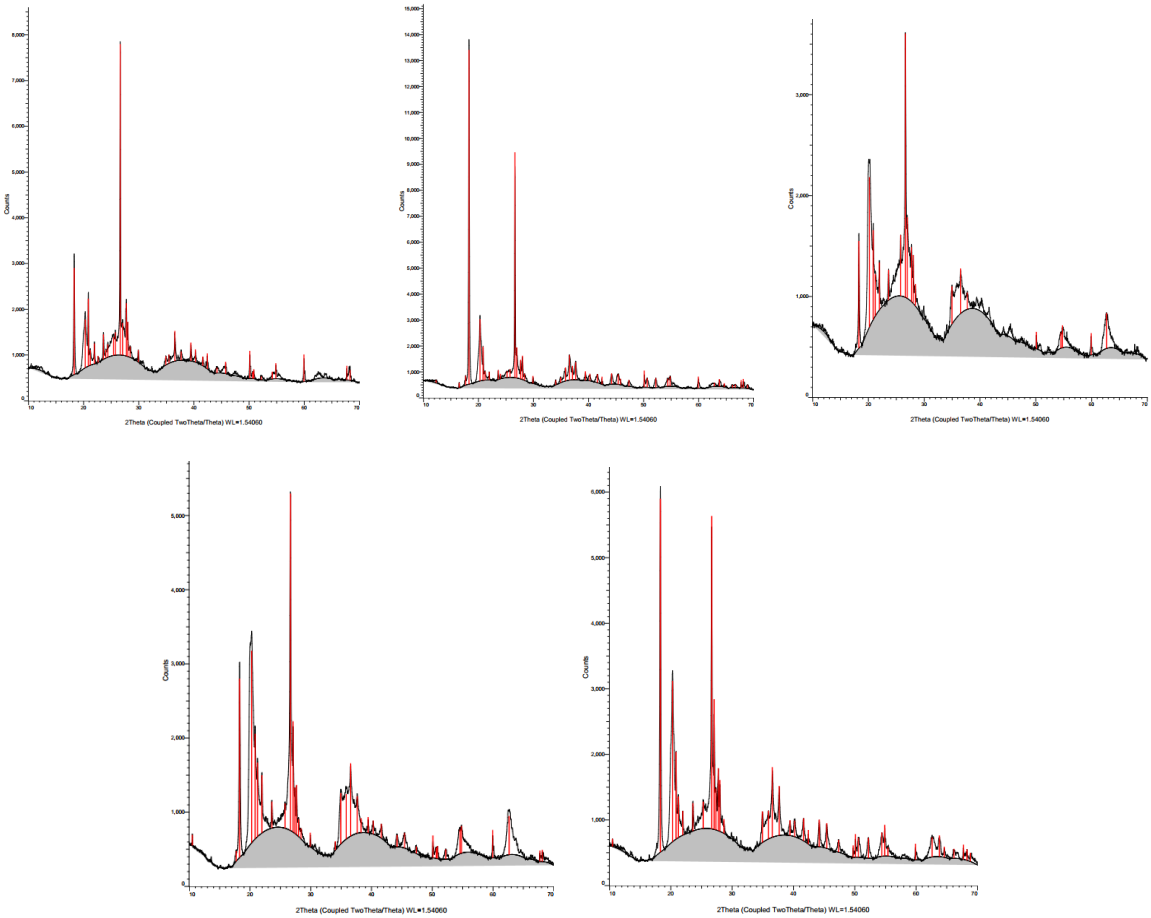
Proporsi material kristalin dan non kristalin terletak pada keteraturan atomnya. Mineral non kristalin/amorf pada setiap horizon tanah semakin berkurang dapat diperhatikan pada difaktogram Gambar 1 dan 2. Difaktogram menunjukkan adanya gundukan yang melebar dan tidak membentuk puncak yang tajam menunjukkan adanya mineral dengan susunan atom yang tidak beraturan yang disebut mineral non kristalin/amorf. Pada fase amorf, struktur atom yang tidak teratur mengekspos lebih banyak cacat koordinasi, yang secara langsung memperkaya properti material dan memperluas spektrum kegunaannya (Laila Rizqiyah et al., 2023).. Puncak seperti menyerupai gundukan bukit berada pada sudut 2 θ seperti $36{,}5^0$,$54{,}9^0$, $62{,}8^{0.}$ dan tindai pada permukaan berna abu-abu. Hal ini menunjukkan bahwa pelapukan tanah seiring dengan kandungan mineral non kristalin/amorf dimana semakin tinggi kandungan amorf maka semakin terjadi pelapukan pada tanah andisol yang memiliki sifat andik. Keberadaannya yang tinggi pada horizon atas mengindikasikan proses pedogenesis aktif, termasuk transformasi silika dan akumulasi Al dalam bentuk kompleks Al–humus.

Pola ini menunjukkan tanah dengan karakter andik yang kuat, sesuai dengan klasifikasi Andisol di lingkungan berbahan induk abu vulkanik. Seluruh horizon didominasi oleh mineral alofan, terutama pada horizon A (84,5%) dan Bw1 (81,1%). Hal ini menunjukkan bahwa bahan piroklastik mengalami pelapukan yang cukup intensif namun pelapukan tersebut belum membentuk mineral kristalin yang stabil (Sufardi et al., 2021).

Salah satu mineral amorf yaitu alofan yang terbentuk dari alterasi cepat gelas vulkanik dalam kondisi drainase baik dan fluktuasi kelembapan tinggi. Alofan adalah nama kelompok mineral liat non kristalin alumino hidrous silikat dengan komposisi kimia yang sangat beragam. Penurunan proporsi alofan pada horizon lebih dalam (Bw3: 45,2%; C: 54%) dapat diintepretasikan sebagai indikasi variasi deposisi material atau diferensiasi lingkungan pelapukan mikro. Fraksi non-kristalin selalu ada pada setiap horizon hingga horizon paling bawah (horizon C), yang mengindikasikan bahwa sifat andik pada setiap horizon. Dominasi mineral non kristalin/amorf sering menyebabkan kesuburan isban tanah lebih rendah isbanding potensi kimianya, terutama dalam konteks ketersediaan P (Guo et al., 2024).



Gambar 1. Analisis XRD Didominasi Mineral Non Kristalin 84,5% pada Horizon L- Bw1



Gambar 2. Analisis XRD Penurunan Mineral Non Kristalin 45,2% pada Horizon Bw2- C

Proses peralihan dari fase amorf menuju pembentukan mineral berlapis 1:1 terlihat jelas dari deteksi halosit di semua lapisan horizon. Jumlahnya yang berada pada tingkat menengah menunjukkan bahwa tanah tersebut sedang berada dalam tahapan pelapukan atau transformasi mineralogi tingkat lanjut, Pada tanah Andisol, mineral halosit sering berkembang melalui reorganisasi struktur alofan ketika kondisi

drainase dan stabilitas kimia memungkinkan kristalisasi parsial. Kehadiran kaolinit dalam jumlah sedikit pada beberapa horizon mengindikasikan lingkungan pelapukan yang relatif lebih lanjut, meskipun belum mencapai tingkat dominasi mineral kristalin stabil (Iqbal & Puswanto, 2024).

Komposisi mineral yang didominasi alofan dengan kuarsa sebagai fase kristalin utama menghasilkan kombinasi sifat fisik yang baik (porositas tinggi, struktur remah stabil) tetapi tantangan kimia berupa retensi P dan kapasitas tukar basa yang rendah pada pH masam. Meskipun peralihan alofan menjadi halloysit pada lapisan tanah tertentu mampu memperkokoh stabilitas struktur, proses ini membawa konsekuensi berupa melemahnya daya ikat tanah terhadap anion (Nishigaki et al., 2021). Oleh karena itu, pemahaman mengenai komposisi mineral liat menjadi dasar ilmiah yang sangat krusial dalam merancang pengelolaan lahan yang presisi. Pendekatan berbasis mineralogi ini dapat dilakukan dengan pemberian input seperti bahan organik dan silikat benar-benar sesuai dengan kebutuhan spesifik di lokasi *Food Estate.*

Pengelolaan Tanah Andisol Berdasarkan Komposisi Mineral Liat Non-Kristalin (Amorf)

Pengelolaan lahan dengan tanah Andisol membutuhkan pengelolaan yang optimal. Pengelolaan yang tidak tepat bisa berdampak pada kesehatan tanah untuk asa yang akan datang (Beckstrom et al., 2025). Secara kesuluruhan horizon tanah didominasi oleh mineral non kristalin/amorf yang terbentuk dari pelapukan abu vulkanik. Mineral amorf memiliki sifat yang khusus meretensi P sangat tinggi. Oleh sebab itu menjadi perhatian khusus dalam mengelolah lahan yang memiliki tanah dengan kandungan retensi P yang sangat tinggi. Mineral amorf memiliki kemampuan untuk menahan P dengan sangat kuat sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Hal ini karena mineral amorf memiliki permukaan yang luas sehingga mengakomodasi ion dan memblokir P dalam jumlah besar. Menyikapi keberadaan mineral amorf yang dominan pada tanah diperlukan upaya untuk meminimalkan penahan P agar dapat tersedia bagi tanaman (Sukarman et al., 2020).

Pendekatan untuk memperkecil/membuka blokir P dilakukan antara lain melalui pemberian bahan organik, pemberian kapur, metode pemupukan P. Bahan organik diberikan ke dalam tanah penting meskipun tanah andisol memiliki kandungan C-organik tinggi namun bahan organik berfungsi untuk membuat kondisi Al dan Fe menjadi tidak aktif sehingga P terlepas dari ikatan Al dan Fe reaktif (Rosidah *et al.,* 2018).

Pendekatan melalui pemberian kapur dapat menetralkan reaksi tanah. Reaksi tanah bergerak menuju netral dan berkurang kemasamannya karena aktivitas Al dan Fe menurun dan mengendap menjadi hidroksida. Pada kondisi ini permukaan mineral amorf seperti alofan yang memiliki muatan positif berkurang sehingga memperlemah ikatan memblokir P dan perlahan-lahan melepaskan P sehingga tanaman dapat menyerap P dalam bentuk tersedia.(Erwinda et al., 2025).

Pendekatan selanjutnya dapat dilakukan melalui metode pemupukan yakni penempatan pupuk pada suatu titik tertentu. Hal ini untuk memperkecil singgungan antara pupuk dengan tanah yang memiliki area permukaan jerapan yang tinggi. Penempatan pupuk P yang terpusat pada suatu titk menyebabkan situs jerapan disekitar pupuk lebih cepat terisi sehingga blokir P menjadi lemah. Pemberian pupuk P dengan sistem penempatan pupuk di dekat akar sehingga retensi P dapat

dikurangi dan efisiensi pemupukan meningkat. Kemampuan tanah menyerap P akan meningkat seiring dengan bertambahnya ketinggian tempat dan kedalaman lapisan tanah. Semakin tinggi dan dalam tanahnya, semakin besar daya tampung adsorpsinya (Aini et al., 2024).

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Tanah Andisol didominasi mineral non-kristalin dibandingkan kristalin pada setiap horizon. Mineral yang sangat dominan pada non kristalin (amorf) seperti alofan/imogolit dan kuarsa pada mineral kristalin. Dominasi mineral non kristalin (amorf) membutuhkan upaya pengelolaan spesifik khususnya karena dapat memblokir P. Implikasinya pada pengelolaan lahan pada tanah dengan kandungan mineral liat non kristalin (amorf) yang dominan yakni perlu menerapkan pemberian bahan organik, kapur dan penempatan pupuk pada titik tertentu. Hal ini perlu dilanjutkan dengan percobaan lapangan dan respon tanaman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Pemerintah daerah Kabupaten Humbang Hasundutan sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

Aini, S. N., Sari, D. M., Setiawati, A. R., Salam, A. K., & Lumbanraja, and J. (2024). Phosphorus Adsorption at Different Altitudes and Soil Depths in Mt . Anak Krakatau before the December 2018 Eruption : Analysis using the Langmuir Isothermic Model Phosphorus Adsorption at Different Altitudes and Soil Depths in Mt . Anak Krakatau before t. *IOP Publishing*, *December*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1482/1/012022

Al-Mahanna, R. H. A., and Alabadi, & Sagban, L. A. (2025). Study of the Composition and Relative Distribution of Light and Heavy Sand Minerals and the Effects of Weathering on Some Soils from the Middle Euphrates Regions Study of the Composition and Relative Distribution of Light and Heavy Sand Minerals and the E. *IOP Publishing*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1487/1/012216

Arifin, M., Devnita, R., Anda, M., Goenadi, D. H., & Nugraha, A. (2022). Characteristics of Andisols Developed from Andesitic and Basaltic Volcanic Ash in Different Agro-Climatic Zones. *Soil Systems*, *6*(4). https://doi.org/10.3390/soilsystems6040078

Beckstrom, T. B., Maaz, T. M., Deenik, J. L., Peter, Hayley, Amy, C., Christine, K., Glazer, T., Rivera, J., & Susan, Z. (2025). From volcanic ash to abundant earth : understanding Andisol organic matter dynamics in relation to soil health on Hawai'i Island. *Biogeochemistry*, *168*(2), 1–16. https://doi.org/10.1007/s10533-025-01216-9

Cuéllar-cruz, M., Zúñiga-estrada, E. A., Zúñiga-estrada, M. A., Islas, S. R., & Moreno, A. (2025). *Self-Induced Crystalline Morphology at the Mineral – Fluid Interface : Silica – Carbonate Biomorphs of Alkaline Earth Metals as a Case Study*. 1–19.

Erwinda, E., Muslim, R. Q., Pratamaningsih, M. M., Hati, D. P., Kricella, P., Suryani, E., & Susilawati, H. L. (2025). The Linkage of Soil pH, Phosphorus Availability,

and Exchangeable Aluminum in Andisol and Recommendations for Soil Improvement. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, *30*(3), 464–472. https://doi.org/10.18343/jipi.30.3.464

GmbH, B. A. (2010). *D8 ADVANCE D8 DISCOVER User Manual Innovation with Integrity* (Karlsruhe,). Bruker AXS GmbH.

Guo, Z., Liu, Z., & Tang, R. (2024). *MATERIALS CHEMISTRY Applications of amorphous inorganics as novel functional materials*. 1703–1730. https://doi.org/10.1039/d3qm01263h

Hartiningsih. (2023). *Identifikasi Jenis Mineral Industri Dengan Xrd Pada Sampel Batupasir Formasi Ekmai , Distrik Ertsberg , Kabupaten Mimika , Provinsi Papua Tengah*. *2*(2).

Iqbal, P., & Puswanto, E. (2024). The use of RSCS and XRD to volcanic residual soil characterization concerning the environment and sustainable development . Case Study : West Lampung Transect Road , Sumatra , Indonesia The use of RSCS and XRD to volcanic residual soil characterization co. *IOP Publishing*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1438/1/012075

Kementerian Pertanian. (2023). *Petani Food Estate Hortikultura Humbahas: Siapa Bilang Kami Gagal ?* https://www.pertanian.go.id/?show=news&act=view&id=5229

Laila Rizqiyah, E., Nuryani Hidayah Utami, S., & Heru Purwanto, B. (2023). Retention And Availability of Andisol Soil Phosphorus in Monocultural and Policultural Crop Patterns in Ngablak and Getasan Subdistrict, Magelang and Semarang, Indonesia. *BIO Web of Conferences*, *80*. https://doi.org/10.1051/bioconf/20238003016

Rambey, R., & Elfiati, D. (2022). *Agroforestry-Based Land Management in the Food Estate Area of Ria-Ria Village , Pollung District , Humbang Hasundutan Regency , North Sumatra*. *7*(2), 805–810.

Rosidah Rosi, Rina Devnita, Ridha Hudaya, & dan Rachmat Haryanto. (2018). PENGARUH PARTIKEL MIKRO TERAK BAJA TERHADAP RETENSI FOSFOR DAN HIDROGEN PADA ANDISOL. *Jurnal Penelitian Saintek*, *23*(2), 86–94.

Sufardi, S., Arabia, T., Khairullah, K., & Apriani, I. (2021). Particle size distribution and clay minerals in dryland soils of Aceh Besar , Indonesia Particle size distribution and clay minerals in dryland soils of Aceh Besar , Indonesia. *IOP Publishing*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/922/1/012013

Sukarman, Dariah., A., & Suratman. (2020). Volcanic Soils in Sloping Dry Land and Its Potential for Agriculture in Indonesia. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian*, *39*(1), 21. https://doi.org/10.21082/jp3.v39n1.2020.p21-34

Syahputra, O. H., Anggraini, N., & Irmansyah, T. (2024). *Food estate management strategy in Humbang Hasundutan Regency , North Sumatra Province Food estate management strategy in Humbang Hasundutan Regency , North Sumatra Province*. *Earth Environ. Sci. 1302 012103*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1302/1/012103

Tampubolon, J. H., Delvian, & Rauf, A. (2024). *ANALISIS PENDAPATAN USAHATANI TANAMAN*. *12*(2), 246–258.

USDA; Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (13 th). USDA Natural

Resources Conservation Service.

Yudis, A., Prayoga, Esa, Budiman, Christoper Michael, Intifadhah, & Sahara Hamas. (2025). Tinjauan Struktur dan Karakter Mineral Padatan dengan Menggunakan Metode X-Ray Diffraction (XRD): Review Singkat. *Progressive Physics Journal*, *6*, 508–515.