



Transformasi Mineral Klei pada Pertanian Intensif: Implikasi terhadap Kesuburan Tanah dan Keberlanjutan

Transformations of Clay Minerals Under Agricultural Intensification: Implications for Soil Fertility and Sustainability

R Ayu Chairunnisya^{1*}, Retno L Lubis¹, Yaumil Khairiyah¹, Khairun Purgawa¹ dan Retno Purnama Sari²

¹Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

²Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Jember

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

ABSTRAK

Transformasi mineral klei dalam tanah akibat intensifikasi pertanian memiliki dampak signifikan terhadap kesuburan tanah dan keberlanjutan sistem pertanian. Artikel review ini mengkaji dinamika transformasi mineral klei yang dipicu oleh praktik seperti pemupukan kimia, irigasi berlebih, dan pengolahan tanah intensif. Transformasi ini memengaruhi kapasitas tukar kation, retensi hara, dan stabilitas agregat tanah, dengan implikasi jangka panjang terhadap produktivitas dan kesehatan tanah. Kajian literatur dilakukan dengan meninjau publikasi dalam lima tahun terakhir yang berkaitan dengan kata kunci "transformasi mineral klei," "evolusi klei pada tanah," dan "pengelolaan tanah pertanian berkelanjutan." Sumber yang dipilih berasal dari basis data ilmiah terkemuka dan mencakup studi yang secara representatif menggambarkan transformasi mineral klei dalam sistem tanah pertanian serta dampaknya terhadap sifat tanah. Hasil kajian menunjukkan bahwa interaksi antara mineral klei, bahan organik, dan mikroorganisme dapat mempercepat transformasi mineral, tetapi juga membuka peluang untuk pengelolaan adaptif yang meningkatkan fungsi tanah. Oleh karena itu, strategi pertanian berkelanjutan berbasis bukti, seperti penggunaan biochar dan pertanian presisi, direkomendasikan untuk memitigasi dampak negatif transformasi mineral klei dan mendukung keberlanjutan tanah.

Kata Kunci: intensifikasi pertanian, keberlanjutan, mineral klei, transformasi klei

ABSTRACT

The transformation of clay minerals in soil due to agricultural intensification has significant impacts on soil fertility and the sustainability of agricultural systems. This review article examines the dynamics of clay mineral transformation triggered by practices such as chemical fertilization, excessive irrigation, and intensive soil tillage. These transformations influence cation exchange capacity, nutrient retention, and soil aggregate stability, with long-term implications for soil productivity and health. The literature review was conducted by analyzing publications from the last five years related to the keywords "clay mineral transformation," "clay evolution in soil," and "sustainable agricultural soil management." Relevant sources were selected from leading scientific databases, focusing on studies that represent clay mineral transformation in agricultural soil systems and its impact on soil properties. The review findings indicate that interactions between clay minerals, organic matter, and microorganisms can accelerate mineral transformation but also provide opportunities for adaptive management to enhance soil function. Therefore, evidence-based sustainable agricultural strategies, such as biochar application and precision farming, are recommended to mitigate the negative impacts of clay mineral transformation and support soil sustainability.

Keywords: agricultural intensification, clay minerals, clay transformation. sustainability

PENDAHULUAN

Mineral klei merupakan komponen esensial tanah yang memainkan peran krusial dalam menentukan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, sehingga memengaruhi berbagai proses penting dalam sistem tanah (Kome *et al.*, 2019). Sebagai reservoir nutrisi, mineral klei memiliki kapasitas tukar kation (KTK) yang tinggi, yang memungkinkan mineralisasi dan menyediakan unsur hara esensial dalam tanah (Zhang *et al.*, 2024). Selain itu, interaksi kompleks mineral klei dengan elemen-elemen tanah lainnya turut mengendalikan sekuestrasi dan stabilitas bahan organik tanah (Kome *et al.*, 2019), struktur tanah (Elhassan *et al.*, 2023) dan mendukung aktivitas biologis yang menjadikan mineral ini komponen vital dalam menjaga tingkat kesuburan tanah (Keller *et al.*, 2021).

Keberadaan dan stabilitas mineral klei menghadapi tantangan serius akibat meningkatnya aktivitas antropogenik, terutama dalam bentuk intensifikasi pertanian (Yu *et al.*, 2022). Praktik pertanian intensif telah memicu transformasi mineral klei yang berdampak pada perubahan komposisi mineralogi dan fungsi tanah (Liu *et al.*, 2017; Manjaiah *et al.*, 2019). Transformasi ini terjadi melalui mekanisme pelapukan yang dipercepat oleh aktivitas manusia (Yu *et al.*, 2022) dan diperkuat oleh faktor lingkungan seperti kondisi iklim (Gao *et al.*, 2021; Majid, 2023). Dalam konteks ini, perubahan signifikan pada komposisi mineral utama tanah, seperti illit, kaolinit, dan klorit, secara langsung dipengaruhi oleh aktivitas pemupukan dan akumulasi polutan (Pal *et al.*, 2022).

Implikasi dari perubahan komposisi mineral klei ini sangat luas, mencakup mineralisasi dan retensi hara, dinamika air tanah, kondisi aerasi, pembentukan agregat, hingga dekomposisi bahan organik (Zhang *et al.*, 2022). Chen *et al.* (2023) menunjukkan bahwa peningkatan illit dalam tanah akibat kombinasi pemupukan kimia dan bahan organik secara kontinu meningkatkan tempat adsorpsi fosfor sebanyak 20–21%, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor sebesar 47–58%. Selain itu, perubahan kandungan mineral klei juga berdampak pada kapasitas tukar kation (KTK) dan retensi air tanah. Studi oleh Mishra *et al.* (2022) menunjukkan bahwa dominasi smektit dalam tanah sawah dapat meningkatkan KTK hingga 35%, sementara peningkatan kandungan kaolinit dalam tanah kering mengurangi retensi air sebesar 12–18%. Penelitian lain melaporkan bahwa kaolinit mampu meningkatkan KTK sebesar 4,01–7,33 cmolc kg⁻¹, tergantung pada komposisi awal tanah (Song *et al.*, 2023). Selain itu, kemampuan smektit untuk membengkak dan menahan air menyebabkan peningkatan retensi air sekitar 15–25%, bergantung pada kondisi spesifik dan komposisi tanah (Benavides & Guggenheim, 2024; Mejri *et al.*, 2022).

Mineral klei memberikan kontribusi fundamental terhadap dinamika sistem tanah, dengan karakteristik dan peran yang bervariasi bergantung pada jenis mineral dan ukuran partikelnya (Zaarur & Erel, 2024). Pembentukan mineral klei sendiri merupakan hasil interaksi kompleks dari lima faktor pembentuk tanah, yakni bahan induk, iklim, biota, topografi, dan waktu (Lybrand & Rasmussen, 2018; Mavris *et al.*, 2011). Dalam konteks perubahan penggunaan lahan, transformasi signifikan pada mineral klei tipe 2:1 berdampak langsung terhadap dinamika hara, khususnya dalam proses penyimpanan dan pertukaran K⁺, yang selanjutnya memengaruhi tingkat kesuburan dan fungsi tanah secara keseluruhan (Austin *et al.*, 2018). Lebih jauh, proses kaolinisasi yang mengubah mineral klei tipe 2:1 menjadi kaolinit tidak hanya mengubah ukuran dan susunan partikel klei, tetapi juga secara signifikan memengaruhi struktur tanah, yang pada akhirnya berdampak pada porositas dan kapasitas retensi air tanah (Li *et al.*, 2020).

Dalam satu dekade terakhir, penelitian mengenai transformasi mineral klei akibat intensifikasi pertanian semakin mendapat perhatian, seiring dengan meningkatnya urgensi pengelolaan tanah berkelanjutan untuk ketahanan pangan global. Transformasi ini tidak hanya memengaruhi kesuburan tanah, tetapi juga berkontribusi terhadap perubahan ekosistem yang lebih luas, terutama dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, degradasi lahan, dan pertumbuhan populasi. Berdasarkan urgensi tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif proses transformasi mineral klei yang dipicu oleh intensifikasi pertanian, menganalisis mekanisme yang terlibat, serta mengevaluasi dampaknya terhadap kesuburan dan keberlanjutan tanah, serta menyusun sintesis ilmiah yang dapat menjadi dasar bagi strategi pengelolaan tanah yang lebih adaptif, inovatif, dan berbasis bukti ilmiah.

Berbeda dari kajian sebelumnya yang umumnya berfokus pada aspek mineralogi atau kimia tanah secara terpisah, artikel ini menawarkan perspektif baru dengan mengintegrasikan faktor antropogenik, lingkungan, dan biogeokimia dalam memahami transformasi mineral klei. Melalui pendekatan multidisiplin, review ini mensintesis berbagai temuan terkini tentang interaksi kompleks antara aktivitas manusia, kondisi lingkungan, dan proses biogeokimia yang menggerakkan perubahan mineral klei. Selain itu, artikel ini menyoroti dampak mekanisme transformasi mineral klei terhadap keseimbangan hara, stabilitas struktur tanah, dan kapasitas retensi air—dimensi penting yang belum

banyak dikaji secara holistik dalam literatur sebelumnya.

DINAMIKA MINERAL KLEI DALAM TANAH

Klasifikasi dan karakteristik mineral klei

Fraksi klei merupakan komponen esensial tanah yang memiliki peran krusial dalam menentukan sifat fisik dan kimia tanah. Berdasarkan struktur kristal dan komposisi kimianya, mineral klei dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok utama yang memiliki karakteristik dan pengaruh berbeda terhadap fungsi tanah. Mineral klei tipe 1:1 merupakan struktur filosilikat yang tersusun dari satu lapis tetrahedral silika dan satu lapis oktahedral alumina. Kaolinit, sebagai contoh utama mineral klei 1:1, memiliki struktur berlapis khas yang terikat oleh ikatan hidrogen, yang memengaruhi sifat fisiknya seperti belahan dan kekerasan (Ható *et al.*, 2013). Struktur lapisan mineral ini terdiri dari lembar silika dan alumina yang tersusun secara berselang-seling, menghasilkan struktur yang stabil dengan jarak basal sekitar 0,72 nm pada kaolinit (Ható *et al.*, 2013). Mineral-mineral klei tipe 1:1 dicirikan oleh kapasitas tukar kation yang relatif rendah dan stabilitas yang tinggi, yang secara langsung memengaruhi sifat-sifat tanah seperti drainase dan ketersediaan hara. Pembentukan mineral ini umumnya terjadi dalam kondisi pelapukan tertentu yang selanjutnya berimplikasi pada kesuburan dan struktur tanah (Pineau *et al.*, 2022). Karakteristik spesifik lainnya meliputi luas permukaan yang relatif rendah dan ikatan hidrogen yang kuat antar lapisan, yang berkontribusi terhadap stabilitasnya yang tinggi. Dalam sistem tanah, mineral klei tipe 1:1 memainkan peran penting dalam mengatur retensi air, ketersediaan hara, dan pembentukan struktur tanah (Zhang *et al.*, 2022).

Mineral klei tipe 2:1 dalam tanah mengacu pada struktur mineral yang tersusun dari satu lapis oktahedral yang diapit oleh dua lapis tetrahedral (Liao *et al.*, 2024). Struktur khas ini dijumpai pada mineral-mineral seperti illit, smektit, dan vermikulit, yang dikenal memiliki kemampuan mengembang dan mengerut seiring dengan perubahan kadar air (Ouyang *et al.*, 2021). Karakteristik mengembang-mengerut ini memungkinkan mineral-mineral tersebut untuk meretensi air, yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman, terutama di daerah-daerah arid (Liao *et al.*, 2024). Dibandingkan dengan mineral tipe 1:1 seperti kaolinit, mineral klei tipe 2:1 memiliki kapasitas tukar kation (KTK) yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan kemampuan tanah dalam meretensi unsur hara (Song *et al.*, 2023). Selain itu, dominansi mineral klei 2:1 dalam tanah berkontribusi terhadap tingkat plastisitas dan stabilitas tanah (Elhassan *et al.*, 2023).

Mineral klei amorf dalam tanah merujuk pada konstituen liat non-kristalin yang keberadaannya berdampingan dengan mineral klei kristalin. Material amorf ini sering dijumpai sebagai lapisan pelapis pada silikat kristalin (Tsukimura *et al.*, 2021). Keberadaan material amorf dapat menunjukkan spektrum yang beragam, mulai dari material vulkanik atau material hasil tumbukan yang masih murni hingga mineral klei yang terbentuk melalui alterasi akuatik, yang mencerminkan kompleksitas sifat dan proses pembentukannya (Thorpe *et al.*, 2022). Mineral klei amorf, seperti silika amorf (SiA) dan besi zero-valent amorf (FeZVA), memiliki karakteristik unik berupa luas permukaan tinggi dan struktur tidak teratur (Akinbodunse *et al.*, 2024). SiA memiliki kemampuan signifikan dalam meningkatkan kapasitas penyimpanan air tanah hingga 180% dengan penambahan 3% berat SiA, terutama pada tanah berpasir, serta berperan dalam meningkatkan mobilitas dan bioavailabilitas fosfor melalui kompetisi pada tempat sorpsi (Schaller *et al.*, 2020). Sementara itu, FeZVA dalam komposit kaolinit berkontribusi pada stabilisasi logam berat seperti kadmium dalam tanah, peningkatan pH dan kapasitas tukar kation, serta pengurangan karbon organik terlarut (Ren *et al.*, 2023). Meskipun mineral klei amorf menawarkan berbagai manfaat bagi tanah, efektivitasnya bergantung pada tekstur dan komposisi tanah, dengan pengaruh yang lebih signifikan pada tanah berpasir dibandingkan tanah liat berdebu (Zarebanadkouki *et al.*, 2024).

Stabilitas dan distribusi mineral klei pada tanah

Mineral klei merupakan komponen utama dalam tanah yang berperan krusial dalam menentukan sifat fisik, kimia, dan biologis tanah. Mineral ini terbentuk melalui proses pelapukan bahan induk yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti kondisi iklim dan dinamika pedogenik (Hong *et al.*, 2023; Ouyang *et al.*, 2021). Dengan ukuran partikel yang sangat kecil ($<2 \mu\text{m}$), mineral klei memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi serta kapasitas tukar kation (KTK) yang besar (Zhang *et al.*, 2024), menjadikannya media penting dalam penyediaan dan retensi unsur hara bagi tanaman (Datta *et al.*, 2020). Selain itu, perannya dalam pembentukan agregat tanah, peningkatan kapasitas retensi air, serta interaksi dengan bahan organik dan mikroorganisme menjadikan mineral klei sebagai elemen kunci

dalam menjaga kesuburan dan keberlanjutan sistem pertanian (Yu *et al.*, 2020).

Stabilitas mineral klei mengacu pada kemampuan mineral-mineral klei untuk mempertahankan struktur dan komposisinya dalam berbagai kondisi lingkungan. Faktor-faktor seperti jenis bahan induk (Datta *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2023), kondisi iklim (Ibarra & Evaristo, 2024; Zhao *et al.*, 2024), karakteristik tanah (Mejri *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2023) dan interaksi dengan material lain (Soltaninejad *et al.*, 2023), berperan dalam mengontrol proses pembentukan, transformasi, dan persistensi mineral klei dalam tanah. Interaksi yang kompleks ini tidak hanya memengaruhi sifat fisik dan kimia tanah tetapi juga menentukan kemampuan tanah dalam mendukung produktivitas pertanian dan ketahanan ekosistem secara keseluruhan.

Studi membuktikan adanya hubungan yang erat antara stabilitas mineral klei tipe 1:1 dengan komposisi larutan tanah. Peningkatan nilai pF, mengindikasikan ukuran pori yang lebih kecil dan berkorelasi positif dengan peningkatan pH larutan tanah namun berkorelasi negatif dengan konsentrasi silika (Fernandez-Marcos *et al.*, 1979). Fenomena ini mengonfirmasi stabilitas mineral klei tipe 1:1 di berbagai horizon tanah. Lebih lanjut, studi lain menemukan bahwa karakteristik struktur mineral klei tipe 1:1 (kaolinit) yang lebih sederhana dengan ruang antar lapisan yang lebih terbatas menghasilkan kapasitas penyerapan ion yang lebih rendah, namun memberikan tingkat stabilitas yang lebih tinggi dalam tanah dibandingkan dengan mineral klei tipe 2:1 (montmorilonit) (Wiśniewska *et al.*, 2022).

Stabilitas mineral klei tipe 2:1 (illit, vermikulit, dan montmorilonit) lebih rendah dibandingkan dengan mineral klei tipe 1:1 (kaolinit), terutama akibat perbedaan struktur kristal dan tingkat kerentanannya terhadap proses pelapukan. Mineral klei tipe 2:1 memiliki struktur berlapis ganda, dengan dua lapisan tetrahedral yang mengapit satu lapisan oktahedral, sehingga memungkinkan pertukaran air dan kation dalam jumlah lebih besar. Hal ini menyebabkan mineral tersebut lebih reaktif dan rentan terhadap pelapukan dalam berbagai kondisi lingkungan (Austin *et al.*, 2018; Razum *et al.*, 2024). Proses erosi dan defisiensi hara yang berlangsung dalam jangka panjang dapat semakin mempercepat pelapukan mineral klei tipe 2:1 (Musa *et al.*, 2024). Untuk meningkatkan stabilitas mineral klei tipe 2:1, beberapa penelitian menyarankan penggunaan material geopolimer berbasis metakaolin, yang berpotensi mengurangi kerentanan terhadap pelapukan serta meningkatkan kestabilan strukturalnya (Zad & Kazemzadeh, 2024).

Selain stabilitas individu mineral, interaksi antara mineral klei tipe 1:1, tipe 2:1, dan mineral klei amorf juga berperan dalam menentukan sifat tanah secara keseluruhan, terutama dalam hal stabilitas agregat, kapasitas retensi air, dan ketersediaan hara. Mineral tipe 1:1, seperti kaolinit, yang memiliki struktur berlapis tunggal dengan ikatan hidrogen yang kuat, lebih stabil dan kurang ekspansif dibandingkan dengan mineral tipe 2:1 yang dapat mengalami ekspansi akibat masuknya air dan ion (Austin *et al.*, 2018; Razum *et al.*, 2024). Sementara itu, mineral klei amorf, seperti alofan dan imogolit, yang banyak ditemukan pada tanah vulkanik, memiliki luas permukaan spesifik tinggi dan kapasitas adsorpsi besar, sehingga berkontribusi terhadap retensi hara dan stabilisasi struktur tanah (Musa *et al.*, 2024). Kombinasi ketiga jenis mineral ini sangat menentukan dinamika kesuburan tanah; dominasi mineral tipe 2:1 dapat meningkatkan kapasitas retensi hara tetapi juga berisiko menyebabkan dispersi partikel tanah, sementara keberadaan mineral tipe 1:1 dan mineral amorf dapat membantu memperkuat agregasi tanah dan mengurangi risiko erosi.

Stabilitas mineral klei pada tanah memengaruhi pola distribusi mineral klei di berbagai jenis tanah pertanian, yang juga dipengaruhi oleh faktor-faktor pembentuk tanah seperti bahan induk dan kondisi lingkungan. Berdasarkan hasil-hasil penelitian yang dirangkum pada Tabel 1, komposisi mineral klei menunjukkan variasi yang signifikan di antara jenis-jenis tanah, dengan dominasi mineral tertentu yang berbeda sesuai dengan konteks lingkungannya.

Tabel 1. Kumpulan studi yang membahas faktor – faktor yang berperan dalam distribusi klei

Faktor – faktor yang mempengaruhi distribusi klei	Studi	Hasil studi
Bahan Induk	(Ouyang <i>et al.</i> , 2021; Yu <i>et al.</i> , 2020)	Tanah berbahan induk granit, sebagian besar akan mengandung mineral klei 1:1 (kaolinit), sedangkan tanah yang berasal dari batu kapur, endapan sungai kaya dan batuan pasir akan kandungan mineral klei 2:1 (illit, smektit dan vermikulit).
	(Esaa & Kassim, 2021)	Keberadaan montmorilonit pada tanah – tanah arid dalam studi ini merupakan

Faktor – faktor yang mempengaruhi distribusi klei	Studi	Hasil studi
Sifat Tanah	(Herrero <i>et al.</i> , 2024)	hasil pewarisan alami dari mineral mika. Sedangkan klorit dalam tanah merupakan hasil kloritisasi mineral klei 2:1. Mika dan klorit diidentifikasi sebagai mineral ‘turunan’ dari bahan induk kaya akan gipsum, sedangkan smektit terbentuk dari tranformasi ataupun neoformasi. Studi ini menekankan pada faktor litogenik memiliki pengaruh lebih signifikan dibandingkan pedogenik pada pembentukan mineral klei dalam tanah.
	(Firmano <i>et al.</i> , 2020)	Defisiensi unsur K ⁺ jangka panjang dalam tanah memengaruhi tatanan struktural filosilikat 2:1 yang terkait dengan cadangan K.
	(Liao <i>et al.</i> , 2024)	Kepadatan lapisan atas tanah dan tingkat drainase menjadi dua indikator dalam pendekatan pengamatan distribusi mineral klei tanah. Kepadatan tanah lebih mencerminkan distribusi klei 2:1, sedangkan tingkat drainase yang tinggi merepresentasikan mineral – mineral sekunder.
	(Günel & Acir, 2024)	Melalui pendekatan <i>machine learning</i> , penelitian ini mengidentifikasi bahwa kation yang dapat dipertukarkan, khususnya magnesium (Mg) dan kalsium (Ca), merupakan faktor penting yang mempengaruhi distribusi spasial mineral lempung di wilayah semi-kering Turkiye. Konsentrasi Mg memiliki pengaruh terkuat dalam memprediksi smektit+vermikulit (SMVR) dan ilit, sedangkan Ca paling signifikan untuk prediksi kaolinit.
Kondisi Lingkungan	(Shahrokh <i>et al.</i> , 2023; Xinwei <i>et al.</i> , 2023)	Topografi, termasuk kemiringan dan posisi lereng, mempengaruhi pergerakan air dan partikel tanah, sehingga mempengaruhi distribusi klei mineral. Lereng yang lebih curam dapat menyebabkan peningkatan erosi dan pengangkutan partikel lempung.
	(Lin <i>et al.</i> , 2021)	Faktor lingkungan seperti iklim, topografi, dan sifat-sifat tanah secara signifikan mempengaruhi distribusi klei mineral di dalam tanah. Iklim, khususnya suhu dan curah hujan, memiliki efek negatif langsung terhadap konsentrasi kalium tanah, yang selanjutnya dipengaruhi oleh sifat-sifat utama tanah dan komposisi mineralogi klei.
	(Punia & Siddaiah, 2019)	Iklim semi-kering Gurun Thar memengaruhi distribusi oksida utama dan mineral tanah liat di wilayah

Faktor – faktor yang mempengaruhi distribusi klei	Studi	Hasil studi
		terdekat.
Aktivitas Manusia	(Lin <i>et al.</i> , 2021; Maphuhla & Oyediji, 2024; Nortjé & Laker, 2021; Zhang & Wang, 2020)	Aktivitas pertambangan dapat mengubah distribusi alami klei mineral dengan mendatangkan polutan dan mengubah komposisi kimiawi tanah.

Stabilitas dan distribusi mineral klei dalam tanah merupakan hasil interaksi kompleks antara berbagai faktor, meliputi bahan induk, sifat tanah, kondisi lingkungan, dan aktivitas manusia. Keempat faktor tersebut saling berinteraksi dan berkontribusi terhadap variabilitas spasial serta komposisi mineral klei dalam sistem tanah. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, berbagai studi telah memfokuskan penelitiannya pada satu atau dua faktor spesifik untuk mengkaji lebih dalam signifikansi dan mekanisme pengaruhnya terhadap sebaran mineral klei dalam sistem tanah. (Xu *et al.*, 2023) menjelaskan bahwa bahan induk berperan sebagai penyedia fondasi bagi pembentukan mineral klei tanah, sementara sifat-sifat tanah seperti tekstur dan pH memengaruhi ketersediaan unsur-unsur pembentuknya. Kondisi lingkungan, terutama iklim dan topografi, selanjutnya memodifikasi pola distribusi ini. Aktivitas antropogenik, khususnya praktik pertanian dan pencemaran, dapat mengubah komposisi tanah serta meningkatkan atau menurunkan keberadaan unsur-unsur mikro tertentu, yang menghasilkan interaksi kompleks dalam distribusi mineral klei tanah.

DAMPAK PRAKTIK INTENSIFIKASI PERTANIAN TERHADAP TRANSFORMASI MINERAL KLEI

Praktik pertanian intensif yang dicirikan oleh penggunaan bahan kimia pertanian, mesin berat, dan irigasi berlebihan telah mempercepat degradasi tanah dan mengubah proses alami transformasi mineral klei. Sistem pertanian intensif ini memberikan dampak signifikan terhadap transformasi mineral klei dalam tanah, yang mengakibatkan berbagai konsekuensi ekologis dan agronomi, meliputi penurunan kesuburan tanah, peningkatan salinitas tanah, dan deplesi unsur hara esensial (Tabel 2).

Tabel 2. Dampak intensifikasi pertanian terhadap transformasi mineral klei dan mekanismenya

Studi	Aktivitas intensifikasi	Hasil Studi	Mekanisme Transformasi
Liu <i>et al.</i> (2017)	Pengolahan tanah – Pemupukan (pupuk NPK) – Input bahan organik (biomassa tanaman)	Hasil penelitian selama delapan tahun menunjukkan adanya transformasi signifikan antar jenis mineral klei. Sebagai contoh, illit dapat bertransformasi menjadi vermikulit atau smektit, bergantung pada ketersediaan kalium (K ⁺) dan tingkat keasaman tanah. Fenomena ini mengonfirmasi bahwa mineral klei bersifat dinamis dan dapat mengalami perubahan sesuai dengan kondisi lingkungan dan praktik pengelolaan pertanian.	Transformasi mineral klei dalam tanah dipengaruhi oleh praktik pertanian, kedalaman tanah, dan sifat kimia seperti pH dan ketersediaan K ⁺ . Illit dapat berubah menjadi vermikulit atau smektit tergantung keasaman tanah dan K ⁺ , sementara perpindahan partikel halus seperti illit dan vermikulit mengubah komposisi mineral pada berbagai kedalaman. Materi organik lebih berasosiasi dengan vermikulit dan smektit, memengaruhi distribusi mineral. Praktik intensif meningkatkan vermikulit hingga 68%, terutama setelah oksidasi materi organik dengan H ₂ O ₂ . Kondisi asam mempercepat

Studi	Aktivitas intensifikasi	Hasil Studi	Mekanisme Transformasi
Shahrokh <i>et al.</i> (2020)	Budidaya jeruk usia 5, 10, dan 20 tahun.	Penelitian ini mengungkap transformasi palygorskite menjadi kaolinit di rizosfer pohon jeruk, terutama pada kebun jeruk manis dan lemon, yang menunjukkan dinamika mineral tanah akibat aktivitas tanaman dan kondisi lingkungan. Transformasi ini lebih dominan pada pohon jeruk yang lebih tua (20 tahun), seiring dengan meningkatnya kebutuhan magnesium (Mg) akibat budidaya berkelanjutan	pelepasan K^+ dan mobilisasi Al^{3+} , memicu transformasi struktural seperti smektit menjadi vermikulit, yang berdampak pada kesuburan dan keberlanjutan tanah. Transformasi palygorskite menjadi kaolinit di tanah, khususnya di rizosfer pohon jeruk, terjadi melalui pelapukan yang dipicu oleh asam organik dari akar tanaman, yang memecah struktur palygorskite dan melepaskan magnesium (Mg). Nutrisi ini diserap oleh akar, sementara sisa silika dan aluminium membentuk kaolinit yang lebih stabil. Proses ini lebih intensif di rizosfer, didukung oleh kondisi tanah seperti pH, kelembaban, dan suhu, dengan pohon jeruk tua menunjukkan pembentukan kaolinit lebih tinggi karena sistem perakaran yang matang. Observasi mikroskopik mengonfirmasi adanya partikel kaolinit baru berbentuk heksagonal, menunjukkan perubahan kimia dan morfologi mineral.
Sousa <i>et al.</i> (2021)	Irigasi dan penanaman jangka panjang (26 tahun)	Penelitian ini menunjukkan perbedaan signifikan antara profil tanah irigasi (IP) dan non-irigasi (N-IP) dalam sifat kimia dan mineralogi, di mana IP mengalami penurunan natrium dapat ditukar (solodisasi), sedangkan N-IP menunjukkan akumulasi garam terlarut dan natrium dapat ditukar yang lebih tinggi (solonisasi). Irigasi memicu perubahan mineralogi, dengan IP menunjukkan kaolinisasi progresif, sedangkan N-IP memiliki tingkat pelapukan lebih rendah dengan keberadaan mineral lapisan campuran seperti kaolinit-vermikulit dan illit-smektit. Rasio SiO_2/Al_2O_3 yang sedikit menurun pada IP mencerminkan transformasi mineral akibat irigasi jangka panjang.	Penelitian ini mengidentifikasi kaolinit dan illit sebagai mineral dominan di fraksi klei pada profil irigasi (IP) dan non-irigasi (N-IP). Pada IP, terjadi kaolinisasi progresif, yaitu transformasi mineral klei yang kurang stabil menjadi kaolinit yang lebih stabil akibat pelapukan primer melalui hidrolisis dan pencucian. Sebaliknya, N-IP menunjukkan keberadaan mineral berlapis campuran seperti kaolinit-vermikulit dan illit-smektit, yang mencerminkan tingkat pelapukan lebih rendah. Irigasi terbukti mempercepat konversi mineral yang kurang stabil menjadi bentuk yang lebih stabil

Studi	Aktivitas intensifikasi	Hasil Studi	Mekanisme Transformasi
Tao <i>et al.</i> (2021)	Pemupukan dengan pupuk kandang dan pengapuran	Penelitian ini menunjukkan bahwa aplikasi pupuk kandang jangka panjang meningkatkan retensi fosfor (P) tanah dengan menyediakan banyak situs retensi P melalui mineral klei yang mendukung oksida Fe kristalin dan amorf, yang berperan dalam adsorpsi dan stabilisasi P. Pemberian pupuk kandang juga mengubah mineral klei dari tipe 2:1 menjadi tipe 1:1, dipengaruhi oleh peningkatan biomassa mikroba. Transformasi ini menunjukkan integrasi antara mikrobiologi dan mineralogi dalam mengontrol retensi P dan perubahan mineral klei.	seperti kaolinit dan illit melalui pelepasan ion dan penghilangan garam larut. Transformasi klei 2:1 menjadi 1:1 terjadi melalui interaksi mikroorganisme yang menghasilkan zat ekstraseluler, mengurangi Fe(III) struktural, dan merusak struktur smektit. Aplikasi pupuk kandang meningkatkan biomassa mikroba, mempercepat perubahan fase mineral, serta memengaruhi retensi fosfor pada kompleks mineral klei-oksida besi.
Das <i>et al.</i> (2022)	Pemupukan N dan P, serta defisiensi K berkepanjangan	Penelitian ini mengungkapkan masalah serius terkait deplesi kalium (K) dalam tanah pertanian India akibat praktik tanam intensif yang lebih fokus pada pemupukan nitrogen (N) dan fosfor (P), sementara aplikasi K sering diabaikan. Hal ini menyebabkan keseimbangan K negatif, yang memburuk dari -3,29 juta ton pada 2000-01 menjadi -7,2 juta ton pada 2015-16. Deplesi K jangka panjang merusak cadangan K yang dapat dipertukarkan maupun tidak, mengurangi kesuburan tanah dan produktivitas tanaman. Sistem tanam padi-gandum yang dominan, misalnya, dapat menyerap hingga 325 kg K per hektar.	Pengabaian pemupukan kalium (K) dalam jangka panjang dapat memicu transformasi signifikan pada mineral klei, di mana mineral seperti mika atau illit bertransformasi menjadi vermikulit dan smektit yang memiliki muatan lapisan lebih rendah. Dalam eksperimen jangka panjang, kandungan mika pada fraksi klei menurun drastis di lahan tanpa aplikasi K, menunjukkan hilangnya mineral pembawa K akibat deplesi K. Transformasi mineral ini sering kali bersifat irreversibel, di mana mineral seperti mika yang berubah menjadi bentuk kurang stabil tidak dapat lagi secara efektif menyediakan K bagi tanaman.
Sandler <i>et al.</i> (2023)	Pemupukan K dan irigasi	Penelitian mengenai pengaruh pemupukan kalium (K) dan irigasi pada tanah pertanian di Israel mengungkapkan bahwa aplikasi K secara signifikan memengaruhi komposisi kimia dan mineralogi tanah. Perubahan yang paling nyata teramati pada transformasi illit-smektit (IS) menjadi kaolinit dan illit di tanah	Transformasi mineral klei dalam tanah dipengaruhi oleh interaksi antara pemupukan kalium (K), irigasi, dan jenis tanah. Pemupukan K mempercepat perubahan illit-smektit (IS) menjadi kaolinit dan illit dengan meningkatkan ketersediaan K bagi

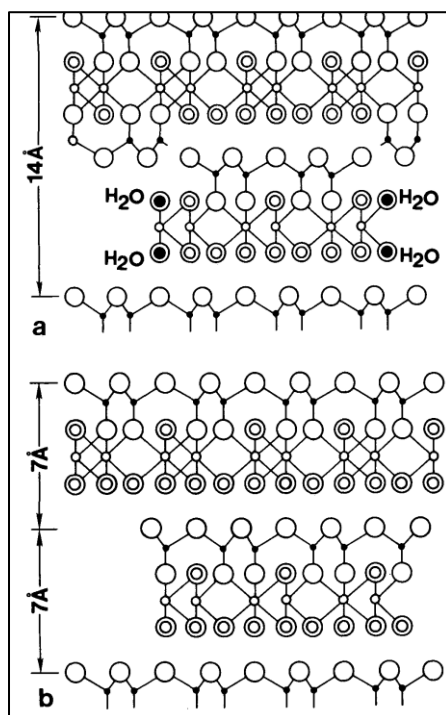
Studi	Aktivitas intensifikasi	Hasil Studi	Mekanisme Transformasi
		berpasir, yang berkaitan dengan keseimbangan K positif. Menariknya, pada tanah berlempung dan berliat, perubahan akibat praktik budidaya cenderung minimal. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pemupukan K yang berlebihan, terutama pada sistem produksi biomassa tinggi, dapat mengakibatkan keseimbangan K negatif, yang mengindikasikan potensi deplesi cadangan K alami tanah. Mineral IS sendiri berperan sebagai sumber K dinamis yang mendukung kebutuhan tanaman, sehingga menekankan pentingnya pengelolaan K dan irigasi yang cermat untuk menjaga kesehatan dan keberlanjutan tanah dalam sistem pertanian.	tanaman, sedangkan irigasi menjaga kelembaban tanah untuk mendukung reaksi kimia yang diperlukan dalam proses ini. Pada tanah berpasir, kombinasi irigasi dan pemupukan K menghasilkan keseimbangan K positif yang mendorong transformasi IS menjadi mineral yang lebih stabil. Namun, pada tanah dengan tekstur lempung dan berliat, perubahan mineral akibat irigasi dan pemupukan K cenderung minimal. Selain itu, kelebihan pemupukan K, terutama dengan irigasi berlebih, dapat menyebabkan keseimbangan K negatif karena kapasitas retensi K yang terbatas.
Li et al. (2024)	Aplikasi pupuk mineral secara masif dan jangka panjang	Penelitian pada tanah Vertisol menunjukkan bahwa fosfor koloid (CP) yang dapat diekstraksi dengan air berkontribusi signifikan pada transportasi fosfor, dengan konsentrasi 6–37 kali lebih tinggi daripada fosfor reaktif terlarut (DRP). Konsentrasi fosfor total, tersedia, dan organik menurun seiring kedalaman, mencerminkan migrasi dari permukaan ke subsoil. Sifat koloid seperti potensi zeta negatif meningkatkan mobilitas fosfor, sementara perubahan spesiasi fosfor, seperti peningkatan hidroksiapatit (HAP) dengan kedalaman, dipengaruhi oleh pengasaman tanah dan perilaku montmorilonit dan nontronit.	Aplikasi berlebihan pupuk mineral dalam jangka panjang dapat mengubah mineral klei dalam tanah, khususnya pada Vertisol,. Pengasaman tanah akibat penggunaan pupuk kaya fosfor secara terus-menerus memengaruhi muatan dan struktur mineral klei, seperti montmorilonit dan nontronit, dengan meningkatkan pelarutan mineral dan mengubah sifat fisik maupun kimianya. Translokasi koloid fosfor dari lapisan permukaan ke subsoil dipengaruhi oleh perilaku mengembang-menyusut mineral klei, yang menciptakan jalur aliran preferensial bagi air dan unsur hara. Perubahan potensial zeta menjadi lebih negatif akibat akumulasi fosfor organik dan anorganik meningkatkan mobilitas koloid fosfor dan interaksi dengan komponen tanah lainnya, sehingga dapat memengaruhi struktur matriks klei.

Praktik intensifikasi pertanian, yang meliputi pengolahan tanah, pemupukan, irigasi, dan budidaya tanaman jangka panjang, memberikan pengaruh signifikan terhadap transformasi mineral klei dalam tanah. Aktivitas antropogenik tersebut tidak hanya memodifikasi komposisi mineral klei tetapi juga memengaruhi stabilitasnya, dengan tingkat perubahan yang bergantung pada kondisi lingkungan dan sistem pengelolaannya. Mekanisme fundamental yang menginduksi transformasi mineral klei melibatkan serangkaian proses, mencakup pelarutan ion-ion esensial seperti K^+ dan Mg^{2+} , pelepasan bahan organik, serta pelapukan primer yang diinisiasi oleh faktor-faktor lingkungan.

Implementasi irigasi memainkan peran instrumental dalam transformasi mineral klei, sebagaimana divalidasi melalui investigasi (Sousa *et al.*, 2021) dan (Sandler *et al.*, 2023). Aplikasi irigasi jangka panjang terbukti mempercepat pelapukan mineral yang memiliki stabilitas rendah, seperti illit-smektit, menjadi kaolinit yang lebih stabil, khususnya pada tanah bertekstur pasir. Transformasi tersebut difasilitasi oleh mekanisme pencucian ion-ion terlarut, modifikasi pH tanah, dan pembentukan jalur aliran preferensial yang diakibatkan oleh karakteristik mengembang-menyusut mineral klei. Sebaliknya, pada tanah bertekstur lebih halus seperti lempung dan liat, proses transformasi mineral akibat irigasi menunjukkan laju perubahan yang relatif lebih lambat. Berdasarkan beberapa evidensi empiris tersebut, dapat disimpulkan bahwa praktik intensifikasi pertanian memberikan pengaruh substansial terhadap dinamika mineral klei, dengan implikasi signifikan terhadap keberlanjutan kesuburan tanah dan produktivitas sistem pertanian.

PRO DAN KONTRA: TRANSFORMASI MINERAL KLEI DAN KESUBURAN TANAH DALAM SISTEM PERTANIAN INTENSIF

Transformasi mineral klei dalam tanah (Gambar 1) memiliki pengaruh yang kompleks terhadap sifat kimia, fisik, dan biologisnya, yang secara langsung memengaruhi kesuburan tanah dalam sistem pertanian intensif. Transformasi ini dipengaruhi oleh interaksi dengan bahan organik, mikroorganisme, dan kondisi lingkungan, yang secara kolektif menentukan ketersediaan hara, stabilitas struktur tanah, dan aktivitas mikroba dalam tanah.



Gambar 1. Ilustrasi mekanisme potensi perubahan struktur pada kisi smektit: (a) Tetrahedral inversi dan penempelan pada lembaran Al-hidroksi-interlayer. (b) Pembentukan dua lapisan seperti kaolinit 1:1 dari struktur alamiah 2:1 smektit.

Sumber: Dikutip dari hasil studi oleh (Karathanasis & Hajek, 1983)

1. Dampak terhadap sifat kimia tanah

Transformasi mineral klei dari tipe 2:1 menjadi tipe 1:1 memiliki peran fundamental dalam regulasi retensi dan bioavailabilitas unsur hara dalam sistem tanah. Mekanisme ini

berlangsung melalui perubahan struktur kristal mineral yang mempengaruhi kapasitas pertukaran kation dan anion, sehingga berdampak pada dinamika hara dalam sistem tanah. Studi oleh (Tao *et al.*, 2021) menunjukkan bahwa perlakuan ini tidak hanya meningkatkan akumulasi fosfor dalam koloid tanah, tetapi juga mendorong transformasi mineral klei dari tipe 2:1, seperti illit, menjadi tipe 1:1, seperti kaolinit. Perubahan ini terjadi melalui interaksi dengan oksida besi kristalin maupun amorf, yang berfungsi sebagai situs adsorpsi utama dalam meningkatkan stabilitas fosfor. Selain itu, aplikasi pupuk kandang yang berkelanjutan dapat meningkatkan pH tanah tanpa meningkatkan salinitas secara signifikan, menciptakan kondisi yang lebih optimal bagi transformasi mineral klei dan peningkatan retensi fosfor dalam tanah.

Mendukung temuan tersebut, (Chen *et al.*, 2023) mengonfirmasi peran signifikan mineral illit dan kaolinit dalam retensi fosfor pada tanah yang diaplikasikan dengan pupuk organik selama delapan tahun. Implementasi pemupukan organik pada tanah sawah alkalin menginduksi peningkatan persentase mineral illit yang memiliki kapasitas superior dalam mengadsorpsi hara fosfor, sehingga berkontribusi pada peningkatan bioavailabilitas P hingga 58,2% dibandingkan dengan metode pemupukan konvensional. Studi ini juga mengidentifikasi korelasi positif antara pemupukan organik dengan diversitas mikroba, khususnya kelompok *Firmicutes* dan *Gemmatimonadetes*, yang berperan instrumental dalam transformasi mineral klei melalui mekanisme dekomposisi bahan organik dan modifikasi struktur tanah.

Di sisi lain, (Austin *et al.*, 2018) dalam tulisannya menegaskan bahwa perubahan mineral klei 2:1 menjadi 1:1 juga dapat memberikan dampak negatif terhadap kesuburan tanah. Perubahan mineral klei, khususnya dari smektit yang memiliki kapasitas tukar kation (KTK) tinggi menjadi kaolinit dengan KTK rendah, berimplikasi pada reduksi kapasitas retensi hara tanah, sehingga meningkatkan risiko pencucian nutrisi.

2. Dampak terhadap sifat fisik tanah

Transformasi mineral klei juga memengaruhi sifat fisik tanah, terutama dalam hal stabilitas agregat dan kapasitas retensi air. Kome *et al.* (2019) mengidentifikasi bahwa transformasi mineral klei dapat menginduksi degradasi struktur tanah dan peningkatan densitas tanah, yang berdampak negatif terhadap infiltrasi air, aerasi, dan penetrasi akar. Fenomena ini berpotensi menghambat pertumbuhan tanaman akibat keterbatasan akses air dan oksigen.

Investigasi lebih lanjut oleh (Gverić *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa transformasi smektit menjadi kaolinit menyebabkan penurunan KTK dan kapasitas retensi air, sehingga memengaruhi aksesibilitas air bagi tanaman dan stabilitas kelembaban tanah. Penurunan porositas tanah akibat transformasi ini dapat membatasi ekspansi sistem perakaran dan meningkatkan kerentanan terhadap erosi tanah, terutama dalam sistem pertanian intensif yang bergantung pada input eksternal untuk mempertahankan produktivitas.

3. Dampak terhadap sifat biologi tanah

Transformasi mineral klei juga memiliki implikasi terhadap dinamika mikroba tanah dan keseimbangan ekosistem biologis. Aplikasi pupuk kandang yang berkelanjutan mengubah komposisi dan aktivitas mikroorganisme tanah, terutama bakteri dan jamur, yang berperan dalam mendegradasi mineral klei. Mikroorganisme ini mempercepat transformasi smektit menjadi illit melalui mekanisme reduksi Fe(III) struktural dan produksi senyawa polimer ekstraseluler (EPS). Reduksi Fe(III) menyebabkan perubahan kristalografi yang memfasilitasi reaksi transformasi, sementara EPS yang terdiri dari polisakarida, protein, lipid, dan asam organik melemahkan struktur smektit serta meningkatkan interaksi mikroba dengan mineral, sehingga mempercepat proses transformasi (Tao *et al.*, 2021).

Penelitian (Li *et al.*, 2022), mengamati bagaimana mineral klei seperti kaolinit, goetit, dan illit mengalami perubahan melalui interaksi kompleks antara pupuk organik, aktivitas mikroba, dan bahan organik tanah. Aplikasi pupuk organik intensif menginduksi pembentukan mineral amorf seperti lepidokrokite, yang difasilitasi oleh aktivitas mikroba dalam mendegradasi struktur mineral dan mensintesis senyawa organik. Fenomena ini berkontribusi pada pengayaan tanah dengan elemen seperti besi (Fe), aluminium (Al), dan silikon (Si), yang berimplikasi pada peningkatan kapasitas retensi hara, porositas, dan agregasi tanah.

Dari perspektif stabilitas karbon organik tanah, (Xue *et al.*, 2022) mengobservasi perubahan pada hidroksi-interlayered vermikulit, kaolinit, vermikulit, serta oksida besi di bawah perlakuan aplikasi jerami jangka panjang. Transformasi ini meningkatkan stabilitas karbon organik tanah dengan membentuk kompleks organo-mineral yang melindungi karbon dari dekomposisi mikroba. Namun, ada potensi destabilisasi oksida besi kristalin yang berperan dalam retensi karbon, yang dapat berdampak terhadap keseimbangan karbon tanah dalam jangka panjang.

Xu & Tsang (2024) menjelaskan bahwa mineral klei tipe 2:1 yang berasosiasi dengan karbon organik tanah memiliki karakteristik waktu pergantian yang lebih ekstensif, mencapai skala ribuan tahun, sedangkan karbon organik tanah (KOT) yang terasosiasi dengan mineral tipe 1:1 menunjukkan kerentanan yang lebih tinggi terhadap proses mineralisasi. Temuan ini konsisten dengan hasil investigasi (Huang, 2010) yang mengonfirmasi bahwa KOT yang terintegrasi dengan mineral tipe 2:1 memiliki stabilitas temporal yang superior. (Tao & Houlton, 2024) menambahkan bahwa proses pelapukan yang berperan dalam stabilisasi KOT menunjukkan efektivitas yang lebih rendah pada konteks mineral tipe 1:1, sehingga membatasi potensi sekuestrasi karbon. Meskipun demikian, mineral tipe 1:1 memiliki kapasitas untuk memfasilitasi proses mikroba spesifik yang mengoptimalkan dekomposisi bahan organik, suatu fenomena yang berpotensi menguntungkan dalam konteks siklus nutrisi tertentu. Dualitas karakteristik ini merefleksikan kompleksitas interaksi antara mineral tanah dengan dinamika karbon dalam sistem pertanian.

Transformasi mineral klei dalam sistem pertanian intensif menimbulkan dualisme pandangan akibat sifat kompleks dan multidimensi interaksi antara mineral tanah, bahan organik, mikroorganisme, dan input pertanian. Dari sisi positif, transformasi klei dari tipe 2:1 menjadi tipe 1:1 dapat meningkatkan ketersediaan hara tertentu, seperti fosfor, melalui pembentukan mineral illit dan kaolinit yang stabil. Selain itu, interaksi dengan bahan organik dan mikroba dapat memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan retensi karbon. Namun, proses ini juga membawa dampak negatif, seperti penurunan kapasitas tukar kation (KTK), degradasi struktur tanah, dan peningkatan risiko pencucian hara, yang disebabkan oleh sifat mineral tipe 1:1 yang memiliki kapasitas retensi hara lebih rendah. Perbedaan ini muncul karena sifat mineral yang bervariasi serta responsnya terhadap kondisi lingkungan dan pengelolaan tanah. Transformasi mineral tertentu dapat bermanfaat dalam konteks siklus hara tertentu, namun berisiko merugikan stabilitas karbon dan produktivitas jangka panjang. Dualisme ini menunjukkan pentingnya pendekatan pengelolaan terpadu yang mempertimbangkan kondisi tanah, kebutuhan tanaman, serta dinamika mikroba, untuk meminimalkan dampak negatif sambil mengoptimalkan manfaat transformasi klei.

STRATEGI PENGELOLAAN BERKELANJUTAN MENGHADAPI TRANSFORMASI MINERAL KLEI

Pengelolaan berkelanjutan bertujuan untuk meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas pertanian dengan meminimalkan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas pertanian. Transformasi mineral klei, pada dasarnya, merupakan proses alamiah yang dapat dipercepat oleh aktivitas antropogenik. Pemeliharaan kualitas tanah melalui pengelolaan berkelanjutan memungkinkan transformasi klei memberikan dampak positif serta mengurangi potensi dampak negatifnya terhadap tanah. Pathak *et al.* (2024) dan Bezboruah *et al.* (2024) sependapat bahwa teknik pengolahan tanah seperti tanpa olah tanah, strip-till, dan mulsa-olah tanah dapat meminimalkan gangguan tanah, sehingga mendorong terbentuknya ekosistem tanah yang lebih sehat.

Zhao *et al.* (2023) membuktikan dengan adanya penerapan tata kelola hidrologi yang baik, pengelolaan pH tanah yang optimal, serta pengaturan konsentrasi kation asam dalam larutan tanah efektif dalam mengurangi potensi dampak negatif dari transformasi klei. Menghindari genangan air dapat mencegah terbentuknya kondisi anaerobik yang merugikan, seperti pembentukan mineral hidroksi-interlayered vermikulit (HIV). Di sisi lain, pH tanah yang moderat mendukung pelepasan dan interlayerisasi aluminium, yang penting untuk stabilitas mineral klei. Pengaturan konsentrasi kation asam melalui amandemen tanah dan pemupukan juga mendorong evolusi mineral klei yang lebih stabil, meningkatkan retensi hara, dan menjaga kesehatan tanah.

Aplikasi komposit klei-biochar juga dapat menjadi alternatif pengelolaan berkelanjutan dalam menghadapi transformasi mineral klei, sebagaimana yang ditemukan dalam studi (Rafique *et al.*, 2023). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa komposit klei-biochar efektif mengurangi dampak negatif transformasi klei dengan meningkatkan kualitas tanah, mempertahankan struktur tanah, serta meningkatkan retensi nutrisi, sehingga mencegah pencucian hara dan degradasi klei. Biochar dalam komposit ini juga berfungsi untuk menyekuestrasi karbon, menstabilkan bahan organik tanah, dan mengurangi emisi gas rumah kaca, sehingga menciptakan ekosistem tanah yang lebih seimbang. Selain itu, komposit ini dapat mengimobilisasi polutan, menjaga integritas mineral klei, dan mencegah perubahan struktur akibat kontaminasi.

Secara holistik, (Futa *et al.*, 2024) memaparkan beberapa strategi berkelanjutan untuk meningkatkan potensi mineral klei tanah, seperti penggunaan nanomaterial, praktik pertanian organik, dan pertanian presisi. Strategi-strategi tersebut berperan penting dalam menjaga stabilitas struktur

tanah, retensi nutrisi, serta kapasitas simpan air pada tanah klei. Pemantauan kesehatan tanah secara rutin memungkinkan intervensi dini untuk mencegah degradasi klei, sementara pengelolaan sumber daya, seperti daur ulang bahan organik dan penggunaan tanaman penutup, dapat menjaga keseimbangan hara. Adopsi teknik pertanian cerdas iklim juga berkontribusi pada peningkatan ketahanan tanah terhadap dampak perubahan iklim, sehingga memastikan keberlanjutan fungsi dan produktivitas tanah.

KESIMPULAN

Transformasi mineral klei dalam sistem pertanian intensif merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi antara aktivitas antropogenik, sifat tanah, dan kondisi lingkungan. Proses transformasi ini, seperti perubahan mineral tipe 2:1 menjadi 1:1, membawa dampak ganda: di satu sisi meningkatkan stabilitas mineral dan retensi karbon organik, tetapi di sisi lain menurunkan kapasitas tukar kation, retensi hara, dan air, sehingga memengaruhi produktivitas tanah jangka panjang. Pengelolaan tanah berkelanjutan, seperti penggunaan biochar, pupuk organik, dan pertanian presisi, dapat mengoptimalkan manfaat transformasi mineral klei sambil memitigasi dampak negatifnya terhadap kesuburan tanah. Strategi pengelolaan yang berbasis bukti sangat diperlukan untuk memastikan keberlanjutan sistem pertanian, khususnya dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, degradasi lahan, dan peningkatan kebutuhan pangan global.

DAFTAR PUSTAKA

- Akinbodunse, S. J., Ufer, K., Dohrmann, R., & Mikutta, C. 2024. Evaluation of the Rietveld method for determining content and chemical composition of inorganic X-ray amorphous materials in soils. *American Mineralogist*, 109(12), 2037–2051. <https://doi.org/10.2138/am-2023-9240>
- Austin, J. C., Perry, A., Richter, D. D., & Schroeder, P. A. 2018. Modifications of 2:1 Clay Minerals in a Kaolinite-Dominated Ultisol under Changing Land-Use Regimes. *Clays and Clay Minerals*, 66(1), 61–73. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2017.064085>
- Benavides, P. A. D., & Guggenheim, S. 2024. Effect of Layer Charge Density and Charge Location on the Swelling of Smectite: Implications for Geological Storage of CO₂ and High-Level Nuclear Wastes. *American Mineralogist*. <https://doi.org/10.2138/am-2024-9557>
- Bezboruah, M., Sharma, S. K., Laxman, T., Ramesh, S., Sampathkumar, T., Gulaiya, S., Malathi, G., & Krishnaveni, S. A. 2024. Conservation Tillage Practices and Their Role in Sustainable Farming Systems. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(9), 946–959. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i92892>
- Chen, M., Zhang, S., Liu, L., & Ding, X. 2023. Influence of organic fertilization on clay mineral transformation and soil phosphorous retention: Evidence from an 8-year fertilization experiment. *Soil and Tillage Research*, 230, 105702. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105702>
- Das, D., Sahoo, J., Raza, M. B., Barman, M., & Das, R. 2022. Ongoing soil potassium depletion under intensive cropping in India and probable mitigation strategies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00728-6>
- Datta, S., Ghosh, S., & Das, D. 2020. Soil Mineralogy and Clay Minerals. In *The Soils of India* (pp. 131–149). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-31082-0>
- Elhassan, A. A. M., Mnzool, M., Smaoui, H., Jendoubi, A., Elnaim, B. M. E., & Faihan Alotaibi, M. 2023. Effect of clay mineral content on soil strength parameters. *Alexandria Engineering Journal*, 63, 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.012>
- Fernandez-Marcos, M. L., Macías, F., & Guitián-Ojea, F. 1979. A contribution to the study of the stability of clay minerals from the soil solution composition at different pF values. *Clay Minerals*, 14(1), 29–37. <https://doi.org/10.1180/claymin.1979.014.1.04>
- Firmano, R. F., Melo, V. F., Montes, C. R., De Oliveira, A., De Castro, C., & Alleoni, L. R. F. 2020. Potassium Reserves in the Clay Fraction of a Tropical Soil Fertilized for Three Decades. *Clays and Clay Minerals*, 68(3), 237–249. <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00078-6>
- Futa, B., Gmitrowicz-Iwan, J., Skersienė, A., Šlepetienė, A., & Parašotas, I. 2024. Innovative Soil Management Strategies for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 16(21), 9481. <https://doi.org/10.3390/su16219481>
- Gao, Y., Gao, Y., Ibarra, D. E., Du, X., Dong, T., Liu, Z., & Wang, C. 2021. Clay mineralogical evidence for mid-latitude terrestrial climate change from the latest Cretaceous through the earliest Paleogene in the Songliao Basin, NE China. *Cretaceous Research*, 124, 104827. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2021.104827>
- Günel, H., & Acir, N. 2024. Spatial variability of clay minerals in a semi-arid region of Türkiye. *Geoderma*

- Regional*, 38, e00820. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00820>
- Gverić, Z., Rubinić, V., Kampić, Š., Vrbanc, P., Paradžik, A., & Tomašić, N. 2022. Clay mineralogy of soils developed from Miocene marls of Medvednica Mt., NW Croatia: Origin and transformation in temperate climate. *CATENA*, 216, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106439>
- H. Esaa, F., & Kassim, J. K. 2021. Identification and distribution of minerals in soils from al-Ahrar area, Waist province, Iraq. *Journal of Life Science and Applied Research*, 2(1), 16–23. <https://doi.org/10.59807/jlsar.v2i1.26>
- Ható, Z., Makó, É., & Kristóf, T. 2013. *Molecular simulation study of kaolinite intercalation*. 41, 2013.
- Herrero, J., Jiménez-Ballesta, R., & Castañeda, C. 2024. The Clay Minerals in the Soils of the Gypseous Belt of Barbastro, NE Spain. *Land*, 13(9), 1415. <https://doi.org/10.3390/land13091415>
- Hong, H., Ji, K., Hei, H., Wang, C., Liu, C., Zhao, L., Lanson, B., Zhao, C., Fang, Q., & Algeo, T. J. 2023. Clay mineral evolution and formation of intermediate phases during pedogenesis on picrite basalt bedrock under temperate conditions (Yunnan, southwestern China). *CATENA*, 220, 106677. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106677>
- Huang, P. M. 2010. Impacts of Mineral Colloids on the Transformation of Biomolecules and Physical and Chemical Protection of Soil Organic Carbon. In J. Xu & P. M. Huang (Eds.), *Molecular Environmental Soil Science at the Interfaces in the Earth's Critical Zone* (pp. 13–16). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05297-2_4
- Ibarra, D. E., & Evaristo, J. 2024. Soil pore water evaporation and temperature influences on clay mineral paleothermometry. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 21. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01201-4>
- Karathanasis, A. D., & Hajek, B. F. 1983. Transformation of Smectite to Kaolinite in Naturally Acid Soil Systems: Structural and Thermodynamic Considerations. *Soil Science Society of America Journal*, 47(1), 158–163. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010031x>
- Keller, C., Rizwan, M., & Meunier, J.-D. 2021. Are Clay Minerals a Significant Source of Si for Crops? A Comparison of Amorphous Silica and the Roles of the Mineral Type and pH. *Silicon*, 13(10), 3611–3618. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00877-5>
- Kome, G. K., Enang, R. K., Tabi, F. O., & Yerima, B. P. K. 2019. Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: A Review. *Open Journal of Soil Science*, 09(09), 155–188. <https://doi.org/10.4236/ojss.2019.99010>
- Li, H., Hu, Z., Wan, Q., Mu, B., Li, G., & Yang, Y. 2022. Integrated Application of Inorganic and Organic Fertilizer Enhances Soil Organo-Mineral Associations and Nutrients in Tea Garden Soil. *Agronomy*, 12(6), 1330. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061330>
- Li, S., Chen, S., Bai, S., Tan, J., & Jiang, X. 2024. Intensive agricultural management-induced subsurface accumulation of water-extractable colloidal P in a Vertisol. *SOIL*, 10(1), 49–59. <https://doi.org/10.5194/soil-10-49-2024>
- Li, S., He, H., Tao, Q., Zhu, J., Tan, W., Ji, S., Yang, Y., & Zhang, C. 2020. Kaolinization of 2:1 type clay minerals with different swelling properties. *American Mineralogist*, 105(5), 687–696. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7339>
- Liao, Q., Gu, H., Qi, C., Chao, J., Zuo, W., Liu, J., Chen, T., & Zhang, L. 2024. Mapping global distributions of clay-size minerals via soil properties and machine learning techniques. *Science of The Total Environment*, 949, 174776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174776>
- Lin, Y., Wang, J., & Lin, C. 2021. Response of toxic metal distributions and sources to anthropogenic activities and pedogenic processes in the Albic Luvisol profile of northeastern China. *Environmental Advances*, 6, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100142>
- Liu, Y.-L., Yao, S.-H., Han, X.-Z., Zhang, B., & Banwart, S. A. 2017. Soil Mineralogy Changes With Different Agricultural Practices During 8-Year Soil Development From the Parent Material of a Mollisol. In *Advances in Agronomy* (Vol. 142, pp. 143–179). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.015>
- Lybrand, R. A., & Rasmussen, C. 2018. Climate, topography, and dust influences on the mineral and geochemical evolution of granitic soils in southern Arizona. *Geoderma*, 314, 245–261. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.042>
- Majid, A. 2023. *Paleo-climatic and paleo-environment implication of clay mineral across Upper Cretaceous--Lower Eocene deposits from Gafsa Basin*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1623282/v2>
- Manjaiah, K. M., Mukhopadhyay, R., Paul, R., Datta, S. C., Kumararaja, P., & Sarkar, B. 2019. Clay minerals and zeolites for environmentally sustainable agriculture. In *Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials* (pp. 309–329). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814617-0.00008-6>
- Maphuhla, N. G., & Oyediji, O. O. 2024. Effects of Clay Minerals on Enzyme Activity as a Potential Biosensor of Soil Pollution in Alice Township. *Waste*, 2(1), 85–101. <https://doi.org/10.3390/waste2010005>
- Mavris, C., Plötze, M., Mirabella, A., Giacciai, D., Valboa, G., & Egli, M. 2011. Clay mineral evolution along a soil chronosequence in an Alpine proglacial area. *Geoderma*, 165(1), 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.010>

- Mejri, C., Oueslati, W., & Amara, A. B. H. 2022. Structural Alteration, Hydration Stability, Heavy Metal Removal Efficiency, and Montmorillonite Porosity Fate by Coupling the Soil Solution pH and a Thermal Gradient. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 4421932. <https://doi.org/10.1155/2022/4421932>
- Mishra, G., Sulieman, M. M., Kaya, F., Francaviglia, R., Keshavarzi, A., Bakhshandeh, E., Loum, M., Jangir, A., Ahmed, I., Elmobarak, A., Basher, A., & Rawat, D. 2022. Machine learning for cation exchange capacity prediction in different land uses. *CATENA*, 216, 106404. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106404>
- Musa, I. O., Samuel, J. O., Adams, M., Abdulsalam, M., Nathaniel, V., Maude, Asmau M., Adedayo, O. A., & Tiamiyu, A. T. 2024. Soil Erosion, Mineral Depletion and Regeneration. In *Soil Erosion, Mineral Depletion and Regeneration* (pp. 159–172). Springer, Cham.
- Nortjé, G. P., & Laker, M. C. 2021. Factors That Determine the Sorption of Mineral Elements in Soils and Their Impact on Soil and Water Pollution. *Minerals*, 11(8), 821. <https://doi.org/10.3390/min11080821>
- Ouyang, N., Zhang, Y., Sheng, H., Zhou, Q., Huang, Y., & Yu, Z. 2021. Clay mineral composition of upland soils and its implication for pedogenesis and soil taxonomy in subtropical China. *Scientific Reports*, 11(1), 9707. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89049-y>
- Pal, A., Garia, S., & Nair, A. M. 2022. *Effect of Clay Mineralogy on Hill Slope Weathering*. EGU22-9879. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-9879>, 2022.
- Pathak, H., Chatterjee, D., Saha, S., & Das, B. (Eds.). 2024. *Climate Change Impacts on Soil-Plant-Atmosphere Continuum* (Vol. 78). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-7935-6>
- Pineau, M., Mathian, M., Baron, F., Rondeau, B., Le Deit, L., Allard, T., & Mangold, N. 2022. Estimating kaolinite crystallinity using near-infrared spectroscopy: Implications for its geology on Earth and Mars. *American Mineralogist*, 107(8), 1453–1469. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8025>
- Punia, A., & Siddaiah, N. S. 2019. Impact of mines and thar desert on the distribution of major oxides in the soils of khetri copper mine region. *Journal of Applied Geochemistry*, 21(2), 269–275.
- Rafique, M. I., Ahmad, J., Usama, M., Ahmad, M., Al-Swadi, H. A., Al-Farraj, A. S. F., & Al-Wabel, M. I. 2023. Clay-Biochar Composites: Emerging Applications in Soil. In *Clay Composites. Advances in Material Research and Technology*. Springer.
- Razum, I., Pavlaković, S. M., Rubinić, V., & Durn, G. 2024. New soil weathering index based on compositional data analyses of silt to sand sized parent mineral assemblages of terra rossa soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 263, 107213. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107513>
- Ren, J., Zheng, C., Yong, Y., Lin, Z., Zhu, A., He, C., & Pan, H. 2023. Effect and mechanism of kaolinite loading amorphous zero-valent iron to stabilize cadmium in soil. *Science of The Total Environment*, 904, 166319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166319>
- Sandler, A., Fine, P., & Bar-Tal, A. 2023. The Effect of K-Fertilization and Irrigation on the Composition of Cultivated Soils: Examples from Israel. *Minerals*, 13(12), 1547. <https://doi.org/10.3390/min13121547>
- Schaller, J., Frei, S., Rohn, L., & Gilfedder, B. S. 2020. Amorphous Silica Controls Water Storage Capacity and Phosphorus Mobility in Soils. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 94. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00094>
- Shahrokh, V., Khademi, H., & Zeraatpisheh, M. 2023. Mapping clay mineral types using easily accessible data and machine learning techniques in a scarce data region: A case study in a semi-arid area in Iran. *CATENA*, 223, 106932. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106932>
- Soltaninejad, S., Marandi, S. M., & B.P., N. 2023. Effects of the Types and Amounts of Clay Minerals on Durability of Lime-Stabilized Clay Soils. *Minerals*, 13(10), 1317. <https://doi.org/10.3390/min13101317>
- Song, X., Jin, J., Li, H., Wang, F., Liu, J., Wang, X., Huang, X., Chai, C., Song, N., & Zong, H. 2023. Kaolinite reduced Cd accumulation in peanut and remediate soil contaminated with both microplastics and cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 266, 115580. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115580>
- Sousa, M. G., Araujo, J. K. S., Ferreira, T. O., Andrade, G. R. P., Araújo Filho, J. C., Fracetto, G. G. M., Santos, J. C. B., Fracetto, F. J. C., Lima, G. K., & Souza Junior, V. 2021. Long-term effects of irrigated agriculture on Luvisol pedogenesis in semi-arid region, northeastern Brazil. *CATENA*, 206, 105529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105529>
- Tao, F., & Houlton, B. Z. 2024. Inorganic and organic synergies in enhanced weathering to promote carbon dioxide removal. *Global Change Biology*, 30(1), e17132. <https://doi.org/10.1111/gcb.17132>
- Tao, L., Wen, X., Li, H., Huang, C., Jiang, Y., Liu, D., & Sun, B. 2021. Influence of manure fertilization on soil phosphorous retention and clay mineral transformation: Evidence from a 16-year long-term fertilization experiment. *Applied Clay Science*, 204, 106021. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106021>
- Thorpe, M., Rahman, Z., Tu, V., Longstaffe, F. J., & Osinski, G. R. (2022, March 7). *TEM and XRD Investigation of Impact Glass Alteration Products: Amorphous Materials, Phyllosilicates and Everything in Between*. 53rd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas.
- Tsukimura, K., Miyoshi, Y., Takagi, T., Suzuki, M., & Wada, S. 2021. Amorphous nanoparticles in clays, soils

- and marine sediments analyzed with a small angle X-ray scattering (SAXS) method. *Scientific Reports*, 11(1), 6997. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86573-9>
- Wiśniewska, M., Fijałkowska, G., Szewczuk-Karpisz, K., Herda, K., & Chibowski, S. 2022. Ionic Polyacrylamides as Stability-Modifying Substances of Soil Mineral Suspensions Containing Heavy Metal Impurities. *Processes*, 10(8), 1473. <https://doi.org/10.3390/pr10081473>
- Xinwei, Z., Yunchao, Z., & Qiulan, F. 2023. Main influencing factors of soil particle distribution in the karst basin. *CATENA*, 224, 107002. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107002>
- Xu, Y., Bi, R., & Li, Y. 2023. Effects of anthropogenic and natural environmental factors on the spatial distribution of trace elements in agricultural soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 249, 114436. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114436>
- Xu, Z., & Tsang, D. C. W. 2024. Mineral-mediated stability of organic carbon in soil and relevant interaction mechanisms. *Eco-Environment & Health*, 3(1), 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2023.12.003>
- Xue, B., Huang, L., Li, X., Lu, J., Gao, R., Kamran, M., & Fahad, S. 2022. Effect of Clay Mineralogy and Soil Organic Carbon in Aggregates under Straw Incorporation. *Agronomy*, 12(2), 534. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020534>
- Yu, M., Tariq, S. M., & Yang, H. 2022. Engineering clay minerals to manage the functions of soils. *Clay Minerals*, 57(1), 51–69. <https://doi.org/10.1180/clm.2022.19>
- Yu, Z., Zhang, Y., Sheng, H., Zhang, L., Zhou, Q., & Yan, X. 2020. Composition of clay minerals and their pedogenetic and taxonomic implications for Stagnic Anthrosols derived from different parent materials in Hunan Province, China. *Journal of Soils and Sediments*, 20(3), 1558–1570. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02499-w>
- Zaarur, S., & Erel, R. 2024. The effect of soil mineral composition on K availability to plants. *EGU24-21838*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-21838>, 2024.
- Zad, A. A., & Kazemzadeh, M. 2024. Stabilization of Lead and Zinc Nitrate-Contaminated Low Plasticity Clayey Soil Using Metakaolin Geopolymer. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 33(7), 759–783. <https://doi.org/10.1080/15320383.2023.2255676>
- Zarebanadkouki, M., Al Hamwi, W., Abdalla, M., Rahnemaie, R., & Schaller, J. 2024. The effect of amorphous silica on soil–plant–water relations in soils with contrasting textures. *Scientific Reports*, 14(1), 10277. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60947-1>
- Zhang, B., Zhou, M., Zhu, B., Xiao, Q., Zheng, X., Zhang, J., Müller, C., & Butterbach-Bahl, K. 2022. Soil clay minerals: An overlooked mediator of gross N transformations in Regosolic soils of subtropical montane landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108612. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108612>
- Zhang, J., Zhu, Z., Niu, M., Yu, M., Dong, X., & Yang, H. 2024. In-situ evolution of ionic sites at clay mineral interfaces facilitates fluoride and phosphorus mineralization. *Environmental Science & Technology*, 58(32), 14541–14554. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c05988>
- Zhang, Q., & Wang, C. 2020. Natural and Human Factors Affect the Distribution of Soil Heavy Metal Pollution: A Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(7), 350. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04728-2>
- Zhang, Y., Tian, R., Liu, D., Guo, X., Yang, S., & Li, H. 2022. Insight into Hofmeister effects on aggregation of 2:1 and 1:1 type clay minerals. *European Journal of Soil Science*, 73(4). <https://doi.org/10.1111/ejss.13287>
- Zhao, L., Hong, H., Qian, F., Hei, H., & Algeo, T. J. 2023. Hydrologic regulation of clay-mineral transformations in a redoximorphic soil of subtropical monsoonal China. *American Mineralogist*, 108(3), 1881–1896. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8706>
- Zhao, M., Zhang, Z., Li, M., Gao, C., Zhang, J., & He, N. 2024. Soil Mineral-Associated Organic Carbon and Its Relationship to Clay Minerals across Grassland Transects in China. *Applied Sciences*, 14(5), 2061. <https://doi.org/10.3390/app14052061>