

Divergensi Biogeokimia Zn Pada Landscape Kontrastif: Komparasi Sistem Buffering Tanah Renzina-Kambisol dan Implikasinya Terhadap Strategi Nutrisi Adaptif Jagung Lokal

Divergence of Zn Biogeochemistry in Contrasting Landscapes: A Comparison of Buffering Systems between Renzina and Cambisol Soils and Its Implications for Adaptive Nutritional Strategies of Local Maize

Mika Sampe Rompon¹, Melewanto Patabang², Julianus Dising³

¹Program Studi Manajemen Pertanian Lahan Kering, Jurusan Manajemen Pertanian Lahan Kering,

Politeknik Pertanian Negeri Kupang

²Program Studi Ekowisata, Sekolah Vokasi, IPB University

³Program Studi Teknologi Rekayasa Pangan, Jurusan Tanaman Pangan dan Hortikultura, Politeknik Pertanian Negeri Kupang

*Corresponding author: mikasamperompon@yahoo.co.id

Abstrak

Defisiensi Zn merupakan masalah global yang mempengaruhi lebih dari dua miliar orang, namun pemahaman mengenai pengaruh faktor pembentuk tanah terhadap biogeokimia Zn masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis divergensi biogeokimia Zn antara tanah Renzina dan Kambisol Eutrik serta implikasinya terhadap strategi adaptasi nutrisi jagung lokal di Timor Tengah Selatan. Penelitian komparatif dilakukan pada dua sistem tanah yang kontras dengan pendekatan natural experiment berdasarkan gradien elevasi. Pengambilan sampel tanah dan biji jagung dilakukan menggunakan stratified purposive sampling pada enam zona elevasi. Analisis laboratorium meliputi sifat fisikokimia tanah dan kandungan nutrisi biji, dengan interpretasi biogeokimia melalui analisis korelasi, regresi, dan komparasi sistem buffering. Tanah Renzina yang defisien Zn (16,08–38,44 ppm) menunjukkan efisiensi transfer yang sangat tinggi (48,3–103,5%), sementara Kambisol Eutrik yang kaya Zn (111,73–412,11 ppm) hanya mencapai efisiensi 7,4–19,7%. Model prediktif biogeokimia berdasarkan elevasi menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,88–0,90. Ditemukan sinergi universal antara Zn dan kalium ($r = 0,993$) serta pola distribusi nutrisi yang kontras antara kedua sistem tanah. Temuan mengungkap paradoks fundamental di mana tanaman mengembangkan sindrom adaptasi nutrisi yang berbeda: “emergency uptake mode” pada kondisi defisiensi dan “protective regulation mode” pada kondisi kelimpahan. Implikasi dari temuan ini menantang paradigma konvensional hubungan linier antara ketersediaan dan penyerapan nutrisi serta menunjukkan perlunya strategi manajemen nutrisi yang site-specific untuk lanskap heterogen. Penelitian ini menawarkan paradigma baru dalam ilmu tanah dengan menunjukkan sistem tanah-tanaman sebagai unit terintegrasi dengan sifat emergen. Mekanisme homeostasis Zn yang secara fundamental berbeda antara kedua sistem tanah memberikan kontribusi pada pengembangan manajemen nutrisi presisi. Studi lanjutan diperlukan untuk eksplorasi mekanisme molekuler dari sindrom adaptasi nutrisi serta validasi model pada spektrum pedologis yang lebih luas.

Kata kunci: Defisiensi seng, Biogeokimia seng, Adaptasi nutrisi jagung, Sistem tanah Renzina dan Kambisol Eutrik, Manajemen nutrisi spesifik lokasi

Abstract

Zn deficiency is a global issue affecting over two billion people; however, understanding of how soil-forming factors influence Zn biogeochemistry remains limited. This study aims to analyze the biogeochemical divergence of Zn between Renzina and Eutric Cambisol soils and its implications for the nutrient adaptation strategies of local maize in South Central Timor. A comparative study was conducted on two contrasting soil systems using a natural experiment approach based on an elevation gradient. Soil and maize seed samples were collected using stratified purposive sampling across six elevation zones. Laboratory analyses included soil physicochemical properties and seed nutrient content, with biogeochemical interpretations conducted through correlation, regression, and buffering system comparisons. Zn-deficient Renzina soils (16.08–38.44 ppm) exhibited exceptionally high transfer efficiency (48.3–103.5%), whereas Zn-rich Eutric Cambisol soils (111.73–412.11 ppm) showed efficiencies of only 7.4–19.7%. Biogeochemical predictive models based on elevation yielded determination coefficients (R^2) of 0.88–0.90. A universal synergistic relationship between Zn and potassium ($r = 0.993$) and contrasting nutrient distribution patterns between the two soil systems were identified. The findings reveal a fundamental paradox wherein plants develop distinct nutrient adaptation syndromes: an "emergency uptake mode" under deficiency conditions versus a "protective regulation mode" under abundance. These implications challenge the conventional paradigm of a linear relationship between nutrient availability and uptake and indicate the necessity for site-specific nutrient management strategies in heterogeneous landscapes. This study introduces a new paradigm in soil science by demonstrating soil-plant systems as integrated units with emergent properties. The fundamentally different Zn homeostasis mechanisms between the two soil systems contribute to the advancement of precision nutrient management. Further research is required to explore the molecular mechanisms underlying nutrient adaptation syndromes and to validate the model across a broader pedological spectrum.

Keywords: Zn deficiency, Zn biogeochemistry, Maize nutritional adaptation, Renzina and Eutric Cambisol soil systems, Site-specific nutrient management

• Pendahuluan

Defisiensi Zn mempengaruhi sekitar tiga miliar orang di dunia, terutama di negara berkembang yang mengandalkan jagung sebagai pangan pokok, dengan dampak kesehatan dan ekonomi yang signifikan di Afrika Sub-Sahara dan Asia Selatan (Hacisalihoglu, 2020; Mallikarjuna et al., 2020; Manzeke-Kangara et al., 2021). Kandungan Zn pada jagung modern yang menurun dibandingkan varietas tradisional memperburuk masalah ini (Mallikarjuna et al., 2020; Mutambu et al., 2023). Biofortifikasi jagung melalui pemuliaan genetik dan aplikasi agronomis terbukti efektif meningkatkan kandungan Zn, berpotensi mengurangi defisiensi hingga 40% dan memenuhi 89-100% kebutuhan harian kelompok rentan (Rosales et al., 2023; Mutambu et al., 2023; Saboor et al., 2021; Bashir et al., 2021; Watts et al., 2020).

Perubahan iklim dan intensifikasi pertanian memperparah masalah distribusi seng (Zn) di lanskap pertanian, menciptakan heterogenitas spasial berupa "hotspot" dan "coldspot" nutrisi yang berdampak pada kesehatan manusia, produktivitas pertanian, dan ketahanan pangan (Adelisardou et al., 2023; Lai et al., 2022; Liu et al., 2024). Pencucian Zn akibat perubahan iklim meningkat hingga 15-25%, sementara intensifikasi pertanian tanpa penggantian nutrisi memadai memperluas area defisien, menyebabkan penurunan hasil panen hingga 10-40% dan meningkatkan risiko

stunting (Adelisardou et al., 2023; Turner et al., 2016). Di Indonesia, dengan 60% lahan berupa tanah masam dan ketergantungan tinggi pada jagung lokal, diperlukan strategi manajemen spasial-adaptif untuk mengatasi ketimpangan nutrisi dan menjaga keberlanjutan sistem pangan.

Biogeochemical cycling mengatur distribusi dan ketersediaan seng (Zn) melalui proses pelapukan, transportasi, dan deposisi yang terintegrasi dengan kontinum tanah-tanaman-atmosfer (Zaman et al., 2025). Interaksi dinamis antara sifat fisik-kimia tanah, aktivitas mikroorganisme, dan strategi adaptif tanaman menentukan efisiensi transfer Zn dari geosfer ke biosfer, sementara keseimbangan termodinamika mengontrol spesiasi dan mobilitas Zn dalam larutan tanah (Silva & Lambers, 2020; Zaman et al., 2025). Aktivitas antropogenik seperti pertanian intensif mengganggu siklus alami ini, sehingga diperlukan pendekatan integratif yang menggabungkan teknologi pemantauan modern dengan model prediktif multiskala untuk manajemen Zn berkelanjutan dalam menghadapi perubahan lingkungan global (Zaman et al., 2025).

Tanah Renzina yang berkembang dari batuan karbonat memiliki kandungan kalsium tinggi, reaksi alkalis, dan umumnya produktivitas rendah kecuali untuk tanaman tertentu (Kabala, 2018; Filipović et al., 2024), sementara Kambisol dengan horizon diagnostik jelas dan tingkat pelapukan sedang menunjukkan variasi kualitas fisik dan potensi produksi yang lebih tinggi pada profil dalam (Drăghici et al., 2024; Abakumov et al., 2024; Blagojević et al., 2016), dimana perbedaan karakteristik kimia-fisik, produktivitas, dan fungsi ekosistem kedua jenis tanah ini penting untuk pengelolaan lahan berkelanjutan (Galazka et al., 2020; Abakumov, 2023).

Meskipun Zn merupakan mikronutrien esensial untuk produktivitas jagung, hingga saat ini belum ada studi komparatif komprehensif yang menganalisis perilaku Zn pada sistem tanah kontras seperti Renzina dan Kambisol, sehingga pemahaman tentang mekanisme buffering Zn pada tanah dengan mineralogi berbeda masih sangat terbatas. Keterbatasan ini diperparah oleh minimnya data tentang strategi adaptif varietas jagung lokal terhadap status Zn tanah, yang mengakibatkan belum tersedianya model prediktif untuk bioavailabilitas Zn berdasarkan karakteristik landscape. Lebih lanjut, pendekatan penelitian yang ada selama ini cenderung terfragmentasi karena minimnya integrasi antara pendekatan biogeokimia dengan program breeding untuk mengembangkan varietas dengan Zn efficiency tinggi, padahal integrasi tersebut sangat krusial untuk mengatasi defisiensi Zn secara berkelanjutan di lahan-lahan marginal.

Penelitian ini akan menjawab bagaimana perbedaan karakteristik pedogenetik antara tanah Renzina dan Kambisol mempengaruhi siklus biogeokimia Zn dalam sistem pertanian jagung lokal. Investigasi akan mengidentifikasi mekanisme buffering dominan yang mengontrol ketersediaan Zn pada kedua jenis tanah, termasuk peran pH, bahan organik, dan mineral liat dalam regulasi mobilitas Zn. Studi ini juga akan mengungkap bagaimana varietas jagung lokal mengembangkan strategi nutrisi adaptif sebagai respons terhadap kontras ketersediaan Zn antara kedua sistem tanah. Selanjutnya, penelitian akan mengevaluasi korelasi antara posisi lanskap dengan

status Zn tanah dan respons fisiologis tanaman, memberikan pemahaman komprehensif tentang interaksi tanah-tanaman-Zn dalam konteks agroekosistem karst dan non-karst.

Penelitian ini memberikan kontribusi teoretis fundamental terhadap pemahaman biogeochemical cycling Zn dalam sistem tanah kontras, yang menjadi dasar pengembangan rekomendasi pemupukan Zn site-specific untuk optimalisasi produktivitas tanaman. Temuan mengenai mekanisme adaptasi tanaman terhadap ketersediaan Zn membuka peluang identifikasi traits spesifik untuk program breeding varietas Zn-efficient, sekaligus menyediakan basis ilmiah bagi formulasi kebijakan biofortifikasi dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Secara metodologis, penelitian ini menghasilkan protokol assessment Zn availability yang terstandarisasi, memungkinkan evaluasi status Zn tanah yang lebih akurat dan aplikatif untuk berbagai agroekosistem di Indonesia.

Penelitian ini memiliki signifikansi tinggi karena menghadirkan pendekatan integratif biogeokimia-agronomi yang baru dalam mengkaji landscape kontras untuk pengembangan jagung lokal. Relevansinya sangat kuat dalam mendukung pencapaian SDGs, khususnya Zero Hunger dan Good Health and Well-being, melalui peningkatan produktivitas dan kualitas nutrisi jagung sebagai pangan pokok. Hasil penelitian memiliki aplikabilitas luas karena dapat diekstrapolasi ke wilayah-wilayah dengan kondisi agroekologi serupa, sehingga dampaknya melampaui lokasi studi. Kontribusi terhadap sustainable intensification agriculture menjadikan penelitian ini penting untuk keberlanjutan sistem pertanian yang mampu memenuhi kebutuhan pangan tanpa merusak lingkungan. Valorisasi plasma nutfah jagung lokal melalui penelitian ini tidak hanya melestarikan kearifan lokal tetapi juga memperkuat ketahanan pangan berbasis sumber daya genetik domestik yang telah beradaptasi dengan kondisi setempat.

Penelitian ini bertujuan menganalisis divergensi biogeokimia Zn antara tanah Renzina dan Kambisol Eutrik serta implikasinya terhadap strategi adaptasi nutrisi jagung lokal di Timor Tengah Selatan.

- **Metode Penelitian**

- Kerangka Konseptual**

- Penelitian komparatif untuk menganalisis biogeokimia Zn pada dua sistem tanah kontras berdasarkan teori pembentukan tanah Hans Jenny, dengan fokus pada pengaruh bahan induk dan relief terhadap bioavailabilitas Zn tanaman jagung.

- Lokasi dan Waktu**

- Penelitian dilaksanakan di Kabupaten Timor Tengah Selatan, NTT (Juli-Desember 2023) pada dua lokasi kontras: Kelurahan Soe dengan tanah Renzina dari batuan sedimen berkapur (729-901 mdpl) dan Desa Kuatae dengan tanah Kambisol Eutrik dari material vulkanik (450-726 mdpl).

- Desain Penelitian**

Desain penelitian menggunakan natural experiment dengan stratifikasi sampling berdasarkan gradien ketinggian pada enam zona (tiga zona per lokasi) untuk memahami interaksi faktor pembentuk tanah dengan distribusi spasial Zn.

Metode Sampling

Metode sampling dilakukan dengan stratified purposive sampling berdasarkan ketinggian. Sampel tanah diambil pada kedalaman 0-20 cm menggunakan bor tanah dengan validasi GPS, sedangkan sampel biji jagung diambil pada fase matang fisiologis dari titik sampling yang sama.

Analisis Laboratorium

Analisis Laboratorium mencakup analisis fisika tanah (tekstur), kimia tanah (pH, N-total, P-tersedia, K-tersedia, Zn-tersedia), dan nutrisi biji jagung (N, P, K, Zn total) menggunakan metode standar seperti Kjeldahl, Bray-1, dan spektrofotometri.

Analisis Data

Analisis data meliputi statistik deskriptif, analisis korelasi Pearson/Spearman, regresi linear berganda untuk model prediktif, dan analisis komparatif efisiensi sistem buffering Zn melalui rasio Zn biji terhadap Zn tanah.

Tools dan Validasi

Tools dan validasi menggunakan Microsoft Excel untuk pengolahan data dan visualisasi. Quality control dilakukan melalui standard reference materials dan duplicate analysis (CV <10%), serta verifikasi lapangan dengan dokumentasi GPS dan fotografis.

Pertimbangan Etis

Pertimbangan etis menerapkan sustainable sampling dengan volume minimal, koordinasi dengan petani lokal, dan informed consent dari pemilik lahan untuk memastikan tidak mengganggu produktivitas pertanian.

Limitasi Metodologi

Limitasi metodologi mencakup sampling satu periode waktu, terbatas pada dua jenis tanah spesifik, dan analisis Zn total tanpa diferensiasi fraksi Zn dalam tanah.

• Hasil Dan Pembahasan

Tabel 1. Karakteristik Pedologis dan Geomorfologis Kedua Sistem Tanah

Parameter	Tanah Renzina (Kelurahan Soe)	Kambisol Eutrik (Desa Kuatae)
Rentang Ketinggian (m dpl)	729 - 901	450 - 726
Bahan Induk Kelas Lereng (%)	Batuan Sedimen Berkapur 8 - 25	Material Vulkanik 0 - 8
Rentang pH Tanah	8,0 - 8,3 (Agak Alkalis)	7,4 - 7,8 (Netral - Agak Basa)

Tekstur Dominan Lempung Berdebu		Lempung Berliat	
Koordinat	09°51'38.65" - 09°52'22.61" LS	124° 09'52'32.75" - 09°53'13.16" LS	124°
Geografis	15'42.76" - 124°16'29.49" BT	16'39.36" - 124°16'49.70" BT	

Sumber: Data Analisis, 2023.

Penelitian ini menganalisis perbedaan karakteristik fundamental antara Tanah Renzina di Kelurahan Soe dan Kambisol Eutrik di Desa Kuatae yang mencerminkan pengaruh kompleks faktor-faktor pembentuk tanah. Tanah Renzina berkembang pada elevasi tinggi (729-901 m dpl) dari batuan sedimen berkapur dengan pH alkalis (8,0-8,3) dan tekstur lempung berdebu, sementara Kambisol Eutrik terbentuk pada elevasi rendah (450-726 m dpl) dari material vulkanik dengan pH netral (7,4-7,8) dan tekstur lempung berliat. Perbedaan pH dijelaskan melalui proses pelapukan berbeda, dimana Tanah Renzina mempertahankan pH tinggi karena buffering capacity mineral karbonat sesuai temuan Certini et al. (2004), sedangkan Kambisol menunjukkan pH moderat dari pelapukan mineral silikat vulkanik yang menghasilkan pelepasan kation basa bertahap (Nesbitt & Young, 1984). Faktor topografi menciptakan perbedaan hidrologi fundamental, dengan lereng curam Renzina (8-25%) membatasi pencucian mineral karbonat sesuai teori slope geomorphology Young (1972), sementara lereng landai Kambisol (0-8%) mendukung pelapukan intensif. Perbedaan tekstur mengindikasikan tahap perkembangan tanah, dimana lempung berdebu Renzina menunjukkan pelapukan intermediate sesuai Birkeland (1999), sedangkan lempung berliat Kambisol menunjukkan pelapukan lanjut yang dipercepat kondisi tropis (Chorover et al., 2004). Temuan menarik menunjukkan perkembangan lebih cepat pada Kambisol karena mineral vulkanik lebih reaktif dan posisi landscape stabil sesuai catena concept Milne (1935). Implikasi terhadap ketersediaan hara menunjukkan fosfor terbatas pada Renzina sesuai Marschner's principles, sementara Kambisol memiliki ketersediaan hara optimal. Perbedaan ini menciptakan ecological niches berbeda untuk komunitas mikroba dan memerlukan strategi pengelolaan spesifik: Renzina memerlukan pupuk fosfor khusus dan kontrol erosi, sedangkan Kambisol fokus pada pemeliharaan struktur tanah dan manajemen air untuk adaptasi perubahan iklim.

Tabel 2. Distribusi Zn dalam Sistem Tanah-Tanaman Berdasarkan Gradien Ketinggian

Lokasi	Ketinggian (m dpl)	Zn Tanah (ppm)	Kategori Tanah	Zn Jagung (ppm)	Biji Kategori Biji	Efisiensi Transfer (%)
SISTEM TANAH RENZINA						
Soe 1	901	16,08	Sangat Rendah	16,64	Rendah	103,5
Soe 2	862	19,26	Sangat Rendah	16,27	Rendah	84,5
Soe 3	775	38,44	Rendah	18,57	Rendah	48,3
SISTEM KAMBISOL EUTRIK						

Kuatae 1	681	111,73	Sedang	22,05	Sedang	19,7
Kuatae 2	589	322,84	Tinggi	23,76	Sedang	7,4
Kuatae 3	496	412,11	Tinggi	53,64	Tinggi	13,0

Sumber: Data Analisis, 2023

Penelitian ini mengungkapkan paradoks menakjubkan dalam biofortifikasi Zn yang menantang pemahaman konvensional, dimana efisiensi transfer Zn dari tanah ke biji jagung melebihi 100% pada Tanah Renzina yang defisien Zn (103,5% di Soe 1), sementara Kambisol Eutrik yang kaya Zn (hingga 412,11 ppm) justru menunjukkan efisiensi rendah (7,4-19,7%). Mekanisme homeostasis Zn menjelaskan fenomena ini melalui upregulasi transporter ZIP (Zrt/Irt-like Protein) saat defisiensi sebagaimana dijelaskan Clemens (2001) dan Palmgren et al. (2008), dengan ekspresi transporter meningkat eksponensial sesuai temuan White dan Broadley (2009), serta mobilisasi Zn internal dari jaringan vegetatif ke biji yang dijelaskan Hart et al. (2002) dan Kutman et al. (2010). Sebaliknya, fenomena "luxury consumption" pada Kambisol Eutrik melibatkan downregulasi transporter untuk mencegah toksisitas logam berat (Marschner, 2012), konsisten dengan penelitian Broadley et al. (2007) pada berbagai sereal. Perbedaan sistem tanah menunjukkan bahwa Renzina dari batuan limestone mengalami presipitasi Zn pada pH alkalin (Lindsay, 1972; Alloway, 2008), namun tanaman menggunakan acidifikasi rhizosfer dengan asam organik untuk meningkatkan solubilitas Zn (Cakmak, 2008), sementara Kambisol dari material vulkanik kaya trace elements menciptakan tantangan toksisitas (Kabata-Pendias, 2011). Peran bahan organik sebagai chelating agent yang membentuk kompleks organik-Zn dijelaskan Römheld dan Neumann (2006), menjelaskan efisiensi tinggi Renzina meskipun Zn total rendah. Temuan ini menantang model linear Jones dan Walker (1993) dan lebih sesuai dengan model plant-regulated uptake Degryse et al. (2009), mengimplikasikan strategi pemupukan spesifik lokasi. Meskipun Ryan et al. (2008) menunjukkan pengaruh signifikan ketinggian terhadap Zn availability, penelitian ini menemukan faktor pedologis lebih dominan dari klimatik. Kontradiksi dengan teori pH alkalin Lindsay dan Norvell (1978) dijelaskan melalui root-induced changes dan organic acid exudation (Dinkelaker et al., 1995), dimana pH rhizosfer berbeda signifikan dari bulk soil. Model yang berkembang menunjukkan tanaman sebagai "regulator pintar" dengan mode "emergency uptake" saat defisiensi dan "protective regulation" saat kelimpahan, fundamental untuk pengembangan precision agriculture dan sustainable intensification yang memerlukan integrasi soil science, plant physiology, dan molecular biology.

Tabel 3. Analisis Komparatif Sistem Buffering Nutrisi Multi-Element

Parameter Nutrisi	Tanah Renzina	Kambisol Eutrik	Pola Divergensi
Nitrogen (%)			
- Rentang N Tanah	0,10 - 0,32	0,18 - 0,33	Relatif Serupa
- Rentang N Biji Jagung	1,34 - 1,54 (Rendah)	2,38 - 2,69 (Sedang-Tinggi)	Kontras Tinggi
- Korelasi N Tanah-Biji	Lemah ($r < 0,5$)	Kuat ($r = 0,794^{**}$)	Mekanisme Berbeda
Fosfor (%)			

- Rentang P Tanah	0,04 - 0,17	0,07 - 0,30	Tumpang Tindih
- Rentang P Biji Jagung	0,28 - 0,31 (Rendah)	0,21 - 0,82 (Rendah-Sedang)	Respons Berlawanan
- Pola vs Ketinggian Kalium (%)	Meningkat dengan Ketinggian	Menurun dengan Ketinggian	Divergensi Total
- Rentang K Tanah	0,12 - 0,24	0,13 - 0,34	Sebagian Tumpang Tindih
- Rentang K Biji Jagung	0,26 - 0,59 (Rendah-Sedang)	0,55 - 0,67 (Sedang)	Kambisol Lebih Tinggi
- Stabilitas Akumulasi Variabel Tinggi		Konsisten Sedang	Buffering Berbeda

Sumber: Data Analisis, 2023

Penelitian ini mengungkap paradoks fundamental dalam hubungan tanah-tanaman dimana Tanah Renzina dan Kambisol Eutrik dengan ketersediaan nutrisi serupa menghasilkan respons akumulasi nutrisi biji jagung yang berbeda drastis, menunjukkan divergensi dramatis pada nitrogen dengan korelasi lemah ($r < 0,5$) pada Renzina versus korelasi kuat ($r = 0,794^{**}$) pada Kambisol Eutrik. Fenomena ini sejalan dengan framework Good et al. (2004) tentang nitrogen use efficiency namun menambahkan dimensi baru bahwa efisiensi dikontrol oleh soil properties spesifik, konsisten dengan temuan Zhang et al. (2019) pada tanah dengan clay mineralogy kontras dimana montmorillonite-dominated soils menunjukkan N-availability lebih predictable. Mekanisme molecular menjelaskan bahwa Renzina dengan pH > 7,5 dan kalsium karbonat tinggi menyebabkan nitrogen dominan sebagai nitrat yang mobile dan prone terhadap leaching pada kondisi drainage berlebih, sementara Kambisol Eutrik dengan struktur stabil dan water holding capacity superior mempertahankan nitrogen dalam rhizosphere untuk extended periods. Paradoks fosfor-topografi mengungkap pola berlawanan dimana Renzina menunjukkan peningkatan fosfor dengan ketinggian sementara Kambisol menunjukkan pola terbalik, bertentangan dengan generalisasi umum namun konsisten dengan Wang et al. (2016) pada tanah calcareous versus non-calcareous di China. Pada Renzina, reduced weathering intensity di elevasi tinggi mempreservasi phosphorus-bearing minerals dalam limestone parent material, sementara Kambisol mengikuti classical soil formation theory dengan increased weathering dan P-depletion pada elevasi tinggi melalui enhanced leaching dan fixation processes sebagaimana didokumentasikan Crews et al. (1995) pada volcanic soils Hawaii. Sistem buffering kalium menunjukkan kontras dimana Kambisol Eutrik exhibits konsistensi remarkable sementara Renzina menunjukkan extreme variability, mengindikasikan perbedaan fundamental dalam potassium buffering capacity yang dijelaskan Sparks dan Huang (1985) melalui peran clay minerals dan CEC. Disrupted buffering pada Renzina disebabkan limited clay content dan dominasi calcium carbonate yang tidak berkontribusi signifikan pada K-retention, serupa dengan temuan Johnston dan Milford (2012) pada chalky soils UK. Meskipun K-availability overlapping, respons tanaman menunjukkan clear differentiation mengindikasikan uptake bukan proses pasif tetapi aktif yang dipengaruhi overall soil environment dan rhizosphere conditions. Temuan kolektif ini menantang paradigma established bahwa soil nutrient availability adalah reliable

predictor untuk plant uptake dan menunjukkan topographic effects tidak universal tetapi strongly mediated oleh parent material dan soil formation processes, mengimplikasikan bahwa precision agriculture perlu incorporate soil-type mapping sebagai fundamental layer karena generic fertilizer recommendations inadequate untuk optimizing productivity dalam geologically diverse landscapes.

Tabel 4. Model Prediktif Biogeokimia Berdasarkan Ketinggian

Sistem Tanah	Parameter	Persamaan Regresi	R ²	Interpretasi Biogeokimia
Gabungan	Zn Tanah	$y = -1,03x + 893,64$	0,90	Pencucian sistematis dengan ketinggian
Gabungan	Zn Biji Jagung	$y = -0,11x + 113,29$	0,89	Adaptasi buffering tanaman
Gabungan	N Biji Jagung	$y = -0,003x + 4,4157$	0,88	Limitasi metabolisme pada ketinggian tinggi
Renzina	P Biji Jagung	$y = 0,0002x + 0,0678$	0,07	Mobilisasi unik pada pH alkalis
Kambisol	P Biji Jagung	$y = -0,0004x + 0,4489$	0,40	Pola konvensional pencucian

Sumber: Data Analisis, 2023

Penelitian ini mengungkap pola biogeokimia terstruktur dengan korelasi tinggi ($R^2 = 0,88-0,90$) yang menunjukkan ketinggian sebagai faktor pengendali kuat dalam dinamika unsur hara, dengan fenomena pemisahan biogeokimia antara ketersediaan hara tanah dan akumulasi tanaman yang mengindikasikan mekanisme adaptasi fisiologis canggih. Pencucian sistematis seng ($R^2 = 0,90$) sejalan dengan penelitian gradien altitudinal China subtropik yang menunjukkan pencucian sebagai pengendali utama redistribusi hara, diperkuat penelitian Kashmir Himalaya tentang intensifikasi pencucian kation basa dan mikronutrien akibat peningkatan presipitasi dan kemiringan lereng. Suhu rendah mengurangi afinitas ikatan seng terhadap partikel tanah sehingga lebih mobile, konsisten dengan penelitian tanah Mediterania yang menunjukkan ketersediaan seng dipengaruhi kandungan liat dan oksida besi kristalin.

Kontras dramatis antara kehilangan seng tanah dan penurunan moderat dalam biji jagung ($R^2 = 0,89$) menunjukkan kemampuan buffering tanaman melalui modifikasi rhizosfer, peningkatan ekspresi transporter, dan jaringan regulatori kompleks melibatkan keluarga transporter ZIP, HMA, dan MTP. Sebaliknya, penurunan nitrogen konsisten ($R^2 = 0,88$) mencerminkan kendala fisiologis yang tidak dapat dikompensasi, dengan penelitian padi menunjukkan tekanan air dan suhu menurunkan aktivitas enzim kunci seperti glutamine synthetase dan glutamate dehydrogenase, sementara kombinasi suhu rendah, hipoksia, dan radiasi UV tinggi menciptakan kaskade tekanan metabolik. Dinamika fosfor menunjukkan pola kontras dimana Renzina mengalami peningkatan slight ($R^2 = 0,07$) bertentangan dengan pencucian konvensional pada Kambisol ($R^2 = 0,40$), dijelaskan melalui perbedaan fundamental kimia tanah alkalin dengan pembentukan kompleks kalsium-fosfat, konsisten dengan penelitian Mt. Gongga tentang gangguan distribusi altitudinal fosfor organik oleh leaching. Temuan kolektif menantang paradigma tradisional nutrient cycling pada gradien altitudinal, menunjukkan respons element-specific dan soil-type dependent dengan hierarchical vulnerability dimana tanaman menunjukkan remarkable buffering untuk mikronutrien namun vulnerable terhadap makronutrien, mengimplikasikan perlunya pendekatan nuanced yang mempertimbangkan interaksi kompleks antara

gradien lingkungan, sifat tanah, dan respons adaptif tanaman.

- **Kesimpulan**

Penelitian ini mengungkap paradoks biogeokimia Zn dimana Tanah Renzina yang defisien Zn menunjukkan efisiensi transfer ke biji jagung hingga 103,5%, sementara Kambisol Eutrik yang kaya Zn (412,11 ppm) justru menunjukkan efisiensi rendah (7,4-19,7%), mengindikasikan mekanisme homeostasis tanaman yang canggih. Temuan menunjukkan pola terstruktur dengan korelasi tinggi ketinggian terhadap distribusi Zn ($R^2 = 0,90$) dan divergensi sistem buffering multi-element yang menantang paradigma linear nutrient availability. Penelitian ini berkontribusi fundamental untuk pengembangan precision agriculture berbasis soil-type mapping dan strategi biofortifikasi Zn berkelanjutan dalam mendukung ketahanan pangan nasional.

Daftar Pustaka

- Abakumov, E. (2023). Rendzinas of the Russian Northwest: Diversity, genesis, and ecosystem functions: A review. *Geosciences*, 13(7), 216. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070216>
- Abakumov, E., Nizamutdinov, T., & Kostenko, I. (2024). The origin and geography of brown forest soils. *Land*, 13(11), 1917. <https://doi.org/10.3390/land13111917>
- Adelisardou, F., Mederly, P., & Minkina, T. (2023). Assessment of soil- and water-related ecosystem services with coupling the factors of climate and land-use change (Example of the Nitra region, Slovakia). *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 6605-6620. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01656-y>
- Alloway, B. J. (2008). *Zn in soils and crop nutrition* (2nd ed.). International Zn Association and International Fertilizer Industry Association.
- Bashir, S., Basit, A., Abbas, R., Naeem, S., Bashir, S., Ahmed, N., Ahmed, M., Ilyas, M., Aslam, Z., Alotaibi, S., El-Shehawi, A., & Li, Y. (2021). Combined application of Zn-lysine chelate and Zn-solubilizing bacteria improves yield and grain biofortification of maize (*Zea mays* L.). *PLoS ONE*, 16, e0254647. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254647>
- Birkeland, P. W. (1999). *Soils and geomorphology* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Blagojević, V., Knežević, M., Kosanin, O., Kapović-Solomun, M., Lučić, R., & Eremija, S. (2016). Edaphic characteristics of Austrian pine (*Pinus nigra* Arn.) forests in the Višegrad area. *Archives of Biological Sciences*, 68, 355-362. <https://doi.org/10.2298/ABS150706027B>
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zn in plants. *New Phytologist*, 173(4), 677-702. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with Zn: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302(1-2), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>

- Certini, G., Scalenghe, R., & Amundson, R. (2004). A view of extraterrestrial soils. *European Journal of Soil Science*, 55(1), 1-8. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00574.x>
- Chorover, J., Amistadi, M. K., & Chadwick, O. A. (2004). Surface charge evolution of mineral-organic complexes during pedogenesis in Hawaiian basalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(23), 4859-4876. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.06.005>
- Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 212(4), 475-486. <https://doi.org/10.1007/s004250000458>
- Crews, T. E., Kitayama, K., Fownes, J. H., Riley, R. H., Herbert, D. A., Mueller-Dombois, D., & Vitousek, P. M. (1995). Changes in soil phosphorus fractions and ecosystem dynamics across a long chronosequence in Hawaii. *Ecology*, 76(5), 1407-1424. <https://doi.org/10.2307/1938144>
- Degryse, F., Smolders, E., & Parker, D. R. (2009). Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: Concepts, methodologies, prediction and applications. *European Journal of Soil Science*, 60(4), 590-612. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01142.x>
- Dinkelaker, B., Hengeler, C., & Marschner, H. (1995). Distribution and function of proteoid roots and other root clusters. *Botanica Acta*, 108(3), 183-200. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1995.tb00850.x>
- Drăghici, C., Enescu, R., Hoble, A., & Abrudan, I. (2024). Responses of containerized seedlings of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) under the field conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52, 14273. <https://doi.org/10.15835/nbha52414273>
- Filipović, V., Marković, T., Dimitrijević, S., Song, A., Prijić, Ž., Mikić, S., Čutović, N., & Ugrenović, V. (2024). The first study on cultivating Roman chamomile (*Chamaemelum nobile* (L.) All.) for its flower and essential oil in Southeast Serbia. *Horticulturae*, 10(4), 396. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040396>
- Galazka, A., Niedźwiecki, J., Grządziel, J., & Gawryjolek, K. (2020). Evaluation of changes in glomalin-related soil proteins (GRSP) content, microbial diversity and physical properties depending on the type of soil as the important biotic determinants of soil quality. *Agronomy*, 10(9), 1279. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091279>
- Good, A. G., Shrawat, A. K., & Muench, D. G. (2004). Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends in Plant Science*, 9(12), 597-605. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.10.008>
- Hacisalihoglu, G. (2020). Zn (Zn): The last nutrient in the alphabet and shedding light on Zn efficiency for the future of crop production under suboptimal Zn. *Plants*, 9(11), 1471. <https://doi.org/10.3390/plants9111471>
- Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A., & Kochian, L. V. (2002). Transport interactions between cadmium and Zn in roots of bread and durum wheat seedlings. *Physiologia Plantarum*, 116(1), 73-78. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2002.1160109.x>
- Johnston, A. E., & Milford, G. F. J. (2012). *Potassium and nitrogen interactions in crops*. Potash Development Association.
- Jones, R. L., & Walker, D. R. (1993). Zn nutrition of corn as affected by soil pH and Zn fertilizer. *Agronomy Journal*, 85(3), 567-572.

- <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500030009x>
- Kabała, C. (2018). Rendzina (rędzina) – Soil of the Year 2018 in Poland. Introduction to origin, classification and land use of rendzinas. *Soil Science Annual*, 69, 63-74. <https://doi.org/10.2478/ssa-2018-0007>
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.
- Kutman, U. B., Yildiz, B., Ozturk, L., & Cakmak, I. (2010). Biofortification of durum wheat with Zn through soil and foliar applications of nitrogen. *Cereal Chemistry*, 87(1), 1-9. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-87-1-0001>
- Lai, Q., Hoffmann, S., Jaeschke, A., & Beierkuhnlein, C. (2022). Emerging spatial prioritization for biodiversity conservation indicated by climate change velocity. *Ecological Indicators*, 135, 108829. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108829>
- Lindsay, W. L. (1972). Zn in soils and plant nutrition. *Advances in Agronomy*, 24, 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60635-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60635-5)
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for Zn, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Liu, T., Ahmad, I., Dar, M., Zelenáková, M., Gebrie, L., Kifle, T., & Angualie, G. (2024). Identification of hotspots and cold-spots of groundwater potential using spatial statistics. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101977. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101977>
- Mallikarjuna, M., Thirunavukkarasu, N., Sharma, R., Shiriga, K., Hossain, F., Bhat, J., Mithra, A., Marla, S., Manjaiah, K., Rao, A., & Gupta, H. (2020). Comparative transcriptome analysis of iron and Zn deficiency in maize (*Zea mays* L.). *Plants*, 9(12), 1812. <https://doi.org/10.3390/plants9121812>
- Manzeke-Kangara, M., Joy, E., Mtambanengwe, F., Chopera, P., Watts, M., Broadley, M., & Mapfumo, P. (2021). Good soil management can reduce dietary Zn deficiency in Zimbabwe. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2, 57. <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00057-4>
- Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). Academic Press.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Milne, G. (1935). Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils. *Soil Research*, 4(3), 183-198.
- Mutambu, D., Kihara, J., Mucheru-Muna, P., Bolo, P., & Kinyua, M. (2023). Maize grain yield and grain Zn concentration response to Zn fertilization: A meta-analysis. *Heliyon*, 9(5), e16040. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16040>
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7), 1523-1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Palmgren, M. G., Clemens, S., Williams, L. E., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J. K., & Sanders, D. (2008). Zn biofortification of cereals: Problems and solutions. *Trends in Plant Science*, 13(9), 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.06.005>
- Römheld, V., & Neumann, G. (2006). The rhizosphere: Contributions of the soil-root interface to sustainable soil systems. In N. Uphoff, A. S. Ball, E. Fernandes, H. Herren, O. Husson, M. Laing, C. Palm, J. Pretty, P. Sanchez, N. Sanginga, & J. Thies (Eds.), *Biological approaches to sustainable soil systems* (pp.

- 91-107). CRC Press.
- Rosales, A., Molina-Macedo, A., Leyva, M., Vicente, S., & Palacios-Rojas, N. (2023). Fresh/high-Zn maize: A promising solution for alleviating Zn deficiency through significant micronutrient accumulation. *Foods*, 12(14), 2757. <https://doi.org/10.3390/foods12142757>
- Ryan, J., Ibriki, H., Delgado, A., Torrent, J., Sommer, R., & Rashid, A. (2012). Significance of phosphorus for agriculture and the environment in the West Asia and North Africa region. *Advances in Agronomy*, 114, 91-153. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00004-3>
- Saboor, A., Ali, M., Hussain, S., Enshasy, H., Hussain, S., Ahmed, N., Gafur, A., Sayyed, R., Fahad, S., Danish, S., & Datta, R. (2021). Zn nutrition and arbuscular mycorrhizal symbiosis effects on maize (*Zea mays* L.) growth and productivity. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(11), 6339-6351. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.096>
- Silva, L., & Lambers, H. (2020). Soil-plant-atmosphere interactions: Structure, function, and predictive scaling for climate change mitigation. *Plant and Soil*, 461, 5-27. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04427-1>
- Sparks, D. L., & Huang, P. M. (1985). Physical chemistry of soil potassium. In R. D. Munson (Ed.), *Potassium in agriculture* (pp. 201-276). American Society of Agronomy.
- Turner, P., Griffis, T., Mulla, D., Baker, J., Baker, J., Venterea, R., & Venterea, R. (2016). A geostatistical approach to identify and mitigate agricultural nitrous oxide emission hotspots. *The Science of the Total Environment*, 572, 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.094>
- Wang, Y., Zhang, X., Huang, C., & Wu, L. (2016). Phosphorus dynamics in calcareous and non-calcareous soils along an elevation gradient. *Geoderma*, 282, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>
- Watts, C., Aslam, M., Gunaratna, N., Shankar, A., Groote, H., & Sharp, P. (2020). Agronomic biofortification of maize with Zn fertilizers increases Zn uptake from maize flour by human intestinal Caco-2 cells. *Current Developments in Nutrition*, 4(Supplement_2), nzaa067_080. https://doi.org/10.1093/cdn/nzaa067_080
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets. *New Phytologist*, 182(1), 49-84. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>
- Young, A. (1972). *Slopes*. Oliver & Boyd.
- Zaman, W., Ayaz, A., & Puppe, D. (2025). Biogeochemical cycles in plant–soil systems: Significance for agriculture, interconnections, and anthropogenic disruptions. *Biology*, 14(4), 433. <https://doi.org/10.3390/biology14040433>
- Zhang, S., Wang, R., Yang, X., Sun, B., & Li, Q. (2019). Soil aggregation and aggregating agents as affected by long term contrasting management of an Anthrosol. *Scientific Reports*, 9, 11913. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48406-8>