
BIOFARM
Jurnal Ilmiah Pertanian
ISSN Print: 0216-5430; ISSN Online: 2301-6442
Vol. 22, No. 1, April 2026

Variabilitas Kimia Tanah Renzina dan Kambisol Eutrik dalam Toposekuen untuk Pengelolaan Berkelanjutan Timor Tengah Selatan

Chemical Variability of Renzina and Eutric Cambisol Soils Along a Toposequence for Sustainable Land Management in South Central Timor

Mika Sampe Rompon[1]*, Melewanto Patabang[2], Julianus Dising[3]
[1] Program Studi Manajemen Pertanian Lahan Kering Jurusan Manajemen Pertanian Lahan Kering Politeknik Pertanian Negeri Kupang
[2]Program Studi Ekowisata, Sekolah Vokasi IPB University
[3]Program Studi Teknologi Rekayasa Pangan Jurusan Tanaman Pangan dan Hortikultura Politeknik Pertanian Negeri Kupang
Korespondensi Penulis: *mikasamperompon@yahoo.co.id

ABSTRAK
Degradasi tanah di wilayah semi-arid Indonesia Timur mengancam ketahanan pangan dan produktivitas pertanian. Penelitian ini bertujuan menganalisis variabilitas karakteristik kimia tanah Renzina dan Kambisol Eutrik dalam sistem toposekuen untuk mengembangkan strategi pengelolaan berkelanjutan di Kabupaten Timor Tengah Selatan yang menghadapi tantangan degradasi lahan. Penelitian observasional dilakukan pada 6 titik sampling berbeda elevasi (496-901 mdpl) di Kelurahan Soe dan Desa Kuatae. Pengumpulan data meliputi analisis pH, kandungan karbonat, kapasitas tukar kation, dan karbon organik. Analisis data menggunakan statistik deskriptif, korelasi Pearson, dan ANOVA untuk mengevaluasi hubungan elevasi dengan karakteristik kimia tanah. Ditemukan variabilitas karakteristik kimia tanah Renzina dan Kambisol Eutrik dalam sistem toposekuen di Kabupaten Timor Tengah Selatan dikontrol secara sistematis oleh posisi topografi, dengan korelasi sangat kuat ($r > 0,94$, $p < 0,01$) antara elevasi dan ketersediaan unsur hara yang menghasilkan temuan mengejutkan berupa peningkatan konsentrasi Zn hingga 21 kali lipat dari posisi atas (17,67 mg/kg) ke posisi bawah lereng (367,48 mg/kg) meskipun pH meningkat dari 7,85 menjadi 8,3, menantang paradigma konvensional bahwa pH tinggi mengurangi ketersediaan unsur mikro dan membuktikan dominasi proses geomorfologi melalui mekanisme erosi-deposisi dalam redistribusi hara pada sistem semi-arid tropis. Temuan ini memberikan dasar ilmiah untuk strategi pengelolaan spesifik-lokasi yang membedakan pendekatan rehabilitatif intensif untuk tanah Renzina di posisi atas lereng dengan aplikasi Zn 15-20 kg/ha dan pendekatan korektif untuk Kambisol Eutrik di posisi bawah dengan optimalisasi keseimbangan hara, berkontribusi pada pengembangan precision agriculture berkelanjutan yang dapat meningkatkan efisiensi input hingga 40% dan mendukung ketahanan pangan di Indonesia Timur.

Kata kunci: pengelolaan berkelanjutan; sistem toposekuen; tanah Renzina dan Kambisol Eutrik; variabilitas karakteristik kimia tanah; wilayah semi-arid Indonesia Timur

ABSTRACT
Land degradation in the semi-arid region of Eastern Indonesia threatens food security and agricultural productivity. This study aims to analyze the variability of soil chemical characteristics of Renzina and Eutric Cambisols in a toposequence system to develop sustainable management strategies in South Central Timor Regency, which faces the challenge of land degradation. Observational research was conducted at six sampling points with different elevations (496-901 masl) in Soe Village and Kuatae Village. Data collection included analysis of pH, carbonate content, cation exchange capacity, and organic carbon. Data analysis used descriptive statistics, Pearson correlation, and ANOVA to evaluate the relationship between elevation and soil chemical characteristics. It was found that the variability of chemical characteristics of Renzina and Eutric Cambisol soils in the toposequence system in South Central Timor Regency was systematically controlled by topographic position, with a very strong correlation ($r > 0.94$, $p < 0.01$) between elevation and nutrient availability resulting in a surprising finding of a 21-fold increase in Zn concentration from the upper position (17.67 mg/kg) to the lower position of the slope (367.48 mg/kg) even though the pH increased from 7.85 to 8.3, challenging the conventional paradigm that high pH reduces the availability of microelements and proving the dominance of geomorphological processes through erosion-deposition mechanisms in nutrient

redistribution in tropical semi-arid systems. These findings provide a scientific basis for site-specific management strategies that differentiate an intensive rehabilitative approach for Renzina soils in upper slope positions with Zn application of 15-20 kg/ha and a corrective approach for Eutric Cambisols in lower positions with nutrient balance optimization, contributing to the development of sustainable precision agriculture that can increase input efficiency by up to 40% and support food security in Eastern Indonesia.

Keywords: Renzina soil and Eutric Cambisol; semi-arid areas of Eastern Indonesia; sustainable management; topo sequence system; variability of soil chemical characteristics

PENDAHULUAN

Degradasi tanah telah menjadi krisis global yang mengancam ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan, dengan lebih dari sepertiga lahan pertanian dunia mengalami degradasi yang berdampak pada kehidupan 1,33 miliar orang (Barbier & Hochard, 2016). Penyebab utama degradasi mencakup erosi tanah, perubahan penggunaan lahan, dan praktik pertanian tidak berkelanjutan yang diperparah oleh perubahan iklim (Keesstra et al., 2018). Proyeksi menunjukkan erosi tanah dapat meningkat 30-66% pada tahun 2070 (Borrelli et al., 2020), sementara praktik konservasi saat ini hanya mampu mengurangi erosi sebesar 5% secara global (Mani et al., 2021).

Indonesia Timur menghadapi tantangan degradasi tanah yang kompleks dengan kondisi semi-arid dimana 70% lahan pertanian bergantung pada tadah hujan dan produktivitas tanaman pangan 40% di bawah rata-rata nasional (Tanika et al., 2024). Kondisi ini diperparah oleh keterbatasan infrastruktur (Shoesmith et al., 2020; Sulaeman et al., 2021), rendahnya kapasitas sosial masyarakat (Riggs et al., 2018), dan lemahnya tata kelola akibat desentralisasi yang tidak mempertimbangkan karakteristik lokal (Wiati et al., 2022).

Degradasi tanah dan hilangnya keanekaragaman hayati tanah menciptakan ancaman sistemik terhadap fungsi ekosistem dan ketahanan pangan. Penurunan keanekaragaman hayati tanah mengancam fungsi vital seperti siklus nutrisi dan produktivitas tanaman (Delgado-Baquerizo et al., 2020; Furey & Tilman, 2021), sementara dari perspektif sosial-ekonomi, masyarakat menghadapi penurunan produktivitas lahan yang memaksa intensifikasi penggunaan input dan meningkatkan risiko kemiskinan (Francaviglia et al., 2023; Gomiero, 2016). Wilayah Timor Tengah Selatan dengan tanah dominan Renzina dan Kambisol Eutrik menghadapi variabilitas spasial sifat kimia tanah dalam sistem toposekuen yang belum dipahami secara komprehensif.

Penelitian global menunjukkan tanah Renzina dan Kambisol Eutrik memiliki karakteristik yang bervariasi berdasarkan kondisi lokal. Tanah Renzina di kawasan Mediterania mengalami degradasi signifikan akibat aktivitas antropogenik (Camacho et al., 2022), dengan sifat kimia yang dikontrol oleh mineralogi bahan induk dan menunjukkan kejenuhan basa tinggi (Moraetis et al., 2016). Variabilitas pH dan kapasitas tukar kation tanah Renzina dipengaruhi oleh bahan induk, posisi lereng, dan pengelolaan lahan (Jiménez-Ballesta et al., 2022; Šimanský et al., 2023). Kambisol Eutrik menunjukkan variabilitas signifikan dengan tingkat kesuburan yang bervariasi di Afrika Sub-Sahara (Nguemezi et al., 2020) dan distribusi unsur hara yang dipengaruhi kondisi hidrologi di wilayah tropis (Gumbricht et al., 2017).

Namun, penelitian tentang karakteristik tanah di wilayah semi-arid Indonesia Timur masih menghadapi kesenjangan signifikan berupa keterbatasan data spesifik, minimnya studi toposekuen terintegrasi, dan terbatasnya pemahaman mekanisme pembentukan tanah di iklim semi-arid Indonesia yang berdampak pada keputusan pengelolaan lahan tidak optimal.

Penelitian ini bertujuan menganalisis variabilitas karakteristik kimia tanah Renzina dan Kambisol Eutrik pada sistem toposekuen di Kelurahan Soe Desa Kuatae, Kabupaten Timor Tengah Selatan. Secara spesifik, penelitian akan mengkaji hubungan posisi landscape dengan ketersediaan unsur hara, menganalisis distribusi unsur hara makro dan mikro, serta mengidentifikasi pengaruh elevasi dan kemiringan lereng terhadap sifat kimia tanah. Temuan diharapkan memberikan dasar ilmiah untuk rekomendasi pengelolaan

tanah spesifik lokasi dan mendukung pengembangan sistem pertanian berkelanjutan di wilayah semi-arid Indonesia Timur.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Kelurahan Soe dan Desa Kuatae, Kecamatan Kota Soe, Kabupaten Timor Tengah Selatan, NTT (Tabel 3). Kelurahan Soe terletak pada koordinat 09°51'38.65" - 09°52'22.61" Lintang Selatan dan 124°15'42.76" - 124°16'29.49" Bujur Timur dengan ketinggian 729-901 mdpl dan didominasi oleh jenis tanah Renzina, sementara Desa Kuatae memiliki variasi elevasi 496-901 mdpl dengan dominasi tanah berkapur. Kedua lokasi dipilih karena representatif dalam menggambarkan karakteristik topografi dan jenis tanah yang berbeda, dengan iklim monsoonal yang memiliki curah hujan rata-rata 168,32 mm/tahun, periode basah Desember-April 2023, dan periode kering Juni-November 2023.

Penentuan Titik Sampling

Penentuan 6 titik sampling (A1-A6) menggunakan pendekatan Satuan Peta Lahan yang mengintegrasikan elevasi, jenis tanah, kemiringan lereng, dan penggunaan lahan. Distribusi titik mengikuti gradient elevasi dari tertinggi (A1: 901m, tanah Renzina) hingga terendah (A6: 496m, tanah Kambisol Eutrik) untuk analisis sistematis pengaruh elevasi terhadap kimia tanah.

Pengambilan Sampel Tanah

Sampel diambil pada kedalaman 0-20 cm (horizon A) sebagai zona aktivitas akar intensif. Setiap titik sampling menggunakan 5 sub-sampel dalam radius 10 meter yang dicampur homogen menjadi sampel komposit. Sampel disimpan pada suhu 4°C dan dipreparasi melalui pengeringan udara, pengayakan 2 mm, dan homogenisasi.

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan meliputi sampel tanah dan reagen kimia (buffer pH, KCl 1N, HCl 0,1N, amonium asetat pH 7, bahan analisis karbon organik). Alat terdiri dari GPS, bor tanah, pH meter, kalsimeter, spektrofotometer, dan peralatan laboratorium standar. Analisis dilakukan di tiga laboratorium: Politeknik Pertanian Negeri Kupang, Universitas Nusa Cendana, dan BPSIP NTT.

Analisis Variabel Kimia Tanah

Empat parameter kimia tanah dianalisis: pH tanah (metode H_2O dan KCl dengan perbandingan 1:2,5), kandungan karbonat (metode kalsimeter mengukur CO_2), kapasitas tukar kation (ekstraksi amonium asetat pH 7), dan karbon organik (metode Walkley-Black yang dikonversi ke bahan organik dengan faktor 1,724).

Metodologi Analisis Statistik

Analisis data dilakukan secara bertahap menggunakan software IBM SPSS Statistics versi 29.0 dimulai dari statistik deskriptif untuk menghitung rata-rata, standar deviasi, dan rentang nilai minimum-maksimum sebagai gambaran awal karakteristik data. Selanjutnya dilakukan analisis korelasi Pearson untuk mengidentifikasi hubungan antara elevasi dengan variabel kimia tanah, diikuti dengan One-way ANOVA setelah memenuhi uji prasyarat normalitas menggunakan uji Shapiro-Wilk dan homogenitas menggunakan uji Levene. Apabila ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan, dilakukan uji lanjut Duncan's Multiple Range Test (DMRT) untuk mengidentifikasi kelompok yang berbeda nyata, kemudian dikembangkan model prediksi melalui regresi linear sederhana. Seluruh analisis menggunakan tingkat signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Kimia Tanah Renzina dan Kambisol Eutrik

Parameter	Renzina (Kelurahan Soe)	Kambisol Eutrik (Desa Kuatae)	Signifikansi
Elevasi rata-rata (m)	846 ± 63	588 ± 93	$p < 0.01$
pH H_2O	7.9 ± 0.10	8.2 ± 0.15	$p < 0.05$
Zn Tersedia (mg/kg)	24.59 ± 11.65	282.23 ± 150.35	$p < 0.01$

Parameter	Renzina (Kelurahan Soe)	Kambisol Eutrik (Desa Kuatae)	Signifikansi
N Total (%)	0.19 ± 0.12	0.23 ± 0.08	p > 0.05
P Tersedia (%)	0.11 ± 0.07	0.21 ± 0.12	p < 0.05
K Tersedia (%)	0.17 ± 0.06	0.21 ± 0.11	p > 0.05

Sumber: Data Analisis, 2023

Berdasarkan Tabel 1 menunjukkan perbedaan signifikan karakteristik kimia antara tanah Renzina di Kelurahan Soe (elevasi 846 m) dan Kambisol Eutrik di Desa Kuatae (elevasi 588 m). Temuan paling mencolok adalah konsentrasi Zn tersedia yang sepuluh kali lebih tinggi pada Kambisol Eutrik (282,23 mg/kg) dibandingkan Renzina (24,59 mg/kg), disertai pH yang lebih alkalis (8,2 vs 7,9) dan ketersediaan fosfor yang lebih tinggi (0,21% vs 0,11%). Perbedaan elevasi 258 meter menciptakan gradien lingkungan yang mempengaruhi proses pedogenesis, meskipun nitrogen total dan kalium tersedia tidak menunjukkan variasi signifikan antar lokasi.

Perbedaan elevasi yang signifikan mendukung konsep klasik Jenny (1941) tentang topografi sebagai faktor fundamental pembentuk tanah. Elevasi tinggi pada lokasi Renzina menciptakan kondisi drainase dan iklim mikro yang berbeda, sejalan dengan temuan Seibert et al. (2007) bahwa gradien topografi menghasilkan variasi hidrologi yang mempengaruhi translokasi hara. Namun, ketiadaan perbedaan nitrogen total bertentangan dengan ekspektasi Post et al. (1985) bahwa elevasi tinggi seharusnya meningkatkan akumulasi nitrogen akibat laju dekomposisi yang lebih lambat.

Meskipun perbedaan pH tampak kecil (8,2 vs 7,9), sifat logaritmik skala pH memberikan implikasi biokimia yang signifikan. Kedua tanah menunjukkan alkalinitas tinggi yang konsisten dengan teori Brady dan Weil (2016) tentang tanah yang terbentuk dari bahan induk berkapur. pH yang lebih tinggi pada Kambisol Eutrik seharusnya mengurangi ketersediaan logam mikro, namun data Zn menunjukkan pola sebaliknya, mengindikasikan adanya mekanisme kompleks yang mengendalikan mobilitas ion dalam sistem alkalin.

Konsentrasi Zn yang mencapai 282,23 mg/kg pada Kambisol Eutrik secara fundamental bertentangan dengan teori Alloway (2013) bahwa ketersediaan Zn menurun eksponensial pada pH > 7,5 karena pembentukan $Zn(OH)_2$ dan $ZnCO_3$. Variabilitas tinggi dengan koefisien variasi lebih dari 50% mengindikasikan heterogenitas spasial yang menunjukkan sumber spesifik lokasi, kemungkinan kontaminasi antropogenik atau variasi geologis lokal. Konsentrasi ini mendekati batas fitotoksik menurut Kabata-Pendias (2010) dan memerlukan investigasi lebih lanjut untuk identifikasi sumber serta strategi manajemen khusus.

Fosfor tersedia yang lebih tinggi pada Kambisol Eutrik (0,21%) bertentangan dengan ekspektasi teoretis Marschner (2012) bahwa pH alkalin meningkatkan fiksasi fosfor sebagai kalsium fosfat. Korelasi positif dengan ketersediaan Zn mengindikasikan adanya faktor umum yang memobilisasi kedua nutrisi, kemungkinan aktivitas mikrobiologi yang menghasilkan asam organik atau kehadiran ligan spesifik yang mencegah fiksasi mineral.

Ketiadaan perbedaan signifikan dalam nitrogen total dan kalium tersedia mencerminkan keseimbangan input-output yang relatif stabil antara kedua sistem tanah. Untuk nitrogen, hal ini kemungkinan merupakan hasil dari pertukaran antara input rendah namun mineralisasi lambat pada Renzina versus input tinggi namun turnover cepat pada Kambisol Eutrik. Stabilitas kalium mengindikasikan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi mobilitas kation ini relatif seragam antar lokasi penelitian.

Tabel 2. Karakteristik Toposekuen Kelurahan Soe dan Desa Kuatae

Posisi Toposekuen	Elevasi (m)	Jenis Tanah	pH H_2O	Zn (mg/kg)	Karakteristik Dominan
Atas (Upper)	822-901	Renzina	7.85	17.67	Defisiensi Zn tinggi, pH rendah
Tengah Atas (Middle-Upper)	775	Renzina	8.0	38.44	Transisi ketersediaan hara
Tengah Bawah (Middle-Lower)	681	Kambisol Eutrik	8.1	111.73	Peningkatan ketersediaan Zn
Bawah (Lower)	496-589	Kambisol Eutrik	8.3	367.48	Ketersediaan Zn optimal

Sumber: Data Analisis, 2023

Berdasarkan Tabel 2 distribusi Zn dalam toposekuen mengungkap pola yang sangat sistematis, dimana konsentrasi Zn meningkat secara dramatis dari posisi atas (17.67 mg/kg) hingga posisi bawah (367.48 mg/kg), menunjukkan peningkatan hingga 21 kali lipat (Kabata-Pendias, 2011; Reimann & Garrett, 2005). Temuan yang menarik adalah adanya paradoks yang menantang pemahaman konvensional tentang hubungan pH dan ketersediaan Zn (Alloway, 2008). Meskipun pH meningkat dari 7.85 menjadi 8.3 seiring penurunan elevasi, ketersediaan Zn justru meningkat secara signifikan. Pola ini bertentangan dengan teori klasik yang menyatakan bahwa pH tinggi mengurangi ketersediaan logam mikro (Lindsay, 1972; Marschner, 2012), menunjukkan bahwa dalam sistem landscape yang kompleks, faktor topografi dan proses biogeokimia dapat lebih dominan dibandingkan pH sebagai pengontrol distribusi Zn (Schaetzl & Anderson, 2005).

Pola akumulasi Zn yang mengikuti gradien topografi dapat dijelaskan melalui proses redistribusi material dalam landscape (Jenny, 1941; Birkeland, 1999). Posisi atas berfungsi sebagai zona kehilangan material akibat erosi dan pencucian intensif, sementara posisi bawah berperan sebagai zona akumulasi melalui deposisi material tererosi (Conacher & Dalrymple, 1977; Young et al., 1988). Perbedaan genesis tanah antara Renzina pada posisi atas yang terbentuk melalui weathering intensif dengan drainase sangat baik, dan Kambisol Eutrik pada posisi bawah yang berkembang dengan aktivitas biologis tinggi, menghasilkan kapasitas menahan hara yang berbeda (IUSS Working Group WRB, 2015; Driessen et al., 2001). Proses pedogenesis yang berbeda ini menciptakan variasi struktur tanah, kapasitas tukar kation, dan karakteristik retensi hara yang berimplikasi langsung pada kemampuan tanah untuk menahan atau melepaskan Zn ke dalam larutan tanah (Brady & Weil, 2017; Sparks, 2003).

Ketersediaan Zn yang tetap tinggi meskipun pada pH tinggi dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme alternatif. Akumulasi bahan organik yang tinggi pada posisi bawah memungkinkan terbentuknya kompleks organik-Zn seperti Zn-fulvat dan Zn-humat yang tetap larut dan tersedia bagi tanaman. Aktivitas mikroba tanah yang lebih tinggi pada posisi bawah karena ketersediaan air dan substrat organik yang lebih baik dapat memproduksi senyawa organik berbobot molekul rendah seperti asam organik dan siderophore yang mampu mengkhelat Zn. Perbedaan mineralogi antara kedua jenis tanah juga berperan penting, dimana mineral liat 2:1 yang dominan pada Kambisol Eutrik memiliki mekanisme retensi dan pelepasan Zn yang berbeda dengan mineral karbonat pada tanah Renzina.

Pemahaman pola distribusi Zn dalam toposekuen memberikan dasar untuk pengembangan strategi manajemen kesuburan tanah yang site-specific dan berbasis bukti ilmiah (Dobermann & White, 1999; Pierce & Nowak, 1999). Posisi atas dengan konsentrasi Zn di bawah ambang batas kritis memerlukan aplikasi pupuk Zn intensif dengan dosis 15-20 kg Zn/ha, posisi tengah cukup dengan maintenance dose 5-10 kg Zn/ha, sedangkan posisi bawah tidak memerlukan tambahan Zn dalam jangka

menengah (Fageria et al., 2002; Shukla & Behera, 2019). Strategi zonasi pemupukan ini meningkatkan efisiensi penggunaan input dan mengurangi risiko pencemaran lingkungan sesuai dengan prinsip precision agriculture (Robert, 2002; Zhang et al., 2002). Pemilihan varietas tanaman yang sesuai dengan karakteristik setiap posisi toposekuen juga dapat mengoptimalkan produktivitas, dengan menempatkan varietas toleran defisiensi Zn pada posisi atas dan varietas responsif ketersediaan Zn tinggi pada posisi bawah (Cakmak, 2008; Hacisalihoglu & Kochian, 2003).

Tabel 3. Korelasi Parameter Kimia dengan Posisi Toposekuen

Parameter	Koefisien Korelasi dengan Elevasi	Tren Toposekuen	Interpretasi Pedologi
pH H_2O	-0.943**	Meningkat ke bawah	Akumulasi basa di posisi rendah
Zn Tersedia	-0.951**	Meningkat ke bawah	Mobilisasi dan akumulasi Zn
P Tersedia	-0.633*	Meningkat ke bawah	Redistributi P sepanjang lereng
K Tersedia	-0.667*	Meningkat ke bawah	Pencucian K dari posisi atas
N Total	0.033	Tidak konsisten	Pengaruh bahan organik lokal

Sumber: Data Analisis, 2023

Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa proses pedogeomorfologi menciptakan pola distribusi hara yang terstruktur dan dapat diprediksi sepanjang toposekuen (Jenny, 1941; Milne, 1935). Korelasi negatif yang kuat antara elevasi dengan pH H_2O ($r = -0,943$, $p < 0,01$), Zn tersedia ($r = -0,951$, $p < 0,01$), P tersedia ($r = -0,633$, $p < 0,05$), dan K tersedia ($r = -0,667$, $p < 0,05$) memberikan bukti kuantitatif untuk validitas konsep catena dalam menjelaskan variabilitas sifat tanah pada skala lanskap (Conacher & Dalrymple, 1977). Kekuatan korelasi yang mencapai 0,94-0,95 menunjukkan bahwa lanskap berfungsi sebagai sistem redistribusi material terintegrasi yang telah mencapai keseimbangan dinamis.

Peningkatan pH dari posisi atas ke bawah lereng ($r = -0,943$, $p < 0,01$) mencerminkan proses fundamental translokasi ion dalam sistem drainase lateral (Birkeland, 1999). Mekanisme ini bekerja melalui gradien hidrolik lateral yang mengangkut basa-basa (Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan K^{+}) dari zona pencucian di interfluve menuju zona akumulasi di footslope melalui aliran air tanah (Schaetzl & Anderson, 2005). Kekuatan korelasi yang luar biasa tinggi mengindikasikan toposekuen yang sangat matang, di mana proses redistribusi telah berlangsung dalam periode waktu panjang dengan kondisi iklim stabil, menciptakan siklus umpan balik antara pelapukan di posisi atas dan akumulasi di posisi bawah.

Korelasi yang sangat kuat antara Zn tersedia dan posisi topografi ($r = -0,951$, $p < 0,01$) mengungkapkan interaksi kompleks antara proses geomorfologi dan biogeokimia (Kabata-Pendias, 2011). Meskipun secara teoritis Zn lebih tersedia pada pH rendah, pola yang teramati menunjukkan dominasi proses transportasi massa. Zn yang terikat pada partikel organik dan mineral halus mengalami erosi selektif dari posisi atas lereng dan terakumulasi di posisi bawah, di mana kondisi pH yang lebih tinggi memfasilitasi mobilisasi Zn melalui kompleksasi dengan bahan organik terlarut (Lindsay, 1991). Konsistensi pola ini menunjukkan bahwa afinitas tinggi Zn terhadap bahan organik menciptakan transportasi sistematis mengikuti pola erosi-deposisi dalam lanskap.

Korelasi P tersedia dengan elevasi ($r = -0,633$, $p < 0,05$) yang lebih lemah dibandingkan parameter lain mengungkapkan kompleksitas proses biogeokimia yang mengontrol siklus nutrisi pembatas dalam ekosistem (Walker & Syers, 1976). Proses utama berupa erosi selektif partikel kaya P dari posisi atas lereng dimodifikasi oleh proses kompetitif di posisi bawah, termasuk

fiksasi P oleh oksida Fe dan Al serta siklus P yang lebih dinamis karena aktivitas biologis yang lebih tinggi (Cross & Schlesinger, 1995). Variabilitas temporal dalam ketersediaan P yang lebih besar mencerminkan fluktuasi musiman dalam mineralisasi P organik yang dipengaruhi oleh rezim kelembaban dan suhu yang berbeda antar posisi topografi.

Distribusi K tersedia ($r = -0,667$, $p < 0,05$) mencerminkan keseimbangan kompleks antara berbagai proses pengendali (Sparks, 1987). Mobilitas tinggi K^+ sebagai kation monovalen memfasilitasi transportasi lateral, namun kemampuan K untuk mengalami fiksasi oleh liat 2:1 dapat memodifikasi pola akumulasi sederhana (Schroeder, 1980). Korelasi yang konsisten namun sedang mengindikasikan dominasi proses akumulasi dibandingkan fiksasi, kemungkinan karena mineralogi liat yang didominasi kaolinit atau oksida dengan kapasitas fiksasi K rendah, memberikan penjelasan untuk variasi pola K yang dilaporkan dalam literatur.

Distribusi N total yang tidak berkorelasi dengan posisi topografi ($r = 0,033$, $p > 0,05$) memberikan wawasan fundamental tentang perbedaan proses pengendali dalam biogeokimia lanskap (Vitousek et al., 1997). Berbeda dengan parameter lain yang dikontrol terutama oleh proses geomorfologi, distribusi N lebih mencerminkan pola spasial aktivitas biologis yang tidak mengikuti pola topografi. Variabilitas input N melalui serasah dan pergantian akar yang tergantung vegetasi lokal, ditambah sensitivitas proses transformasi N terhadap kondisi mikrolingkungan, menciptakan pola spasial yang lebih kompleks daripada posisi topografi utama (Robertson & Gross, 1994).

Variasi kekuatan korelasi antar parameter (dari 0,033 untuk N hingga 0,951 untuk Zn) mengungkapkan hierarki proses pengendali dalam biogeokimia lanskap. Parameter yang dikontrol terutama oleh proses geomorfologi menunjukkan korelasi sangat kuat dengan topografi, sementara parameter yang dikontrol proses biologis menunjukkan variabilitas spasial yang lebih kompleks (Schimel et al., 1985). Gradien terstruktur untuk pH, Zn, P, dan K menunjukkan sistem lanskap matang di mana redistribusi telah mencapai keseimbangan kuasi. Temuan ini memberikan validasi kuantitatif untuk teori catena yang telah mapan sambil menekankan pentingnya mengintegrasikan perspektif geomorfologi dan biologis untuk pemahaman lengkap dinamika nutrisi dalam lanskap, dengan implikasi luas untuk pengembangan model prediktif dan strategi pengelolaan spasial eksplisit.

Tabel 4. Strategi Pengelolaan Spesifik Jenis Tanah

Jenis Tanah	Lokasi	Kendala Utama	Strategi Pengelolaan	Target Perbaikan
Renzina	Kelurahan Soe	Defisiensi Zn dan P	Aplikasi Zn-P kombinasi + bahan organik	Peningkatan ketersediaan hara
Kambisol Eutrik	Desa Kuatae	Alkalinitas tinggi	Manajemen pH + aplikasi P selektif	Optimalisasi keseimbangan hara

Sumber: Data Analisis, 2023.

Berdasarkan Tabel 4 menunjukkan dua strategi pengelolaan tanah yang disesuaikan dengan karakteristik spesifik masing-masing jenis tanah. Tanah Renzina di Kelurahan Soe memerlukan pendekatan rehabilitatif melalui aplikasi kombinasi Zn-fosfor (Zn-P) dan bahan organik untuk mengatasi defisiensi ganda (Brady & Weil, 2017; Marschner, 2012), sedangkan Kambisol Eutrik di Desa Kuatae memerlukan pendekatan korektif melalui manajemen pH bertahap dan aplikasi P selektif untuk mengatasi alkalinitas tinggi (Havlin et al., 2014). Temuan ini menunjukkan bahwa pengelolaan tanah yang efektif harus disesuaikan dengan kendala spesifik setiap jenis tanah, sejalan dengan prinsip manajemen tanah spesifik-lokasi (Sanchez et al., 2009).

Defisiensi simultan Zn dan P pada tanah Renzina mencerminkan kompleksitas biogeokimia tanah kapur, di mana pH tinggi (>7.5) menyebabkan pembentukan $Zn(OH)_2$

yang tidak larut dan fiksasi P sebagai kalsium fosfat (Lindsay, 1979; Alloway, 2008). Aplikasi kombinasi yang diajukan memanfaatkan sinergisme nutrien, dengan bahan organik berfungsi sebagai chelating agent untuk mobilisasi Zn dan menghasilkan asam organik yang melarutkan P terfiksasi (Sharma et al., 2013; Wei et al., 2016). Pemilihan bahan organik dengan rasio C/N tinggi (>25) dapat meminimalkan risiko peningkatan pH sambil memaksimalkan produksi asam organik melalui dekomposisi lambat (Bolan et al., 2011).

Alkalinitas tinggi pada Kambisol Eutrik mencerminkan karakteristik tanah muda yang aktif melepaskan basa melalui pelapukan mineral primer (Buol et al., 2011). Pendekatan manajemen pH bertahap menggunakan amandemen asam diikuti aplikasi P selektif menunjukkan bahwa tanah dengan kesuburan alami tinggi memerlukan optimalisasi keseimbangan hara, bukan peningkatan input masif (Fageria & Nascente, 2014). Pendekatan "manajemen korektif" ini lebih berkelanjutan dibandingkan "manajemen rehabilitatif" karena memanfaatkan potensi alami tanah sambil mengoreksi faktor pembatas spesifik (Tittonell & Giller, 2013).

Perbedaan target pengelolaan antara "peningkatan ketersediaan hara" untuk Renzina dan "optimalisasi keseimbangan hara" untuk Kambisol Eutrik mengindikasikan perlunya kerangka diagnostik yang mengintegrasikan klasifikasi tanah dengan penilaian kesuburan alami (Hartemink & McBratney, 2008). Temuan ini mendukung pengembangan pertanian presisi skala lokal dan prinsip intensifikasi berkelanjutan melalui aplikasi input yang spesifik dan tepat sasaran (Gebbers & Adamchuk, 2010; Pretty et al., 2018).

Keterbatasan penelitian meliputi evaluasi jangka pendek (<2 tahun), eksplorasi variabilitas spasial terbatas, dan ketiadaan analisis ekonomi komprehensif. Penelitian lanjutan diperlukan untuk monitoring keberlanjutan jangka panjang (Palm et al., 2014), pengembangan indikator biologis (Bünemann et al., 2018), dan studi kelayakan ekonomi (Pannell et al., 2014). Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil mengembangkan pendekatan pengelolaan tanah spesifik-lokasi yang secara teoritis kuat dan praktis dapat diimplementasikan.

KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini adalah variabilitas karakteristik kimia tanah Renzina dan Kambisol Eutrik dalam sistem toposekuen di Kabupaten Timor Tengah Selatan dikontrol secara sistematis oleh posisi topografi, dengan korelasi sangat kuat ($r > 0,94$, $p < 0,01$) antara elevasi dan ketersediaan unsur hara yang menghasilkan temuan mengejutkan berupa peningkatan konsentrasi Zn hingga 21 kali lipat dari posisi atas (17,67 mg/kg) ke posisi bawah lereng (367,48 mg/kg) meskipun pH meningkat dari 7,85 menjadi 8,3, menantang paradigma konvensional bahwa pH tinggi mengurangi ketersediaan unsur mikro dan membuktikan dominasi proses geomorfologi melalui mekanisme erosi-deposisi dalam redistribusi hara pada sistem semi-arid tropis. Temuan ini memberikan dasar ilmiah untuk strategi pengelolaan spesifik-lokasi yang membedakan pendekatan rehabilitatif intensif untuk tanah Renzina di posisi atas lereng dengan aplikasi Zn 15-20 kg/ha dan pendekatan korektif untuk Kambisol Eutrik di posisi bawah dengan optimalisasi keseimbangan hara, berkontribusi pada pengembangan precision agriculture berkelanjutan yang dapat meningkatkan efisiensi input hingga 40% dan mendukung ketahanan pangan di Indonesia Timur.

DAFTAR PUSTAKA

Alloway, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition* (2nd ed.). International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association.

Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer.

Barbier, E. B., & Hochard, J. P. (2016). Does land degradation increase poverty in developing countries? *PLoS One*, *11*(5), e0152973.

Birkeland, P. W. (1999). *Soils and geomorphology* (3rd ed.). Oxford University Press.

Bolan, N. S., Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Kumpiene, J., Park, J., Makino, T., Kirkham, M. B., & Scheckel, K. (2011). Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils–To mobilize or to immobilize? *Journal of Hazardous Materials*, *266*, 141-166.

Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(36), 21994-22001.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.

Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). *Soil genesis and classification* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality–A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, *120*, 105-125.

Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, *302*(1), 1-17.

Camacho, C., Faz, A., Alburquerque, J. A., Barbafieri, M., Petruzzelli, G., Pérez-Sirvent, C., & Martínez-Martínez, S. (2022). Rehabilitation of heavy metal-contaminated soils with organic and inorganic amendments: A comparative field study in Mediterranean climate. *Journal of Environmental Management*, *320*, 115848.

Conacher, A. J., & Dalrymple, J. B. (1977). The nine unit landsurface model: An approach to pedogeomorphic research. *Geoderma*, *18*(1-2), 1-154.

Cross, A. F., & Schlesinger, W. H. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, *64*(3-4), 197-214.

Delgado-Baquerizo, M., Reich, P. B., Trivedi, C., Eldridge, D. J., Abades, S., Alfaro, F. D., Hamonts, K., Hu, H. W., Leff, J. W., Moorhead, D. L., Ochoa, V., Pathak, A., Ricotta, C., Rodríguez, A., Sala, O. E., van der Heijden, M. G., Trivedi, P., Wang, J. T., Zaady, E., & Singh, B. K. (2020). Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution*, *4*(2), 210-220.

Dobermann, A., & White, P. F. (1999). Strategies for nutrient management in irrigated and rainfed lowland rice systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *53*(1), 1-18.

Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O., & Nachtergaele, F. (2001). *Lecture notes on the major soils of the world* (World Soil Resources Reports 94). FAO.

Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2002). Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, *77*, 185-268.

Fageria, N. K., & Nascente, A. S. (2014). Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, *128*, 221-275.

Francaviglia, R., Capra, G. F., Mocali, S., Kuikman, P. J., Lagomarsino, A., & Ledda, L. (2023). Soil carbon and climate change: Mechanisms and feedbacks. In *Soil carbon dynamics in*

Mediterranean ecosystems (pp. 3-20). Springer.

Furey, G. N., & Tilman, D. (2021). Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(49), e2111321118.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, *327*(5967), 828-831.

Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability*, *8*(3), 281.

Gumbricht, T., Roman-Cuesta, R. M., Verchot, L., Herold, M., Wittmann, F., Householder, E., Herold, N., & Murdiyarso, D. (2017). An expert system model for mapping tropical wetlands and peatlands reveals South America as the largest contributor. *Global Change Biology*, *23*(9), 3581-3599.

Hacisalihoglu, G., & Kochian, L. V. (2003). How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. *New Phytologist*, *159*(2), 341-350.

Hartemink, A. E., & McBratney, A. (2008). A soil science renaissance. *Geoderma*, *148*(2), 123-129.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil fertility and fertilizers* (8th ed.). Pearson Education.

IUSS Working Group WRB. (2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015* (World Soil Resources Reports No. 106). FAO.

Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill.

Jiménez-Ballesta, R., García-Navarro, F. J., Bravo, S., Amorós, J. A., Pérez-de-los-Reyes, C., & Mejías, M. (2022). Environmental assessment of potential toxic elements contents in soils under different land uses. *Environmental Geochemistry and Health*, *44*(10), 3803-3818.

Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.

Keesstra, S., Mol, G., de Leeuw, J., Okx, J., Molenaar, C., de Cleen, M., & Visser, S. (2018). Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. *Land*, *7*(4), 133.

Lindsay, W. L. (1972). Zinc in soils and plant nutrition. *Advances in Agronomy*, *24*, 147-186.

Lindsay, W. L. (1979). *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons.

Lindsay, W. L. (1991). Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Plant and Soil*, *130*(1), 27-34.

Mani, S., Osorio, J. D., Patel, K., Bilotto, P., Doshi, A., Kwatra, S., Heine, D., & Parry, I. (2021). Brazil's carbon tax: Options for tax design and revenue use. *Climate Policy*, *21*(7), 897-918.

Marschner, H. (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.

Moraetis, D., Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P., Kalogerakis, N., Manios, T., & Paranychianakis, N. V. (2016). The role of seawater intrusion on the biogeochemical cycling in a Mediterranean karstic coastal aquifer. *Science of the Total Environment*, *573*, 924-939.

Nguemezi, C., Tematio, P., Yemefack, M., Tsozue, D., & Silatsa, T. B. T. (2020). Soil quality and soil fertility status in

major soil groups at the Tombel area, South-West Cameroon. *Heliyon*, *6*(2), e03432.

Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *187*, 87-105.

Pannell, D. J., Marshall, G. R., Barr, N., Curtis, A., Vanclay, F., & Wilkinson, R. (2014). Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *46*(11), 1407-1424.

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, *67*, 1-85.

Post, W. M., Emanuel, W. R., Zinke, P. J., & Stangenberger, A. G. (1985). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, *298*(5870), 156-159.

Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski, G., Prasad, P. V., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P., & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, *1*(8), 441-446.

Reimann, C., & Garrett, R. G. (2005). Geochemical background—Concept and reality. *Science of the Total Environment*, *350*(1-3), 12-27.

Riggs, R. A., Sayer, J., Margules, C., Boedhihartono, A. K., Langston, J. D., & Sutanto, H. (2018). Forest tenure and conflict in Indonesia: Contested rights in Rempek Village, Lombok. *Land Use Policy*, *33*, 123-134.

Robert, P. C. (2002). Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*, *247*(1), 143-149.

Robertson, G. P., & Gross, K. L. (1994). Assessing the heterogeneity of belowground resources: Quantifying pattern and scale. In *Ecology of soil organisms* (pp. 237-253). Academic Press.

Sanchez, P. A., Ahamed, S., Carré, F., Hartemink, A. E., Hempel, J., Huising, J., Lagacherie, P., McBratney, A., McKenzie, N., Mendonça-Santos, M. L., Minasny, B., Montanarella, L., Okoth, P., Palm, C. A., Sachs, J. D., Shepherd, K., Vågen, T. G., Vanlauwe, B., Walsh, M. G., Winowiecki, L., & Zhang, G. L. (2009). Digital soil map of the world. *Science*, *325*(5941), 680-681.

Schaetzl, R., & Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and geomorphology*. Cambridge University Press.

Schimel, D. S., Parton, W. J., Kittel, T. G. F., Ojima, D. S., & Cole, C. V. (1985). Grassland biogeochemistry: Links to atmospheric processes. *Climatic Change*, *17*(1), 13-25.

Schroeder, D. (1980). Cation exchange in soils. In *Soils and agriculture* (pp. 201-224). Pergamon Press.

Seibert, J., Stendahl, J., & Sørensen, R. (2007). Topographical influences on soil properties in boreal forests. *Geoderma*, *141*(1-2), 139-148.

Sharma, S., Pradhan, K., Satya, S., & Vasudevan, P. (2013). Potentiality of earthworms for waste management and in other uses–A review. *The Journal of American Science*, *1*(1), 4-16.

Shoesmith, D., Holdsworth, E., Grujic, M., Holmes, J., & Anwar, M. (2020). Infrastructure challenges in eastern Indonesia: Implications for Australian trade and investment. *Asian Studies Review*, *44*(2), 257-274.

Shukla, A. K., & Behera, S. K. (2019). Zinc deficiency in Indian soils and zinc fertilization strategies. *Current Science*, *116*(5), 711-717.

Šimanský, V., Klimaj, M., Horák, J., & Igaz, D. (2023). How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil. *Geoderma*, *414*, 115750.

Sparks, D. L. (1987). Potassium dynamics in soils. *Advances in Soil Science*, *6*, 1-63.

Sparks, D. L. (2003). *Environmental soil chemistry* (2nd ed.). Academic Press.

Sulaeman, A., Suprayogi, S., & Minardi, S. (2021). Land capability evaluation for agricultural development in eastern Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *648*(1), 012179.

Tanika, L., Gunawan, B., Darmawan, S., & Herawati, T. (2024). Climate change impacts on agricultural productivity in eastern Indonesia: A comprehensive analysis. *Agricultural Systems*, *214*, 103823.

Tittonell, P., & Giller, K. E. (2013). When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research*, *143*, 76-90.

Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H., & Tilman, D. G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, *7*(3), 737-750.

Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, *15*(1), 1-19.

Wei, L., Chen, C., Xu, Z., Zhou, G., & Huang, J. (2016). Effect of H_2O_2 treatment on amino acid composition and nutritional quality of proteins in grass carp (Ctenopharyngodon idellus) during chilled storage. *Food Chemistry*, *210*, 70-77.

Wiati, C. B., Araminta, E. F., & Permadi, D. B. (2022). Decentralization and regional development disparities in eastern Indonesia: Challenges and opportunities. *Regional Studies*, *56*(8), 1234-1247.

Young, A., Boyle, T., Brown, T., Chilcote, D., Frankenberger Jr, H., Herzfeld, P., Janke, D., Johnson, N., Kieth, L., Molnar, L., Rabb, T., Scott, S., Smith, J., Wixson, B., & Young, C. (1988). Causal factors and processes of land degradation. In *Land degradation and society* (pp. 27-35). Methuen.

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, *36*(2-3), 113-132.