KUALITAS, KESEHATAN, DAN ERODIBILITAS TANAH UNTUK PRIORITAS KONSERVASI PADA KEBUN SAWIT RAKYAT DI SINTANG

SOIL QUALITY, SOIL HEALTH, AND ERODIBILITY FOR CONSERVATION PRIORITIES IN SMALLHOLDER OIL PALM IN SINTANG

Muhammad Nuriman[1*], Bambang Widiarso[1], Feira Budiarsyah Arief[1], Suprianus Nawang[2], Rizki Eko Wahyudi[2]

[1] Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak, Kalimantan Barat
[2]Mahasiswa Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak, Kalimantan Barat

Email: muhammad.nuriman@faperta.untan.ac.id

Diterima: 28-08-2026 Disetujui: 23-09-2026 Diterbitkan: 25-10-2026

ABSTRAK

Tanah kebun sawit rakyat di Kalimantan Barat bersifat masam dan mudah menurun fungsinya, tetapi penilaiannya jarang dikaitkan dengan prioritas konservasi. Penelitian ini mengevaluasi kualitas tanah, kesehatan tanah, dan estimasi erodibilitas pada dua blok kebun sawit rakyat di Sintang yang dipupuk organik dan NPK untuk menentukan faktor pembatas dan arah pengelolaan konservasi. Sampel Inceptisol (0-20 cm) diambil pada tiga titik per blok dan dianalisis untuk 12 parameter fisik, kimia, dan biologi. Indeks kualitas tanah (IKT) dihitung dengan formula Bajracharya, indeks kesehatan tanah (IKS) dengan kerangka skor berbasis pustaka 11 indikator, dan erodibilitas (K) dengan nomograf Wischmeier pada beberapa skenario. IKT berkelas sedang pada kedua blok (0,49 dan 0,50), demikian pula IKS (49,2 dan 49,4). Kesamaan IKS terbentuk dari indikator yang berlawanan arah. Cacing tanah, N-total, dan C-organik lebih baik pada blok organik, sedangkan P tersedia, skor pH, dan retensi air lebih baik pada blok anorganik. Faktor pembatas di kedua blok ialah pH rendah, K-dd dan KTK rendah, serta biomassa mikroba rendah. Estimasi K berkisar sedang sampai tinggi (0,31 sampai 0,47). Hasil ini mengarahkan konservasi pada pemeliharaan bahan organik, pemupukan K berimbang, dan perlindungan permukaan tanah, dan bersifat diagnostik karena setiap sistem diwakili satu kebun.

Kata kunci: erodibilitas, konservasi, sawit, tanah

ABSTRACT

Smallholder oil palm soils in West Kalimantan are acidic and easily degraded. This study evaluated soil quality, soil health, and estimated erodibility in two smallholder plantation blocks in Sintang under organic and NPK fertilization to identify limiting factors and conservation directions. Inceptisol topsoil (0-20 cm) was sampled at three points per block and analyzed for 12 parameters. Soil quality (SQI) was calculated with the Bajracharya formula, soil health (SHI) with an 11-indicator score, and erodibility (K) with the Wischmeier nomograph. SQI was medium in both blocks (0.49 and 0.50), as was SHI (49.2 and 49.4). The similar SHI arose from indicators acting in opposite directions. Earthworms, total N, and organic C were more favorable in the organic block, whereas available P, pH score, and water retention were more favorable in the inorganic block. The limiting factors in both blocks were low pH, low exchangeable K and CEC, and low microbial biomass. Estimated K ranged from moderate to high (0.31 to 0.47). Conservation should focus on maintaining organic matter, balanced K fertilization, and soil surface protection. The results are diagnostic because each system was represented by a single plantation.

Keywords: conservation, erodibility, plantation, soil

PENDAHULUAN

Petani rakyat mengelola sekitar 40% luas perkebunan kelapa sawit Indonesia, tetapi hasil tandan buah segarnya baru sekitar 42% dari hasil yang dapat dicapai (de Vos *et al*. 2026). Kesenjangan itu terutama bersumber dari praktik agronomi, antara lain pemupukan yang hanya mencakup sekitar separuh lahan dan komposisi hara yang tidak seimbang (Monzon *et al*. 2023; Lim *et al*. 2023). Di Sintang dan Jambi, fosfor diberikan 2 sampai 4 kali takaran anjuran, kalium hanya 50 sampai 60% dari anjuran, dan defisiensi kalium terdeteksi di 82% kebun (Woittiez *et al*. 2019).

Pengelolaan tersebut berlangsung di atas tanah yang fungsinya mudah menurun. Survei pada kebunTanah sawit rakyat di Jambi memiliki C dan N yang lebih rendah serta pemadatan yang lebih tinggi daripada tanah karet (Guillaume *et al.,* 2016), dan tanah sawit di Semenanjung Malaysia memiliki pH sekitar 4,3 sampai 5,0 dengan C-organik lapisan atas 1,6 sampai 2% (Golicz *et al*. 2024). Pemupukan anorganik jangka panjang dikaitkan dengan N total dan C-organik yang sangat rendah, walaupun pengaruhnya sulit dipisahkan dari konversi hutan (Salamat *et al.,* 2021). Sebaliknya, tandan kosong kelapa sawit dalam takaran sedang dan teratur meningkatkan C-organik dan fauna tanah (Tao *et al.,* 2018; Noirot *et al.,* 2022; Ardiyanto *et al.,* 2026), dan kebun yang dipupuk organik ditambah NPK memiliki pH, N total, dan P tersedia lebih tinggi daripada kebun yang hanya dipupuk NPK secara tidak teratur (Apori *et al.,* 2020).

Indeks kualitas tanah (IKT) dan indeks kesehatan tanah (IKS) merangkum fungsi tanah dari beberapa indikator sehingga dapat menunjukkan faktor yang paling membatasi, tetapi hasilnya bergantung pada pilihan indikator, ambang, dan pembobotan yang bersifat subjektif (Bünemann *et al.,* 2018). Fungsi skor *Cornell Assessment of Soil Health* disusun dari basis data Amerika Serikat bagian timur laut (Moebius-Cl*une et al.,* 2016), dan kerangka untuk wilayah beriklim sedang dinilai kurang cocok bagi sistem tanaman tahunan tropis (Ho *et al.,* 2026). Di perkebunan sawit, IKT telah dipakai untuk membandingkan pembenah organik di Thailand (Boafo *et al.,* 2020). Karena itu, nilai acuan IKS pada penelitian ini disusun dari pustaka sawit dan tanah mineral regional (Nuriman *et al.,* 2026).

Penurunan fungsi tanah berkaitan dengan kerentanan terhadap erosi. Erosi dan limpasan pada sawit berumur lima tahun di Kalimantan Tengah lebih tinggi daripada di hutan (Jaya *et al.,* 2018), dan mulsa tandan kosong memperbaiki agregasi serta retensi air pada sawit di lahan berlereng (Moradi *et al.,* 2015). Kepekaan intrinsik tanah terhadap erosi dinyatakan sebagai erodibilitas (faktor K dalam USLE) yang dapat diperkirakan dari nomograf Wischmeier (Wischmeier *et al.,* 1971), walaupun persamaannya hanya berlaku untuk bahan organik sampai sekitar 4% dan fraksi debu ditambah pasir sangat halus tidak lebih dari 70% (Corral-Pazos-de-Provens *et al.,* 2023). K tanah sawit di Ogan Komering Ilir dilaporkan sebesar 0,18 (Priatna dan Sepriansyah, 2024).

Terdapat tiga kesenjangan. Pertama, penilaian tanah pada sawit rakyat umumnya berhenti pada status kesuburan atau indikator tunggal, sehingga belum jelas indikator yang paling membatasi fungsi tanah. Kedua, kerangka kesehatan tanah yang tersedia berasal dari wilayah beriklim sedang dan kurang diuji pada tanah mineral masam di bawah sawit tropis (Moebius-Clune *et al.,* 2016; Ho *et al.,* 2026), dan indeks yang berbeda jarang dibandingkan pada kebun yang sama. Ketiga, hasil diagnosis jarang diterjemahkan menjadi prioritas konservasi, misalnya melalui kepekaan tanah terhadap erosi. Penelusuran pustaka tidak menemukan studi pada sawit rakyat Kalimantan Barat yang memasangkan IKT, IKS, dan estimasi erodibilitas pada tanah mineral.

Penelitian ini bertujuan (1) mengevaluasi kualitas dan kesehatan tanah serta estimasi erodibilitas pada kebun sawit rakyat di Sintang, (2) mengidentifikasi indikator pembatas fungsi tanah melalui dekomposisi skor IKS, dan (3) merumuskan implikasinya bagi prioritas konservasi tanah. Dua blok dengan sistem pemupukan berbeda dipakai sebagai konteks pembanding dan bukan sebagai percobaan perlakuan. Kebaruan penelitian ini ialah IKS dengan nilai acuan dari pustaka sawit dan tanah

mineral regional, pembandingan IKT dan IKS pada sampel yang sama, serta matriks yang menerjemahkan diagnosis menjadi prioritas konservasi dengan estimasi erodibilitas yang diuji sensitivitasnya (Tabel 5).

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada kebun sawit rakyat anggota Koperasi Produksi Rimba Harapan, Desa Merarai Satu, Kecamatan Sungai Tebelian, Kabupaten Sintang, Kalimantan Barat. Tanah di lokasi berupa Inceptisol, tanaman sawit berumur 6 sampai 13 tahun, topografi datar sampai bergelombang ringan (kemiringan di bawah 8%), dan curah hujan 3.105 mm pada Agustus 2025 sampai Juli 2026 (Stasiun Meteorologi Tebelian, BMKG, 2026). Curah hujan bulanan berkisar 15,2 sampai 462,9 mm, dan pengambilan sampel pada Mei 2026 bertepatan dengan bulan terbasah (462,9 mm). Dua blok kebun dengan sistem pemupukan berbeda diamati. Blok anorganik dipupuk NPK majemuk 13:6:27 sebesar 2,2 t ha^{-1} $tahun^{-1}$ (14 kg per pohon per tahun dalam tiga kali aplikasi), setara sekitar 1,8 kg N, 0,8 kg P_2O_5, dan 3,8 kg K_2O per pohon per tahun, tanpa input bahan organik selama lima tahun terakhir. Blok organik dikelola dengan pemupukan terpadu selama satu tahun terakhir, yaitu kompos padat berbahan tandan kosong kelapa sawit dan kotoran ayam sekitar 15 sampai 20 kg per pohon per tahun sesuai praktik petani, ditambah pupuk anorganik berdosis lebih rendah daripada praktik konvensional (urea, NPK, KCl, SP-36/TSP, dan dolomit, masing-masing sekitar 0,5 kg per pohon per tahun). Pengamatan lapangan dilakukan pada April 2026 dan analisis sampel di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Pontianak.

Setiap blok diwakili tiga titik sampel individual di piringan tanaman (radius pemupukan aktif, 2,5 sampai 3 m dari batang), sehingga terdapat enam sampel. Piringan dipilih karena merupakan zona paling aktif bagi akar, akumulasi bahan organik, dan penerimaan pupuk. Tanah diambil pada kedalaman 0-20 cm setelah pengeboran untuk memastikan jenis tanah dan kesamaan kondisi lahan antar blok. Metode analisis indikator IKS disajikan pada Tabel 1, dengan retensi air ditetapkan secara gravimetri (Kurnia *et al.*, 2022).

IKT dihitung dengan formula Bajracharya et al. (2006) sebagaimana diterapkan Nuriman et al. (2025), yaitu IKT = (0,2 × R_STC) + (0,1 × R_pH) + (0,4 × R_OC) + (0,3 × R_NPK), dengan R_STC skor kelas tekstur tanah (*soil texture class*), R_pH skor pH, R_OC skor C-organik, dan R_NPK skor hara N, P, dan K. Skor setiap komponen (R) mengikuti Ghimire et al. (2018) yang dimodifikasi, dengan skor hara disesuaikan pada kriteria Sulaeman et al. (2005), dari 0,2 untuk kelas terendah sampai 1,0 untuk kelas tertinggi. Kelas tekstur ditetapkan melalui pengamatan lapang dan seluruh sampel berkelas liat berdebu sehingga R_STC sama pada semua sampel. IKT dikelaskan menjadi sangat rendah (0,00-0,19), rendah (0,20-0,39), sedang (0,40-0,59), baik (0,60-0,79), dan sangat baik (0,80-1,00) dengan pendekatan skoring linear (Partoyo, 2005). IKS dihitung dari 11 indikator fisik, kimia, dan biologi dengan kerangka skor berbasis pustaka (Nuriman *et al.*, 2026) yang mengadaptasi pendekatan Cornell (Moebius-Clune *et al*. 2016). Nilai acuan (μ dan σ) tiap indikator diturunkan dari pustaka tanah mineral di bawah sawit di Kalimantan Barat dan sekitarnya, kecuali biomassa mikroba yang berasal dari perkebunan sawit perusahaan di Malaysia (Tabel 1; *Nuriman et al.*, 2026). Nilai x diubah menjadi $z = (x - \mu)/\sigma$, lalu skor 0 sampai 100 untuk pola semakin besar semakin baik dihitung sebagai $100 \times \Phi(z)$, dengan Φ fungsi distribusi normal kumulatif baku, dan jumlah bakteri di-$\log_{10}$ sebelum diskor. Skor pH memakai pola optimum, yaitu $100 \times \exp(-z^2/2)$. Optimum pH ditetapkan 4,5 dengan SD 0,5 agar kisaran pH 4 sampai 5 yang dinilai sesuai bagi sawit komersial (Nelson *et al.*, 2011) berada dalam satu SD dari optimum, bukan diturunkan dari pH yang diukur (Nuriman *et al.*, 2026). Karena pola ini kurang sesuai untuk pH di atas sekitar 5,5, skor pH dibaca sebagai jarak dari optimum acuan dan bukan ukuran kemasaman. Sebagai uji sensitivitas, optimum pH digeser menjadi 5,0 (SD 0,5) dan IKS juga dihitung dengan acuan pH

sebelumnya (4,9 ± 0,4). Kadar air tanah tidak dipakai karena bergantung pada cuaca saat pengambilan sampel. IKS adalah rerata sebelas skor dan dikelaskan sangat rendah (0-20), rendah (21-40), sedang (41-60), baik (61-80), dan sangat baik (81-100).

Erodibilitas diestimasi dengan nomograf Wischmeier berfaktor konversi 1,292: 100K = 1,292 × [2,1 × 10^{-4} × M^1,14 × (12 − a) + 3,25 × (b − 2) + 2,5 × (c − 3)], dengan K dalam ton ha jam (ha MJ mm)$^{-1}$ (Wischmeier *et al.*, 1971; Corral-Pazos-de-Provens *et al.*, 2023). Faktor 1,292 (= 0,1317 × 9,81) lazim dipakai di Indonesia sehingga nilai K sekitar 9,81 kali nilai dengan faktor SI murni dan sebanding dengan kelas Arsyad (2010). Di sini M = (% debu + % pasir sangat halus) × (100 − % liat), a adalah bahan organik (BO = C-organik × 1,724), b kode struktur (1 sampai 4), dan c kode permeabilitas (1 sampai 6). Karena fraksi tekstur, struktur, dan permeabilitas tidak diukur per sampel, skenario dasar memakai M = 3.709,4, b = 4 (gumpal bersudut), dan c = 6 (sangat lambat) yang diacu dari satu sampel lempung liat berdebu (liat 39,1%, debu 54,75%) pada basis data erodibilitas yang tersedia, sehingga K antar sampel hanya berbeda oleh BO. Sampel acuan itu sedikit di bawah batas kelas liat berdebu (liat ≥ 40%) yang dipakai untuk tanah penelitian, dan kode b = 4 dan c = 6 adalah nilai paling berat pada nomograf, sehingga skenario dasar diperlakukan sebagai batas atas. Sensitivitas diuji pada skenario liat 45% dengan debu 50% (M = 2.750), liat 50% dengan debu 45% (M = 2.250), serta struktur dan permeabilitas yang lebih ringan (b = 3 dan c = 4) dengan M dasar. Kelas K mengikuti Arsyad (2010), yaitu sangat rendah (0,00-0,10), rendah (0,11-0,20), sedang (0,21-0,32), agak tinggi (0,33-0,43), tinggi (0,44-0,55), dan sangat tinggi (0,56-0,64).

Kelas sifat tanah ditetapkan menurut kriteria Sulaeman *et al.*, (2005). Setiap parameter disajikan sebagai rerata ± simpangan baku per blok bersama selisih rerata (organik dikurangi anorganik). Besaran perbedaan dinyatakan dengan Hedges' g, yaitu Cohen's d dengan koreksi bias sampel kecil, bersama selang kepercayaan 95% dari distribusi t non-sentral (Lakens, 2013). Uji signifikansi tidak dijadikan dasar kesimpulan karena setiap sistem diwakili satu kebun dan ketiga sampel merupakan subsampel dalam blok, sehingga perbedaan antar blok tidak dapat dipisahkan dari perbedaan lokasi. Analisis ini diperlakukan sebagai diagnosis eksploratif pada kebun yang diteliti, dan perbedaan dinyatakan sebagai asosiasi pada blok yang diamati (Davies dan Gray, 2015). Selang kepercayaan menggambarkan variasi antar titik sampel di dalam satu kebun, bukan galat percobaan perlakuan, dan tidak dibaca sebagai bukti efek sistem pemupukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi dan faktor pembatas tanah

Tanah pada kedua blok bereaksi masam dan miskin kation basa. Nilai pH berkisar 4,48 sampai 5,09, K-dd 0,08 sampai 0,10 cmol(+) kg^{-1}, dan KTK 7,83 sampai 8,47 cmol(+) kg^{-1} (Tabel 2). Menurut kriteria Sulaeman et al. (2005), K-dd tergolong sangat rendah pada seluruh sampel blok anorganik dan dua dari tiga sampel blok organik (0,05 dan 0,07), sedangkan satu sampel blok organik tergolong rendah (0,18). KTK tergolong rendah pada seluruh sampel. Perbedaan K-dd (g = 0,27) dan KTK (g = 0,51) antar blok kecil dengan selang kepercayaan yang mencakup nol, sehingga keduanya ditafsirkan sebagai keterbatasan bersama tanah yang diamati. K-dd tetap rendah pada blok anorganik walaupun menerima sekitar 3,8 kg K_2O per pohon per tahun, sejalan dengan defisiensi kalium yang meluas pada sawit rakyat (Woittiez *et al.*, 2019). Kondisi ini diduga berkaitan dengan KTK yang rendah dan curah hujan yang tinggi (3.105 mm selama periode pengamatan), karena kemampuan tanah menjerap kation terbatas sehingga K mudah hilang melalui pencucian. Dugaan ini belum diuji karena kehilangan K tidak diukur. Pada tanah masam, KTK sebagian besar bersumber dari muatan bahan organik dan muatan variabel yang bergantung pada pH, tetapi blok organik yang ber-C-organik dan ber-pH lebih tinggi hanya memiliki KTK sedikit lebih tinggi (8,47 dibanding 7,83 cmol(+) kg^{-1}).

Tabel 1. Indikator IKS, metode analisis, nilai acuan, dan pola skor

Indikator	Satuan	Metode analisis	Nilai acuan (μ ± σ)	Pola skor
pH tanah	–	pH meter, H_2O 1:2,5	4,5 ± 0,5	Optimum (Gauss)
C-organik	%	Walkley-Black	1,5 ± 0,35	Semakin besar semakin baik
N-total	%	Kjeldahl	0,2 ± 0,05	Semakin besar semakin baik
P tersedia	mg kg^{-1}	Bray I	15 ± 5	Semakin besar semakin baik
K dapat ditukar	cmol(+) kg^{-1}	NH_4OAc 1 N pH 7	0,2 ± 0,09	Semakin besar semakin baik
KTK	cmol(+) kg^{-1}	NH_4OAc 1 N pH 7	10 ± 3	Semakin besar semakin baik
Retensi air (pF 2,54)	% vol	Gravimetri (Kurnia *et al.*, 2022)	8 ± 2,5	Semakin besar semakin baik
Populasi bakteri	log_{10} cfu g^{-1}	Pengenceran serial	6 ± 1	Semakin besar semakin baik (data di-log_{10})
Populasi cacing tanah	ekor m^{-2}	Kuadran 25 × 25 cm	55 ± 30	Semakin besar semakin baik
C biomassa mikroba	μg C g^{-1}	Fumigasi-ekstraksi (Vance *et al.*, 1987)	250 ± 70	Semakin besar semakin baik
N biomassa mikroba	μg N g^{-1}	Fumigasi-ekstraksi (Vance *et al.*, 1987)	8 ± 3	Semakin besar semakin baik

Keterangan: μ = rerata dan σ = simpangan baku populasi acuan menurut Nuriman et al. (2026); kadar air tanah diukur tetapi tidak dipakai dalam IKS.

Perbedaan antar blok paling besar terdapat pada pH, C-organik, P tersedia, dan retensi air. Blok organik memiliki pH 5,09 ± 0,22 dan C-organik 2,66 ± 0,09%, lebih tinggi daripada blok anorganik (pH 4,48 ± 0,01 dan C-organik 1,89 ± 0,17%), dengan ukuran efek besar (Hedges' g 3,10 dan 4,70; Gambar 1).

Kemasaman tanah (pH). Menurut kriteria Sulaeman et al. (2005), tanah blok organik tergolong masam (pH 5,09), sedangkan tanah blok anorganik sangat masam (pH 4,48). Selisih 0,61 satuan itu sejalan dengan hasil di Ghana. Kebun sawit yang dipupuk organik dan NPK memiliki pH 5,45, sedangkan kebun yang hanya dipupuk NPK secara sporadis memiliki pH 5,03 (Apori *et al.*, 2020). Pada percobaan jangka panjang di Sumatra, pemberian tandan kosong juga menaikkan pH (Tao *et al.*, 2018). Pupuk bernitrogen, sebaliknya, dapat menurunkan pH melalui nitrifikasi dan pencucian nitrat (Nelson *et al.*, 2011). Blok organik juga menerima dolomit (sekitar 0,5 kg per pohon per tahun). Karena dolomit, kompos, dan pupuk nitrogen bekerja bersamaan, pengaruh masing-masing tidak dapat dipisahkan dalam rancangan ini.

Karbon organik. Menurut Sulaeman et al. (2005), C-organik blok organik tergolong sedang (2,66%) dan blok anorganik rendah (1,89%). Nilai blok anorganik sepadan dengan tanah sawit di Semenanjung Malaysia (pH sekitar 4,3 sampai 5,0 dan C-organik lapisan atas 1,6 sampai 2%) (Golicz *et al.*, 2024) dan dengan sebagian besar tanah sawit di Jambi yang C-organiknya di bawah 2,2% (Guillaume *et al.*, 2016), sedangkan blok organik melampaui kisaran Semenanjung Malaysia tersebut. Selisih C-organik tidak dapat dikaitkan seluruhnya dengan kompos, karena pemberiannya baru sekitar satu tahun dan akumulasi karbon organik berlangsung bertahap, sehingga sebagian selisih kemungkinan berasal dari perbedaan kondisi awal antar kebun yang sulit dipisahkan dari pengaruh pemupukan (Salamat *et al.*, 2021).

Fosfor tersedia. P tersedia berlawanan arah, yaitu 10,22 ± 4,64 mg kg^{-1} pada blok

organik dan 30,67 ± 1,78 mg kg^{-1} pada blok anorganik (g = −4,65), searah dengan masukan fosfor mineral dari NPK. Menurut kriteria Sulaeman et al. (2005) untuk P Bray I, seluruh sampel blok anorganik (28,74 sampai 32,25 mg kg^{-1}) tergolong sangat tinggi, sedangkan blok organik beragam, yaitu rendah (5,93), sedang (9,59), dan sangat tinggi (15,15 mg kg^{-1}). Sampel organik dengan P tertinggi juga memiliki pH (5,34) dan K-dd (0,18 cmol(+) kg^{-1}) tertinggi, yang menunjukkan variasi spasial di dalam blok. Takaran fosfor blok anorganik (sekitar 0,8 kg P_2O_5 per pohon per tahun) tidak besar dan riwayat pemupukan sebelumnya tidak tercatat, sehingga akumulasi jangka panjang belum dapat dipastikan sebagai penyebabnya. Karena pupuk fosfor juga diberikan pada blok organik, penjelasannya memerlukan data P total dan riwayat pemupukan.

Nitrogen total. N-total blok organik (0,27% dengan kisaran 0,21 sampai 0,35%) tergolong sedang dan blok anorganik (0,18% dengan kisaran 0,16 sampai 0,20%) rendah menurut Sulaeman et al. (2005). Nilai yang lebih tinggi pada blok organik searah dengan C-organik yang lebih tinggi karena sebagian besar N tanah berada dalam bentuk organik, tetapi selang kepercayaan efeknya mencakup nol sehingga selisih ini tidak dapat dipastikan.

Retensi air. Retensi air pada pF 2,54 lebih tinggi pada blok anorganik (19,59 ± 2,77% vol) daripada blok organik (11,37 ± 2,01% vol) (g = −2,72; selang −4,90 sampai −0,46), berlawanan dengan harapan bahwa bahan organik meningkatkan retensi air. Meta-analisis melaporkan bahwa pengaruh bahan organik terhadap kapasitas air tersedia umumnya kecil, yaitu sekitar 1,16 mm per 100 mm tanah untuk setiap kenaikan 1% C-organik dan paling kecil pada tanah bertekstur liat (Minasny dan McBratney, 2018). Selisih C-organik 0,78 poin persentase karena itu tidak cukup menjelaskan selisih retensi 8,22% vol. Perbedaan tekstur, struktur, atau porositas lebih mungkin berperan, tetapi fraksi tekstur tidak diukur per sampel. Kadar air lapang saat pengambilan sampel juga lebih tinggi pada blok anorganik (53,2 sampai 60,1% dibanding 49,0 sampai 52,1%), sehingga pola ini ditafsirkan hati-hati.

Kualitas dan kesehatan tanah

IKT kedua blok berkelas sedang (0,49 ± 0,05 dan 0,50 ± 0,00) dengan selisih kecil (g = −0,33; selang −1,61 sampai 0,99). Dengan bobot 0,4 untuk C-organik dan 0,3 untuk NPK, skor P tersedia yang tinggi pada blok anorganik kemungkinan mengimbangi pH dan C-organik yang lebih rendah, sehingga indeks ini tidak mempertahankan perbedaan yang tampak pada parameter penyusunnya. Nilai indeks bergantung pada pilihan indikator, ambang, dan bobot (Bünemann *et al.*, 2018). Dengan tiga sampel per blok, kemiripan nilai IKT tidak dapat ditafsirkan sebagai bukti bahwa kedua blok setara.

IKS berkelas sedang pada kedua blok, yaitu 49,20 ± 7,23 pada blok organik dan 49,44 ± 2,52 pada blok anorganik. Selisih −0,24 poin dengan ukuran efek kecil dan selang kepercayaan lebar (g = −0,04; selang −1,31 sampai 1,25) tidak mendukung adanya perbedaan IKS antar blok. Hasil ini bergantung pada nilai acuan, terutama pH. Dengan optimum pH 5,0 ± 0,5 selisih menjadi +7,26 poin ke arah blok organik (52,94 dan 45,68), dan dengan acuan pH sebelumnya 4,9 ± 0,4 menjadi +6,50 poin (52,14 dan 45,64), sehingga arah selisih ditentukan oleh letak optimum pH terhadap pH kedua blok (4,48 dan 5,09). Dengan acuan Cornell modifikasi yang lebih ketat (μ dan σ sempit pada K-dd, N, dan biomassa mikroba), IKS kedua blok turun menjadi 36,8 dan 29,2 (rendah), dengan blok organik lebih tinggi 7,6 poin. Kelas dan arah selisih karena itu ditafsirkan sebagai posisi relatif terhadap acuan, bukan status absolut (Moebius-Clune *et al.*, 2016; Ho *et al.*, 2026).

Indikator utama pembentuk kesehatan tanah

Dekomposisi skor memperlihatkan bahwa selisih IKS yang hampir nol berasal dari indikator yang berlawanan arah (Tabel 3). Populasi cacing tanah (+4,26 poin), N-total (+4,18 poin), C-organik (+1,38 poin), bakteri (+1,03 poin), K-dd (+0,73 poin), dan KTK (+0,69 poin) berkontribusi ke arah blok organik, sedangkan P tersedia (−7,00 poin),

Vol. 05, No. 02
e-ISSN. 2830-7097

pH (−4,38 poin), dan retensi air (−1,20 poin) berkontribusi ke arah blok anorganik. P tersedia merupakan penyumbang tunggal terbesar, diikuti pH. Retensi air berkontribusi kecil karena nilai kedua blok melampaui acuan (8 ± 2,5% vol), sehingga skor blok anorganik jenuh pada 100.

Skor pH. Skor pH blok anorganik mendekati 100 karena pH 4,48 berada di sekitar optimum acuan (4,5), sedangkan pH blok organik (5,09) telah melampaui optimum sehingga berskor 51,8 ± 23,8, dengan satu sampel (pH 5,34) berskor 24,4. Skor ini mencerminkan jarak dari optimum dan tidak berarti tanah blok anorganik lebih baik dari sisi kemasaman, karena pH 4,48 tergolong sangat masam.

Populasi cacing tanah. Cacing tidak ditemukan pada seluruh sampel blok anorganik, sedangkan pada blok organik populasinya sangat beragam (16, 48, dan 208 ekor m^{-2}), sehingga skor rerata 50,2 ± 45,9 sangat bergantung pada satu sampel. Ketiadaan cacing pada blok anorganik konsisten dengan tanah yang paling masam dan paling miskin bahan organik. Ardiyanto *et al.,* (2026) melaporkan korelasi positif antara C-organik dan kelimpahan cacing (r = 0,60) pada sawit di tanah Spodosol. Respons cacing terhadap tandan kosong tidak seragam, karena Tao et al. (2018) melaporkan penurunan biomassa cacing invasif dominan (*Pontoscolex corethrurus*) walaupun fauna tanah lain meningkat. Penyebab ketiadaan cacing tidak dapat dipisahkan dari faktor lain dalam rancangan ini.

Bakteri dan biomassa mikroba. Populasi bakteri blok organik relatif seragam (3,6 sampai 6,7 × 10^8 CFU g^{-1}), sedangkan pada blok anorganik dua sampel hanya 8,5 sampai 8,8 × 10^6 CFU g^{-1} dan satu sampel 7,3 × 10^8 CFU g^{-1}. Karena seluruh nilai melampaui acuan (10^6 CFU g^{-1}), skor bakteri jenuh dan hampir tidak membedakan blok (99,6 dibanding 88,3). C biomassa mikroba sangat rendah pada kedua blok (21,4 ± 13,0 dan 8,3 ± 1,0 µg g^{-1}) dibanding acuan 250 µg g^{-1}, demikian pula N biomassa mikroba (1,49 dan 1,03 µg g^{-1} dibanding acuan 8 µg g^{-1}), sehingga skornya mendekati nol dan kontribusinya masing-masing tidak lebih dari 0,1 poin. Acuan biomassa mikroba berasal dari perkebunan sawit perusahaan di Malaysia, sehingga nilai ini ditafsirkan hati-hati. Jumlah koloni bakteri dan biomassa mikroba menangkap aspek yang berbeda dari komunitas mikroba.

Kedua indeks menempatkan kedua blok pada kelas sedang dengan nilai hampir sama, tetapi melalui mekanisme berbeda. IKT berbobot pada C-organik dan hara NPK sehingga satu indikator hara yang tinggi (P tersedia) dapat mengimbangi indikator lain, sedangkan IKS memasukkan indikator biologi dan merata-ratakan skor tiap indikator sehingga ketiadaan cacing dan rendahnya biomassa mikroba ikut terlihat. Pada IKS, kesamaan nilai muncul karena indikator berlawanan arah saling mengimbangi, dan hanya dekomposisi per indikator yang menunjukkan bahwa dua kebun berindeks sama memiliki profil kekuatan dan kelemahan berbeda. Blok organik unggul pada cacing tanah, N-total, dan C-organik, sedangkan blok anorganik unggul pada P tersedia, pH relatif terhadap optimum, dan retensi air. Indeks tunggal karena itu tidak cukup sebagai dasar tindakan konservasi. Temuan ini sejalan dengan peringatan bahwa hasil indeks bergantung pada pilihan indikator, acuan, dan pembobotan (Bünemann *et al.,* 2018), sehingga skor per indikator dan uji sensitivitas acuan perlu dilaporkan.

Estimasi erodibilitas dan sensitivitasnya

BO hasil konversi C-organik adalah 4,59 ± 0,15% pada blok organik dan 3,25 ± 0,29% pada blok anorganik. Estimasi K pada skenario dasar adalah 0,411 sampai 0,420 (rerata 0,417, agak tinggi) pada blok organik dan 0,452 sampai 0,469 (rerata 0,459, tinggi) pada blok anorganik (Tabel 4). Karena M, b, dan c diasumsikan sama untuk seluruh sampel, K merupakan fungsi linear BO, dengan penurunan sekitar 0,03 untuk setiap kenaikan 1% BO, sehingga statistik K identik dengan statistik C-organik dan bukan bukti independen. Yang dapat dinyatakan hanyalah bahwa, pada tekstur dan struktur yang diasumsikan, selisih BO 1,34% setara dengan selisih K sekitar 0,043.

Tabel 2. Sifat tanah, IKT, IKS, dan estimasi erodibilitas pada dua blok kebun (n = 3 per blok)

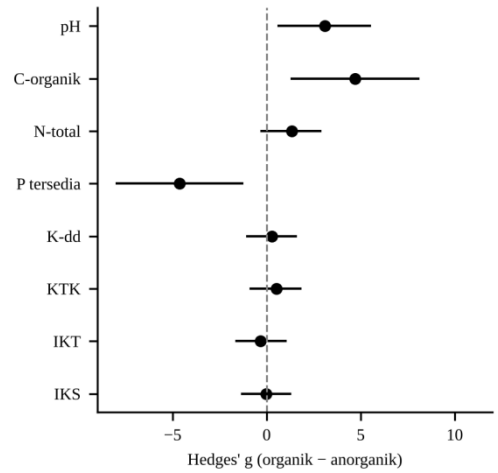
Parameter	**Organik (rerata ± SD)**	**Anorganik (rerata ± SD)**	**Selisih (O − A)**	**Hedges' g (CI 95%)**
pH (H_2O)	5,09 ± 0,22	4,48 ± 0,01	0,61	3,10 (0,64 sampai 5,50)
C-organik (%)	2,66 ± 0,09	1,89 ± 0,17	0,78	4,70 (1,32 sampai 8,06)
N-total (%)	0,27 ± 0,07	0,18 ± 0,02	0,09	1,33 (−0,28 sampai 2,84)
P tersedia (mg kg^{-1})	10,22 ± 4,64	30,67 ± 1,78	−20,45	−4,65 (−7,98 sampai −1,31)
K-dd (cmol(+) kg^{-1})	0,10 ± 0,07	0,08 ± 0,01	0,02	0,27 (−1,04 sampai 1,55)
KTK (cmol(+) kg^{-1})	8,47 ± 1,21	7,83 ± 0,76	0,64	0,51 (−0,85 sampai 1,80)
Retensi air (% vol)	11,37 ± 2,01	19,59 ± 2,77	−8,22	−2,72 (−4,90 sampai −0,46)
C biomassa mikroba (µg g^{-1})	21,43 ± 12,98	8,33 ± 0,96	13,10	1,14 (−0,40 sampai 2,58)
N biomassa mikroba (µg g^{-1})	1,49 ± 0,92	1,03 ± 0,23	0,46	0,54 (−0,82 sampai 1,84)
IKT	0,49 ± 0,05 (sedang)	0,50 ± 0,00 (sedang)	−0,01	−0,33 (−1,61 sampai 0,99)
IKS	49,20 ± 7,23 (sedang)	49,44 ± 2,52 (sedang)	−0,24	−0,04 (−1,31 sampai 1,25)
Estimasi K*	0,417 ± 0,005 (agak tinggi)	0,459 ± 0,009 (tinggi)	−0,043	−4,70 (−8,06 sampai −1,32)

Keterangan: O = organik, A = anorganik; Hedges' g dihitung untuk organik dikurangi anorganik. *K diestimasi dengan M, b, dan c yang diasumsikan sehingga merupakan fungsi BO (lihat teks).

Tabel 3. Kontribusi indikator terhadap selisih IKS antara dua blok kebun

Indikator	**Organik**	**Anorganik**	**Poin**
P tersedia	22,9	99,9	−7,00
pH	51,8	99,9	−4,38
Populasi cacing tanah	50,2	3,3	+4,26
N-total	78,9	32,9	+4,18
C-organik	99,9	84,8	+1,38
Retensi air	86,8	100,0	−1,20
Populasi bakteri	99,6	88,3	+1,03
K-dd	17,8	9,8	+0,73
KTK	31,5	23,9	+0,69
Dua indikator lain			≤ 0,1 tiap

Keterangan: skor indikator IKS (0-100); poin = kontribusi, yaitu (skor organik − skor anorganik) dibagi 11; jumlah seluruh indikator −0,24 poin.



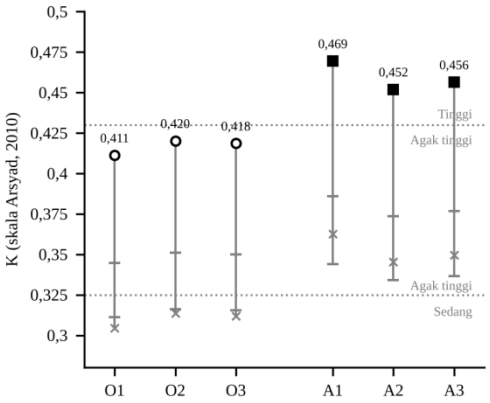
Gambar 1. Besaran efek (Hedges' g, organik dikurangi anorganik) dan selang kepercayaan 95%; estimasi K tidak ditampilkan karena merupakan fungsi linear BO

Nilai absolut estimasi K sangat bergantung pada asumsi tekstur, struktur, dan permeabilitas (Gambar 2). Skenario liat 45% dan debu 50% menurunkan K menjadi 0,348 pada blok organik dan 0,379 pada blok anorganik, dan skenario liat 50% dan debu 45% menjadi 0,314 dan 0,338. Skenario struktur dan permeabilitas lebih ringan (b = 3 dan c = 4) menurunkan K menjadi 0,310 (sedang) dan 0,353 (agak tinggi). Seluruh skenario memberi kisaran 0,31 sampai 0,47, kelas bergeser antara sedang dan tinggi, dan arah selisih antar blok tidak berubah. Karena b dan c pada skenario dasar adalah nilai paling berat, estimasi skenario dasar ditafsirkan sebagai batas atas. BO blok organik (4,48 sampai 4,76%) juga melampaui batas sekitar 4% yang menjadi dasar kalibrasi nomograf (Corral-Pazos-de-Provens *et al.*, 2023), dan pada tanah tropis nomograf dilaporkan tidak pasti dan cenderung menaksir terlalu rendah (Alonso *et al.*, 2025). Seluruh estimasi di sini lebih tinggi daripada K sawit di Ogan Komering Ilir sebesar 0,18 (Priatna dan Sepriansyah, 2024). Perbandingan langsung memerlukan data tekstur terukur dan faktor konversi yang sama. Erodibilitas hanya menggambarkan kepekaan, bukan laju erosi, yang juga ditentukan oleh erosivitas hujan, lereng, dan penutupan tanah (Jaya *et al.*, 2018). Kemiringan lahan yang kecil (di bawah 8%) diperkirakan membatasi laju erosi aktual.

Tabel 4. Bahan organik dan estimasi erodibilitas tanah per sampel pada skenario dasar

Sampel	BO (%)	K	Kelas
Organik 1	4,76	0,411	Agak tinggi
Organik 2	4,48	0,420	Agak tinggi
Organik 3	4,53	0,418	Agak tinggi
Anorganik 1	2,93	0,469	Tinggi
Anorganik 2	3,48	0,452	Tinggi
Anorganik 3	3,34	0,456	Tinggi

Keterangan: K diestimasi dengan M = 3.709,4, b = 4, dan c = 6; kelas menurut Arsyad (2010).



Gambar 2. Analisis sensitivitas estimasi erodibilitas (K) terhadap skenario tekstur tanah; titik = skenario dasar (M = 3.709,4; b = 4; c = 6), garis abu-abu = rentang tiga skenario lain (tanda datar: liat 45% dengan debu 50% dan liat 50% dengan debu 45%; tanda silang: b = 3 dan c = 4). O = organik, A = anorganik

Implikasi kesehatan tanah terhadap pengelolaan konservasi

Diagnosis di atas dapat diterjemahkan menjadi prioritas pengelolaan (Tabel 5). Hubungan yang mendasarinya bersifat mekanistik, yaitu bahan organik berpotensi meningkatkan aktivitas biologi dan pembentukan agregat, yang selanjutnya dapat memperbesar porositas dan infiltrasi serta menurunkan limpasan dan kepekaan erosi. Stabilitas agregat, infiltrasi, dan limpasan tidak diukur dalam penelitian ini, sehingga rantai tersebut diperlakukan sebagai hipotesis kerja, dengan dukungan tidak langsung dari perbaikan agregasi dan retensi air oleh mulsa tandan kosong pada sawit di lahan berlereng (Moradi *et al.*, 2015).

Urutan prioritas disusun dari banyaknya faktor pembatas yang ditangani satu tindakan. Pemeliharaan bahan organik berada di urutan pertama karena menangani KTK dan retensi hara yang rendah, aktivitas biologi, dan kepekaan erosi sekaligus. Tandan kosong kelapa sawit dalam takaran sedang dan teratur meningkatkan C-organik dan fauna tanah (Tao *et al.*, 2018; Noirot *et al.*, 2022; Ardiyanto *et al.*, 2026). Kompos yang baru diberikan sekitar satu tahun belum tentu cukup menaikkan C-organik secara berarti, sehingga pemberiannya perlu dilanjutkan dan bahan organik di sekitar kebun, seperti pelepah, tandan kosong, dan gulma terkelola, dikembalikan ke piringan dan gawangan. Pengelolaan K berada di urutan kedua karena K-dd tetap rendah walaupun blok anorganik menerima sekitar 3,8 kg K_2O per pohon per tahun dan KTK rendah membatasi penahanan K, sehingga dosis terbagi berdasarkan analisis tanah lebih sesuai daripada menambah takaran sekaligus (Woittiez *et al.*, 2019; Lim *et al.*, 2023). Ameliorasi kemasaman berada di urutan ketiga dan dilakukan sesuai hasil analisis, karena pH 4,5 sampai 5,1 masih dalam kisaran tanah sawit regional (Golicz *et al.*, 2024). Perlindungan permukaan tanah menyertai seluruh tindakan karena estimasi K sedang sampai tinggi menunjukkan tanah peka terhadap erosi bila terbuka. Pada blok anorganik, P tersedia yang sangat tinggi menunjukkan bahwa takaran P sebaiknya ditentukan dari analisis tanah, mengingat P sering diberikan melebihi anjuran pada sawit rakyat (Woittiez *et al.*, 2019).

Prioritas pada Tabel 5 merupakan implikasi pengelolaan dari diagnosis, bukan efek tindakan yang diuji dalam penelitian ini. Artikel ini juga tidak menyimpulkan bahwa pemupukan organik lebih baik daripada pemupukan anorganik. Karena kompos baru diberikan sekitar satu tahun, selisih C-organik antar blok yang besar (0,78 poin persentase) kemungkinan sebagian berasal dari perbedaan kondisi awal antar kebun. Setiap sistem diwakili satu kebun dan ketiga sampel merupakan subsampel, sehingga pengaruh pemupukan tidak dapat dipisahkan dari lokasi, riwayat lahan, maupun umur tanaman. Selang kepercayaan yang lebar

menunjukkan bahwa besar perbedaan antar blok belum dapat ditetapkan. Simpulan yang dapat dipertanggungjawabkan ialah bahwa diagnosis kesehatan tanah mengidentifikasi faktor pembatas dan arah prioritas konservasi pada kebun yang diamati. Penelitian lanjutan memerlukan beberapa kebun per sistem pemupukan; pengukuran fraksi tekstur, struktur, permeabilitas, stabilitas agregat, dan infiltrasi; serta pengamatan lintas musim.

Tabel 5. Matriks diagnosis tanah, risiko, dan prioritas pengelolaan konservasi

Diagnosis tanah	Temuan	Risiko atau fungsi tanah	Prioritas pengelolaan
C-organik rendah	Terutama blok anorganik (1,89%)	Agregasi dan fungsi biologi	Penambahan dan pemeliharaan bahan organik
K-dd rendah	Kedua blok (0,08 dan 0,10 cmol(+) kg^{-1})	Ketidakseimbangan hara	Pengelolaan K berdasarkan analisis tanah
Tanah masam	Kedua blok (pH 4,48 sampai 5,09)	Ketersediaan hara	Ameliorasi sesuai kebutuhan hasil analisis
Cacing tanah rendah	Tidak ditemukan pada blok anorganik	Fungsi biologi rendah	Peningkatan bahan organik dan habitat tanah
Estimasi K sedang sampai tinggi	0,31 sampai 0,47 menurut skenario tekstur, struktur, dan permeabilitas	Kerentanan erosi	Perlindungan permukaan tanah
KTK rendah	Kedua blok (7,83 sampai 8,47 cmol(+) kg^{-1})	Retensi hara rendah	Peningkatan bahan organik dan pengelolaan hara bertahap

Keterangan: prioritas merupakan implikasi pengelolaan dari diagnosis dan bukan efek tindakan yang diuji dalam penelitian ini.

KESIMPULAN

Tanah pada kebun sawit rakyat yang diamati berkelas sedang menurut IKT (0,49 dan 0,50) dan IKS (49,2 dan 49,4), dengan faktor pembatas berupa kemasaman tanah, K-dd dan KTK yang rendah, serta biomassa mikroba yang rendah di kedua blok. Kesamaan IKS terbentuk dari indikator yang saling mengimbangi. Cacing tanah, N-total, dan C-organik lebih baik pada blok organik, sedangkan P tersedia, skor pH, dan retensi air lebih baik pada blok anorganik. Arah selisih IKS bergantung pada acuan pH (dengan optimum pH 5,0 selisihnya +7,3 poin ke arah blok organik), sehingga besar dan arah perbedaan antar blok belum dapat ditetapkan. Estimasi erodibilitas berkisar sedang sampai tinggi (0,31 sampai 0,47) menurut skenario tekstur, struktur, dan permeabilitas. Hasil ini mengarahkan pengelolaan konservasi pada pemeliharaan bahan organik, pemupukan K berimbang, perbaikan kemasaman tanah, dan perlindungan permukaan tanah. Karena hanya dua blok yang diamati dan erodibilitas dihitung dari parameter yang diasumsikan, rekomendasi ini bersifat diagnostik dan perlu diverifikasi pada beberapa kebun per sistem dengan tekstur, struktur, dan permeabilitas terukur.

DAFTAR PUSTAKA

Alonso, GR, Casalí, J, Campo-Bescós, MÁ & Díaz, J 2025, 'Soil properties governing erodibility of Cuban soils: a univariate erodibility equation', *Soil Systems*, vol. 9, no. 4, hh. 131.

Apori, SO, Adams, S, Hanyabui, E, Musah, M, Marius, M & Acheampong, MK 2020, 'Evaluation of soil fertility status in oil palm plantations in the Western Region of Ghana', *AIMS Agriculture and Food*, vol. 5, no. 4, hh. 938–949.

Ardiyanto, A, Tarigan, SD, Widyastuti, R, Nugroho, B & Rivai, FA 2026, 'Optimization of empty fruit bunch application to improve soil organic carbon, total soil nitrogen, earthworm populations, and oil palm performance on Spodosols', *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, vol. 41, no. 2, hh. 199–215.

Arsyad, S 2010, *Konservasi tanah dan air*, edisi 2, IPB Press, Bogor.

Bajracharya, RM, Sharma, S, Dahal, BM, Sitaula, BK, Rokaya, K & Jeng, A 2006, 'Assessment of soil quality using physiochemical and biological indicators in a mid-hill watershed of Nepal', Proceedings of the International Seminar on Environmental and Social Impacts of Agricultural Intensification in Himalayan Watersheds, hh. 105–114.

BMKG 2026, Data iklim bulanan Stasiun Meteorologi Tebelian (ID WMO 96559) periode Agustus 2025–Agustus 2026, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta.

Boafo, DK, Kraisornpornson, B, Panphon, S, Owusu, BE & Amaniampong, PN 2020, 'Effect of organic soil amendments on soil quality in oil palm production', Applied Soil Ecology, vol. 147, hh. 103358.

Bünemann, EK, Bongiorno, G, Bai, Z, Creamer, RE, De Deyn, G, de Goede, R, Fleskens, L, Geissen, V, Kuyper, TW, Mäder, P, Pulleman, M, Sukkel, W, van Groenigen, JW & Brussaard, L 2018, 'Soil quality: a critical review', Soil Biology and Biochemistry, vol. 120, hh. 105–125.

Corral-Pazos-de-Provens, E, Rapp-Arrarás, I & Domingo-Santos, JM 2023, 'The USLE soil erodibility nomograph revisited', International Soil and Water Conservation Research, vol. 11, no. 1, hh. 1–13.

Davies, GM & Gray, A 2015, 'Don't let spurious accusations of pseudoreplication limit our ability to learn from natural experiments (and other messy kinds of ecological monitoring)', Ecology and Evolution, vol. 5, no. 22, hh. 5295–5304.

De Vos, RE, Lim, YL, Sunawan, Donough, CR, Monzon, JP, Tenorio, FA, Sugianto, H, Palupi, S, Tito, AP, Saleh, S, Ulfaria, N, Amsar, J & Slingerland, M 2026, 'Fertilizer use in Indonesian oil palm smallholder systems: agronomic and socio-economic constraints and opportunities', Environment, Development and Sustainability, doi:10.1007/s10668-026-07687-6.

Ghimire, P, Bhatta, B, Pokhrel, B & Shrestha, I 2018, 'Assessment of soil quality for different land uses in the Chure region of Central Nepal', Journal of Agriculture and Natural Resources, vol. 1, no. 1, hh. 32–42.

Golicz, K, Cheak, SC, Jacobs, S, Grosse-Stoltenberg, A, Safaei, M, Bellingrath-Kimura, S, Breuer, L & Wartenberg, A 2024, 'The older, the better: a comprehensive survey of soil organic carbon under commercial oil palm plantations', Environmental Monitoring and Assessment, vol. 197, no. 1, hh. 86.

Guillaume, T, Holtkamp, AM, Damris, M, Brümmer, B & Kuzyakov, Y 2016, 'Soil degradation in oil palm and rubber plantations under land resource scarcity', Agriculture, Ecosystems & Environment, vol. 232, hh. 110–118.

Ho, LS, Tan, GYA, Ibrahim, J & Teh, C-K 2026, 'Diagnostic limitations in soil health frameworks for tropical perennial systems: a critical review and implications for regenerative agriculture in Southeast Asia', Agronomy, vol. 16, no. 17, hh. 1733.

Jaya, A, Birawa, C, Adji, FF, Anwar, M & Banuwa, IS 2018, 'Erosion and surface runoff on forest and oil palm plantation in Jalemu Watershed, Gunung Mas Regency, Central Kalimantan Province', Journal of Tropical Soils, vol. 23, no. 3, hh. 151–159.

Kurnia, U, Agus, F, Adimihardja, A & Dariah, A (eds) 2022, Sifat fisik tanah dan metode analisisnya, edk 2, Balai Penelitian Tanah, Bogor.

Lakens, D 2013, 'Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs', Frontiers in Psychology, vol. 4, hh. 863.

Lim, YL, Tenorio, FA, Monzon, JP, Sugianto, H, Donough, CR, Rahutomo, S, Agus, F, Slingerland, MA, Darlan, NH, Dwiyahreni, AA, Farrasati, R, Mahmudah, N,

Muhamad, T, Nurdwiansyah, D, Palupi, S, Pradiko, I, Saleh, S, Syarovy, M, Wiratmoko, D & Grassini, P 2023, 'Too little, too imbalanced: nutrient supply in smallholder oil palm fields in Indonesia', Agricultural Systems, vol. 210, artikel 103729.

Minasny, B & McBratney, AB 2018, 'Limited effect of organic matter on soil available water capacity', European Journal of Soil Science, vol. 69, no. 1, hh. 39–47, doi:10.1111/ejss.12475.

Moebius-Clune, BN, Moebius-Clune, DJ, Gugino, BK, Idowu, OJ, Schindelbeck, RR, Ristow, AJ, van Es, HM, Thies, JE, Shayler, HA, McBride, MB, Kurtz, KSM, Wolfe, DW & Abawi, GS 2016, Comprehensive assessment of soil health: the Cornell framework manual, Cornell University, Geneva, NY.

Monzon, JP, Lim, YL, Tenorio, FA, Farrasati, R, Pradiko, I, Sugianto, H, Donough, CR, Rattalino Edreira, JI, Rahutomo, S, Agus, F, Slingerland, MA, Zijlstra, M, Saleh, S, Nashr, F, Nurdwiansyah, D, Ulfaria, N, Winarni, NL, Zulhakim, N & Grassini, P 2023, 'Agronomy explains large yield gaps in smallholder oil palm fields', Agricultural Systems, vol. 210, artikel 103689.

Moradi, A, Sung, CTB, Goh, KJ, Hanif, AHM & Ishak, CF 2015, 'Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation', Soil and Tillage Research, vol. 145, hh. 62–71.

Nelson, PN, Rhebergen, T, Berthelsen, S, Webb, MJ, Banabas, M, Oberthür, T, Donough, CR, Rahmadsyah, Indrasuara, K & Lubis, A 2011, 'Soil acidification under oil palm: rates and effects on yield', Better Crops, vol. 95, no. 4, hh. 22–25.

Noirot, LM, Müller-Stöver, DS, Wahyuningsih, R, Sørensen, H, Sudarno, Simamora, A, Pujianto, Suhardi & Caliman, J-P 2022, 'Impacts of empty fruit bunch applications on soil organic carbon in an industrial oil palm plantation', Journal of Environmental Management, vol. 317, hh. 115373.

Nuriman, M, Wibowo, SS, Rezekikasari, Agustin, L & Setiawati, T 2025, 'Bio-reclamation evaluation of former gold mine land: pre- and post-reclamation soil management conditions', Jurnal Biologi Tropis, vol. 25, no. 3, hh. 2457–2464.

Nuriman, M, Murni, SD, Indrawati, USYV, Munawir, M, Purnamasari, E & Amano, Y 2026, 'Soil health assessment for conservation-oriented regenerative management of smallholder oil palm on degraded mineral soil in West Kalimantan, Indonesia', Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences, manuskrip telah diajukan (JGIAS-2610143).

Partoyo 2005, 'Analisis indeks kualitas tanah pertanian di lahan pasir pantai Samas Yogyakarta', Ilmu Pertanian, vol. 12, no. 2, hh. 140–151.

Priatna, SJ & Sepriansyah, A 2024, 'Soil erosion sensitivity of rubber plant, oil palm, and teak in Ogan Komering Ilir District', Jurnal Lahan Suboptimal, vol. 13, no. 2, hh. 138–144.

Salamat, SS, Hassan, MA, Shirai, Y, Mohd Hanif, A, Norizan, MS, Mohd Zainudin, MH, Mustapha, NA, Mat Isa, MN & Abu Bakar, MF 2021, 'Effect of inorganic fertilizer application on soil microbial diversity in an oil palm plantation', BioResources, vol. 16, no. 2, hh. 2279–2302.

Sulaeman, Suparto & Eviati 2005, Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk, Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.

Tao, H-H, Snaddon, JL, Slade, EM, Henneron, L, Caliman, J-P & Willis, KJ 2018, 'Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: a case study in Sumatra,

Indonesia', Agriculture, Ecosystems & Environment, vol. 256, hh. 105–113.

Vance, ED, Brookes, PC & Jenkinson, DS 1987, 'An extraction method for measuring soil microbial biomass C', Soil Biology and Biochemistry, vol. 19, no. 6, hh. 703–707.

Wischmeier, WH, Johnson, CB & Cross, BV 1971, 'A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites', Journal of Soil and Water Conservation, vol. 26, no. 5, hh. 189–193.

Woittiez, LS, Turhina, S, Deccy, D, Slingerland, M, van Noordwijk, M & Giller, KE 2019, 'Fertiliser application practices and nutrient deficiencies in smallholder oil palm plantations in Indonesia', Experimental Agriculture, vol. 55, no. 4, hh. 543–559.