

Kajian Ketahanan Penetrasi Tanah Akibat Residu Frekuensi Pemupukan Anorganik pada Tanah Ultisol Perkebunan Kelapa Sawit

Riduanson Tarigan. S, *Wiskandar, dan Ajidirman

Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jambi.
Kampus Pinang Masak, Mendalo Darat Jambi. 36361 Telp. +620741583051
*e-mail korespondensi: wiskandar@unj.ac.id

Abstract. Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is an important plantation commodity, the productivity of which is influenced by the quality of the root-zone environment. This study aimed to examine soil penetration resistance in Ultisols with varying histories of inorganic fertilizer application frequency, and its relationship with soil physical properties and management zones. The research was conducted from April to June 2026 at PT Mekar Agro Sawit, Batang Hari Regency, Jambi Province, using a survey method with stratified systematic sampling. Observations were carried out across eight plant age groups (1–15 years)—representing cumulative fertilizer application frequencies ranging from 2 to 30 times—three slope positions, and two management zones (the palm circle and the inter-row area), resulting in a total of 48 observation units. Parameters measured included penetration resistance, bulk density (BD), total pore space (TPS), soil moisture content, organic matter (OM), and soil texture at a depth of 0–30 cm. The results indicate that as plant age and the cumulative frequency of historical fertilizer application increase, both penetration resistance and bulk density rise, while total pore space and soil moisture content decline. In the palm circle, penetration resistance at a depth of 10 cm increased from 14.16 to 28.21 kgF cm⁻², while at a depth of 30 cm, it rose from 22.66 to 34.56 kgF cm⁻². The palm circle zone exhibited higher penetration resistance compared to the inter-row area. The soil texture was predominantly sandy loam. The increase in penetration resistance is associated with higher soil compaction and lower soil moisture content. These findings indicate a shift in the mechanical condition of the soil in older plantations, though they do not yet establish a direct causal link between the frequency of inorganic fertilizer application and soil penetration resistance.

Keywords : Fertilization frequency, oil palm, soil physical properties, Ultisol

Abstrak. Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan komoditas perkebunan penting yang produktivitasnya dipengaruhi oleh kualitas lingkungan perakaran. Penelitian ini bertujuan mengkaji ketahanan penetrasi tanah pada Ultisol dengan riwayat frekuensi pemupukan anorganik berbeda serta keterkaitannya dengan sifat fisik tanah dan zona pengelolaan. Penelitian dilaksanakan April–Juni 2026 di PT Mekar Agro Sawit, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi, menggunakan metode survei dengan stratified systematic sampling. Pengamatan dilakukan pada delapan kelompok umur tanaman (1–15 tahun) yang merepresentasikan frekuensi pemupukan kumulatif 2–30 kali, tiga posisi lereng, dan dua zona pengelolaan, yaitu piringan dan antarbarisan, dengan total 48 satuan pengamatan. Parameter yang diamati meliputi ketahanan penetrasi, bobot volume (BV), total ruang pori (TRP), kadar air (KA), bahan organik (BO), dan tekstur tanah pada kedalaman 0–30 cm. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan umur tanaman dan representasi frekuensi pemupukan historis diikuti peningkatan ketahanan penetrasi serta BV, dan penurunan TRP dan KA. Pada piringan, ketahanan penetrasi kedalaman 10 cm meningkat dari 14,16 menjadi 28,21 kgF cm⁻², sedangkan pada kedalaman 30 cm meningkat dari 22,66 menjadi 34,56 kgF cm⁻². Zona piringan memiliki ketahanan penetrasi lebih tinggi dibandingkan antarbarisan. Tekstur tanah didominasi Sandy Loam. Peningkatan ketahanan penetrasi berkaitan dengan meningkatnya kepadatan dan menurunnya kadar air tanah. Temuan ini menunjukkan adanya perubahan kondisi mekanis tanah pada tanaman yang lebih tua, tetapi belum membuktikan hubungan kausal langsung antara frekuensi pemupukan anorganik dan ketahanan penetrasi.

Kata kunci: Frekuensi Pemupukan, Kelapa sawit, sifat fisik tanah, Ultisol

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis Indonesia yang berperan penting dalam pembangunan sektor pertanian dan perekonomian. Keberlanjutan produktivitas kelapa sawit tidak hanya ditentukan oleh kecukupan hara, tetapi juga oleh kualitas tanah sebagai lingkungan perakaran yang menyediakan ruang, air, dan udara bagi pertumbuhan akar. Pengelolaan perkebunan dalam jangka panjang, termasuk pemupukan, pemeliharaan vegetasi, dan pengelolaan residu tanaman, dapat memengaruhi karakteristik tanah. Pada perkebunan kelapa sawit di Sumatra, perbedaan pengelolaan antar zona berkaitan dengan perbedaan cadangan karbon tanah, sedangkan pengelolaan bahan organik jangka panjang dapat memperbaiki kualitas tanah dan komunitas mikroorganisme Hidayat et al., 2024). Oleh karena itu, pemeliharaan kualitas fisik tanah merupakan bagian penting dalam mendukung produktivitas dan keberlanjutan perkebunan kelapa sawit.

Ultisol merupakan salah satu kelompok tanah yang banyak dimanfaatkan untuk pertanian dan perkebunan di Indonesia, tetapi memiliki kendala berupa reaksi masam, kandungan bahan organik relatif rendah, serta potensi

degradasi struktur dan pemadatan akibat pengelolaan intensif. Kondisi tersebut dapat meningkatkan *berat volume*, menurunkan ruang pori, dan membatasi pergerakan air serta udara dalam tanah. Perubahan sifat fisik tersebut berpotensi menghambat perkembangan akar dan menurunkan kualitas lingkungan perakaran. Sifat fisik Ultisol juga dapat bervariasi menurut kondisi lahan dan posisi lereng, termasuk *berat volume*, kadar air, dan ruang pori (Septiaji et al., 2024).

Kondisi fisik tanah pada perkebunan kelapa sawit merupakan hasil interaksi berbagai faktor, antara lain aktivitas pengelolaan, umur tanaman, perkembangan akar, akumulasi serasah, kadar air, tekstur, posisi lereng, dan zona pengelolaan. Aktivitas pemeliharaan, pemanenan, pengangkutan hasil, dan lalu lintas alat dapat memberikan tekanan mekanis yang meningkatkan risiko pemadatan. Sebaliknya, zona yang mempertahankan residu tanaman seperti *interrow* dan *frond stack* cenderung mempunyai kondisi karbon tanah lebih baik dibandingkan zona yang lebih intensif mengalami lalu lintas (*harvesting path*) (Rahman et al., 2021). Perbedaan praktik pengelolaan dan vegetasi bawah juga dapat memengaruhi *soil health* pada perkebunan kelapa sawit (Thoumazeau et al., 2024). Hal tersebut menunjukkan bahwa evaluasi kondisi fisik tanah perlu mempertimbangkan variasi spasial dan temporal dalam sistem perkebunan.

Pemupukan anorganik merupakan input penting dalam budidaya kelapa sawit karena kebutuhan unsur hara berlangsung secara berulang sepanjang siklus produksi. Nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) berperan penting dalam pertumbuhan dan produktivitas tanaman, tetapi efektivitas pemupukan dipengaruhi oleh karakteristik tanah dan lingkungan tumbuh. Efisiensi penggunaan pupuk K dan Mg pada kelapa sawit dilaporkan berbeda menurut sifat tanah, tekstur, curah hujan, kemiringan lereng, dan ketersediaan air Prabowo et al., (2023). Meskipun demikian, pengaruh pupuk mineral terhadap sifat fisik tanah tidak bersifat langsung maupun seragam. Respons tanah bergantung pada jenis dan dosis pupuk, lama aplikasi, tekstur, bahan organik, kelembapan, perkembangan akar, serta praktik pengelolaan lainnya. Pemupukan mineral dapat memengaruhi karbon dan agregasi tanah, tetapi perubahan *berat volume* dan porositas tidak selalu menunjukkan pola yang sama. Dengan demikian, riwayat frekuensi pemupukan perlu dipertimbangkan sebagai salah satu komponen pengelolaan yang berpotensi berinteraksi dengan faktor lingkungan dan pengelolaan lainnya.

Salah satu indikator penting untuk mengevaluasi kondisi mekanis tanah adalah *ketahanan penetrasi tanah*, yaitu tahanan tanah terhadap penetrasi yang dapat menggambarkan hambatan mekanis terhadap perkembangan akar. Nilai *ketahanan penetrasi* berkaitan dengan *berat volume* dan kadar air serta dipengaruhi oleh tekstur dan struktur tanah. Peningkatan *berat volume* dan kondisi tanah yang lebih kering umumnya meningkatkan ketahanan penetrasi (Lardy et al., 2022). Ketahanan penetrasi yang tinggi dapat membatasi pemanjangan dan eksplorasi akar serta mengurangi akses tanaman terhadap air dan unsur hara. Karena itu, *penetration resistance* sebaiknya diinterpretasikan bersama *berat volume*, ruang pori, dan kadar air sebagai bagian dari sistem kualitas fisik tanah (Colombi et al., 2025).

Pada perkebunan kelapa sawit, lingkungan perakaran bersifat heterogen akibat perbedaan intensitas pengelolaan antar zona. Zona piringan (*weeded circle*) umumnya lebih intensif menerima pemeliharaan dan aplikasi pupuk, sedangkan zona antar barisan (*interrow*) dipengaruhi oleh vegetasi bawah, akumulasi serasah, aktivitas akar, dan lalu lintas perkebunan. Selain itu, umur tanaman dan posisi lereng dapat memengaruhi kondisi fisik tanah melalui perubahan perkembangan akar, akumulasi bahan organik, distribusi air, erosi, dan deposisi material. Variasi kemiringan lereng pada Ultisol diketahui berkaitan dengan perubahan *berat volume*, kadar air, dan ruang pori (Septiaji et al., 2024). Oleh karena itu, umur tanaman, posisi lereng, zona pengelolaan, dan kadar air perlu dipertimbangkan dalam mengevaluasi hubungan antara riwayat pemupukan dan *penetration resistance*.

Meskipun penelitian mengenai pemupukan kelapa sawit telah banyak membahas efisiensi hara, kesuburan tanah, pertumbuhan, dan produktivitas, informasi mengenai hubungan antara riwayat frekuensi pemupukan anorganik dan ketahanan penetrasi tanah pada Ultisol perkebunan kelapa sawit dalam kondisi lapangan masih terbatas. Kajian pemadatan tanah pada perkebunan umumnya lebih banyak dikaitkan dengan lalu lintas dan aktivitas mekanis, sedangkan pengaruh riwayat pemupukan terhadap kondisi fisik tanah kemungkinan berlangsung secara tidak langsung melalui interaksi dengan bahan organik, akar, kadar air, tekstur, dan praktik pengelolaan. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang mengintegrasikan riwayat frekuensi pemupukan dengan indikator fisik tanah dan faktor spasial perkebunan.

Penelitian ini bertujuan mengkaji ketahanan penetrasi tanah pada Ultisol perkebunan kelapa sawit dengan riwayat frekuensi pemupukan anorganik yang berbeda serta mengevaluasi keterkaitannya dengan *berat volume*, total ruang pori, kadar air, bahan organik, tekstur tanah, umur tanaman, posisi lereng, dan zona pengelolaan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kondisi mekanis tanah dan potensi hambatan terhadap lingkungan perakaran sebagai dasar evaluasi kualitas dan keberlanjutan pengelolaan tanah pada perkebunan kelapa sawit.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada April hingga Juni 2026 di areal perkebunan kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) PT Mekar Agro Sawit, yang berlokasi di Desa Simpang Aur Gading, Kecamatan Bathin XXIV, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi. Selanjutnya, analisis laboratorium terhadap sifat fisika dan kimia tanah dilakukan di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Jambi.

Penelitian ini menggunakan metode survei lapangan dengan pendekatan stratified systematic sampling. Stratifikasi dilakukan berdasarkan tiga faktor utama, yaitu umur tanaman, posisi lereng, dan zona pengelolaan tanah. Amatan dilakukan pada blok perkebunan dengan jenis tanah Ultisol dan kemiringan lereng sekitar 15%. Delapan kelompok umur tanaman yang diamati mencakup 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 tahun. Berdasarkan catatan riwayat pengelolaan kebun, aplikasi pemupukan anorganik dilakukan secara rutin dengan rata-rata frekuensi dua kali per tahun. Oleh karena itu, frekuensi kumulatif pemupukan yang merepresentasikan riwayat pengelolaan pada masing-masing kelompok umur berturut-turut adalah 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26, dan 30 kali aplikasi. Frekuensi ini ditempatkan sebagai indikator riwayat pengelolaan, bukan sebagai perlakuan eksperimental.

Pada setiap kelompok umur tanaman, ditetapkan tiga posisi lereng (bagian atas, tengah, dan bawah) serta dua zona pengamatan (piringan dan antarbarisan). Dari kombinasi faktor tersebut, diperoleh total 48 satuan pengamatan ($8 \text{ kelompok umur} \times 3 \text{ posisi lereng} \times 2 \text{ zona}$). Penentuan titik pengamatan di lapangan diidentifikasi melalui peta kerja yang kemudian diverifikasi secara langsung menggunakan Global Positioning System (GPS) dan aplikasi Avenza Maps.

Pengambilan sampel tanah dilakukan pada kedalaman 0–30 cm. Pada zona piringan (weeded circle), sampel diambil pada radius ± 1 m dari pokok tanaman, sedangkan pada zona antarbarisan (interrow), pengambilan dilakukan pada bagian tengah antarbarisan dengan jarak ± 4 m dari pokok tanaman. Sampel tanah utuh (undisturbed soil sample) diambil menggunakan ring sample untuk analisis bobot volume (BV) dan kadar air. Sementara itu, sampel tanah terganggu (disturbed soil sample) diambil untuk analisis kandungan C-organik dan tekstur tanah. Setiap sampel tanah diberi label yang mencantumkan identitas blok, umur tanaman, posisi lereng, serta zona pengambilan.

Parameter sifat tanah yang diamati meliputi ketahanan penetrasi tanah (soil penetration resistance), bobot volume (BV), total ruang pori (TRP), kadar air, C-organik, dan tekstur tanah.

Data ketahanan penetrasi tanah (penetration resistance) diinterpretasikan secara deskriptif dengan mempertimbangkan variabel umur tanaman, frekuensi pemupukan, posisi lereng, zona pengelolaan, dan kedalaman tanah. Keterkaitan antara penetration resistance dengan sifat fisik-kimia tanah lainnya (BV, TRP, kadar air, C-organik, dan tekstur) dianalisis untuk menjelaskan hubungan antara riwayat pengelolaan dengan kondisi mekanis tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan Organik, Berat Volume, Total Ruang Pori dan Kadar Air

Hasil analisis menunjukkan bahwa sifat fisik tanah pada lahan pertanaman kelapa sawit di Desa Aur Gading bervariasi berdasarkan karakteristik tanah pada masing-masing lokasi (Tabel 1). Hasil pengamatan menunjukkan adanya perubahan sifat fisik tanah pada berbagai umur tanaman dan zona pengelolaan, yaitu piringan (P) dan luar piringan/antarbarisan (T). Secara umum, peningkatan umur tanaman yang sekaligus merepresentasikan peningkatan frekuensi aplikasi pupuk secara historis dari 2 hingga 30 kali aplikasi diikuti oleh kecenderungan peningkatan bobot volume (BV) serta penurunan total ruang pori (TRP) dan kadar air (KA). Sebaliknya, kandungan bahan organik (BO) menunjukkan pola yang lebih fluktuatif. Pola perubahan tersebut mengindikasikan bahwa kondisi fisik tanah pada perkebunan kelapa sawit tidak ditentukan oleh satu faktor, tetapi merupakan hasil interaksi antara riwayat pengelolaan, bahan organik, perkembangan akar, aktivitas perkebunan, kadar air, dan kondisi lingkungan tanah (Rounsevell et al., 2021).

Tabel 1. Analisis BV (Berat Volume), TRP (Total Ruang Pori), Kadar Air, dan BO (Bahan Organik) Areal Perkebunan Kelapa Sawit di Desa Aur Gading

Blok/Tahun	BO (%)		BV (g/cm ³)		TRP (%)		KA (%)	
	P	T	P	T	P	T	P	T
P5/1 Th	3,04	3,64	1,22	1,15	52,79	55,41	21,15	22,65
F2/3 Th	2,54	3,37	1,22	1,12	53,14	56,45	22,16	23,86
B1/5 Th	4,97	3,32	1,27	1,19	50,29	54,07	20,16	21,90
N1/7 Th	2,45	2,97	1,31	1,24	49,73	51,99	18,32	20,90
P3/9 Th	2,25	3,05	1,31	1,23	49,65	52,50	17,75	19,47
R1/11 Th	2,19	2,59	1,39	1,31	46,58	49,73	16,80	17,12
M/13 Th	2,86	2,94	1,43	1,33	44,87	48,72	14,17	16,72
F/15 Th	2,48	2,34	1,44	1,35	44,50	48,02	12,92	13,33

Ket : P = Piringan tanaman

T = Luar piringan/antar tajuk tanaman

Pada zona piringan, BV meningkat dari $1,22 \text{ g cm}^{-3}$ pada tanaman umur 1 tahun menjadi $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ pada umur 15 tahun, atau meningkat sekitar 18,0%. Pada zona antarbarisan, BV meningkat dari 1,15 menjadi $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ atau sekitar 17,4%. Nilai BV pada zona piringan juga secara konsisten lebih tinggi dibandingkan antarbarisan pada seluruh kelompok umur. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tanah pada zona piringan cenderung lebih padat dibandingkan tanah antarbarisan. Peningkatan BV pada tanaman yang lebih tua dapat berkaitan dengan semakin lamanya tanah menerima aktivitas pengelolaan, seperti pemeliharaan tanaman, pengendalian vegetasi, pemupukan, pemanenan, dan lalu lintas pekerja atau alat (Dislich et al., 2017). Tekanan mekanis yang berlangsung berulang berpotensi menyebabkan penataan kembali partikel tanah dan mengurangi ruang pori, terutama apabila aktivitas dilakukan ketika tanah mempunyai kadar air tinggi (Keller et al., 2019; Pulido-Moncada et al., 2021).

Hubungan antara umur tanaman dan BV juga menunjukkan kecenderungan yang sangat kuat, dengan koefisien korelasi sebesar $r = 0,98$ pada piringan dan $r = 0,96$ pada antar barisan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tua tanaman atau semakin besar representasi riwayat frekuensi pemupukan, semakin tinggi BV tanah. Namun, karena frekuensi pemupukan dalam penelitian ini tidak diberikan sebagai perlakuan eksperimental dan berkorelasi dengan umur tanaman, hubungan tersebut tidak dapat diartikan sebagai bukti bahwa pemupukan anorganik secara langsung menyebabkan peningkatan BV (Manning et al., 2020). Umur tanaman juga merupakan representasi dari lamanya tanah menerima berbagai aktivitas pengelolaan sehingga faktor-faktor tersebut berpotensi berkontribusi terhadap perubahan kepadatan tanah (Gaveau et al., 2022).

Peningkatan BV diikuti oleh penurunan TRP. Pada piringan, TRP menurun dari 52,79% pada umur 1 tahun menjadi 44,50% pada umur 15 tahun, sedangkan pada antarbarisan menurun dari 55,41% menjadi 48,02%. Dengan demikian, selama periode pengamatan terjadi penurunan TRP sekitar 15,7% pada piringan dan 13,3% pada antarbarisan. Hubungan umur tanaman dengan TRP juga sangat kuat dan bersifat negatif, yaitu $r = -0,97$ pada kedua zona. Secara fisik, kondisi ini sesuai dengan hubungan antara BV dan ruang pori, karena peningkatan kerapatan tanah menyebabkan ruang kosong di antara partikel tanah menjadi semakin kecil (Rabot et al., 2018). Dengan demikian, tanah dengan BV yang lebih tinggi cenderung mempunyai TRP yang lebih rendah (Alaoui et al., 2018).

Zona antar barisan secara konsisten mempunyai TRP lebih tinggi dibandingkan zona piringan. Pada umur 1 tahun, misalnya, TRP mencapai 55,41% pada antarbarisan dibandingkan 52,79% pada piringan, sedangkan pada umur 15 tahun masing-masing sebesar 48,02% dan 44,50%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lingkungan tanah pada antarbarisan relatif lebih mampu mempertahankan ruang pori dibandingkan piringan. Keberadaan vegetasi bawah, serasah, residu pelepah, dan aktivitas akar pada antarbarisan dapat berkontribusi terhadap pemeliharaan struktur dan pembentukan pori tanah (Hassler et al., 2022). Sebaliknya, zona piringan merupakan area yang lebih intensif mengalami pemeliharaan dan pembersihan vegetasi sehingga masukan bahan organik dari vegetasi bawah relatif lebih terbatas (Formaglio et al., 2021).

Kandungan BO menunjukkan pola yang berbeda dari BV dan TRP. Pada zona piringan, BO berkisar antara 2,19–4,97%, sedangkan pada zona antarbarisan berkisar antara 2,34–3,64%. Kandungan BO pada piringan meningkat dari 3,04% pada umur 1 tahun menjadi 4,97% pada umur 5 tahun, kemudian menurun menjadi 2,19% pada umur 11 tahun, meningkat kembali menjadi 2,86% pada umur 13 tahun, dan menurun menjadi 2,48% pada umur 15 tahun. Pada antarbarisan, BO cenderung menurun dari 3,64% pada umur 1 tahun menjadi 2,34% pada umur 15 tahun. Fluktuasi tersebut menunjukkan bahwa BO merupakan komponen tanah yang dinamis dan dipengaruhi oleh keseimbangan antara masukan (input) dan kehilangan (loss) bahan organik (Poeplau et al., 2021).

Kandungan BO yang relatif lebih tinggi pada antarbarisan pada beberapa kelompok umur diduga berkaitan dengan keberadaan vegetasi bawah, serasah, dan residu tanaman yang memberikan masukan karbon ke permukaan tanah (Tandon et al., 2019). Sebaliknya, pengelolaan piringan yang lebih intensif dapat mengurangi sumber bahan organik dari vegetasi bawah. Tingginya BO pada piringan umur 5 tahun menunjukkan bahwa faktor lokal juga dapat memengaruhi akumulasi bahan organik, seperti jumlah serasah, kondisi penutupan permukaan, aktivitas akar, dan riwayat pengelolaan blok (Guillaume et al., 2018). Oleh karena itu, hubungan BO dengan umur tanaman atau frekuensi pemupukan tidak menunjukkan pola linear. Bahan organik dapat memperbaiki struktur dan stabilitas agregat serta membantu mempertahankan ruang pori (Blanco-Canqui & Ruis, 2020), tetapi pengaruhnya dapat berinteraksi dengan tekstur, kadar air, aktivitas akar, dan tekanan mekanis (Six & Paustian, 2019).

Perubahan TRP juga berkaitan dengan perubahan KA. Kadar air pada piringan menurun dari 21,15% pada umur 1 tahun menjadi 12,92% pada umur 15 tahun, sedangkan pada antarbarisan menurun dari 22,65% menjadi 13,33%. Pada seluruh kelompok umur, KA antarbarisan cenderung lebih tinggi dibandingkan piringan. Hubungan antara BV dan KA menunjukkan korelasi negatif yang kuat, yaitu $r = -0,98$ pada piringan dan $r = -0,96$ pada antarbarisan, sedangkan hubungan TRP dengan KA bersifat positif dengan nilai $r = 0,97$ dan $r = 0,96$. Pola tersebut menunjukkan bahwa tanah dengan BV lebih tinggi dan TRP lebih rendah pada penelitian ini cenderung mempunyai kadar air yang lebih rendah.

Penurunan KA dapat berkaitan dengan perubahan distribusi ruang pori akibat peningkatan kepadatan tanah (Mossadeghi-Björklund et al., 2019). Selain itu, kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh perkembangan sistem

perakaran tanaman, evapotranspirasi, tutupan permukaan tanah, bahan organik, dan kondisi iklim mikro (Nelson et al., 2020). Zona antarbarisan yang memiliki vegetasi bawah dan residu tanaman lebih banyak berpotensi mempunyai perlindungan permukaan yang lebih baik sehingga kehilangan air melalui evaporasi dapat ditekan (Darras et al., 2021). Dengan demikian, perbedaan KA antara piringan dan antarbarisan tidak hanya berkaitan dengan BV dan TRP, tetapi juga dengan perbedaan pengelolaan permukaan tanah.

Perubahan BV, TRP, KA, dan BO mempunyai implikasi penting terhadap soil penetration resistance. Peningkatan BV dan penurunan TRP menunjukkan semakin rapatnya susunan tanah dan semakin terbatasnya ruang untuk pergerakan air, udara, dan perkembangan akar (Colombi et al., 2018). Apabila kondisi tersebut berlangsung bersamaan dengan penurunan kadar air, kekuatan mekanis tanah dapat meningkat sehingga hambatan penetrasi akar berpotensi menjadi lebih besar (Gao et al., 2022). Oleh karena itu, penetration resistance perlu diinterpretasikan secara bersamaan dengan BV dan KA (Whalley et al., 2019). Nilai ketahanan penetrasi dapat meningkat pada tanah yang lebih padat dan relatif kering, sehingga perbedaan nilai penetrasi antarlokasi tidak dapat langsung dianggap sebagai akibat perbedaan frekuensi pemupukan.

Dari perspektif lingkungan perakaran, peningkatan BV yang disertai penurunan TRP dan KA berpotensi mengurangi kualitas ruang tumbuh akar (Bengough et al., 2019). Kondisi tanah yang lebih padat dapat meningkatkan hambatan mekanis terhadap pemanjangan akar, sedangkan berkurangnya ruang pori dapat membatasi ketersediaan ruang untuk air dan udara (Correa et al., 2019). Apabila kondisi tersebut berkembang pada lapisan perakaran, kemampuan akar kelapa sawit dalam mengeksplorasi tanah untuk memperoleh air dan unsur hara dapat terganggu (Raza et al., 2021).

Tekstur Tanah

Hasil analisis tekstur pada 8 titik pengamatan di lahan yang ditanami kelapa sawit menunjukkan kelas tekstur, yaitu Sandy Loam dan Loam Sandy (Tabel 2). Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 2, tanah lokasi penelitian didominasi fraksi pasir dengan kandungan 49–77%, debu 21–46%, dan liat 1–5%. Berdasarkan klasifikasi USDA, tujuh blok termasuk kelas *Sandy Loam*, sedangkan Blok B1/5 Th termasuk *Loamy Sand*. Dominasi fraksi pasir menunjukkan bahwa tanah memiliki tekstur relatif kasar yang berpengaruh terhadap pergerakan air, penyimpanan air, aerasi, dan respons tanah terhadap pemadatan. Tekstur tanah merupakan sifat dasar yang relatif stabil dibandingkan sifat fisik dinamis seperti kadar air dan bobot volume, tetapi dapat menunjukkan variasi spasial akibat perbedaan bahan induk, topografi, dan proses pembentukan tanah (Ito et al., 2023).

Tabel 2. Analisis Tekstur Tanah lokasi penelitian Areal Perkebunan Kelapa Sawit di Desa Aur Gading

Blok/Tahun	Tekstur			USDA Tekstur
	Pasir (%)	Debu (%)	Liat (%)	
P5/1 Th	70	29	1	Sandy Loam
F2/3 Th	71	28	1	Sandy Loam
B1/5 Th	77	21	1	Loamy Sand
N1/7 Th	49	46	4	Sandy Loam
P3/9 Th	50	46	4	Sandy Loam
R1/11 Th	55	41	4	Sandy Loam
M/13 Th	62	33	5	Sandy Loam
F/15 Th	69	29	2	Sandy Loam

Rendahnya kandungan liat (1–5%) menunjukkan bahwa variasi tekstur antarblok terutama dipengaruhi oleh perubahan proporsi pasir dan debu. Kondisi ini menyebabkan tanah cenderung memiliki pori makro yang relatif lebih banyak sehingga air lebih mudah bergerak, tetapi kemampuan menahan air relatif rendah. Oleh karena itu, kondisi kadar air menjadi faktor penting dalam interpretasi ketahanan penetrasi tanah. Penelitian Yu et al. (2024) menunjukkan bahwa *penetration resistance* dipengaruhi secara simultan oleh tekstur, bobot volume, dan kadar air tanah, sehingga ketahanan penetrasi tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan satu sifat tanah.

Dalam penelitian ini, dominasi kelas *Sandy Loam* pada hampir seluruh blok menunjukkan bahwa tekstur bukan merupakan faktor utama yang menjelaskan perbedaan *penetration resistance* antarumur tanaman. Perbedaan ketahanan penetrasi lebih tepat dikaitkan dengan perubahan bobot volume, kadar air, total ruang pori, bahan organik, dan riwayat pengelolaan tanah. Hal ini penting karena peningkatan pemadatan dapat meningkatkan hambatan mekanis terhadap pertumbuhan akar, terutama ketika tanah berada pada kondisi relatif kering (Yu et al., 2024).

Dengan demikian, tekstur tanah pada lokasi penelitian dapat dipandang sebagai karakteristik dasar yang relatif seragam dan stabil, sedangkan variasi *penetration resistance* antarlokasi lebih mencerminkan perubahan kondisi fisik

tanah dan riwayat pengelolaan. Dominasi tekstur *Sandy Loam* juga menunjukkan bahwa interpretasi ketahanan penetrasi perlu dilakukan bersama data bobot volume dan kadar air agar pengaruh pemadatan tanah terhadap lingkungan perakaran kelapa sawit dapat dijelaskan secara lebih tepat.

Ketahanan Penetrasi Tanah

Berdasarkan hasil analisis ragam pengaruh frekuensi pemupukan berpengaruh nyata terhadap ketahanan penetrasi tanah (Tabel 3). Hasil uji DMRT 5% menunjukkan adanya perbedaan KP antarkelompok umur. Nilai KP umumnya meningkat dari kelompok umur muda menuju kelompok umur 11, 13, dan 15 tahun. Kelompok F/15 Th menunjukkan nilai KP tertinggi pada hampir seluruh kedalaman, sedangkan kelompok umur muda menunjukkan nilai relatif rendah. Pada zona piringan, KP meningkat dari 14,16 kgF cm⁻² pada umur 1 tahun menjadi 28,21 kgF cm⁻² pada umur 15 tahun pada kedalaman 10 cm, dan dari 22,66 menjadi 34,56 kgF cm⁻² pada kedalaman 30 cm. Pada antarbarisan, KP meningkat dari 10,99 menjadi 21,98 kgF cm⁻² pada kedalaman 10 cm dan dari 20,17 menjadi 29,01 kgF cm⁻² pada kedalaman 30 cm.

Hasil uji DMRT 5% menunjukkan adanya perbedaan KP antarkelompok umur. Nilai KP umumnya meningkat dari kelompok umur muda menuju kelompok umur 11, 13, dan 15 tahun. Kelompok F/15 Th menunjukkan nilai KP tertinggi pada hampir seluruh kedalaman, sedangkan kelompok umur muda menunjukkan nilai relatif rendah. Pada zona piringan, KP meningkat dari 14,16 kgF cm⁻² pada umur 1 tahun menjadi 28,21 kgF cm⁻² pada umur 15 tahun pada kedalaman 10 cm, dan dari 22,66 menjadi 34,56 kgF cm⁻² pada kedalaman 30 cm. Pada antarbarisan, KP meningkat dari 10,99 menjadi 21,98 kgF cm⁻² pada kedalaman 10 cm dan dari 20,17 menjadi 29,01 kgF cm⁻² pada kedalaman 30 cm.

Tabel 3. Analisis pengukuran Ketahanan Penetrasi Tanah Areal Perkenunan Kelapa Sawit di Desa Aur Gading

Blok/ Tahun	KP Piringan (KgF/cm ²)			KP Antar Tajuk (KgF/cm ²)		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm
P5/1 Th	14,16 d	18,02 d	22,66 d	10,99 e	15,41 d	20,17 d
F2/3 Th	14,05 d	17,68 d	22,32 d	10,88 e	14,84 d	19,26 d
B1/5 Th	16,43 cd	19,49 cd	23,91 cd	13,03 d	16,66 d	21,30 cd
N1/7 Th	18,24 c	21,30 c	25,49 c	15,41 c	18,92 c	23,00 c
P3/9 Th	18,92 c	21,98 c	26,40 c	15,41 c	18,24 c	22,89 c
R1/11 Th	24,36 b	27,08 b	30,82 b	18,47 b	21,64 b	26,17 b
M/13 Th	27,19 a	29,57 a	33,20 a	19,49 b	22,43 b	26,40 b
F/15 Th	28,21 a	30,93 a	34,56 a	21,98 a	24,93 a	29,01 a

Ket : Angka-angka yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata menurut uji DMRT 5%

Peningkatan KP juga terlihat seiring bertambahnya kedalaman tanah. Nilai KP pada kedalaman 30 cm umumnya lebih tinggi dibandingkan kedalaman 10 dan 20 cm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lapisan tanah yang lebih dalam mempunyai hambatan mekanis yang lebih besar. Hal ini dapat berkaitan dengan meningkatnya kepadatan tanah, berkurangnya pengaruh bahan organik permukaan, serta perbedaan distribusi akar dan ruang pori secara vertikal. Oleh karena itu, kedalaman tanah perlu dipertimbangkan dalam interpretasi KP karena kondisi fisik tanah tidak seragam secara vertikal.

KP pada zona piringan secara konsisten lebih tinggi dibandingkan antarbarisan pada umur tanaman yang sama. Pola tersebut sejalan dengan BV piringan yang lebih tinggi serta TRP dan KA yang lebih rendah. Piringan merupakan zona yang relatif lebih intensif mengalami pembersihan vegetasi dan aktivitas pemeliharaan, sedangkan antarbarisan memperoleh masukan lebih besar dari vegetasi bawah, serasah, residu pelepah, dan aktivitas akar. Perbedaan kondisi tersebut diduga menyebabkan tanah antarbarisan relatif lebih gembur dan mempunyai hambatan penetrasi lebih rendah.

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 3, ketahanan penetrasi (KP) tanah menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya umur tanaman yang sekaligus merepresentasikan peningkatan riwayat frekuensi aplikasi pupuk anorganik. Peningkatan KP tersebut diikuti oleh peningkatan bobot volume (BV), penurunan total ruang pori (TRP) dan kadar air (KA), serta kecenderungan penurunan bahan organik (BO). Pola ini menunjukkan bahwa KP merupakan respons terhadap interaksi berbagai sifat fisika tanah, terutama BV, TRP, KA, BO, dan tekstur tanah. Dengan demikian, perubahan KP tidak dapat dijelaskan hanya oleh satu faktor. Alhai et al. (2021) dan Lardy et al. (2022) melaporkan bahwa BV dan KA merupakan faktor penting yang memengaruhi variasi KP tanah.

Peningkatan BV pada kelompok umur yang lebih tua diikuti oleh peningkatan KP. Pada zona piringan, BV meningkat dari $1,22 \text{ g cm}^{-3}$ pada umur 1 tahun menjadi $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ pada umur 15 tahun, sedangkan pada antarbarisan meningkat dari 1,15 menjadi $1,35 \text{ g cm}^{-3}$. Peningkatan BV menunjukkan bahwa tanah cenderung menjadi lebih padat sehingga ruang antarpartikel berkurang dan hambatan mekanis terhadap penetrasi meningkat. Hubungan ini didukung oleh Lardy et al. (2022) yang menunjukkan adanya hubungan kuat antara BV dan KP. Peningkatan BV pada penelitian ini diduga berkaitan dengan akumulasi aktivitas pengelolaan perkebunan, seperti pemeliharaan, pemanenan, pengendalian vegetasi, pemupukan, serta lalu lintas pekerja dan alat. Tekanan mekanis yang berlangsung berulang dapat menyebabkan penataan kembali partikel tanah dan meningkatkan kepadatan, terutama pada kondisi tanah yang relatif basah (Keller et al., 2019; Pulido-Moncada et al., 2021).

Hubungan umur tanaman dengan BV tergolong sangat kuat, dengan koefisien korelasi $r = 0,98$ pada zona piringan dan $r = 0,96$ pada antarbarisan. Namun, hubungan tersebut tidak dapat diinterpretasikan sebagai bukti bahwa peningkatan frekuensi pemupukan secara langsung menyebabkan peningkatan BV. Hal ini disebabkan umur tanaman dan frekuensi pemupukan meningkat secara bersamaan, sementara penelitian bersifat observasional. Oleh karena itu, perubahan BV lebih tepat dipandang sebagai hasil akumulasi riwayat pengelolaan dan perubahan kondisi tanah selama perkembangan tanaman.

Peningkatan BV selanjutnya diikuti oleh penurunan TRP. Pada zona piringan, TRP menurun dari 52,79% pada umur 1 tahun menjadi 44,50% pada umur 15 tahun, sedangkan pada antarbarisan menurun dari 55,41% menjadi 48,02%. Hubungan umur tanaman dengan TRP menunjukkan korelasi negatif yang sangat kuat ($r = -0,97$) pada kedua zona. Secara fisik, peningkatan kepadatan tanah menyebabkan ruang kosong di antara partikel berkurang sehingga total ruang pori menjadi lebih rendah (Rabot et al., 2018; Alaoui et al., 2018). Kondisi tersebut dapat meningkatkan hambatan mekanis tanah dan berkontribusi terhadap peningkatan KP.

Perbedaan antarzona juga menunjukkan bahwa TRP pada antarbarisan secara konsisten lebih tinggi dibandingkan zona piringan. Pada umur 1 tahun, TRP antarbarisan mencapai 55,41%, dibandingkan 52,79% pada piringan, sedangkan pada umur 15 tahun masing-masing sebesar 48,02% dan 44,50%. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanah antarbarisan relatif mampu mempertahankan struktur dan ruang pori yang lebih baik. Keberadaan vegetasi bawah, serasah, residu pelepah, dan aktivitas akar diduga berperan dalam mempertahankan struktur tanah serta pembentukan ruang pori (Hassler et al., 2022). Sebaliknya, piringan merupakan zona yang lebih intensif dibersihkan dan dipelihara sehingga masukan bahan organik dari vegetasi bawah relatif lebih terbatas.

Bahan organik menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan BV dan TRP. Pada zona piringan, BO berkisar 2,19–4,97%, sedangkan pada antarbarisan berkisar 2,34–3,64%. Kandungan BO pada piringan meningkat dari 3,04% pada umur 1 tahun menjadi 4,97% pada umur 5 tahun, kemudian menurun pada umur berikutnya dengan beberapa fluktuasi. Pada antarbarisan, BO cenderung menurun dari 3,64% pada umur 1 tahun menjadi 2,34% pada umur 15 tahun. Pola tersebut menunjukkan bahwa BO merupakan komponen tanah yang dinamis dan dipengaruhi oleh keseimbangan antara masukan dan kehilangan bahan organik (Poepflau et al., 2021).

Kandungan BO yang relatif tinggi pada antarbarisan pada beberapa kelompok umur diduga berkaitan dengan keberadaan vegetasi bawah, serasah, dan residu tanaman yang memberikan masukan bahan organik ke tanah. Sebaliknya, pengelolaan piringan yang lebih intensif dapat membatasi sumber bahan organik dari vegetasi bawah. Bahan organik berperan dalam pembentukan dan stabilisasi agregat, peningkatan ruang pori, serta pengurangan kepadatan tanah (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Namun, karena BO dalam penelitian ini berfluktuasi, hubungan BO dengan umur tanaman maupun KP tidak menunjukkan pola linear. Pengaruh BO terhadap KP lebih tepat dipahami melalui perannya dalam memperbaiki agregasi, BV, dan distribusi ruang pori tanah.

Hasil penelitian menunjukkan adanya kecenderungan hubungan negatif antara KA dan KP. Pada zona piringan, KA menurun dari 21,15% pada umur 1 tahun menjadi 12,92% pada umur 15 tahun, sementara KP pada kedalaman 10 cm meningkat dari 14,16 menjadi $28,21 \text{ kgF cm}^{-2}$. Pola yang sama ditemukan pada antarbarisan, dengan penurunan KA dari 22,65% menjadi 13,33% dan peningkatan KP dari 10,99 menjadi $21,98 \text{ kgF cm}^{-2}$.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tanah yang mempunyai kadar air lebih rendah cenderung memiliki kekuatan mekanis lebih tinggi sehingga membutuhkan gaya yang lebih besar untuk ditembus penetrometer. Sebaliknya, peningkatan kadar air dapat menurunkan kekuatan mekanis tanah dan menyebabkan KP lebih rendah. Alhai et al. (2021) menunjukkan bahwa KA merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi KP, meskipun hubungan keduanya dapat bersifat nonlinier.

Penurunan KA dalam penelitian ini juga berkaitan dengan peningkatan BV dan penurunan TRP. Pada tanah yang lebih padat, distribusi ruang pori berubah dan kemampuan tanah dalam menyimpan serta menyediakan air dapat menurun. Kondisi tanah yang semakin kering kemudian meningkatkan hambatan mekanis terhadap penetrasi. Tuzzin De Moraes et al. (2024) pada Oxisol menunjukkan bahwa KP dapat dimodelkan sebagai fungsi nonlinier dari BV dan KA, dengan KP meningkat pada BV yang lebih tinggi dan menurun pada KA yang lebih tinggi. Dengan demikian, peningkatan KP pada kelompok tanaman yang lebih tua kemungkinan merupakan hasil interaksi antara peningkatan kepadatan tanah dan penurunan kadar air.

Zona antarbarisan memiliki KA lebih tinggi dan KP lebih rendah dibandingkan zona piringan. Perbedaan ini diduga berkaitan dengan keberadaan vegetasi bawah, serasah, residu pelepah, dan aktivitas akar yang membantu melindungi permukaan tanah dan mempertahankan kelembapan. Pengelolaan penutup tanah diketahui dapat meningkatkan kemampuan tanah mempertahankan air serta memperbaiki beberapa sifat fisiknya (Ding et al., 2024). Namun, karena penutupan vegetasi, evaporasi, dan jumlah residu tidak diukur secara langsung dalam penelitian ini, mekanisme tersebut perlu dipandang sebagai dugaan yang mendukung interpretasi hasil, bukan sebagai hubungan sebab-akibat yang telah dibuktikan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan KP berkaitan erat dengan peningkatan BV serta penurunan TRP dan KA. Tanah yang semakin padat dan relatif kering mempunyai hambatan mekanis yang lebih besar terhadap penetrasi. Oleh karena itu, KP sebaiknya tidak digunakan sebagai indikator tunggal kondisi fisik tanah, tetapi diinterpretasikan bersama BV, TRP, KA, BO, tekstur, kedalaman, dan zona pengelolaan.

Tanah pada lokasi penelitian didominasi fraksi pasir sebesar 49–77%, debu 21–46%, dan liat 1–5%. Berdasarkan klasifikasi USDA, sebagian besar blok termasuk kelas *Sandy Loam*, sedangkan Blok B1/5 Th termasuk *Loamy Sand*. Dominasi pasir dan rendahnya kandungan liat menunjukkan bahwa tanah mempunyai tekstur relatif kasar, yang memengaruhi distribusi ruang pori, pergerakan air, aerasi, dan respons terhadap perubahan kadar air.

Tekstur merupakan sifat tanah yang relatif stabil dibandingkan BV dan KA. Oleh karena itu, dominasi kelas *Sandy Loam* pada sebagian besar lokasi menunjukkan bahwa variasi KP antarkelompok umur lebih mungkin berkaitan dengan perubahan BV, TRP, KA, BO, dan riwayat pengelolaan daripada perubahan tekstur. Meskipun demikian, tekstur tetap berperan dalam menentukan respons tanah terhadap pemadatan dan perubahan kadar air. Yu et al. (2024) menunjukkan bahwa KP dipengaruhi secara simultan oleh tekstur, BV, dan KA.

Dengan demikian, hasil penelitian memperlihatkan bahwa peningkatan KP pada tanaman yang lebih tua terutama berkaitan dengan perubahan kondisi fisik tanah, yaitu peningkatan BV dan penurunan TRP serta KA. Kondisi tersebut lebih jelas pada zona piringan dibandingkan antarbarisan. Sementara itu, BO menunjukkan pola fluktuatif dan tekstur relatif seragam sehingga kedua faktor tersebut tidak menunjukkan hubungan linear yang konsisten dengan KP.

KESIMPULAN

Peningkatan umur tanaman yang merepresentasikan riwayat frekuensi pemupukan anorganik 2–30 kali menunjukkan kecenderungan peningkatan ketahanan penetrasi dan bobot volume, serta penurunan total ruang pori dan kadar air. Ketahanan penetrasi semakin tinggi dengan bertambahnya kedalaman dan secara konsisten lebih tinggi pada zona piringan dibandingkan antarbarisan. Pada umur 15 tahun, ketahanan penetrasi tertinggi mencapai 28,21 kgF cm⁻² pada kedalaman 10 cm dan 34,56 kgF cm⁻² pada kedalaman 30 cm di zona piringan. Kondisi tersebut berkaitan dengan meningkatnya kepadatan tanah dan menurunnya kadar air serta ruang pori, sehingga berpotensi meningkatkan hambatan perkembangan akar. Tekstur tanah didominasi *Sandy Loam*, sedangkan bahan organik menunjukkan pola fluktuatif. Secara keseluruhan, perubahan ketahanan penetrasi mencerminkan interaksi antara umur tanaman, riwayat pemupukan, sifat fisik tanah, dan pengelolaan perkebunan. Karena penelitian bersifat observasional, peningkatan ketahanan penetrasi tidak dapat dikaitkan secara kausal dengan frekuensi pemupukan anorganik saja.

DAFTAR PUSTAKA

- Alhai, D. P., Syakur, S., & Basri, H. (2021). Ketahanan penetrasi tanah pada penggunaan lahan hortikultura di Saree Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 6(4), 680–690.
- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., & Blöschl, G. (2018). Does compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, 557, 631–642.
- Bengough, A. G., et al. (2019). Root elongation, strengthening and penetrating ability in compacted soils. *Plant and Soil*, 445(1), 199–211.
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527–1576.
- Colombi, T., Torres-Guerrero, R., Kirchgessner, N., Walter, A., & Keller, T. (2018). Penetration resistance along a soil profile determines root growth and crop yield. *Geoderma*, 318, 91–101.
- Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Agronomy*, 9(6), 312.
- Darras, K. F., et al. (2021). Canopy cover and understory vegetation buffer microclimate in oil palm plantations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108486.
- Ding, W., Zvomuya, F., Cao, M., Wu, Y., Liu, Z., & He, H. (2024). Ground cover management improves orchard soil moisture content: A global meta-analysis. *Journal of Hydrology*, 633, 130710.
- Dislich, R., et al. (2017). A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system; *Biological Reviews*, 92(3), 1539–1569.

- Formaglio, G., et al. (2021). Nutrient management affects soil physical and chemical degradation in oil palm smallholder plantations. *Soil Use and Management*, 37(4), 812–824.
- Gao, W., et al. (2022). Combined effects of soil bulk density and matric potential on soil mechanical strength and root penetration. *Soil and Tillage Research*, 215, 105218.
- Gaveau, D. L. A., et al. (2022). Long-term impacts of land-use management on soil physical degradation in Southeast Asian oil palm landscapes. *Global Environmental Change*, 73, 102480.
- Guillaume, T., Kotowska, M. M., Hertel, D., & Kuzyakov, Y. (2018). Carbon costs and benefits of oil palm expansion in Central Sumatra. *Ecology Letters*, 21(5), 663–674.
- Hassler, E., Corre, M. D., Kurniawan, S., et al. (2022). *Mulching with pruned fronds promotes the internal soil N cycling and soil fertility in a large-scale oil palm plantation*. Biogeochemistry, 159, 135–154. DOI: 10.1007/s10533-021-00798-4.
- Hidayat, F., Pane, R. D. P., Sapalina, F., Listia, E., Koga, T., Winarna, Lubis, M. E. S., Oshiro, M., Sakai, K., Utami, S. N. H., & Tashiro, Y. (2024). Long-term application of organic matter improves soil properties and plant growth-promoting bacteria in soil communities of oil palm plantation. *Soil Science and Plant Nutrition*, 70(5–6), 393–405. DOI: 10.1080/00380768.2024.2380881.
- Ito, R., Yanai, J., & Nakao, A. (2023). *Interactive effect of parent material and topography on spatial variability of paddy soil material characteristics in the alluvial plain*.
- Jakhar, G. L., Sharma, P., Sharma, K. R., Sharma, V., Abrol, V., Sharma, M., & Sharma, N. (2019). Soil bulk density as a soil physical health indicator under different land use systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(4), 326–333.
- Keller, T., et al. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhances subsoil compaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(24), 11549–11554.
- Lardy, J. M., DeSutter, T. M., Daigh, A. L. M., Meehan, M. A., & Staricka, J. A. (2022). Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. *Agricultural & Environmental Letters*, 7(2), e20096. DOI: 10.1002/ael2.20096. (ResearchGate)
- Manning, P., et al. (2020). Long-term effects of inorganic fertilization on soil physical architecture in tropical agroecosystems. *Geoderma*, 361, 114061. [Perlu verifikasi kembali karena data bibliografis belum berhasil dipastikan dari sumber yang tersedia.]
- Mossadeghi-Björklund, M., et al. (2019). Pore space architecture control on air and water transport in compacted soils. *Soil and Tillage Research*, 191, 260–271.
- Nelson, P. N., et al. (2020). Soil management in oil palm plantations: Balancing yield and environmental sustainability. *Agroforestry Systems*, 94(4), 1205–1219.
- Poeplau, C., Don, A., & Six, J. (2021). Soil organic carbon stocks and turnover in tropical agricultural soils: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 27(8), 1630–1644.
- Prabowo, N. E., Foster, H. L., Nelson, P. N., et al. (2023). *Potassium and magnesium uptake and fertiliser use efficiency by oil palm at contrasting sites in Sumatra, Indonesia*. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 126, 263–278. DOI: 10.1007/s10705-023-10289-7.
- Pulido-Moncada, M., et al. (2021). Mechanical stresses in agricultural soils: Temporal dynamics of soil compaction under field traffic. *Soil and Tillage Research*, 205, 104781.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review of characterization and quantification metrics. *Geoderma*, 314, 122–137.
- Rahman, N., Giller, K. E., de Neergaard, A., Magid, J., van de Ven, G., & Bruun, T. B. (2021). *The effects of management practices on soil organic carbon stocks of oil palm plantations in Sumatra, Indonesia*. Journal of Environmental Management, 278, 111446. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111446.
- Raza, S., et al. (2021). Root growth response to mechanical resistance and soil aeration status in tropical plantation crops. *Plant, Cell & Environment*, 44(9), 2980–2993.
- Rounsevell, M. D. A., et al. (2021). Interactions between agricultural management, soil structure, and hydrology in tropical agro-ecosystems. *Catena*, 198, 105021. [Disarankan verifikasi judul dan penulis lengkap sebelum dimasukkan ke naskah final.]
- Septiaji, E. D., Bimasri, J., & Amin, Z. (2024). Karakteristik sifat fisik tanah Ultisol berdasarkan tingkat kemiringan lereng. *Agroradix: Jurnal Ilmu Pertanian*, 7(2), 41–49.
- Six, J., & Paustian, K. (2019). Aggregate dynamics and soil organic matter storage in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 83(4), 981–995.
- Tandon, P., et al. (2019). Litterfall dynamics and organic carbon inputs across different management zones in mature oil palm plantations. *Biotropica*, 51(3), 345–356.

- Thoumazeau, A., Mettauer, R., Turinah, Junedi, H., Baron, V., Chéron-Bessou, C., & Ollivier, J. (2024). Effects of fertilization practices and understory on soil health and oil palm performances in smallholdings: An Indonesian case study. *Agricultural Systems*, 213, 103802. DOI: 10.1016/j.agsy.2023.103802.
- Tuzzin De Moraes, M., et al. (2024). The impacts of cover crop mixes on the penetration resistance model of an Oxisol under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 242, 106138. DOI: 10.1016/j.still.2024.106138.
- Whalley, W. R., et al. (2019). Penetration resistance in soil: Dependence on bulk density, water content and matric suction. *European Journal of Soil Science*, 70(5), 1011–1022.
- Yu, et al. (2024). The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, 29, 100838. DOI: 10.1016/j.rhisph.2023.100838.