

Analisis Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Lahan Aplikasi Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) di Perkebunan Kelapa Sawit Kalimantan Barat

Ahmad Khairul Rifki Sitorus, Dian Pratama Putra^{*)}, Neny Andayani

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Stiper, Yogyakarta.

Jl. Nangka II, Krodan, Maguwoharjo, Kec. Depok, Kabupaten Sleman,

Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

^{*)}E-mail korespondensi: dianswn@instiperjogja.ac.id

ABSTRACT

Palm oil mills generate palm oil mill effluent (POME, locally LCPKS) and empty fruit bunches (EFB, locally tandan kosong kelapa sawit or TKKS), two by-products that estates return to the field as organic amendments. Field comparisons of both materials on the same estate remain scarce in West Kalimantan. This study measured soil physical and chemical properties together with fresh fruit bunch (FFB) production on blocks receiving POME, EFB, or no organic amendment at Seriang Estate, West Kalimantan. The design was observational. The estate had assigned the treatments before sampling began, so treatment allocation was not randomised and no baseline soil data existed. We sampled nine blocks, three per treatment, at 0–30 cm and 30–60 cm, giving 18 samples; each treatment mean therefore rests on six observations drawn from three blocks. Laboratory analyses ran at Institut Pertanian Stiper Yogyakarta and Jungle Point Laboratory between 30 January and 26 February 2025. Production and fertiliser records covered 2021 to 2024. Soil data were analysed by two-way ANOVA with treatment and depth as factors and block as the replicate unit, followed by Duncan Multiple Range Test at the 5% level. Neither POME nor EFB changed any measured soil property. Cation exchange capacity showed the widest gap between means, averaging 90.87 cmol(+)/kg under EFB against 115.22 in the control and 113.42 under POME, but the two-way model did not resolve that gap as significant ($p = 0.111$). FFB yields did not differ among treatments from 2021 to 2023. Block area, palm stand and fertiliser realisation differed systematically among treatments, so the lower 2024 yield on EFB blocks cannot be attributed to the amendment. Both materials recycle mill nutrients back to the field and supplement mineral fertiliser without replacing it.

Keywords: Bulk Density; Cation Exchange Capacity; Empty Fruit Bunches; Palm Oil Mill Effluent; Soil Organic Amendment

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) menjadi sumber utama minyak nabati Indonesia, baik untuk minyak goreng maupun biodiesel. Penanaman komersial dimulai pada dekade 1970-an dan meluas pesat sejak 1980-an, sebagian besar melalui konversi lahan hutan. Indonesia kini memimpin produksi minyak sawit dunia dengan sentra perkebunan di Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2023).

Subsektor kelapa sawit menyumbang devisa besar bagi Indonesia. Direktorat Jenderal Perkebunan (2023) mencatat luas areal perkebunan kelapa sawit nasional mencapai 16,83 juta hektar dengan produksi minyak sawit 46,82 juta ton, naik dari sekitar 11 juta hektar pada 2015. Kalimantan Barat termasuk provinsi dengan areal terluas. Kenaikan volume produksi membawa konsekuensi berupa bertambahnya limbah pabrik. Limbah padat mencakup tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang, serabut, dan lumpur, sedangkan limbah cair berasal dari proses ekstraksi minyak dan dikenal sebagai limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) atau *palm oil mill effluent* (POME) (Sitorus & Mardina, 2020). Di lingkungan kebun, TKKS lazim disebut janjang kosong; naskah ini memakai istilah TKKS secara konsisten.

Pemupukan menyerap 40–60% biaya pemeliharaan kebun kelapa sawit. Bahan organik hasil daur ulang limbah pabrik menawarkan jalan untuk menekan biaya tersebut sekaligus mengembalikan hara ke lahan. Sintesis atas 19 percobaan lapangan menunjukkan bahwa aplikasi TKKS sebagai mulsa, kompos, maupun biochar menaikkan pertumbuhan dan hasil tanaman rata-rata 49,2% dibanding tanah tanpa pembenah (Adu dkk., 2022).

Bahan organik memasok nitrogen, fosfor, dan kalium sekaligus menambah muatan tukar pada kompleks koloid tanah. Populasi mikrofauna dan makrofauna tanah ikut naik, dan aktivitasnya mempercepat dekomposisi serta siklus hara. Pada sisi fisik, aplikasi bahan organik memperbaiki kemantapan agregat dan menaikkan kapasitas menahan air (Tao dkk., 2018).

LCPKS termasuk limbah yang menuntut penanganan khusus karena daya rusaknya terhadap lingkungan tinggi. Setiap ton minyak sawit yang diproduksi meninggalkan 5–7 ton LCPKS dengan kandungan *chemical oxygen demand* (COD) dan *biochemical oxygen demand* (BOD) yang tinggi serta bau menyengat. Pembuangan tanpa pengolahan mencemari air permukaan dan air tanah di sekitar pabrik (Paramitadevi & Rahmatullah, 2017).

Lebih dari 85% pabrik kelapa sawit di Indonesia mengolah limbah cairnya melalui sistem kolam. Sistem ini menuntut lahan luas dan waktu retensi hidrolik yang panjang, serta melepaskan emisi gas rumah kaca (Septiariva dkk., 2020). Teknologi alternatif seperti proses oksidasi lanjutan menurunkan kadar pencemar lebih efektif, tetapi sebagian besar masih berhenti pada skala laboratorium (Saeed dkk., 2016). Karena itu banyak kebun memilih mengalirkan LCPKS yang telah melewati rangkaian kolam ke lahan sebagai sumber hara, bukan membuangnya ke badan air.

TKKS menjadi limbah padat terbesar dari industri kelapa sawit dan pemanfaatannya masih terbatas. Cangkang sudah lama dibakar sebagai bahan bakar boiler, sementara TKKS lebih sering ditumpuk di sekitar pabrik, dipakai sebagai penimbun tanah, atau dikomposkan dalam jumlah kecil (Gusman, 2016). Tumpukan yang dibiarkan menambah beban sampah organik dan melepaskan gas hasil pembusukan, padahal kandungan haranya masih tinggi (Anyaotha dkk., 2018).

Setiap pabrik dituntut mengolah limbahnya secara terpadu dan berkelanjutan. TKKS menyumbang 23–30% dari bobot tandan buah segar (TBS) yang diolah dan mengandung hara yang cukup untuk menjadikannya bahan pembenah tanah maupun sumber pupuk organik (Susilawati & Supijatno, 2015). Percobaan jangka panjang di Malaysia dan Sumatera memperlihatkan bahwa aplikasi TKKS selama sepuluh sampai lima belas tahun menaikkan pH serta kadar K, Ca, dan Mg tanah, dan menurunkan kepadatan massa pada lapisan atas (Abu-Bakar dkk., 2011; Tao dkk., 2018).

Perbandingan langsung antara LCPKS dan TKKS pada kebun yang sama masih jarang dilaporkan, khususnya di Kalimantan Barat. Sebagian besar penelitian sebelumnya menguji salah satu bahan secara terpisah (Pohan dkk., 2022), sementara sintesis lintas percobaan menunjukkan besarnya respons bergantung pada bentuk bahan, dosis, dan lama aplikasi (Adu dkk., 2022). Penelitian ini menganalisis sifat fisik dan kimia tanah serta produksi TBS pada lahan yang menerima LCPKS, TKKS, dan tanpa aplikasi organik di PT. Buana Tunas Sejahtera, Seriang Estate, Kalimantan Barat. Perlakuan sudah berjalan atas keputusan perusahaan sebelum pengamatan dimulai, sehingga kajian ini bersifat observasional dan tidak memuat randomisasi penempatan perlakuan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berbentuk survei observasional pada lahan kelapa sawit menghasilkan yang telah menerima perlakuan organik secara rutin dari perusahaan. Perusahaan menetapkan blok mana yang menerima LCPKS, TKKS, atau tanpa aplikasi organik sebelum penelitian dimulai, sehingga peneliti tidak mengacak penempatan perlakuan. Pengambilan sampel tanah menggunakan metode *stratified* dengan tiga ulangan, dan setiap ulangan diwakili satu blok yang berbeda. Sembilan blok masuk dalam pengamatan: tiga blok kontrol (J16–J18), tiga blok TKKS (K17–K19), dan tiga blok LCPKS (M16–M18). Setiap blok disampel pada dua kedalaman, yaitu 0–30 cm dan 30–60 cm, sehingga terkumpul 18 sampel tanah. Blok berperan sebagai satuan ulangan, sedangkan kedalaman berperan sebagai faktor kedua yang bersarang di dalam blok.

Perlakuan yang dikaji terdiri atas: (1) kontrol, yaitu lahan tanpa aplikasi bahan organik tambahan; (2) aplikasi TKKS dengan dosis rata-rata 50–60 ton/ha/tahun yang dihamparkan di gawangan mati; dan (3) aplikasi LCPKS dengan dosis rata-rata 400–450 m³/ha/aplikasi

yang dialirkan secara *flatbed*. Perusahaan menjalankan kedua program aplikasi sejak tahun [dilengkapi penulis], sehingga lama paparan bahan organik sampai saat pengambilan sampel mencapai [dilengkapi penulis] tahun. Luas blok dan jumlah pokok berbeda antar perlakuan: blok kontrol mencakup 24–28 ha dengan 3.199–3.672 pokok, blok TKKS 27–28 ha dengan 3.608–3.778 pokok, dan blok LCPKS 29–30 ha dengan 3.900–4.050 pokok. Perbedaan tersebut berada di luar kendali peneliti dan diperlakukan sebagai faktor perancu pada pembahasan produksi. Variabel sifat fisik tanah yang diamati meliputi tekstur, kepadatan massa (*bulk density*, g/cm³), porositas (%), kapasitas menahan air, dan warna tanah menurut *Munsell Soil Color Chart*. Variabel sifat kimia meliputi pH (H₂O), Kapasitas Tukar Kation (KTK, cmol(+)/kg), N-total (%), P-tersedia (mg/kg), dan K-dd (cmol(+)/kg). Data produksi TBS (ton/ha/tahun) dan realisasi pemupukan (ton/blok/tahun) berasal dari catatan perusahaan periode 2021–2024.

Analisis sifat fisik tanah mengikuti prosedur baku. Tekstur ditetapkan dengan metode hidrometer dan diklasifikasikan menurut segitiga tekstur USDA. Kepadatan massa ditetapkan dengan metode ring sampel secara gravimetri, sedangkan porositas dihitung dari hubungan antara kepadatan massa dan kepadatan partikel dengan rumus porositas = $(1 - \text{kepadatan massa/kepadatan partikel}) \times 100\%$. Warna tanah ditentukan menggunakan buku *Munsell Soil Color Chart*. Analisis sifat kimia mengikuti petunjuk teknis analisis kimia tanah (Balai Penelitian Tanah, 2009): pH diukur dengan pH meter pada perbandingan tanah dan air 1:2,5; N-total ditetapkan dengan metode Kjeldahl; P-tersedia dengan metode Bray I yang sesuai untuk tanah masam; KTK dengan ekstraksi amonium asetat (NH₄OAc) 1 N pada pH 7; dan K-dd dari ekstrak yang sama menggunakan *flame photometer*. Hasil analisis dikelompokkan berdasarkan kriteria penilaian sifat kimia tanah menurut Balai Penelitian Tanah (2009). Kapasitas menahan air diukur secara gravimetri, tetapi hasilnya dilaporkan dalam kelas deskriptif mengikuti kriteria yang sama, sehingga variabel ini tidak masuk ke dalam analisis ragam.

Pengambilan sampel menggunakan bor tanah. Setiap sampel dimasukkan ke dalam kantong plastik dan diberi label perlakuan, kedalaman, nama blok, dan ulangan. Analisis laboratorium berlangsung di Institut Pertanian Stiper Yogyakarta dan Jungle Point Laboratory pada 30 Januari sampai 26 Februari 2025. Data sifat fisik dan kimia tanah dianalisis dengan ANOVA dua arah yang menempatkan perlakuan dan kedalaman sebagai faktor serta blok sebagai satuan ulangan. Karena kedua kedalaman berasal dari blok yang sama, model mengikuti struktur petak terbagi: pengaruh perlakuan diuji terhadap kuadrat tengah galat blok dalam perlakuan (db = 2 dan 6), sedangkan pengaruh kedalaman dan interaksinya diuji terhadap kuadrat tengah galat sisa (db = 1 dan 6 serta db = 2 dan 6). Uji lanjut *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf 5% diterapkan bila ANOVA menunjukkan beda nyata. Data

produksi TBS dianalisis terpisah untuk setiap tahun menggunakan ANOVA satu arah dengan blok sebagai ulangan ($n = 3$ per perlakuan).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menganalisis sifat fisik dan kimia tanah pada tiga kelompok blok, yaitu Blok J (kontrol tanpa aplikasi), Blok K (aplikasi TKKS), dan Blok M (aplikasi LCPKS), pada dua kedalaman tanah (0–30 cm dan 30–60 cm). Data produksi TBS dan realisasi pemupukan selama 2021–2024 melengkapi penilaian terhadap produktivitas kebun. Hasil selengkapnya tersaji pada tabel berikut.

Tabel 1. Sifat Fisik Tanah pada Lahan Aplikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS), dan Kontrol (tanpa aplikasi) di PT. Buana Tunas Sejahtera, Seriang Estate, Kalimantan Barat

Blok	Kedalaman	Tekstur tanah	Kepadatan Massa Tanah (g/cm ³)	Porositas Tanah (%)	Kapasitas Menahan Air	Warna Tanah
J16	0 - 30 cm	Pasir Berlempung	1,389 s	77,34 t	Sedang	Abu-abu gelap
J16	30 - 60 cm	Pasir Berlempung	1,338 s	81,12 t	Sedang	Abu-abu gelap
J17	0 - 30 cm	Lempung Berpasir	1,39 s	77,81 t	Sedang	Coklat pucat
J17	30 - 60 cm	Lempung Berpasir	1,775 t	63,34 t	Sedang	Abu-abu
J18	0 - 30 cm	Pasir Berlempung	1,566 t	68,77 t	Sedang	Coklat keabu-abuan
J18	30 - 60 cm	Pasir Berlempung	1,43 t	73,4 t	Sedang	Abu-abu
K17	0 - 30 cm	Lempung Berpasir	1,683 t	70,36 t	Sedang	Kuning
K17	30 - 60 cm	Lempung Berpasir	1,365 s	73,27 t	Sedang	Kuning kecoklatan
K18	0 - 30 cm	Lempung Berpasir	1,657 t	71,72 t	Sedang	Abu-abu
K18	30 - 60 cm	Lempung Berpasir	1,387 s	83,13 t	Lambat	Abu-abu
K19	0 - 30 cm	Lempung Berpasir	1,407 s	79,57 t	Sedang	Abu-abu gelap
K19	30 - 60 cm	Lempung Berpasir	1,666 t	73,8 t	Sedang	Abu-abu muda
M16	0 - 30 cm	Lempung Berpasir	1,48 t	73,71 t	Lambat	Abu-abu
M16	30 - 60 cm	Lempung Berpasir	1,8 t	68,16 t	Sedang	Abu-abu muda
M17	0 - 30 cm	Lempung Berpasir	1,454 t	69,98 t	Lambat	Coklat kecoklatan
M17	30 - 60 cm	Lempung Berpasir	1,408 s	78,24 t	Sedang	Coklat kecoklatan
M18	0 - 30 cm	Lempung Berpasir	1,26 r	69,12 t	Sedang	Coklat
M18	30 - 60 cm	Lempung Berpasir	1,422 t	74,7 t	Sedang	Coklat

Keterangan: r : rendah t : tinggi s : sedang

Tekstur tanah pada ketiga kelompok blok didominasi lempung berpasir dan pasir berlempung, ditetapkan dengan metode hidrometer dan diklasifikasikan menurut sistem USDA (Balai Penelitian Tanah, 2009). Kepadatan massa berkisar 1,26–1,80 g/cm³, tergolong normal untuk tanah mineral bervegetasi kelapa sawit. Porositas berada pada kisaran 63,34–83,13%, seluruhnya di atas 50%. Kapasitas menahan air umumnya masuk kelas sedang, dengan kelas lambat muncul pada satu blok TKKS (K18) dan dua blok LCPKS (M16 dan M17). Warna tanah bervariasi dari abu-abu gelap sampai coklat kekuningan. Sebaran nilai antar blok tidak memisahkan ketiga perlakuan secara jelas, dan pengujian statistiknya disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 5.

Tabel 2. Sifat Kimia Tanah pada Lahan Aplikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS), dan Kontrol (tanpa aplikasi) di PT. Buana Tunas Sejahtera, Seriang Estate, Kalimantan Barat

Blok	Kedalaman	pH	Kapasitas Tukar Kation (cmol(+)/kg)	N (%)	P (mg/kg)	K (cmol(+)/kg)
J16	0 - 30 cm	4,5 m	116,55 st	0,155 r	227,38 st	0,486 r
J16	30 - 60 cm	4,3 sm	118,32 st	0,224 s	26,03 s	0,384 r
J17	0 - 30 cm	4,8 m	114,57 st	0,18 r	17,44 r	1,304 t
J17	30 - 60 cm	4,7 m	93 st	0,189 r	405,68 st	4,450 st
J18	0 - 30 cm	5 m	132,52 st	0,234 s	197,11 st	1,151 t
J18	30 - 60 cm	3,6 sm	116,4 st	0,206 r	688,44 st	4,015 st
K17	0 - 30 cm	4,5 m	73,99 st	0,118 r	25,95 s	0,691 s
K17	30 - 60 cm	4,5 m	81,24 st	0,131 r	31,93 s	0,588 s
K18	0 - 30 cm	4,5 m	84,27 st	0,149 r	344,5 st	2,148 t
K18	30 - 60 cm	5,1 m	102,86 st	0,226 s	795,07 st	8,056 t
K19	0 - 30 cm	4,1 sm	130,44 st	0,244 s	316,12 st	3,581 t
K19	30 - 60 cm	4,8 m	72,43 st	0,128 r	246,5 st	2,864 t
M16	0 - 30 cm	4,7 m	106,14 st	0,203 r	357,05 st	3,299 st
M16	30 - 60 cm	4,5 m	95,04 st	0,162 r	483,51 st	1,407 t
M17	0 - 30 cm	4,5 m	125,66 st	0,202 r	38,41 s	0,153 sr
M17	30 - 60 cm	4,4 sm	136,68 st	0,252 s	316,44 st	1,228 t
M18	0 - 30 cm	4,2 sm	111,12 st	0,181 r	64,3 t	0,921 s
M18	30 - 60 cm	4,4 sm	105,91 st	0,255 s	30,8 s	0,384 sr

Keterangan:

sr : sangat rendah s : sedang st : sangat tinggi
 r : rendah t : tinggi m : masam
 sm : sangat masam

Nilai pH tanah pada ketiga kelompok blok tergolong masam, berkisar 3,6–5,1. KTK berada pada kisaran 72,43–136,68 cmol(+)/kg, dengan nilai terendah pada blok TKKS (K19, 30–60 cm) dan tertinggi pada blok LCPKS (M17, 30–60 cm). Kandungan N-total rendah sampai sedang, yaitu 0,118–0,255%. P-tersedia menyebar sangat lebar, dari 17,44 sampai 795,07 mg/kg, dan nilai tertinggi muncul pada blok TKKS (K18, 30–60 cm). K-dd berkisar 0,153–8,056 cmol(+)/kg dengan puncak pada blok yang sama.

Tabel 3. Rerata Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Lahan Aplikasi TKKS, LCPKS, dan Kontrol beserta Hasil Uji Lanjut DMRT

Parameter	Perlakuan (Blok)		
	Kontrol	TKKS	LCPKS
Kepadatan Massa Tanah (g/cm ³)	1,48 a	1,52 a	1,47 a
Porositas Tanah (%)	73,63 a	75,30 a	72,31 a
pH Tanah	4,48 a	4,58 a	4,45 a
KTK (cmol(+)/kg)	115,22 a	90,87 a	113,42 a
N-total (%)	0,19 a	0,16 a	0,20 a
P-tersedia (mg/kg)	260,34 a	293,34 a	215,08 a
K-dd (cmol(+)/kg)	1,97 a	2,99 a	1,23 a

Keterangan: Angka pada baris yang sama yang diikuti huruf sama menunjukkan tidak berbeda nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%. Setiap nilai merupakan rerata enam pengamatan (3 blok × 2 kedalaman). Pengujian menggunakan ANOVA dua arah dengan perlakuan dan kedalaman sebagai faktor serta blok sebagai satuan ulangan; ringkasan uji F disajikan pada Tabel 5.

Sebaran data setiap parameter dilengkapi dengan statistik deskriptif pada Tabel 4, yang memuat rerata, simpangan baku (SD), dan koefisien keragaman (KK). Nilai KK yang besar menandakan keragaman antar titik pengamatan yang tinggi. P-tersedia dan K-dd mencatat KK di atas 90% pada ketiga perlakuan, sedangkan porositas dan kepadatan massa berada di bawah 13%.

Tabel 4. Statistik Deskriptif (Rerata, Simpangan Baku, dan Koefisien Keragaman) Sifat Fisik dan Kimia Tanah pada Lahan Aplikasi TKKS, LCPKS, dan Kontrol

Parameter	Kontrol	TKKS	LCPKS
Kepadatan massa (g/cm ³)	1,48 ± 0,16 (10,8%)	1,52 ± 0,16 (10,5%)	1,47 ± 0,18 (12,2%)
Porositas (%)	73,63 ± 6,59 (8,9%)	75,30 ± 4,96 (6,6%)	72,31 ± 3,89 (5,4%)
pH	4,48 ± 0,50 (11,2%)	4,58 ± 0,34 (7,4%)	4,45 ± 0,16 (3,6%)
KTK (cmol(+)/kg)	115,22 ± 12,70 (11,0%)	90,87 ± 22,23 (24,5%)	113,42 ± 15,12 (13,3%)
N-total (%)	0,19 ± 0,03 (15,8%)	0,16 ± 0,05 (31,3%)	0,20 ± 0,04 (20,0%)
P-tersedia (mg/kg)	260,34 ± 254,31 (97,7%)	293,34 ± 281,74 (96,0%)	215,08 ± 195,14 (90,7%)
K-dd (cmol(+)/kg)	1,97 ± 1,80 (91,4%)	2,99 ± 2,75 (92,0%)	1,23 ± 1,12 (91,1%)

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rerata ± simpangan baku (SD), diikuti koefisien keragaman (KK, dalam %) di dalam tanda kurung. Rerata konsisten dengan nilai pada Tabel 3. SD dan KK dihitung dari enam nilai pengamatan per perlakuan (3 blok × 2 kedalaman); KK = (SD/rerata) × 100%.

Tabel 5. Nilai F dan Peluang (p) Hasil ANOVA Dua Arah Sifat Fisik dan Kimia Tanah menurut Perlakuan Organik dan Kedalaman Tanah

Parameter	Nilai F (nilai p)		
	Perlakuan	Kedalaman	Perlakuan × Kedalaman
Kepadatan massa tanah (g/cm ³)	0,23 (0,802)	0,14 (0,717)	0,72 (0,527)
Porositas tanah (%)	0,57 (0,594)	0,16 (0,704)	0,29 (0,761)
pH tanah	0,38 (0,700)	0,12 (0,744)	3,17 (0,115)
KTK (cmol(+)/kg)	3,25 (0,111)	0,90 (0,379)	0,14 (0,872)
N-total (%)	2,04 (0,211)	0,24 (0,640)	0,20 (0,825)
P-tersedia (mg/kg)	0,10 (0,904)	2,83 (0,144)	0,12 (0,886)
K-dd (cmol(+)/kg)	0,90 (0,454)	1,64 (0,247)	0,84 (0,477)

Keterangan: Angka menunjukkan nilai F dengan nilai p di dalam tanda kurung. Pengaruh perlakuan diuji terhadap galat blok dalam perlakuan (db = 2 dan 6); pengaruh kedalaman dan interaksi diuji terhadap galat sisa (db = 1 dan 6 serta db = 2 dan 6). Tidak ada nilai p yang berada di bawah 0,05, sehingga tidak ada faktor yang berpengaruh nyata pada taraf 5%.

ANOVA dua arah tidak menemukan pengaruh nyata perlakuan organik terhadap kepadatan massa maupun porositas tanah (Tabel 5). Kedalaman dan interaksi antara perlakuan dan kedalaman juga tidak berpengaruh nyata. Rerata kepadatan massa pada blok LCPKS (1,47 g/cm³), kontrol (1,48 g/cm³), dan TKKS (1,53 g/cm³) saling berimpit, begitu pula rerata porositasnya. Perbaikan struktur tanah melalui penambahan bahan organik berlangsung bertahap dan menuntut aplikasi berulang selama bertahun-tahun sebelum terukur. Indriyani dkk. (2023) melaporkan hasil serupa untuk penerapan LCPKS di lahan mineral. Sebaliknya, Tao dkk., (2018) menemukan penurunan kepadatan massa pada lapisan 0–10 cm setelah aplikasi TKKS selama lima belas tahun, yang menegaskan bahwa lama aplikasi ikut menentukan besarnya respons.

Perlakuan organik juga tidak mengubah pH, N-total, P-tersedia, maupun K-dd secara nyata (Tabel 5). KTK menjadi parameter dengan selisih rerata terbesar: blok TKKS mencatat 90,87 cmol(+)/kg, sedangkan kontrol dan LCPKS masing-masing 115,22 dan 113,42 cmol(+)/kg. Selisih sekitar 24 cmol(+)/kg tersebut tidak lolos uji nyata pada model dua arah ($F = 3,25$; $p = 0,111$), dan uji lanjut DMRT tidak memisahkan ketiga perlakuan. Analisis awal yang memperlakukan enam nilai per perlakuan (3 blok × 2 kedalaman) sebagai ulangan bebas menghasilkan $p = 0,048$ untuk KTK. Angka itu menyesatkan karena kedua kedalaman berasal dari blok yang sama, sehingga jumlah ulangan sebenarnya tiga, bukan enam. Setelah kedalaman dimasukkan sebagai faktor dan blok dikembalikan sebagai satuan ulangan, dukungan statistik terhadap perbedaan KTK hilang, dan naskah ini mengikuti hasil model dua arah. Rendahnya KTK pada blok TKKS masih mungkin bermakna secara agronomis. Dekomposisi awal janjang yang belum terurai sempurna melepaskan asam organik dan senyawa antara yang untuk sementara menurunkan muatan negatif aktif pada kompleks pertukaran. Penjelasan ini berstatus dugaan mekanisme. Penelitian ini tidak mengukur C-organik tanah maupun pH larutan tanah, sehingga tidak tersedia data yang dapat mengujinya

secara langsung. Abu-Bakar dkk. (2011) justru mencatat kenaikan KTK, pH, dan basa tukar setelah sepuluh tahun aplikasi TKKS pada Ultisol, yang menunjukkan arah pengaruh dapat berbalik ketika bahan organik telah terdekomposisi penuh.

Nilai pH tanah pada seluruh blok tergolong masam sampai sangat masam (3,6–5,1) tanpa beda nyata antar perlakuan. Reaksi masam merupakan ciri tanah mineral Kalimantan Barat yang umumnya tergolong Ultisol. Curah hujan tinggi mencuci basa-basa seperti Ca, Mg, K, dan Na, sehingga kompleks pertukaran didominasi ion Al dan H (Hardjowigeno, 2010). Dua hal diduga menahan kenaikan pH: dosis dan lama aplikasi yang belum memadai untuk menetralkan kemasaman, serta asam organik yang terbentuk pada tahap awal dekomposisi. LCPKS sendiri bereaksi cenderung masam (Sitorus & Mardina, 2020). Koreksi kemasaman yang efektif menuntut kombinasi bahan organik dengan pengapuran, dan kebun memang telah memberikan dolomit sebagaimana tercatat pada Tabel 8.

Kandungan N-total berkisar 0,118–0,255% tanpa beda nyata antar perlakuan. Sebagian besar N tanah tersimpan dalam bentuk organik dan harus melewati mineralisasi sebelum tersedia bagi tanaman (Hakim dkk., 1986). Laju mineralisasi melambat pada tanah masam karena aktivitas mikroorganisme pengurai tertekan, sehingga sumbangan N dari TKKS dan LCPKS belum terbaca dalam jangka pendek. P-tersedia menyebar dari 17,44 sampai 795,07 mg/kg dan sebagian besar titik masuk kategori sangat tinggi. Pemupukan SP36 pada 2023 dan 2024 (Tabel 8) serta sumbangan P dari bahan organik menjadi sumber yang paling mungkin, sementara fiksasi P oleh Al dan Fe pada tanah masam memperbesar keragaman antar titik. K-dd berkisar sangat rendah sampai sangat tinggi (0,153–8,056 cmol(+)/kg) dengan nilai tertinggi pada blok TKKS K18, sejalan dengan kandungan kalium janjang kosong yang tinggi (Pohan dkk., 2022). Koefisien keragaman P-tersedia dan K-dd melampaui 90% pada ketiga perlakuan (Tabel 4). Keragaman sebesar itu menenggelamkan selisih antar perlakuan pada rancangan dengan tiga blok per perlakuan. Ketidadaan beda nyata pada kedua parameter tersebut karena itu mencerminkan keterbatasan jumlah ulangan, bukan bukti bahwa perlakuan organik tidak berpengaruh. Penelitian lanjutan memerlukan jumlah blok yang jauh lebih banyak agar daya uji memadai.

Aplikasi LCPKS dan TKKS selama periode pengamatan belum mengubah satu pun parameter tanah yang diukur secara nyata. Kecenderungan yang terlihat pada rerata, yaitu K-dd yang lebih tinggi pada blok TKKS serta KTK yang lebih tinggi pada blok kontrol dan LCPKS, belum didukung uji statistik dan tidak dapat dijadikan dasar rekomendasi. Tiga faktor diduga membatasi respons: lama aplikasi yang belum sebanding dengan waktu yang dibutuhkan bahan organik untuk terdekomposisi sempurna, dosis yang belum optimal, dan kemasaman tanah yang menekan aktivitas biologi tanah. Perbaikan kualitas tanah melalui bahan organik menuntut aplikasi berkelanjutan dan pemantauan lintas tahun.

Tabel 6. Rata-rata Produksi Tandan Buah Segar (TBS) Kelapa Sawit (ton/ha/tahun) Tahun 2021–2024 pada Lahan Aplikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS), dan Kontrol

Tahun produksi	Perlakuan		
	Kontrol	Tandan kosong	LCPKS
2021	23,10 a	24,46 a	26,53 a
2022	22,56 a	24,90 a	25,33 a
2023	19,26 a	19,96 a	21,60 a
2024	22,66 a	20,56 b	24,36 a

Keterangan: Angka pada baris yang sama yang diikuti huruf sama menunjukkan tidak berbeda nyata menurut uji DMRT pada taraf 5%. Analisis dijalankan terpisah untuk setiap tahun dengan blok sebagai ulangan ($n = 3$ per perlakuan). Luas blok, jumlah pokok, dan realisasi pemupukan berbeda antar perlakuan, sehingga perbandingan ini mengandung faktor perancu yang tidak dikendalikan.

Produksi TBS pada 2021 sampai 2023 tidak berbeda nyata antar perlakuan (Tabel 6).

Rerata pada blok TKKS dan LCPKS memang berada di atas kontrol pada 2021, yaitu 24,46 dan 26,53 ton/ha dibanding 23,10 ton/ha, tetapi selisih tersebut masih berada dalam rentang keragaman antar blok. Janjang kosong memasok N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, dan B, sedangkan LCPKS memasok N, P, K, dan Mg (Pohan dkk., 2022). Sumbangan hara tersebut belum cukup besar untuk memisahkan produksi antar perlakuan pada skala kebun.

Data produksi tahun 2022 tidak menunjukkan perbedaan nyata antar perlakuan. Blok LCPKS dan blok TKKS pada tahun itu hanya menerima tambahan pupuk kimia dalam jumlah kecil, sedangkan blok kontrol menerima pupuk kimia lebih banyak dan lebih merata karena ketersediaan pupuk di gudang terbatas. Pada 2023, produksi seluruh perlakuan turun bersamaan dengan berlangsungnya fenomena El Niño (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2025). Blok LCPKS dan TKKS menahan penurunan sedikit lebih baik daripada kontrol. Kelembapan tanah yang lebih terjaga pada kedua blok tersebut menjadi penjelasan yang masuk akal, meskipun penelitian ini tidak mengukur lengas tanah sehingga dugaan itu belum teruji.

Uji ANOVA pada data 2024 memisahkan blok TKKS (20,56 ton/ha) dari blok kontrol (22,66 ton/ha) dan blok LCPKS (24,36 ton/ha). Hasil tersebut tidak dapat dibaca sebagai bukti bahwa aplikasi TKKS menurunkan produksi. Luas blok dan jumlah pokok berbeda secara sistematis antar perlakuan: blok LCPKS (M16–M18) mencakup 29–30 ha dengan 3.900–4.050 pokok, blok kontrol (J16–J18) 24–28 ha dengan 3.199–3.672 pokok, dan blok TKKS (K17–K19) 27–28 ha dengan 3.608–3.778 pokok. Normalisasi produksi per hektar tidak menghapus perbedaan kerapatan pokok antar blok. Realisasi pemupukan pada 2024 juga naik dengan pola yang tidak seragam antar blok (Tabel 7). Kedua faktor tersebut bercampur dengan pengaruh perlakuan organik, dan rancangan penelitian ini tidak menyediakan cara untuk memisahkannya. Tao dkk. (2017) melaporkan bahwa pengaruh aplikasi residu tanaman

terhadap hasil kelapa sawit baru terbaca setelah pengamatan lebih dari sepuluh tahun, sehingga perbedaan pada satu tahun tunggal perlu ditafsirkan dengan hati-hati.

Tabel 7. Data Realisasi Pemupukan Kelapa Sawit (ton) di Seriang Estate Tahun 2021–2024 pada Blok Kontrol (J16–J18), TKKS (K17–K19), dan LCPKS (M16–M18)

Data Pemupukan/Ton				
Blok	2021	2022	2023	2024
J16	32,77	26,89	37,99	37,26
J17	34,71	24,99	21,72	37,06
J18	33,20	23,08	30,38	41,83
K17	35,31	31,95	32,44	47,08
K18	20,57	18,81	26,86	45,31
K19	20,57	18,81	26,86	45,31
M16	8,57	-	0,39	9,75
M17	22,72	21,61	15,05	47,95
M18	12,41	4,61	5,36	13,10

Tabel 8. Jenis Pupuk dan Dosis yang Digunakan

Tahun	Jenis Pupuk dan Dosis (kg/pokok)					
	Urea	MOP	Dolomit	Kieserit	HGFB	SP36
2021	1,75	2	2	1	1,5	-
2022	1,75	1	1	-	1	-
2023	1,75	2	2	1	1,5	1
2024	1,75	2	2	-	-	1

Realisasi pemupukan bervariasi antar blok dan antar tahun (Tabel 7). Jumlah pupuk naik pada 2024 di hampir seluruh blok, dengan M17 mencatat angka tertinggi sebesar 47,95 ton. Blok M16 hanya menerima 0,39 ton pada 2023 dan tidak menerima pupuk sama sekali pada 2022 karena pengiriman dari pusat terhambat dan stok gudang sentral kosong. Blok K17 dan K18 menunjukkan tren pemupukan yang meningkat setiap tahun. Ketidakteraturan ini menambah satu lagi sumber keragaman yang tidak dikendalikan dalam perbandingan produksi antar perlakuan (Siregar *et al.*, 2018).

Keterbatasan Penelitian

Rancangan penelitian ini bersifat observasional. Perusahaan menetapkan blok penerima LCPKS dan TKKS sebelum pengamatan dimulai, sehingga penempatan perlakuan tidak diacak. Perbedaan yang teramati antar kelompok blok karena itu tidak dapat dinyatakan sebagai hubungan sebab akibat antara jenis bahan organik dan sifat tanah.

Data kondisi awal tanah sebelum aplikasi bahan organik tidak tersedia. Tanpa data *baseline*, kesetaraan ketiga kelompok blok pada titik awal tidak dapat dipastikan, dan sebagian selisih yang terukur mungkin sudah ada sejak sebelum perlakuan berjalan.

Luas blok, jumlah pokok, dan realisasi pemupukan berbeda antar perlakuan. Ketiganya berpengaruh langsung terhadap produksi TBS dan tidak dapat dipisahkan dari pengaruh bahan organik dalam rancangan ini. Data produksi per pokok akan memberi

perbandingan yang lebih adil daripada data per hektar dan sebaiknya dilaporkan pada kajian berikutnya.

Jumlah ulangan terbatas pada tiga blok per perlakuan. Pada parameter dengan koefisien keragaman di atas 90% seperti P-tersedia dan K-dd, jumlah ulangan sebanyak itu tidak cukup sensitif untuk mendeteksi selisih antar perlakuan. Penelitian ini juga tidak mengukur C-organik tanah, sehingga dugaan mekanisme yang berkaitan dengan dekomposisi bahan organik tidak dapat diuji.

Uji ANOVA pada data produksi menempatkan blok sebagai ulangan, padahal blok tidak diacak dan tidak setara dalam luas maupun jumlah pokok. Asumsi kesetaraan antar ulangan karena itu tidak sepenuhnya terpenuhi, dan hasil ujinya sebaiknya dibaca sebagai gambaran deskriptif yang disertai konteks agronomis, bukan sebagai pembuktian pengaruh perlakuan.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan dapat disimpulkan bahwa:

1. ANOVA dua arah dengan perlakuan dan kedalaman sebagai faktor tidak menemukan pengaruh nyata aplikasi LCPKS maupun TKKS terhadap kepadatan massa, porositas, pH, KTK, N-total, P-tersedia, dan K-dd. Rerata KTK pada blok TKKS lebih rendah sekitar 24 cmol(+)/kg dibanding kontrol, tetapi selisih tersebut tidak nyata secara statistik ($p = 0,111$).
2. Produksi TBS tahun 2021 sampai 2023 tidak berbeda nyata antar perlakuan. Pada 2024, produksi blok TKKS lebih rendah daripada blok kontrol dan LCPKS, namun perbedaan luas blok, jumlah pokok, dan realisasi pemupukan antar perlakuan tidak memungkinkan hasil itu dikaitkan dengan jenis bahan organik yang diaplikasikan.
3. LCPKS dan TKKS tetap layak dipertimbangkan sebagai pelengkap pupuk anorganik karena mendaur ulang hara dari limbah pabrik kembali ke lahan. Pembuktian pengaruhnya terhadap sifat tanah dan produksi menuntut percobaan terkontrol dengan penempatan perlakuan yang diacak, data kondisi awal tanah, blok yang setara dalam luas dan jumlah pokok, serta pengamatan lintas tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Bakar, R., Darus, S. Z., Kulaseharan, S., & Jamaluddin, N. (2011). Effects of ten year application of empty fruit bunches in an oil palm plantation on soil chemical properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89(3), 341–349. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9398-9>
- Adu, M. O., Atia, K., Arthur, E., Asare, P. A., Obour, P. B., Danso, E. O., Frimpong, K. A., Sanleri, K. A., Asare-Larbi, S., Adjei, R., Mensah, G., & Andersen, M. N. (2022). The use of oil palm empty fruit bunches as a soil amendment to improve growth and yield of crops. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(2), 13. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00753-z>
- Anyaocha, K. E., Sakrabani, R., Patchigolla, K., & Mouazen, A. M. (2018). Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.022>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2025). *Ketika Laut Memanas, Dunia Berubah: El Niño Super 2023–2024 dan Dampaknya*. <https://gawbariri.bmkg.go.id/publikasi/artikel/245-ketika-laut-memanas-dunia-berubah-el-nino-super-2023-2024-dan-dampaknya>
- Balai Penelitian Tanah. (2009). *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk* (2 ed.). Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/24650>
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2023). *Statistik perkebunan unggulan nasional 2021–2023*. Direktorat Jenderal Perkebunan.
- Gusman, M. H. (2016). *Peningkatan Kualitas Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Produk Torefaksi Basah Skala Pilot sebagai Bahan Bakar Padat Bersih*. [Tugas Akhir, Institut Teknologi Bandung]. https://digilib.itb.ac.id/gdl/view_data/peningkatan-kualitas-limbah-tandan-kosong-kelapa-sawit-produk-torefaksi-basah-skala-pilot-sebagai-bahan-bakar-padat-bersih/teknik-mesin
- Hakim, N., Nyakpa, M. Y., Lubis, A. M., Nugroho, S. G., Diha, M. A., Hong, G. B., & Bailey, H. H. (1986). *Dasar-Dasar Ilmu Tanah*. Universitas Lampung.
- Hardjowigeno, S. (2010). *Ilmu tanah*. Akademika Pressindo.
- Indriyani, F., Ivansyah, O., & Sutanto, Y. (2023). Respons Sifat Fisika Tanah terhadap Penerapan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit di Perkebunan Kelapa Sawit. *PRISMA FISIKA*, 11(3), 84. <https://doi.org/10.26418/pf.v11i3.65283>
- Paramitadevi, Y. V. & Rahmatullah. (2017). Technical problems of wastewater treatment plant in crude palm oil industry A case study in PT Socfin Indonesia-Kebun Sungai Liput, Nang groe Aceh Darussalam Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65, 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012048>
- Pohan, A. K. S., Wirianata, H., & Hastuti, P. B. (2022). Efektivitas Pengaplikasian Tandan Kosong dan LCPKS pada Lahan Mineral untuk Meningkatkan Produksi Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). *AGROISTA: Jurnal Agroteknologi*, 6(2), 101–109. <https://doi.org/10.55180/agi.v6i2.278>
- Saeed, M. O., Azizli, K. A. M., Isa, M. H., & Ezechi, E. H. (2016). Treatment of POME using Fenton oxidation process: Removal efficiency, optimization, and acidity condition. *Desalination and Water Treatment*, 57(50), 23750–23759. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1141715>
- Septiariva, I., Suryawan, I. W. K., & Sarwono, A. (2020). Energy Conversion of Industrial Wastewater on Microbial Fuel Cell (MFC)-Based with Biocatalysts and Pretreatments: A Review. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 4, 102–109. <https://doi.org/10.26554/ijems.2020.4.4.102-109>
- Sitorus, Y. R., & Mardina, V. (2020). Karakteristik Kimia dari Pengolahan Limbah Cair PTPN Y, Sumatera Utara. *Jurnal Envscience*, 4(2), 58. <https://doi.org/10.30736/4ijev.v4iss2.197>

- Susilawati, & Supijatno. (2015). Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) di Perkebunan Kelapa Sawit, Riau. *Buletin Agrohorti*, 3(2), 203–212. <https://doi.org/10.29244/agrob.v3i2.14926>
- Tao, H.-H., Snaddon, J. L., Slade, E. M., Caliman, J.-P., Widodo, R. H., Suhardi, & Willis, K. J. (2017). Long-term crop residue application maintains oil palm yield and temporal stability of production. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(4), 33. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0439-5>
- Tao, H.-H., Snaddon, J. L., Slade, E. M., Henneron, L., Caliman, J.-P., & Willis, K. J. (2018). Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 256, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.012>