

Analisis Pengaruh Residu Herbisida terhadap Kesehatan Tanah di Perkebunan Kelapa Sawit Rakyat

Muhammad Iqbal^{*)}, Hangger Gahara Mawandha, Elisabeth Nanik Kristalisasi

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, INSTIPER Yogyakarta

^{*)}Email Korespondensi: baalmuh@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan herbisida merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam pengendalian gulma pada perkebunan kelapa sawit, namun penggunaannya berpotensi meninggalkan residu dalam tanah yang dapat mempengaruhi kesehatan tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat residu herbisida metil metsulfuron di tanah perkebunan kelapa sawit rakyat sebelum dan sesudah aplikasi oleh petani serta mengevaluasi pengaruh residu tersebut terhadap beberapa indikator kesehatan tanah. Penelitian dilaksanakan pada perkebunan kelapa sawit rakyat di Kecamatan Bagan Besar, Kota Dumai, Provinsi Riau pada bulan Mei sampai September 2025. Sampel tanah diambil pada empat waktu pengamatan yaitu sebelum aplikasi herbisida (H-1), satu hari setelah aplikasi (H+1), empat belas hari setelah aplikasi (H+14), dan dua puluh delapan hari setelah aplikasi (H+28). Analisis residu herbisida dilakukan menggunakan metode Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) dengan nilai Limit of Detection (LOD) sebesar 0,01 mg/kg. Parameter kesehatan tanah yang dianalisis meliputi tekstur tanah, permeabilitas tanah, pH tanah, C-organik, kapasitas tukar kation (KTK), serta populasi mikroorganisme tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa residu herbisida metil metsulfuron tidak terdeteksi pada seluruh waktu pengamatan hingga 28 hari setelah aplikasi dengan dosis 35 g/ha. Tanah pada lokasi penelitian memiliki tekstur lempung berpasir dengan kandungan pasir 72-74%, debu 17-21%, dan liat 7-8%. Nilai pH tanah relatif stabil pada kisaran 5,21-5,29, sedangkan permeabilitas tanah meningkat dari 7,08 cm/jam sebelum aplikasi menjadi 8,31 cm/jam pada H+28. Kadar C-organik, kapasitas tukar kation, serta populasi mikroorganisme tanah menunjukkan penurunan pada awal waktu pengamatan yang kemudian meningkat kembali hingga mendekati kondisi awal pada akhir waktu pengamatan. Secara umum, aplikasi herbisida metil metsulfuron dengan dosis 35 g/ha tidak menunjukkan adanya residu yang terdeteksi di dalam tanah serta tidak mengindikasikan gangguan terhadap indikator kesehatan tanah selama periode pengamatan.

Kata Kunci: herbisida, metil metsulfuron, residu herbisida, kesehatan tanah, kelapa sawit.

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis yang memiliki peran penting dalam perekonomian Indonesia. Komoditas ini tidak hanya menjadi penyumbang devisa melalui ekspor minyak sawit dan produk turunannya, tetapi juga berperan dalam menyediakan lapangan kerja bagi masyarakat pedesaan. Data Badan Pusat Statistik (2024) menunjukkan bahwa luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai sekitar 16,83 juta hektar, dimana sekitar 6,38 juta hektar atau sekitar 37,9% di antaranya merupakan perkebunan yang dikelola oleh petani rakyat. Besarnya kontribusi perkebunan rakyat tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan kebun yang baik dan

berkelanjutan menjadi faktor penting dalam menjaga produktivitas serta keberlanjutan sektor perkebunan kelapa sawit.

Dalam sistem budidaya kelapa sawit, keberadaan gulma menjadi salah satu faktor yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman karena gulma berkompetisi dengan tanaman dalam memanfaatkan unsur hara, air, cahaya matahari, serta ruang tumbuh (Corley & Tinker, 2015). Oleh karena itu, pengendalian gulma merupakan kegiatan penting dalam pengelolaan kebun kelapa sawit. Salah satu metode pengendalian gulma yang banyak digunakan adalah aplikasi herbisida kimia karena dinilai lebih praktis dan efisien dalam menekan pertumbuhan gulma pada areal perkebunan yang luas.

Salah satu herbisida yang digunakan dalam pengendalian gulma pada perkebunan kelapa sawit adalah herbisida dengan bahan aktif metil metsulfuron. Herbisida ini termasuk dalam kelompok sulfonilurea yang bekerja dengan menghambat enzim acetolactate synthase (ALS) yang berperan dalam biosintesis asam amino pada tanaman (Palma-Bautista *et al.*, 2022). Penghambatan enzim tersebut menyebabkan terganggunya proses pembelahan sel sehingga pertumbuhan gulma terhambat dan pada akhirnya gulma mengalami kematian secara bertahap (Yu & Powles, 2014).

Meskipun penggunaan herbisida dapat membantu menekan pertumbuhan gulma secara efektif, aplikasi herbisida juga berpotensi meninggalkan residu bahan aktif di dalam tanah. Keberadaan residu herbisida dalam tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti sifat kimia senyawa, karakteristik tanah, kondisi lingkungan, serta aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam proses degradasi senyawa tersebut (Silva *et al.*, 2019). Oleh karena itu, kajian mengenai dinamika residu herbisida serta hubungannya dengan perubahan parameter kesehatan tanah menjadi penting untuk mendukung pengelolaan perkebunan kelapa sawit yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada lahan perkebunan kelapa sawit rakyat yang berlokasi di Kecamatan Bagan Besar, Kota Dumai, Provinsi Riau, Laboratorium Pusat INSTIPER Yogyakarta, Laboratorium Penguji Balai Penerapan Standar Instrumen Pertanian (BPSIP) Yogyakarta dan Laboratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia. Penelitian dilaksanakan dalam waktu lima bulan, yang berlangsung sejak bulan Mei sampai September 2025.

Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan survei lapangan dan analisis laboratorium terhadap sampel tanah. Aplikasi herbisida menggunakan bahan aktif metil metsulfuron dengan dosis 35 g/ha sesuai dengan praktik penggunaan oleh petani di lokasi penelitian.

Pengambilan sampel tanah dilakukan pada tiga gawangan berbeda menggunakan metode *random sampling* dengan titik pengambilan secara acak. Sampel tanah diambil sebanyak 1 kg pada kedalaman 0–20 cm menggunakan bor tanah, kemudian dikompositkan untuk setiap waktu pengamatan. Pengambilan sampel dilakukan pada empat waktu pengamatan yaitu sebelum aplikasi herbisida (H–1), satu hari setelah aplikasi (H+1), empat belas hari setelah aplikasi (H+14), dan dua puluh delapan hari setelah aplikasi (H+28).

Analisis residu herbisida dilakukan menggunakan instrumen Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS) dengan nilai *limit of detection* (LOD) sebesar 0,01 mg/kg. Parameter kesehatan tanah yang dianalisis meliputi tekstur tanah, permeabilitas tanah, pH tanah, C-organik, kapasitas tukar kation, serta populasi mikroorganisme tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis tekstur tanah pada lokasi penelitian menunjukkan bahwa komposisi fraksi tanah relatif seragam selama periode pengamatan. Persentase fraksi pasir berkisar antara 72–74%, fraksi debu 17–21%, dan fraksi liat 7–8%. Berdasarkan klasifikasi tekstur tanah menurut sistem USDA, komposisi tersebut termasuk dalam kelas tekstur lempung berpasir.

Tabel 1. Hasil Analisis Tekstur Tanah Pada Berbagai Waktu Pengamatan

Waktu Pengamatan	Tekstur Tanah (%)			Kelas Tekstur
	Pasir	Debu	Liat	
H-1	73	19	8	Lempung Berpasir
H+1	74	19	7	Lempung Berpasir
H+14	73	17	7	Lempung Berpasir
H+28	72	21	7	Lempung Berpasir

Pada pengamatan sebelum aplikasi herbisida (H-1), kandungan pasir sebesar 73%, debu 19%, dan liat 8%. Setelah aplikasi herbisida pada H+1 komposisi fraksi tanah relatif tidak berubah dengan kandungan pasir 74%, debu 19%, dan liat 7%. Pada pengamatan H+14 dan H+28 komposisi fraksi tanah juga menunjukkan nilai yang relatif stabil dengan kandungan pasir masing-masing 73% dan 72%, debu 17–21%, serta liat 7%. Seluruh sampel tanah tetap berada pada kelas tekstur lempung berpasir. Konsistensi komposisi fraksi tanah tersebut menunjukkan bahwa tekstur tanah pada lokasi penelitian relatif homogen dan tidak mengalami perubahan selama waktu pengamatan.

Hasil analisis residu herbisida menggunakan metode Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC–MS) menunjukkan bahwa residu metil metsulfuron tidak terdeteksi pada seluruh waktu pengamatan, yaitu sebelum aplikasi (H-1), satu hari setelah aplikasi (H+1), empat belas hari setelah aplikasi (H+14), dan dua puluh delapan hari setelah aplikasi (H+28). Nilai residu yang diperoleh berada di bawah batas deteksi metode analisis (<0,01 mg/kg).

Kromatogram total ion (*Total Ion Chromatogram/TIC*) menunjukkan bahwa senyawa yang terdeteksi didominasi oleh senyawa organik alami tanah seperti hexadecanoic acid, octadec-9-enoic acid, octadecanoic acid, dan berbagai turunan ester asam lemak. Senyawa-senyawa tersebut merupakan komponen umum bahan organik tanah sehingga kemunculannya menunjukkan bahwa proses ekstraksi dan analisis berjalan dengan baik.

Metil metsulfuron merupakan herbisida sistemik dari golongan sulfonilurea dengan rumus molekul $C_{14}H_{15}N_5O_6S$ dan massa molekul sekitar 381 g/mol (PubChem, 2024). Senyawa ini memiliki struktur khas berupa gugus sulfonilurea yang pada analisis spektrometri massa menghasilkan fragmen ion diagnostik tertentu seperti fragmen sulfonil dan sulfonamida (Imfeld & Vuilleumier, 2012). Namun pada hasil analisis sampel tanah penelitian ini tidak ditemukan fragmen ion dengan karakteristik tersebut sehingga menunjukkan bahwa residu metil metsulfuron maupun turunannya tidak terdeteksi dalam sampel tanah yang dianalisis.

Tabel 2. Hasil Analisis GC-MS Sampel Tanah H-1

Peak	Retention Time (min)	Area (%)	Senyawa Teridentifikasi	Rumus Kimia	Bobot Molekul
7	16.196	22.63	Octadec-9-enoic acid (Oleic acid)	$C_{18}H_{34}O_2$	282
4	14.346	17.73	Hexadecanoic acid (Palmitic acid)	$C_{16}H_{32}O_2$	256
8	16.498	9.36	2-Monopalmitin	$C_{19}H_{38}O_4$	330
11	18.037	6.74	Cyclopentadecanone	$C_{15}H_{28}O$	224
12	18.408	6.20	Oleic acid methyl ester	$C_{19}H_{36}O_2$	296
24	25.497	5.11	Di-(9-octadecenoyl)-glycerol	$C_{39}H_{72}O_5$	620
27	27.104	4.34	9-Octadecenal (Z)	$C_{18}H_{34}O$	266

Tabel 3. Hasil Analisis GC-MS Sampel Tanah H+1

Peak	Retention Time (min)	Area (%)	Senyawa Teridentifikasi	Rumus Kimia	Bobot Molekul
2	14.321	24.98	Hexadecanoic acid (Palmitic acid)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256
5	16.121	21.45	Octadec-9-enoic acid (Oleic acid)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282
21	27.269	14.94	9-Octadecenal (Z)	C ₁₈ H ₃₄ O	266
19	25.605	13.30	Octadecanoic acid (Stearic acid)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284
9	18.017	4.60	Oleic acid, 3-hydroxypropyl ester	C ₂₁ H ₄₀ O ₃	340
18	24.180	3.09	1-Monoolein (Glycerol monooleate)	C ₂₁ H ₄₀ O ₄	356
12	18.398	3.06	9-Octadecenoic acid methyl ester (Methyl oleate)	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	296

Tabel 4. Hasil Analisis GC-MS Sampel Tanah H+14

Peak	Retention Time (min)	Area (%)	Senyawa Teridentifikasi	Rumus Kimia	Bobot Molekul
2	14.345	23.56	Hexadecanoic acid (Palmitic acid)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256
7	16.129	19.50	Octadec-9-enoic acid (Oleic acid)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282
25	27.349	18.74	9-Octadecenal (Z)	C ₁₈ H ₃₄ O	266
23	25.654	15.84	Octadecanoic acid (Stearic acid)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284
11	18.030	3.89	Oleic acid, 3-hydroxypropyl ester	C ₂₁ H ₄₀ O ₃	340
22	24.212	3.29	Hexadecanoic acid methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	270
13	18.414	3.01	Linoleic acid (9,12-Octadecadienoic acid)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	280

Tabel 5. Hasil Analisis GC-MS Sampel Tanah H+28

Peak	Retention Time (min)	Area (%)	Senyawa Teridentifikasi	Rumus Kimia	Bobot Molekul
2	14.346	22.08	Hexadecanoic acid (Palmitic acid)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256
23	27.387	20.94	9-Octadecenal (Z)	C ₁₈ H ₃₄ O	266
7	16.122	18.56	Cyclopentadecanone, 2-hydroxy	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	240
21	25.672	17.25	Octadecanoic acid (Stearic acid)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284
10	18.038	3.43	Oleic acid, 3-hydroxypropyl ester	C ₂₁ H ₄₀ O ₃	340
20	24.223	3.29	Hexadecanoic acid methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	270
12	18.423	2.90	Linoleic acid	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	280

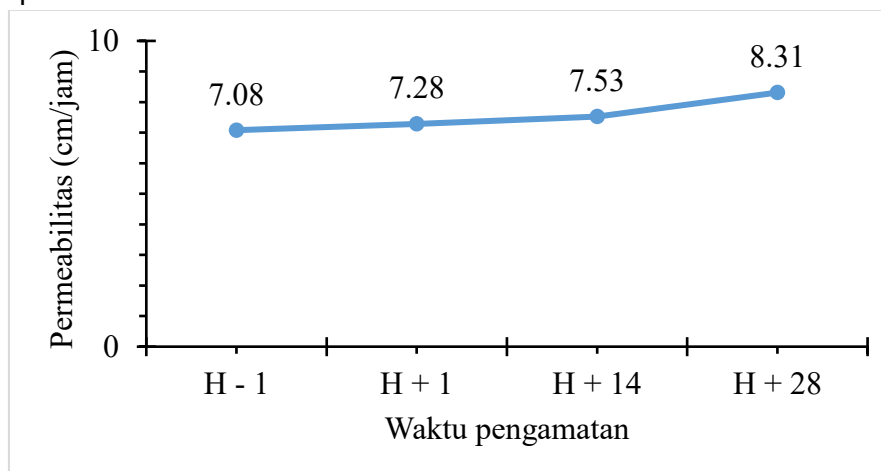
Tidak terdeteksinya residu metil metsulfuron hingga 28 hari setelah aplikasi menunjukkan bahwa senyawa tersebut mengalami peluruhan relatif cepat di dalam tanah. Peluruhan herbisida dalam tanah dapat terjadi melalui beberapa mekanisme utama, yaitu degradasi kimia, degradasi biologis oleh mikroorganisme tanah, serta pergerakan vertikal melalui proses pencucian (*leaching*).

Penelitian yang dilakukan oleh Maznah *et al.* (2020) menjelaskan bahwa metil metsulfuron memiliki waktu peluruhan yang relatif cepat di tanah pertanian sehingga

konsentrasi residunya dapat menurun dalam beberapa minggu setelah aplikasi, sehingga konsentrasi residunya dapat menurun secara signifikan dalam beberapa minggu setelah aplikasi. Selain itu, sifat kelarutan metil metsulfuron yang relatif tinggi dalam air menyebabkan senyawa ini lebih mudah mengalami transformasi di dalam tanah dibandingkan beberapa jenis herbisida lainnya.

Kondisi tanah pada lokasi penelitian yang bertekstur lempung berpasir dengan permeabilitas yang relatif tinggi juga diduga turut mempengaruhi dinamika residu herbisida. Tanah dengan dominasi fraksi pasir memiliki sistem pori makro yang lebih berkembang sehingga memungkinkan pergerakan air dan senyawa terlarut berlangsung lebih cepat melalui profil tanah. Kondisi ini dapat menyebabkan konsentrasi residu pada lapisan tanah permukaan menjadi sangat kecil sehingga residu tidak terdeteksi pada analisis yang dilakukan pada lapisan tanah 0–20 cm (Weil & Brady, 2017).

Nilai permeabilitas tanah menunjukkan peningkatan secara bertahap selama waktu pengamatan. Nilai permeabilitas tanah sebelum aplikasi herbisida sebesar 7,08 cm/jam, kemudian meningkat menjadi 7,28 cm/jam pada H+1, 7,53 cm/jam pada H+14, dan mencapai 8,31 cm/jam pada H+28.

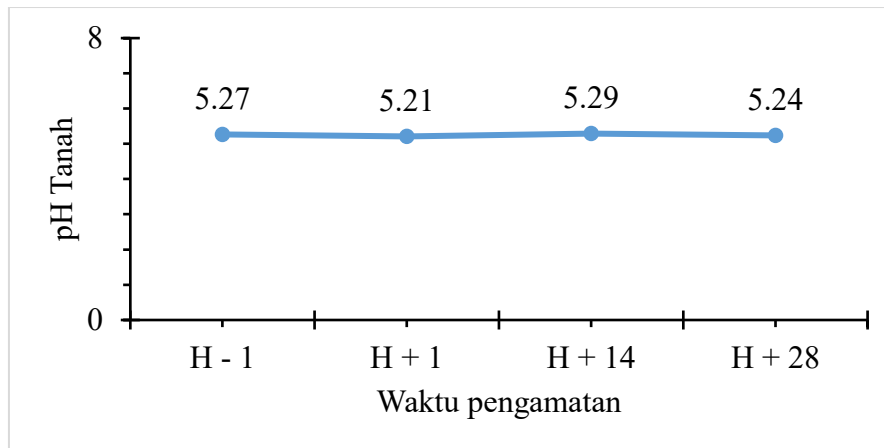


Gambar 1. Dinamika Permeabilitas Tanah pada berbagai waktu pengamatan

Peningkatan nilai permeabilitas tanah selama waktu pengamatan menunjukkan bahwa kemampuan tanah dalam meloloskan air tetap berlangsung dengan baik setelah aplikasi herbisida. Kondisi ini menunjukkan bahwa aplikasi metil metsulfuron tidak menyebabkan gangguan terhadap sistem pori tanah selama waktu pengamatan.

Perubahan nilai permeabilitas tersebut lebih berkaitan dengan karakteristik tekstur tanah pada lokasi penelitian dibandingkan dengan pengaruh langsung dari aplikasi herbisida. Tanah dengan tekstur lempung berpasir yang memiliki kandungan pasir sebesar 72–74% umumnya memiliki porositas makro yang lebih besar sehingga memungkinkan air bergerak lebih cepat melalui profil tanah. Tanah dengan dominasi fraksi pasir juga memiliki kapasitas infiltrasi yang relatif tinggi sehingga nilai permeabilitas tanah cenderung meningkat ketika kondisi struktur tanah tetap stabil (Weil & Brady, 2017).

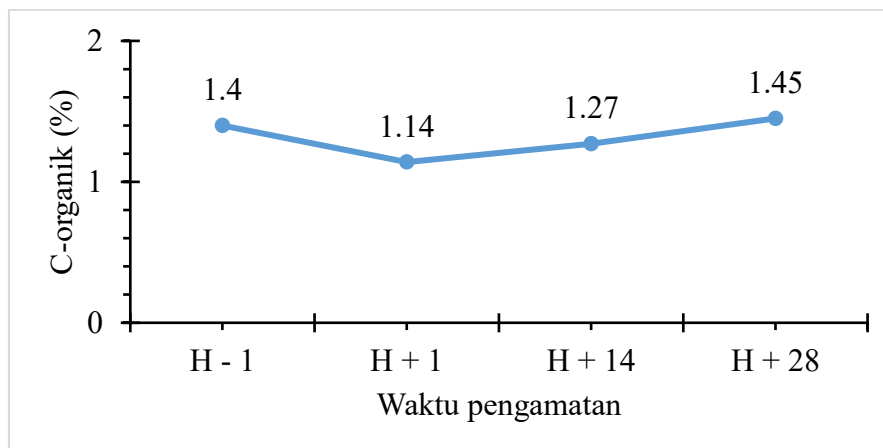
Nilai pH tanah sebelum aplikasi herbisida sebesar 5,27, kemudian sedikit menurun menjadi 5,21 pada H+1, meningkat menjadi 5,29 pada H+14, dan berada pada 5,24 pada H+28.



Gambar 2. Dinamika pH Tanah pada berbagai waktu pengamatan

Fluktuasi nilai pH tanah selama waktu pengamatan relatif kecil dan tetap berada dalam kisaran tanah masam (5,21–5,29). Stabilitas nilai pH tersebut menunjukkan bahwa aplikasi herbisida metil metsulfuron tidak menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap reaksi tanah.

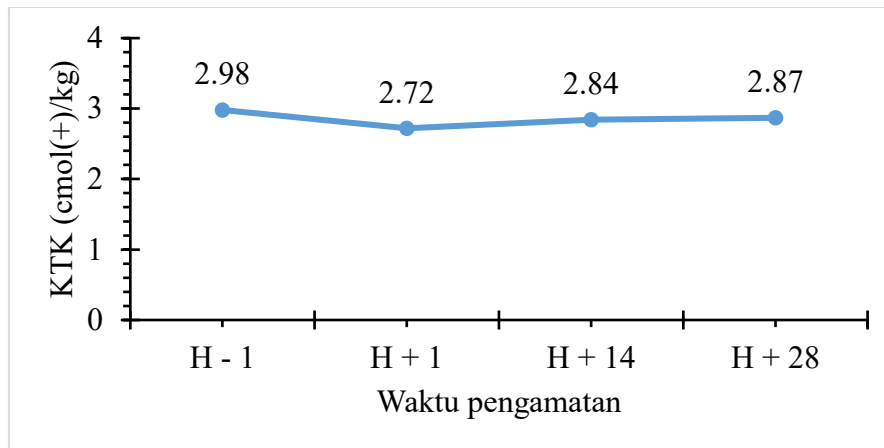
Tanah pada umumnya memiliki sistem penyangga alami yang mampu mempertahankan kestabilan pH meskipun terjadi penambahan senyawa kimia dalam jumlah tertentu. Sistem penyangga tersebut berasal dari keberadaan mineral liat, bahan organik tanah, serta berbagai reaksi kimia yang terjadi pada permukaan koloid tanah (Weil & Brady, 2017).



Gambar 3. Dinamika C-Organik pada berbagai waktu pengamatan

Kadar C-organik tanah sebelum aplikasi sebesar 1,40%, kemudian menurun menjadi 1,14% pada H+1, meningkat menjadi 1,27% pada H+14, dan mencapai 1,45% pada H+28.

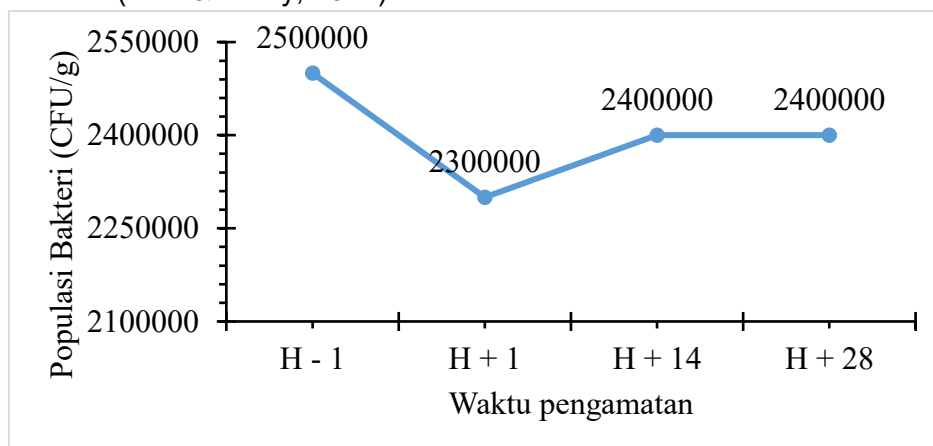
Nilai kapasitas tukar kation tanah sebelum aplikasi sebesar 2,98 cmol(+)/kg, kemudian menurun menjadi 2,72 cmol(+)/kg pada H+1, meningkat menjadi 2,84 cmol(+)/kg pada H+14, dan mencapai 2,87 cmol(+)/kg pada H+28.



Gambar 4. Dinamika Kapasitas Tukar Kation pada berbagai waktu pengamatan

Perubahan nilai KTK menunjukkan pola yang relatif sejalan dengan dinamika kadar C-organik tanah. Kapasitas tukar kation merupakan indikator penting yang menggambarkan kemampuan tanah dalam menahan dan menukar kation hara pada permukaan koloid tanah.

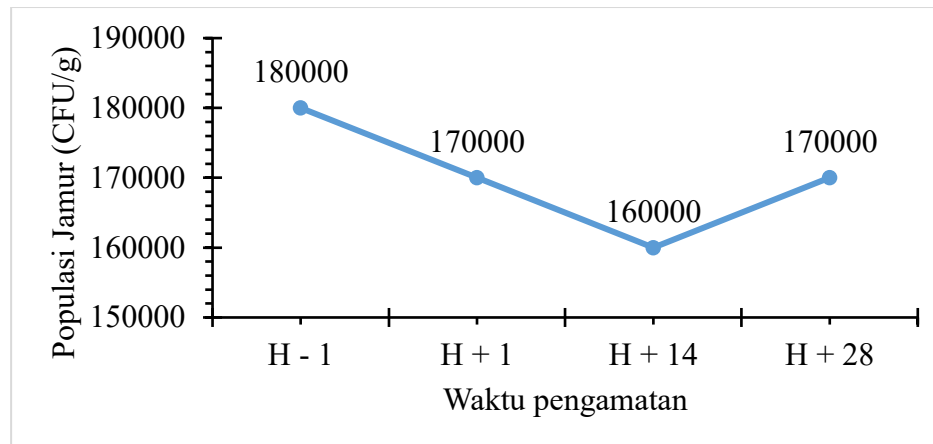
Bahan organik tanah merupakan salah satu sumber utama muatan negatif pada koloid tanah. Oleh karena itu perubahan kandungan bahan organik tanah dapat mempengaruhi nilai kapasitas tukar kation tanah. Peningkatan kembali kadar C-organik pada akhir waktu pengamatan kemungkinan turut berkontribusi terhadap peningkatan kembali nilai kapasitas tukar kation tanah (Weil & Brady, 2017).



Gambar 5. Dinamika Populasi Bakteri pada berbagai waktu pengamatan

Populasi bakteri tanah sebelum aplikasi sebesar $2,5 \times 10^6$ CFU/g, kemudian menurun menjadi $2,3 \times 10^6$ CFU/g pada H+1, meningkat menjadi $2,4 \times 10^6$ CFU/g pada H+14, dan tetap $2,4 \times 10^6$ CFU/g pada H+28.

Populasi jamur tanah sebelum aplikasi sebesar $1,8 \times 10^5$ CFU/g, kemudian menurun menjadi $1,7 \times 10^5$ CFU/g pada H+1, menjadi $1,6 \times 10^5$ CFU/g pada H+14, dan meningkat kembali menjadi $1,7 \times 10^5$ CFU/g pada H+28.



Gambar 6. Dinamika Populasi Jamur pada berbagai waktu pengamatan

Penurunan populasi mikroorganisme tanah pada awal waktu pengamatan menunjukkan adanya respons awal komunitas mikroba terhadap perubahan kondisi lingkungan tanah setelah aplikasi herbisida. Namun peningkatan kembali populasi mikroorganisme pada waktu pengamatan berikutnya menunjukkan bahwa komunitas mikroba tanah mampu beradaptasi terhadap perubahan lingkungan tersebut.

Mikroorganisme tanah memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai perubahan kondisi lingkungan. Dalam beberapa kasus, mikroorganisme tanah bahkan dapat memanfaatkan senyawa kimia hasil degradasi pestisida sebagai sumber energi tambahan dalam proses metabolisme mereka (Bünemann et al., 2018).

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

1. Residu herbisida metil metsulfuron tidak terdeteksi pada tanah perkebunan kelapa sawit rakyat baik sebelum maupun sesudah aplikasi dengan dosis 35 g/ha berdasarkan analisis GC-MS dengan nilai LOD ($<0,01$ mg/kg).
2. Aplikasi herbisida metil metsulfuron dengan dosis 35 g/ha tidak memberikan dampak yang berarti terhadap indikator kesehatan tanah baik sebelum maupun sesudah aplikasi. Perubahan yang terjadi pada beberapa parameter tanah bersifat sementara dan menunjukkan kecenderungan pemulihan hingga mendekati kondisi awal pada akhir waktu pengamatan.

SARAN

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengamatan dalam periode waktu yang lebih panjang serta pada kedalaman tanah yang lebih bervariasi dengan menggunakan metode analisis yang memiliki sensitivitas lebih tinggi untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika residu herbisida dalam tanah.
2. Penggunaan herbisida pada perkebunan kelapa sawit rakyat sebaiknya tetap dilakukan sesuai dengan dosis anjuran dan prinsip pengelolaan gulma terpadu agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap keseimbangan ekosistem tanah dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, *120*, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2015). *The Oil Palm*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118953297>
- Imfeld, G., & Vuilleumier, S. (2012). Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: A critical review. *European Journal of Soil Biology*, *49*, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.010>
- Maznah, Z., Ismail, B. S., & Eng, O. K. (2020). Residue and dissipation kinetics of metsulfuron-methyl herbicide in soil: A field assessment at an oil palm plantation. *Biomolecules*, *10*(7), 1–9. <https://doi.org/10.3390/biom10071067>
- Palma-Bautista, C., Vázquez-García, J. G., Osuna, M. D., Garcia-Garcia, B., Torra, J., Portugal, J., & De Prado, R. (2022). An Asp376Glu substitution in ALS gene and enhanced metabolism confers high tribenuron-methyl resistance in *Sinapis alba*. *Frontiers in Plant Science*, *13*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1011596>
- PubChem. (2024). *Metsulfuron-methyl*. National Center for Biotechnology Information (NCBI). <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/52999>
- Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils – A hidden reality unfolded. *Science of The Total Environment*, *653*, 1532–1545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>
- Weil, R. R. ., & Brady, N. C. . (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
- Yu, Q., & Powles, S. B. (2014). Resistance to inhibitor herbicides: current understanding. *Pest Management Science*, *70*(9), 1340–1350. <https://doi.org/10.1002/ps.3710>
- Zuraina Widya Khonik, Pudjianto Eko, Magdalena Erni, Dewanti Devi Putri, Karina Saulia, & Damarjati Susilo Novianto. (2024). *STATISTIK PERKEBUNAN JILID I 2022-2024*.