

## **Pengaruh Pemberian Bakteri Fotosintetik dan Masa Inkubasi Tanah terhadap P-Tersedia dan Logam Berat Cadmium (Cd) pada Ultisol**

### **Effect of Photosynthetic Bacteria Application and Soil Incubation Period on Available Phosphorus and Cadmium (Cd) in Ultisol**

**SILVA INDRIYATI<sup>1)</sup>, NURUL PUSPITA PALUPI<sup>1)\*</sup>, RAHIMA ALIYA IHSANTI<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Jl. Pasir Balengkong, Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75119, Kalimantan Timur, Indonesia. Tel: +62-821-5011-1883, \*email: nurulpuspita2908@gmail.com

<sup>2)</sup>Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Agroindustri dan Biosistem, Universitas Brawijaya. Gedung FTP Lantai 6, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Kota Malang, Jawa Timur – 65145. Tel: +62-8 12-5052-8683

Manuscript received: Januari 14, 2026 Revision accepted: Juni 10, 2026

#### **ABSTRACT**

Ultisol soils are characterized by low fertility due to acidic soil reaction and limited phosphorus (P) availability. This study aimed to evaluate the effect of photosynthetic bacteria application and soil incubation period on available phosphorus and cadmium (Cd) in Ultisol. The research was conducted at the Soil and Plant Analysis Laboratory, Faculty of Agriculture, Mulawarman University, using a Completely Randomized Design with six doses of photosynthetic bacteria (0, 20, 30, 40, 50, and 60 mL 500 g<sup>-1</sup> soil) and three incubation periods (1, 2, and 3 months), with four replications. Observed parameters included soil pH, available P, and C content. Available P data were analyzed using analysis of variance, while Cd was evaluated descriptively. The results showed that the most effective treatment for increasing available phosphorus (P) was the application of 50 mL of photosynthetic bacteria per 500 g of soil with a three-month incubation period, resulting in an available P concentration of 40.21 ppm. Cd content gradually increased during incubation but remained within the normal range for agricultural soils. Overall, the application of photosynthetic bacteria with an appropriate incubation period has the potential to improve the chemical properties of Ultisol, particularly by enhancing P availability.

**Keywords:** Available Phosphorus, Cadmium (Cd), Incubation Period, Photosynthetic Bacteria, Ultisol

#### **ABSTRAK**

Tanah Ultisol memiliki tingkat kesuburan rendah akibat reaksi tanah masam dan rendahnya ketersediaan fosfor (P). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemberian bakteri fotosintetik dan masa inkubasi tanah terhadap Ptersedia dan logam berat Cd pada Ultisol. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Analisis Tanah dan Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, menggunakan Rancangan Acak Lengkap dengan enam dosis bakteri fotosintetik (0, 20, 30, 40, 50, dan 60 mL 500 g<sup>-1</sup> tanah) dan tiga masa inkubasi (1, 2, dan 3 bulan), dengan empat ulangan. Parameter yang diamati meliputi pH tanah, P-tersedia, dan kandungan Cd. Data P-tersedia dianalisis menggunakan sidik ragam, sedangkan Cd dianalisis secara deskriptif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan terbaik dalam meningkatkan P-tersedia adalah dosis 50 mL bakteri fotosintetik per 500 g tanah dengan masa inkubasi 3 bulan yang menghasilkan P-tersedia sebesar 40,21 ppm. Kandungan Cd mengalami peningkatan bertahap selama inkubasi, namun masih berada dalam batas normal tanah pertanian. Secara keseluruhan, aplikasi bakteri fotosintetik dengan masa inkubasi yang sesuai berpotensi memperbaiki sifat kimia tanah Ultisol, terutama dalam meningkatkan ketersediaan P.

**Kata kunci:** Bakteri Fotosintetik, Kadmium (Cd), Masa Inkubasi, P-tersedia, Ultisol

#### **PENDAHULUAN**

Tanah ultisol merupakan salah satu jenis tanah yang memiliki sebaran luas di Indonesia dan berpotensi besar untuk pengembangan pertanian, namun umumnya dicirikan oleh tingkat kesuburan yang rendah (Sudjadi *et al.*, 1990). tanah ini terbentuk pada daerah curah hujan tinggi sehingga mengalami pencucian basa secara intensif, yang menyebabkan reaksi tanah masam, kapasitas tukar kation rendah, serta ketersediaan unsur hara yang terbatas,

terutama P (Andalusia *et al.*, 2013). Rendahnya ketersediaan P pada tanah ultisol terutama disebabkan oleh fiksasi P oleh Al dan Fe, sehingga P berada dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman (Sanusi *et al.*, 2018).

Selain permasalahan hara, tanah ultisol juga berpotensi mengandung logam berat seperti Cd. Kadmium dapat berasal dari bahan induk tanah maupun dari aktivitas antropogenik, seperti penggunaan pupuk, pestisida, dan limbah pertanian (Wuana & Okieimen, 2011; Huang *et al.*, 2022). Logam berat Cd bersifat toksik, mudah terakumulasi di dalam tanah dan tanaman, serta berisiko mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia apabila masuk ke rantai makanan (Rizwan *et al.*, 2017).

Pemanfaatan bakteri fotosintetik (Photosynthetic Bacteria/PSB) merupakan salah satu pendekatan biologis yang berpotensi memperbaiki sifat kimia tanah ultisol secara ramah lingkungan. Bakteri fotosintetik mampu menghasilkan asam organik dan senyawa bioaktif yang berperan dalam melarutkan P terikat, sehingga meningkatkan ketersediaan P dalam tanah (Li *et al.*, 2019). Aktivitas mikroorganisme tanah juga memengaruhi dinamika logam berat melalui perubahan bentuk dan ketersediaannya di dalam tanah (Jeong *et al.*, 2012).

Efektivitas aplikasi bakteri fotosintetik sangat dipengaruhi oleh masa inkubasi tanah. Masa inkubasi memberikan waktu bagi mikroorganisme untuk beradaptasi dan menjalankan aktivitas metabolisme secara optimal, sehingga dapat meningkatkan ketersediaan P dan mempengaruhi dinamika logam berat dalam tanah (Sanusi *et al.*, 2018). Ultisol umumnya memiliki ketersediaan P yang rendah akibat tingginya fiksasi P oleh Al dan Fe. Pada penelitian ini, Ultisol yang digunakan memiliki P-tersedia sebesar 4,07 ppm yang termasuk kategori sangat rendah. Kondisi tersebut memerlukan upaya perbaikan yang mampu meningkatkan ketersediaan P secara ramah lingkungan sekaligus memperhatikan dinamika logam berat Cd. Meskipun pemanfaatan bakteri fotosintetik maupun masa inkubasi telah banyak dilaporkan dapat memperbaiki sifat kimia tanah, informasi mengenai kombinasi dosis bakteri fotosintetik dan masa inkubasi yang optimum dalam meningkatkan P-tersedia serta pengaruhnya terhadap dinamika logam berat Cd pada ultisol masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pemberian bakteri fotosintetik dan perbedaan masa inkubasi tanah terhadap P-tersedia dan dinamika logam berat Cd pada ultisol.

## BAHAN DAN METODE

### Waktu Dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan September 2025 hingga Desember 2025 terhitung mulai dari persiapan sampel tanah hingga analisis tanah. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Analisis Tanah dan Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Analisis kimia parameter pH H<sub>2</sub>O dan P-tersedia dilakukan di Laboratorium Analisis Tanah dan Tanaman. Analisis P-tersedia menggunakan metode Bray I yang disesuaikan dengan kondisi tanah masam untuk mengukur ketersediaan P bagi tanaman, sedangkan parameter logam berat Cd dilakukan di Laboratorium Tanah UPA PUSREHUT Universitas Mulawarman.

### Alat Dan Bahan

Alat yang digunakan yaitu gelas plastik, penutup plastik, cangkul, timbangan analitik, saringan tanah, penumbuk, dispenser 25 ml, tabung reaksi, pipet 2 ml, *sentrifuge*, botol kocok, mesin pengocok, *vortex mixer*, *microwave digester* dan *ph*. Bahan yang digunakan larutan *bray* dan *kurts*, pereaksi perwarna P encer, aquadest, pereaksi HNO<sub>3</sub> pekat, pereaksi HClO<sub>4</sub> pekat, standar P 20 ppm dan standar 1000 ppm Cd. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Tanah ultisols yang diambil dari Desa Mankurawang, Kecamatan Tenggarong, Kabupaten Kutai Kartanegara.
2. Bakteri Fotosintetik (*Photosynthetic Bacteria/PSB*) yang dibuat dengan bahan air hujan, telur, saus tiram dan MSG (Rizqi *et al.*, 2023).

### Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap. Terdapat enam perlakuan yang akan diulang sebanyak empat kali sehingga terdapat 24 unit percobaan. Kemudian, sampel tanah yang dianalisis per masa inkubasi adalah sampel komposit. Penggabungan sampel komposit menjadi 24 sampel penelitian dilakukan untuk menghemat biaya dan tenaga. Masa inkubasi terdiri dari satu bulan, dua bulan dan tiga bulan. Analisis tanah dilakukan pada hari ke- 30, 60, dan hari ke-90.

Adapun perlakuan dosis yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut;

P<sub>0</sub> = Kontrol, tanpa PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah

P<sub>1</sub> = 20 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah

P<sub>2</sub> = 30 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah

P<sub>3</sub> = 40 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah

P<sub>4</sub> = 50 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah

P<sub>5</sub> = 60 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah

### Prosedur Penelitian

#### 1. Pembuatan Bakteri Fotosintetik/PSB

Bakteri fotosintetik (*Photosynthetic Bacteria*/PSB) dibuat melalui proses fermentasi anaerobik dengan mencampurkan bahan-bahan alami berupa air hujan sebanyak 3 liter, tiga butir telur ayam, tiga sendok makan saus tiram, dan tiga sendok makan monosodium glutamat (MSG). Seluruh bahan dicampurkan secara merata dalam botol plastik dan dibiarkan selama 30 hari di bawah paparan sinar matahari langsung untuk mendukung pertumbuhan bakteri fotosintetik. Tanda PSB siap digunakan adalah ketika campuran berwarna merah.

#### 2. Analisis Awal

Tanah ultisol dianalisis secara kimia terlebih dahulu untuk mengetahui kandungan kimia pada tanah tersebut sebelum pemberian PSB. Tanah dikering anginkan dan lolos ayakan < 2 milimeter (mm), kemudian dilakukan analisis. PSB juga dianalisis awal. Analisis dilakukan pada parameter pH, kandungan P-tersedia dan logam berat Cd. P-Tersedia dianalisis dengan metode Bray sedangkan logam berat Cd dianalisis dengan metode *digestin block*.

#### 3. Persiapan Inkubasi Tanah

Tanah siap pakai sebagai media inkubasi dimasukkan ke dalam gelas plastik steril, kemudian setiap gelas ditimbang hingga mencapai 500 g, menggunakan timbangan analitik. Prosedur ini diulangi hingga diperoleh total 24 gelas media inkubasi siap digunakan.

#### 4. Pemberian PSB

Pemberian PSB dilakukan seminggu sekali selama 3 bulan. PSB diberikan sesuai dengan perlakuan dan ulangan diantaranya P<sub>1</sub> (20 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah), P<sub>2</sub> (30 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah), P<sub>3</sub> (40 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah), P<sub>4</sub> (50 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah), dan P<sub>5</sub> (60 ml PSB/500 g<sup>-1</sup> tanah).

#### 5. Penyiraman

Penyiraman dilakukan dua minggu sekali selama inkubasi berlangsung. Penyiraman dilakukan agar kelembapan tanah tetap terjaga dan mikroba dapat bertahan hidup. Frekuensi penyiraman adalah dua minggu sekali sebanyak 20 ml air. Tanah inkubasi setiap hari dicek kelembapannya.

#### 6. Analisis Akhir

Analisis akhir dilakukan pada parameter pH, P-tersedia dan logam berat Cd. Untuk parameter P-tersedia menggunakan metode Bray I, sedangkan parameter logam berat Cd menggunakan metode *digestin block*.

**Tabel 1.** Analisis Akhir

Parameter	Metode	Satuan	Awal	PSB	B-1	B-2	B-3
pH H <sub>2</sub> O	Elektrode	-	✓	✓	✓	✓	✓
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Bray	ppm	✓	✓	✓	✓	✓
Kadmium (Cd)	Digest Block	Mg kg <sup>-1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓

Keterangan: PSB (Pupuk Bakteri Fotosintetik); B-1 (Bulan pertama); B-2 (Bulan kedua); B-3 (Bulan ketiga)

**Tabel 2.** Kriteria Penilaian Analisis Tanah Parameter P-tersedia

Parameter	Nilai				
	SR	R	S	T	ST
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Bray (ppm P)	< 4	5-7	8-10	11-15	>15

Keterangan: SR (Sangat Rendah); R (Rendah); S (Sedang); T (Tinggi); ST (Sangat Tinggi)

Sumber: Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Bogor, 2023

**Tabel 3.** Status Penilaian pH dalam Tanah

	SM	M	AM	N	AA
pH H <sub>2</sub> O	< 4,5	4,5-5,5	5,5-6,5	6,6-7,5	7,6-8,5

Keterangan: SM (Sangat Masam); M (Masam); AM (Agak Masam); N (Netral); A (Agak Alkalis)

Sumber: Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Bogor, 2023

**Tabel 4.** Ambang Batas Logam Berat dalam Tanah

Elemen	Tanah (Mg kg <sup>-1</sup> )	
	Batas Normal	Batas Kritis
Cd	0,01-2,00	3-8

Sumber: Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Bogor, 2023

**Tabel 5.** Persyaratan Mutu Pupuk Organik Cair

Parameter	Standar Mutu
pH	4-9
N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O	2-6%
Cd	Maks. 1 ppm

Sumber: Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk Bogor, 2023

### Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menggunakan analisis ragam, apabila terdapat pengaruh perlakuan yang nyata. Apabila sidik ragam berbeda nyata maka dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf 5%.

## HASIL DAN DISKUSI

### Hasil

Analisis tanah dilakukan pada saat sebelum diberi perlakuan dan setelah diberi perlakuan. Hal ini untuk membandingkan hasilnya. Analisis tanah dilakukan pada parameter pH, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dan Cd. Analisis tanah setelah perlakuan dilakukan pada masa inkubasi pertama, kedua dan ketiga. Analisis dilakukan di Laboratorium Tanah Gedung OECF Universitas Mulawarman. Analisis tanah pada parameter logam berat Cd dilakukan di Laboratorium Tanah Unit Penunjang Akademik (UPA) Sumber Daya Hayati Hutan Tropis Lembab Universitas Mulawarman. Analisis karakteristik kimia pupuk bakteri fotosintetik juga dilakukan di Laboratorium Tanah Unit Penunjang Akademik Sumber Daya Hayati Hutan Tropis Lembab. Analisis tanah parameter logam berat Cd dilakukan menggunakan sampel komposit per masa inkubasi. Hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 6 dan 7.

**Tabel 6.** Hasil Analisis Karakteristik Kimia Tanah Sampel Awal Tanah

Parameter	Nilai	Status
pH	5,10	Masam
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm P)	4,07	Sangat Rendah
Cd (mg/kg)	0,54	Normal

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Tanah UPA PUSREHUT

**Tabel 7.** Hasil Analisis Karakteristik Kimia pada Pupuk Bakteri Fotosintetik

Parameter	Nilai	Status
pH	6,85	Normal
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm P)	0,13	Normal
Cd (mg/kg)	0,34	Normal
N Total (%)	0,25	Normal

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Tanah UPA PUSREHUT

**Tabel 8.** Nilai Rata-rata pH H<sub>2</sub>O Tiap Perlakuan

Perlakuan	Bulan Pertama		Bulan Kedua		Bulan Ketiga	
	Nilai	Status	Nilai	Status	Nilai	Status
P0	5,20	Masam	4,56	Masam	4,10	Sangat masam
P1	5,50	Agak masam	5,27	Masam	4,42	Sangat masam
P2	5,40	Masam	5,22	Masam	4,80	Masam
P3	5,80	Agak Masam	5,45	Masam	5,70	Agak Masam
P4	5,90	Agak Masam	5,24	Masam	5,66	Agak Masam
P5	5,90	Agak Masam	5,00	Masam	5,79	Agak masam

Keterangan: P<sub>0</sub>: Kontrol; P<sub>1</sub>: 20 ml; P<sub>2</sub>: 30 ml; P<sub>3</sub>: 40 ml; P<sub>4</sub>: 50 ml; P<sub>5</sub>: 60 ml

**Tabel 9.** Nilai Rata-rata P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (ppm P) Tiap Perlakuan

Perlakuan	Bulan Pertama		Bulan Kedua		Bulan Ketiga	
	Nilai	Status	Nilai	Status	Nilai	Status
P0	3,32	Sangat rendah	10,68	Sedang	15,51	Sangat tinggi
P1	0,76	Sangat rendah	7,30	Rendah	20,38	Sangat tinggi
P2	0,66	Sangat rendah	9,16	Sedang	22,21	Sangat tinggi
P3	0,30	Sangat rendah	2,13	Sangat rendah	28,16	Sangat tinggi
P4	0,46	Sangat rendah	6,50	Rendah	40,21	Sangat tinggi
P5	0,20	Sangat rendah	8,30	Sedang	18,04	Sangat tinggi

Keterangan: P<sub>0</sub>: Kontrol; P<sub>1</sub>: 20 ml; P<sub>2</sub>: 30 ml; P<sub>3</sub>: 40 ml; P<sub>4</sub>: 50 ml; P<sub>5</sub>: 60 ml

**Tabel 10.** Nilai Logam Berat Kadmium (Cd) pada sampel Tanah Komposit

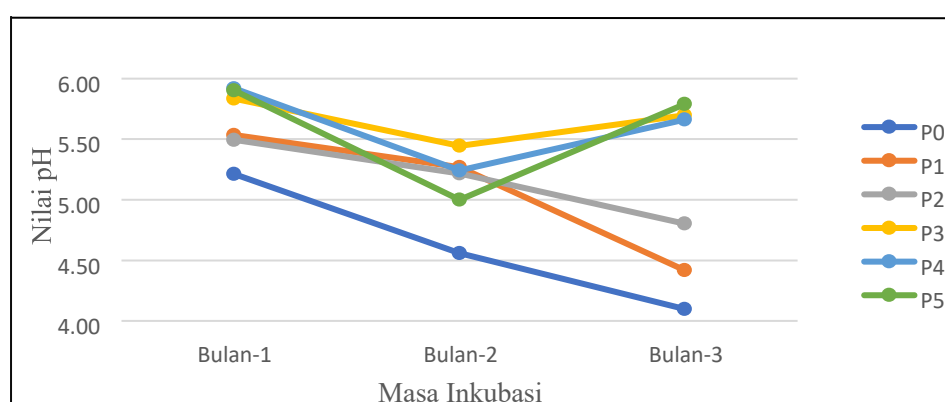
Sampel	Nilai	Status
B <sub>0</sub>	0,54	Normal
B <sub>1</sub>	0,69	Normal
B <sub>2</sub>	0,71	Normal
B <sub>3</sub>	0,76	Normal

Keterangan: B<sub>0</sub>: Kontrol; B<sub>1</sub>: Bulan Pertama; B<sub>2</sub>: Bulan Kedua ; B<sub>3</sub>: Bulan Ketiga

## Diskusi

### 1. Potensi Hidrogen (pH)

Sebelum pemberian bakteri fotosintetik, dilakukan analisis awal pada sampel tanah dan pada pupuk bakteri fotosintetik itu sendiri. Bakteri fotosintetik memiliki pH 6,85. Nilai pH tersebut masih dalam persyaratan nilai pH POC (Badan Penelitian Tanah Bogor). Sebelum diberi perlakuan pupuk bakteri fotosintetik, tanah dianalisis terlebih dahulu. Sampel tanah awal memiliki pH 5,10 (Masam).



**Gambar 1.** Grafik pH pada Bulan Pertama, Kedua dan Ketiga pada Tiap Perlakuan

Dilihat dari nilai rata-rata pada setiap perlakuan (masa inkubasi) pada Gambar 1 nilai pH mengalami perubahan yang dinamis. Pada perlakuan P<sub>0</sub> (Kontrol), nilai pH mengalami penurunan. Pada bulan pertama nilai

pH 5,20 (Masam), lalu pada bulan kedua nilai pH 4,56 (Masam) dan pada bulan ketiga nilai pH 4,10 (Sangat Masam). Pada perlakuan P<sub>0</sub> (Kontrol), pH tanah ultisol menurun karena tidak ada bahan organik yang dapat menetralkan kemasaman. Proses hidrolisis Al<sup>3+</sup>, nitrifikasi, pencucian kation basa, rendahnya bahan organik, dan aktivitas mikroba menyebabkan peningkatan ion H<sup>+</sup> sehingga pH semakin rendah (Hardjowigeno, 2015). Penurunan pH pada perlakuan kontrol terjadi akibat hidrolisis Al<sup>3+</sup> yang menghasilkan ion H<sup>+</sup>, proses nitrifikasi amonium menjadi nitrat, serta pencucian kation basa seperti Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, dan K<sup>+</sup> yang semakin intensif selama inkubasi (Utami *et al.*, 2018). Selain itu, rendahnya kandungan bahan organik pada tanah ultisol menyebabkan minimnya senyawa penyangga pH, sehingga peningkatan ion H<sup>+</sup> tidak dapat diredam secara efektif (Winarso *et al.*, 2019).

Pada perlakuan P<sub>1</sub> (20 ml pupuk bakteri fotosintetik), nilai pH mengalami penurunan. Pada bulan pertama nilai pH 5,50 (Agak Masam), lalu pada bulan kedua menurun menjadi 5,27 (Masam) dan pada bulan ketiga nilai pH 4,42 (Sangat Masam). Perlakuan P<sub>1</sub> (20 ml pupuk bakteri fotosintetik) tidak cukup untuk meningkatkan populasi bakteri. Pada tanah ultisol, bakteri dalam jumlah kecil tidak mampu bertahan dan bekerja optimal (Papin *et al.*, 2024). Bakteri fotosintetik umumnya tumbuh optimal pada kondisi pH netral hingga sedikit basa, sedangkan kondisi tanah ber-pH rendah dapat menghambat pertumbuhan dan aktivitas metaboliknya (Madigan *et al.*, 2018). Populasi mikroba yang rendah menyebabkan aktivitas metabolisme belum mampu menekan pengaruh negatif Al<sup>3+</sup> dan ion H<sup>+</sup> yang dominan pada tanah ultisol. Selain itu, pada fase awal inkubasi, bakteri fotosintetik cenderung menghasilkan asam-asam organik seperti asam asetat, asam laktat, dan asam sitrat sebagai hasil metabolisme, yang dapat menyebabkan penurunan pH tanah sementara (Sonia & Setiawati, 2022).

Pada perlakuan P<sub>2</sub> (30 ml pupuk bakteri fotosintetik), nilai pH mengalami penurunan namun dalam satu kelas status. Pada bulan pertama, nilai pH 5,40 (Masam), lalu bulan kedua menurun menjadi 5,22 (Masam) dan bulan terakhir menjadi 4,80 (Masam). Menurut Rahman (2020), mikroorganisme tanah memerlukan waktu adaptasi terhadap lingkungan masam, sehingga pengaruh positif terhadap pH tanah umumnya terlihat setelah aktivitas mikroba stabil.

Pada perlakuan P<sub>3</sub> (40 mL pupuk bakteri fotosintetik) nilai pH mengalami fluktuasi. Pada bulan pertama, nilai pH 5,80 (Agak Masam), lalu pada bulan kedua nilai pH-nya menurun menjadi 5,45 (Masam) dan terakhir pada bulan ketiga nilai pH naik menjadi 5,70 (Agak Masam). Fluktuasi ini mencerminkan fase adaptasi dan fase aktif bakteri fotosintetik selama masa inkubasi. Pada fase awal, bakteri menghasilkan asam organik yang menurunkan pH, namun pada fase lanjutan, aktivitas biologis mikroba menurunkan kelarutan Al<sup>3+</sup> serta meningkatkan ketersediaan kation basa, sehingga pH tanah kembali meningkat (Zhang *et al.*, 2020)

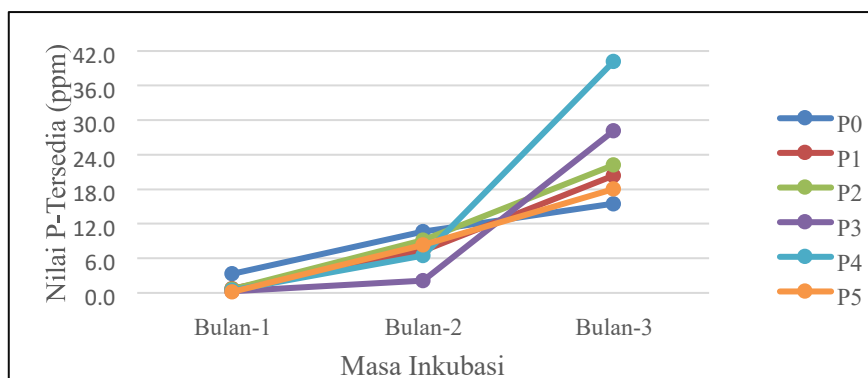
Pada perlakuan P<sub>4</sub> (50 ml pupuk bakteri fotosintetik), nilai pH pada bulan pertama 5,90 (Agak Masam), lalu pada bulan kedua nilai pH 5,24 (Masam) dan terakhir pada bulan ketiga naik menjadi 5,66 (Agak Masam). Populasi mikroba yang tinggi dapat meningkatkan aktivitas enzim tanah, mempercepat dekomposisi bahan organik, dan menghasilkan senyawa penetral kemasaman, sehingga pH tanah cenderung meningkat seiring waktu (Liu *et al.*, 2021). Pada perlakuan P<sub>5</sub> (60 ml pupuk bakteri fotosintetik), nilai pH hampir sama dengan perlakuan P<sub>4</sub>. Pada bulan pertama nilai pH 5,90 (Agak Masam), bulan kedua 5,00 nilai pH 5,00 (Masam) dan pada bulan ketiga nilai pH 5,79 (Agak Masam). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sonia & Setiawati (2022), setelah aplikasi bakteri, nilai pH tanah mengalami penurunan selama fase awal inkubasi disebabkan oleh sekresi asam organik oleh bakteri, lalu dapat berubah kembali seiring waktu secara dinamis selama masa inkubasi karena metabolisme mikroba dan proses penyesuaian tanah berlangsung.

## 2. P-Tersedia

Analisis awal dilakukan pada sampel awal tanah dan pupuk bakteri fotosintetik. Sampel tanah awal menunjukkan nilai 4,07 ppm termasuk dalam kategori sangat rendah. Sedangkan pada pupuk bakteri fotosintetik menunjukkan nilai 0,13 ppm termasuk kategori normal untuk mutu pupuk organik cair berdasarkan Badan Penelitian Tanah Bogor.

Pada Gambar 2 terlihat bahwa ketersediaan fosfor (P-tersedia) tanah ultisol mengalami peningkatan seiring bertambahnya masa inkubasi, dengan nilai tertinggi pada bulan ketiga ditemukan pada perlakuan P<sub>4</sub> (50 ml pupuk bakteri fotosintetik) dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara dosis bakteri fotosintetik dan lama masa inkubasi berperan penting dalam meningkatkan P-tersedia tanah ultisol.

Tingginya nilai P-tersedia pada perlakuan P<sub>4</sub> diduga tidak hanya berasal dari tanah, tetapi juga dipengaruhi oleh kandungan P pada pupuk bakteri fotosintetik itu sendiri, yang berdasarkan analisis awal memiliki nilai P-tersedia sebesar 0,13 ppm. Meskipun nilainya relatif kecil, keberadaan P dalam pupuk organik cair dapat berperan sebagai sumber awal P sekaligus pemicu aktivitas mikroba pelarut P selama masa inkubasi (Zhang *et al.*, 2020).



**Gambar 2.** Grafik P-Tersedia pada Bulan Pertama, Kedua dan Ketiga pada Tiap Perlakuan

Pada bulan pertama, dapat dilihat bahwa rata-rata nilai P-tersedia sangat rendah pada semua perlakuan. Pada P<sub>0</sub>, nilai P-tersedianya adalah 3,32 ppm. Nilai ini adalah yang tertinggi diantara semua perlakuan pada masa inkubasi bulan pertama. Hal ini dapat terjadi karena mikroba asli pada tanah ultisol yang digunakan. Kondisi ini diduga berasal dari aktivitas mikroorganisme *indigenus* (mikroba asli) tanah ultisol yang telah beradaptasi dengan lingkungan tanah tersebut. Mikroba asli umumnya telah memiliki mekanisme bertahan pada kondisi masam dan mampu memobilisasi P dalam jumlah terbatas (Huang *et al.*, 2017). Sedangkan pada perlakuan P<sub>1</sub> sampai P<sub>5</sub>, nilai P-tersedianya sangat rendah. Pada P<sub>1</sub> nilainya 0,76 ppm. Pada P<sub>2</sub> nilainya 0,66 ppm. Pada P<sub>3</sub> nilainya 0,30 ppm. Pada P<sub>4</sub> nilainya 0,46 ppm dan pada perlakuan P<sub>5</sub> nilainya 0,20 ppm. Perlakuan P<sub>1</sub> hingga P<sub>5</sub>, dikategorikan kelas sangat rendah. Hal ini terjadi karena mikroba bakteri belum sepenuhnya efektif terdekomposisi pada tanah. Mikroba bakteri fotosintetik yang ditambahkan masih berada dalam fase adaptasi awal dan belum sepenuhnya aktif dalam proses pelarutan P, sehingga kemampuan mereka untuk meningkatkan P-tersedia belum optimal. Pada fase awal inkubasi, mikroba sering kali lebih banyak mengalami proses pertumbuhan dan penyesuaian (immobilisasi P) daripada melepaskan P secara efektif, sehingga P-tersedia tanah tetap sangat rendah pada semua perlakuan awal (Sonia dan Setiawati, 2022). Selain itu, pada tanah ultisol yang bersifat masam, P umumnya terfiksasi kuat oleh oksida Al dan Fe yang membentuk senyawa aluminium P (AlPO<sub>4</sub>) dan besi P (FePO<sub>4</sub>) sehingga meskipun mikroba telah ditambahkan, pelepasan P ke bentuk tersedia membutuhkan waktu inkubasi yang cukup lama (Prasetyo *et al.*, 2016). Hal ini menjelaskan mengapa pada masa inkubasi bulan pertama seluruh perlakuan masih menunjukkan P-tersedia yang sangat rendah.

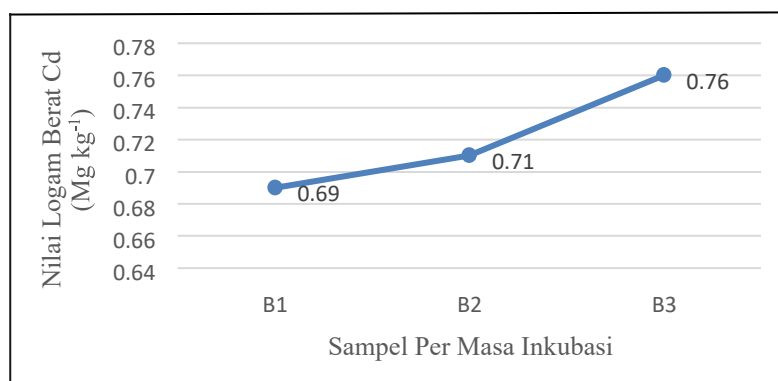
Pada bulan kedua, rata-rata nilai P-tersedia mulai naik perlahan. Pada P<sub>0</sub> (Kontrol), nilainya 10,68 ppm (sedang). P<sub>1</sub> nilainya 7,30 ppm (rendah). P<sub>2</sub> nilainya 9,16 ppm. Perlakuan P<sub>3</sub> 2,13 ppm (sangat rendah). Perlakuan P<sub>4</sub> 6,50 ppm dan P<sub>5</sub> 8,30 ppm (sedang). Peningkatan nilai P-tersedia pada perlakuan P<sub>1</sub> hingga P<sub>5</sub> disebabkan aktivitas mikroba dan produksi asam organik mencapai fase yang lebih stabil dan efektif dalam melepaskan P dari bentuk terikat. Pada perlakuan P<sub>0</sub> (kontrol), peningkatan P-tersedia pada bulan kedua juga terjadi, meskipun tanpa penambahan pupuk bakteri fotosintetik. Hal ini menunjukkan bahwa proses mineralisasi bahan organik dan aktivitas mikroba alami tanah tetap berlangsung selama inkubasi. Namun, peningkatan tersebut relatif lebih rendah dibandingkan perlakuan dengan penambahan bakteri fotosintetik, yang menegaskan bahwa input mikroba eksternal mampu mempercepat mobilisasi P tanah (Wang *et al.*, 2020).

Pada bulan ketiga, nilai P-tersedia naik secara drastis. Pada P<sub>0</sub> (kontrol) nilai P-tersedia 15,51 ppm. Perlakuan P<sub>1</sub> sebesar 20,38 ppm. Perlakuan P<sub>2</sub> sebesar 22,21 ppm. Perlakuan P<sub>3</sub> sebesar 28,16 ppm. Perlakuan P<sub>4</sub> sebesar 40,21 ppm. Perlakuan P<sub>4</sub> (50 ml pupuk bakteri fotosintetik) adalah yang tertinggi nilai P-tersedianya. Tingginya nilai ini menunjukkan bahwa dosis bakteri fotosintetik sebesar 50 ml merupakan dosis optimum dalam meningkatkan ketersediaan P pada tanah ultisol. Pada fase ini, bakteri fotosintetik telah beradaptasi secara optimal dan mampu bekerja secara maksimal dalam melarutkan P terikat melalui produksi asam organik, enzim fosfatase, serta interaksi biologis lainnya (Khan *et al.*, 2018). Peningkatan P-tersedia yang signifikan pada perlakuan P<sub>1</sub> hingga P<sub>4</sub> menunjukkan bahwa masa inkubasi yang lebih lama memberikan waktu yang cukup bagi mikroba untuk menstabilkan aktivitas metaboliknya, sehingga proses pelarutan P berlangsung lebih efektif. Efek pupuk organik cair terhadap ketersediaan P umumnya baru terlihat optimal setelah inkubasi lebih dari satu bulan, terutama pada tanah masam seperti ultisol (Garcia-Lopez *et al.*, 2022). Terakhir, perlakuan P<sub>5</sub> (60 ml) sebesar 18,04 ppm. Penurunan pada P<sub>5</sub> dapat disebabkan karena bakteri tidak lagi efisien pada dosis yang sangat tinggi dimana asam organik menjadi tinggi dan P terfiksasi kembali oleh Al dan Fe (Muktamar *et al.*, 2025).

Peningkatan P-tersedia selama masa inkubasi tidak hanya berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara bagi tanaman, tetapi juga berpotensi mempengaruhi dinamika logam berat Cd di dalam tanah. P yang tersedia dalam larutan tanah dapat berinteraksi dengan ion  $Cd^{2+}$  membentuk senyawa kadmium P yang relatif sukar larut sehingga dapat menurunkan mobilitas dan bioavailabilitas Cd. Selain itu, aktivitas bakteri selama masa inkubasi dapat menghasilkan berbagai senyawa organik yang berperan dalam proses adsorpsi, kompleksasi, dan imobilisasi logam berat dalam tanah. Menurut Wang *et al.* (2022), mikroorganisme tanah mampu mempengaruhi fraksinasi dan ketersediaan logam berat melalui berbagai proses biologis dan kimia selama inkubasi. Selain itu, Zulfiqar *et al.* (2022) menyatakan bahwa keberadaan P dan aktivitas mikroba dapat berkontribusi terhadap perubahan spesiasi Cd sehingga mempengaruhi mobilitas serta ketersediaannya di dalam tanah. Pada penelitian ini, peningkatan P-tersedia seiring bertambahnya masa inkubasi menunjukkan adanya potensi interaksi antara P dan Cd dalam tanah ultisol. Namun demikian, karena parameter yang diamati adalah kandungan Cd total, maka perubahan bentuk dan bioavailabilitas Cd tidak dapat dijelaskan secara langsung.

### 3. Logam Berat Kadmium (Cd)

Pada analisis awal tanah, nilai logam berat Cd adalah  $0,54 \text{ Mg kg}^{-1}$  termasuk dalam kategori normal berdasarkan persyaratan mutu kualitas tanah Badan Penelitian Bogor. Sedangkan pada pupuk bakteri fotosintetik sendiri, nilai logam beratnya  $0,34 \text{ Mg kg}^{-1}$  termasuk dalam status normal. Sampel tanah yang dianalisis per masa inkubasi adalah sampel komposit. Sampel komposit adalah gabungan dari 24 sampel penelitian. Sampel komposit bulan pertama di beri nama B<sub>1</sub>. Sampel komposit kedua diberi nama B<sub>2</sub>. Dan yang terakhir adalah sampel komposit bulan ketiga diberi nama B<sub>3</sub>.



**Gambar 3.** Grafik Logam Berat Kadmium (Cd) pada Sampel Tanah Komposit

Berdasarkan hasil analisis kandungan logam berat Cd pada sampel komposit pada Gambar 3 terlihat adanya peningkatan kadar Cd secara bertahap dari sampel B<sub>1</sub> hingga B<sub>3</sub>. Nilai Cd pada sampel komposit B<sub>1</sub> sebesar  $0,69 \text{ Mg kg}^{-1}$ , meningkat menjadi  $0,71 \text{ Mg kg}^{-1}$  pada B<sub>2</sub>, dan mencapai  $0,76 \text{ Mg kg}^{-1}$  pada B<sub>3</sub>. Peningkatan ini menunjukkan bahwa masa inkubasi dan proses yang menyertainya berpengaruh terhadap dinamika ketersediaan kadmium dalam tanah ultisol. Peningkatan kadar Cd yang terukur selama masa inkubasi juga sangat berkaitan dengan kondisi pH tanah ultisol yang cenderung masam ( $\text{pH} < 7$ ). Pada tanah masam, kelarutan dan mobilitas logam berat, termasuk kadmium, umumnya lebih tinggi dibandingkan tanah netral hingga basa. Kondisi pH rendah menyebabkan ion Cd lebih mudah terlepas dari ikatan mineral liat, oksida besi (Fe), dan aluminium (Al), sehingga fraksi Cd tersedia dalam larutan tanah meningkat.

Peningkatan kadar kadmium yang terjadi secara perlahan tersebut masih tergolong rendah dan diduga berkaitan dengan sumber bahan penyusun pupuk bakteri fotosintetik, seperti air hujan, telur, dan monosodium glutamat (MSG). Bahan-bahan organik tersebut diketahui dapat mengandung jejak logam berat dalam konsentrasi sangat kecil, yang tidak langsung berbahaya, namun dapat terakumulasi selama proses fermentasi dan inkubasi berlangsung (Nugroho *et al.*, 2020). Proses akumulasi menjadi lebih nyata seiring waktu inkubasi yang lebih lama.

Selain faktor bahan baku, aktivitas mikroba fotosintetik selama fermentasi dan inkubasi tanah juga berperan dalam meningkatkan kelarutan kadmium. Mikroorganisme diketahui mampu menghasilkan asam-asam organik seperti asam sitrat, asam asetat, dan asam laktat, yang dapat menurunkan pH mikro di sekitar partikel tanah dan melepaskan kadmium dari ikatan mineral atau fraksi organik tanah (Li *et al.*, 2018). Kondisi ini menyebabkan kadmium lebih mudah terdeteksi dalam analisis laboratorium meskipun total kandungannya relatif kecil. Meskipun terjadi peningkatan kadar kadmium dari B<sub>1</sub> hingga B<sub>3</sub>, nilai yang diperoleh masih berada di bawah

ambang batas kritis kadmium tanah pertanian yang ditetapkan secara internasional, yaitu sekitar 1-3 Mg kg<sup>-1</sup>, tergantung standar yang digunakan (FAO, 2017). Hal ini menunjukkan bahwa pemberian bakteri fotosintetik dan masa inkubasi dalam penelitian ini belum menimbulkan resiko pencemaran kadmium, namun tetap perlu diperhatikan sebagai aspek lingkungan dalam penggunaan pupuk organik cair secara berkelanjutan.

Peningkatan Cd yang terukur juga dapat dikatakan sebagai perubahan dari kadmium terikat menjadi kadmium tersedia, bukan semata-mata penambahan Cd baru ke dalam tanah. Proses inkubasi dengan bantuan mikroba sering kali meningkatkan fraksi logam berat yang larut atau tersedia tanpa menaikkan kandungan total logam berat secara signifikan. Hal ini penting untuk dipahami agar tidak terjadi kesalahan terhadap data kandungan logam berat (Wang *et al.*, 2022).

#### 4. Pengaruh Pemberian Bakteri Fotosintetik terhadap P-Tersedia dan Logam Berat Kadmium (Cd)

Berdasarkan hasil analisis sidik ragam, pemberian bakteri fotosintetik terhadap P-tersedia dan logam berat Cd pada tanah ultisol menunjukkan pengaruh yang tidak nyata secara statistik pada setiap dosis perlakuan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai F-hitung yang lebih kecil dibandingkan F-tabel pada taraf 5%, yang mengindikasikan bahwa perbedaan antar dosis perlakuan relatif tipis dan belum cukup kuat untuk menghasilkan perbedaan yang signifikan secara statistik. Meskipun demikian, secara deskriptif terlihat adanya kecenderungan peningkatan P-tersedia seiring dengan bertambahnya dosis bakteri fotosintetik pada bulan ketiga, di mana perlakuan dosis menengah menunjukkan nilai P-tersedia yang lebih tinggi dibandingkan kontrol. Kondisi ini mengindikasikan bahwa bakteri fotosintetik tetap berperan dalam proses pelarutan P terikat melalui aktivitas metabolisme mikroba, seperti produksi asam organik dan enzim fosfatase, meskipun efeknya belum terdeteksi nyata secara statistik akibat variasi data yang relatif kecil antar perlakuan.

Sementara itu, pada parameter logam berat Cd, pengaruh pemberian bakteri fotosintetik tidak dianalisis menggunakan sidik ragam, karena pengamatan Cd dilakukan pada sampel tanah komposit per masa inkubasi, bukan berdasarkan satuan perlakuan dosis. Perubahan kadar Cd yang terukur lebih mencerminkan respon biologis dan kimia tanah akibat aktivitas mikroba fotosintetik, seperti penurunan pH mikro dan peningkatan kelarutan Cd dari bentuk terikat menjadi lebih tersedia.

#### 5. Pengaruh Masa Inkubasi terhadap P-Tersedia dan Logam Berat Kadmium (Cd)

Masa inkubasi memberikan pengaruh yang jelas terhadap dinamika P-tersedia dan logam berat Cd di dalam tanah. Seiring bertambahnya waktu inkubasi, nilai P-tersedia cenderung meningkat, terutama pada inkubasi bulan kedua hingga bulan ketiga. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses biologis dan kimia tanah memerlukan waktu agar berjalan secara optimal, khususnya aktivitas mikroorganisme dalam melarutkan P yang terfiksasi. Selain itu, masa inkubasi juga memengaruhi perubahan kadar logam berat Cd. Nilai Cd terukur menunjukkan kecenderungan meningkat dari bulan pertama hingga bulan ketiga inkubasi. Peningkatan ini bukan disebabkan oleh penambahan Cd baru ke dalam tanah, melainkan akibat perubahan bentuk Cd dari fraksi terikat menjadi lebih tersedia seiring berlangsungnya proses inkubasi. Kondisi tanah yang masam serta aktivitas mikroba selama inkubasi dapat meningkatkan kelarutan Cd melalui pembentukan asam-asam organik dan perubahan lingkungan mikro tanah. Dengan demikian, masa inkubasi berperan penting dalam mengendalikan ketersediaan P dan dinamika Cd tanah.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan dapat disimpulkan bahwa:

1. Pemberian bakteri fotosintetik berpengaruh terhadap peningkatan P-tersedia pada ultisol. Dosis optimum diperoleh pada perlakuan P4 (50 mL per 500 g tanah) dengan nilai P-tersedia sebesar 40,21 ppm pada bulan ketiga, meningkat dari kondisi awal sebesar 4,07 ppm.
2. Perbedaan masa inkubasi tanah berpengaruh terhadap kandungan P-tersedia dan dinamika ketersediaan logam berat Cd pada ultisol. Masa inkubasi 3 bulan merupakan masa inkubasi terbaik dalam meningkatkan P-tersedia. Nilai P-tersedia meningkat dari 3,32–0,20 ppm pada bulan pertama menjadi 15,51–40,21 ppm pada bulan ketiga.
3. Kandungan Cd meningkat dari 0,54 Mg kg<sup>-1</sup> pada tanah awal menjadi 0,76 Mg kg<sup>-1</sup> pada bulan ketiga, namun masih berada dalam kisaran normal tanah pertanian (< 2 Mg kg<sup>-1</sup>).

## DAFTAR PUSTAKA

- Agusni & Satriawan, H. (2012). *Perubahan kualitas tanah Ultisol akibat penambahan berbagai sumber bahan organik*. *Jurnal Ilmu Tanah dan Agroklimatologi*, 12(3), 32–36. <https://jurnal.umuslim.ac.id/index.php/LTR1/article/view/62>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Andalusia, B., Zainabun, Z., & Arabia, T. (2016). *Karakteristik tanah ordo Ultisol di perkebunan kelapa sawit PT Perkebunan Nusantara I (Persero) Cot Girek Kabupaten Aceh Utara*. *Jurnal Kawista Agroteknologi*, 1(1), 45–49. <https://adoc.pub/karakteristik-tanah-or-do-ultisol-di-perkebunan-kelapa-sawit-.html>
- Antonius, S., Sahputra, R. D., Nuraini, Y., & Dewi, T. K. (2018). *Manfaat pupuk organik hayati, kompos dan biochar pada pertumbuhan bawang merah dan pengaruhnya terhadap biokimia tanah pada percobaan pot menggunakan tanah Ultisol*. *Jurnal Biologi Indonesia*, 14(2), 243–250. <https://journal.ipb.ac.id/jbiologi/article/view/xxxxx>
- Asmuni, A., Avivi, S., & Winarso, S. (2017). *Pertumbuhan sawi yang berasosiasi dengan bakteri *Synechococcus sp.* pada berbagai kondisi media salinitas*. *AGROVIGOR*, 10(1), 64–72. <https://agrovigor.ejournal.unri.ac.id/index.php/agrovigor/article/view/xxx>
- Balai Penelitian Tanah. (2023). *Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk* (Edisi III). Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Bogor
- Chen, Y., Rekha, P. D., Arun, A. B., Shen, F. T., Lai, W. A., & Young, C. C. (2021). *Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities*. *Applied Soil Ecology*, 158, 103780. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103780>
- Fahrunsyah, F., Kusuma, Z., & Mulyadi, M. (2023). *Perubahan pH, aluminium dapat tukar dan fosfor tersedia Ultisol karena pemberian pupuk organik batang pisang dan abu terbang batubara*. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 11(1), 45–54. <https://jatl.ejournal.ipb.ac.id/index.php/jatl/article/view/xxx>
- Fahrunsyah, F., Mulyadi, M., Sarjono, A., & Darma, S. (2021). *Peningkatan efisiensi pemupukan fosfor pada Ultisol dengan menggunakan abu terbang batubara*. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 8(1), 189–202. <https://jtsl.ejournal.ipb.ac.id/index.php/jtsl/article/view/xxx>
- FAO. (2017). *Guidelines for soil description* (4th ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations
- García-López, A. M., Recena, R., Delgado, A., & Cayuela, M. L. (2022). *Biofertilizers as sustainable tools to improve phosphorus availability in acidic soils*. *Agronomy*, 12(3), 635. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030635>
- Girsang, Y., & Widodo, R. A. (2025). *Pengaruh pemberian bakteri pelarut fosfat dan pupuk kandang sapi terhadap ketersediaan P tanah Andosol Kopeng Semarang Jawa Tengah*. *Jurnal Tanah dan Air*, 20(2).
- Hakim, D. L. (2019). *Ensiklopedi jenis tanah di dunia*. Uwais Inspirasi Indonesia.
- Hariani, M., Khalisa, A. H., & Mahdiannoor (2024). *Aplikasi Photosynthetic Bacteria terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman stroberi di dataran rendah*. *Jurnal Daun*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.33084/daun.v11i1.7543>
- Hardjowigeno, S. (2015). *Ilmu tanah*. Akademi Presindo.
- Hariato, E., Rahmidiyani, R., & Radian, H. (2021). *Pengaruh lama inkubasi pupuk kotoran kambing terhadap pertumbuhan dan hasil jagung semi pada tanah aluvial*. *Jurnal Sains Pertanian Equator*, 10(2). <https://doi.org/10.26418/jspe.v10i2.45709>
- Hidayati, N., Putra, R., & Lestari, P. (2019). *Potensi bahan organik rumah tangga sebagai sumber mikro-logam pada proses fermentasi mikroba*. *Jurnal Biologi Lingkungan*, 8(2), 112–120.
- Huang, Y., Mubeen, S., Yang, Z., & Wang, J. (2022). *Cadmium contamination in agricultural soils and crops*. In *Soil Contamination and Remediation*. Springer. 283–301. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-xxx>
- Huang, J., Xu, C., Ridoutt, B. G., Wang, X., & Ren, P. (2017). *Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to agricultural soils*. *Journal of Cleaner Production*, 159, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.008>
- Irfan. (2009). *Teknologi kompos dan aplikasinya di lapangan*. Bogor: Balai Penelitian Tanah

- Islam, A., & Ahammed, G. J. (2022). *Cadmium contamination in the soil environment: Impact on ecosystem and human health*. In *Soil Contamination and Remediation*. Springer: 345–366. [https://doi.org/10.1007/978-3031-56642-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3031-56642-4_4)
- Jeong, S., Moon, H. S., Nam, K., Kim, J. Y., & Kim, T. S. (2012). *Application of phosphate-solubilizing bacteria for enhancing bioavailability and phytoextraction of cadmium (Cd) from polluted soil*. *Chemosphere*, 88(2), 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.034>
- Juliyanti, J., Setiawan, B., Kurniawan, T., & Ramanda, R. F. (2024). *Pengaruh pengaplikasian photosynthetic bacteria terhadap pertumbuhan bibit kopi Robusta (Coffea canephora) di media tanah Ultisol*. *JAP: Journal of Agro Plantation*, 3(2), 314–319. <https://doi.org/10.58466/jap.v3i2.1686>
- Khan, M. S., Zaidi, A., Wani, P. A., & Oves, M. (2018). *Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—A review*. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(4), 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0516-6>
- Lake, Y., Neonbeni, E. Y., Bria, D., & Naisali, H. (2025). *Pengaruh waktu inkubasi dan takaran kompos kotoran ayam terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman pakcoy (Brassica rapa L.)*. *Agrisaintifika*, 9(1), 92–99. <https://doi.org/10.32585/ags.v9i1.5557>
- Li, Y., Cheng, Y., Narayanan, M., Shi, X.-J., Chen, X. & Ma, Y (2019). *Phosphate-solubilizing bacteria: Their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity*. *Science of The Total Environment*, 658, 1110–1120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.123>
- Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T. J., Yuan, Z., & Huang, L. (2018). *A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment*. *Science of the Total Environment*, 468–469, 843–853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>
- Liu, Y., Wang, J., Zhang, H., & Li, X. (2021). *Effects of microbial inoculants on soil acidity, enzyme activities, and nutrient availability in acidic soils*. *Applied Soil Ecology*, 168, 104120. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104120>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson Education. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/brockbiology-of-microorganisms/P200000006237>
- Mubarok, A., Sutanto, A., & Santosa, D. A. (2016). *Pengaruh berbagai jenis pupuk kandang terhadap pertumbuhan tanaman*. *Jurnal Ilmu Pertanian Agros*, 25(3), 335–344.
- Muktamar, Z., Widayati, A., & Sari, R. (2025). *Pengaruh dosis bakteri pelarut fosfat terhadap ketersediaan P pada tanah masam*. *Jurnal Ilmu Tanah Tropika*, 13(1), 45–54.
- Musahidin, M., Purnomo, S., Subardja, V., & B, F. (2022). *Penggunaan Dosis Dekomposer dan Perbedaan Waktu Inkubasi Pada Bokashi Kotoran Walet Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Sawi Hijau (Brassica juncea L.) di Tanah Marginal*. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(1), 45–52. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5813561>
- Nugroho, A., Widodo, W., & Handayanto, E. (2020). *Heavy metal content in biofertilizers and its implication for soil quality*. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 4(2), 45–52. <https://doi.org/10.26554/ijems.2020.4.2.45-52>
- Pane, K. N., Walida, H., Saragih, S. H. Y., & Dalimunthe, B. A. (2021). *Analisis karakteristik sifat biologi tanah Ultisol setelah diinkubasi dengan kompos limbah buah dan sayuran*. *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, 11(2). <https://doi.org/10.47662/alulum.v11i2.xxxx>
- Papin, R., Santoso, E., & Nurhidayati, N. (2024). *Survival and activity of beneficial bacteria in acidic soils under different organic amendments*. *Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 21(1), 45–56. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v21i1.XXXX>
- Pasaribu, N. R., Fauzia, & Hanafiah, A. S. (2018). *Aplikasi beberapa bahan organik dan lamanya inkubasi dalam meningkatkan P-tersedia tanah Ultisol*. *TALENTA Conference Series: Agricultural and Natural Resources*, 1(2), 110–117. <https://doi.org/10.32734/anr.v1i1.129>
- Prasetyo, B. H., Subagyo, H., & Hikmatullah, H. (2016). *Ultisol: Characteristics, constraints, and management for agricultural development*. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 17(2), 67–81. <https://doi.org/10.21082/ijas.v17n2.2016.67-81>
- Rahman, M. M., Islam, M. R., & Hossain, M. A. (2020). *Microbial adaptation and soil pH dynamics during incubation period in acidic soils*. *Soil Research*, 58(4), 356–364. <https://doi.org/10.1071/SR19123>
- Rizqi, M. A., Laupa, M. F. A., Aninia, L. C., Ekaputri, D., Da'inawari, K., Saragi, L. B., Rahman, K. A., & Apriastika, I. N. (2023). *Penyuluhan pembuatan pupuk photosynthetic bacteria (PSB) sebagai upaya peningkatan produktivitas pertanian di Desa Argapura, Bogor*. *Jurnal Pusat Inovasi Masyarakat*, 5(2), 218–225. <https://doi.org/10.29244/jpim.5.2.218-225>

- Rizwan, M., Khan, A., & Alam, M. (2017). *Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. Science of The Total Environment, 601–602, 1591–1609.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.100>
- Sanusi, S., Ch'ng, H. Y., & Othman, S. (2018). *Effects of incubation period and Christmas Island rock phosphate with different rate of rice straw compost on phosphorus availability in acid soil. AIMS Agriculture and Food, 3(4), 384–396.* <https://doi.org/10.3934/agrfood.2018.4.384>
- Septiaji, E. D., Bimasri, J., & Amin, Z. (2024). *Karakteristik sifat fisik tanah Ultisol berdasarkan tingkat kemiringan lereng. Agroradix, 7(2).* <https://doi.org/10.52166/agroteknologi.v7i2.6462>
- Sonia, A. V., & Setiawati, T. C. (2022). *Aktivitas bakteri pelarut fosfat terhadap peningkatan ketersediaan fosfat pada tanah masam. Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi, 15(1), 44–53.* <https://doi.org/10.21107/agrovigor.v15i1.13449>
- Sudjadi, M., Suryatna, & Effendi, S. (1990). *Soil fertility constraints in Indonesia and methods of improvement. Japan International Research Center for Agricultural Sciences.* <http://www.jircas.go.jp/en/publication/tars/24/69-78.pdf>
- Subagyo, H., Siswanto, A. B., & Ritung, S. (2004). *Tanah-tanah pertanian di Indonesia. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Litbang Pertanian*
- Syachroni, S. H. (2017). *Analisis kandungan logam berat kadmium (Cd) pada tanah sawah di Kota Palembang. Sylva: Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Kehutanan, 18(2), 171–180.*
- Tando, E. (2018). *Upaya efisiensi dan peningkatan ketersediaan nitrogen dalam tanah serta serapan nitrogen pada tanaman padi sawah (Oryza sativa L.). Jurnal Buana Sains, 18(2), 171–180.* <https://doi.org/10.33366/bs.v18i2.1190>
- Titrawani, T., Nasution, D. D., Fathuroji, A. F., Sintika, D. M., Hudiyan, S., & Nurdianah, S. (2022). *Pembuatan dan pengaplikasian bakteri fotosintesis (Synechococcus sp.) pada tanaman obat keluarga (TOGA) di Desa Suka Mulya. Universitas Riau. Journal of Comprehensive Science, 1(2), 145–149.* <https://doi.org/10.59188/jcs.v1i2.25>
- Tongarlak, S., Zengin, M., & Mamedov, A. (2020). *Investigating cadmium accumulation in wheat and barley cultivars from acidic soil of Central Turkey. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 26(1), 157–166.* <https://www.agrojournal.org/26/01-157.pdf>
- Utami, S. R., Prijono, S., & Handayanto, E. (2018). *Leaching of base cations and soil acidity development in tropical Ultisols. Journal of Tropical Soils, 23(2), 89–98.* <https://doi.org/10.5400/jts.2018.23.2.89>
- Wang, L., Chen, H., Liu, Y., & Zhang, X. (2022). *Changes in heavy metal fractionation and bioavailability during soil incubation with microbial amendments. Ecotoxicology and Environmental Safety, 234, 113375.* <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113375>
- Winarso, S., Widodo, W., & Hidayat, A. (2019). *Buffer capacity and acidity changes of Ultisols as affected by organic matter management. Soil and Environment, 38(1), 12–20.* <https://doi.org/10.25252/SE/19/56789>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). *Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks, and best available strategies for remediation. International Scholarly Research Notices, 2011, Article ID 402647.* <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Yuniwati, M., Iskarima, F., & Padulemba, A. (2012). *Optimasi kondisi proses pembuatan kompos dari sampah organik dengan cara fermentasi menggunakan EM4. Jurnal Teknologi, 5(2), 172–181.*
- Zhang, X., Li, F., & Yang, Y. (2020). *Microbial mediation of cadmium mobility in acidic agricultural soils. Geoderma, 375, 114470.* <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114470>
- Zulfiqar, U., Jiang, W., Wang, X., Hussain, S., Ahmad, M., Maqsood, M. F., Ali, N., Ishfaq, M., Kaleem, M., Haider, F. U., Farooq, N., Naveed, M., Kucerik, J., Brtnicky, M., & Mustafa, A. (2022). *Cadmium phytotoxicity, tolerance, and advanced remediation approaches in agricultural soils: A comprehensive review. Frontiers in Plant Science, 13, 773815.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.773815>