Jurnal Agrotek Lestari Vol. 12 No. 2, April 2026 P-ISSN: 2477-4790
PP. 133-146 E-ISSN: 2721-8945

# Sinergisme *Serratia Marcescens* AR1 dan Pupuk Organik Kandang Ayam dalam Memodulasi Karakter Agronomis Mentimun *(Cucumis sativus* L.) pada Ultisol

# Synergistic Effects of *Serratia marcescens* AR1 and Chicken Manure Organic Fertilizer in Modulating the Agronomic Characteristics of Cucumbers (*Cucumis sativus* L.) in Ultisols

**Rony Rahmat Hidayat Hasibuan[1], Siti Aminah[2], Hilmina Itawarnemi[2], Agustinur[2], Yulia Windi Tanjung[1]**

[1] Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian Universitas Teuku Umar, Aceh Barat, Aceh.
[2] Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Teuku Umar, Aceh Barat, Aceh.
Corresponding Author: ronyrahmat@utu.ac.id

## *ABSTRACT*

*Horticultural development on ultisols is heavily constrained by extreme acidity and nutrient fixation induced by aluminum. This study aimed to evaluate the agronomic parameters of cucumber (Cucumis sativus L.) through rhizosphere engineering based on the endophytic bacterium Serratia marcescens AR1 and chicken manure organic fertilizer. The experimental method employed a single-factor Completely Randomized Design consisting of six treatment combinations and three replications. The analysis of variance indicated that the bio-organic interaction treatments had a highly significant effect on soil quality, vegetative phase, and yield components. Treatment F (25 ml of AR1 bacterium + 400 g of manure) consistently yielded the most superior performance. This application successfully increased soil pH to 5.65, reduced toxic exchangeable aluminum (Al-dd) to a mere 0.15 me/100g, and substantially elevated soil P and K availability. The improvement of the root microenvironment stimulated maximum vegetative growth, achieving a plant height of 219.77 cm and a leaf count of 64.56 leaves. This functional synergistic effect facilitated photosyntate translocation, which was validated by a very high level of tissue K nutrient transport status. This chain of stimulation culminated in a surge of generative components, producing 93.33 flower buds and boosting the total harvested fruit weight to its highest point at 2.353.00 grams per plant. This integrated bio-organic approach is proven valid as a cutting-edge solution to optimize horticultural crop productivity in suboptimal lands.*

***Keywords***: *Bio-Organic synergism, Cucumis sativus l., Marginal land, Rhizosphere engineering, Serratia marcescens AR1*

## ABSTRAK

Pengembangan hortikultura pada ultisol terkendala keasaman ekstrem dan fiksasi hara oleh aluminium. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi parameter agronomi mentimun (*Cucumis sativus* L.) melalui rekayasa zona perakaran berbasis bakteri endofit *Serratia marcescens* AR1 dan pupuk organik kandang ayam. Metode eksperimen menggunakan Rancangan Acak Lengkap tunggal dengan enam kombinasi perlakuan dan tiga ulangan. Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa perlakuan interaksi bio-organik berpengaruh sangat nyata terhadap kualitas tanah, fase vegetatif, dan komponen hasil. Perlakuan F (Bakteri AR1 25 ml + 400 g pupuk kandang) secara konsisten memberikan hasil terbaik. Aplikasi ini berhasil meningkatkan pH tanah menjadi 5,65, mereduksi aluminium toksik (Al-dd) hingga tersisa

0.15 me/100g serta melesatkan ketersediaan P dan K tanah. Perbaikan lingkungan mikro perakaran merangsang pertumbuhan vegetatif maksimal dengan tinggi tanaman 219.77 cm dan jumlah daun 64.56 helai. Efek sinergis fungsional tersebut memperlancar translokasi fotosintat yang terkonfirmasi dari status angkutan hara K jaringan pada level sangat tinggi. Rantai stimulasi tersebut bermuara pada pelonjakan komponen generatif yang menghasilkan 93.33 kuntum bunga dan mendongkrak berat total buah panen hingga mencapai titik tertinggi sebesar 2.353.00 gram per tanaman. Integrasi bio-organik ini terbukti valid menjadi solusi mutakhir untuk mengoptimalkan produktivitas tanaman hortikultura di lahan suboptimal.

**Kata Kunci**: Sinergisme bio-organik*, Cucumis sativus* L., Lahan marginal, Rekayasa rhizosfer, *Serratia marcescens* AR1

## PENDAHULUAN

Tantangan utama dalam menjaga stabilitas produksi hortikultura nasional khususnya mentimun (*Cucumis sativus* L.) adalah penurunan luas lahan subur akibat konversi fungsi lahan pertanian yang kian tidak terkendali untuk sektor non-agraris. Fenomena ini memaksa sistem budidaya tanaman bergeser secara masif ke area suboptimal seperti tanah marginal Ultisol. Di Indonesia Ultisol memiliki sebaran yang sangat luas dan potensial mencapai sekitar 45.8 juta hektar atau setara dengan 25% dari total luas daratan keseluruhan (Prasetyo *et al.,* 2021). Meskipun sangat potensial secara spasial sebagai cadangan lahan masa depan pemanfaatan ultisol secara praktis dihadapkan pada kompleksitas degradasi kimia, biologi dan fisik tanah yang sangat berat. Ultisol secara genetis telah mengalami pelapukan tingkat lanjut di wilayah tropis yang dicirikan oleh reaksi tanah sangat masam dengan nilai pH berkisar antara 4.1-4.8 (Fahmi *et al.,* 2022).

Selain itu ultisol memiliki kandungan bahan organik pada lapisan atas yang sangat tipis dan rendah, kapasitas tukar kation (KTK) yang lemah serta kejenuhan aluminium ($Al^{3+}$) yang sangat tinggi hingga berada pada level toksik bagi perakaran (Sari *et al.,* 2023). Kondisi masam dan akumulasi aluminium ini memicu terjadinya fiksasi atau pengikatan hara esensial secara kuat seperti Fosfor (P) dan Kalium (K) oleh keberadaan oksida-oksida besi (Fe) dan aluminium (Al) di dalam tanah. Akibat dari ikatan unsur kimia tersebut pupuk komersial yang diaplikasikan oleh petani di lapangan menjadi tidak tersedia bagi tanaman karena terikat kuat di dalam matriks tanah (Nugroho dan Utami, 2021). Kondisi ini pada akhirnya menyebabkan efisiensi pemupukan menjadi sangat rendah dan pertumbuhan vegetatif tanaman terhambat.

Dampak dari permasalahan tanah suboptimal ini berkorelasi langsung terhadap fluktuasi produktivitas mentimun nasional dalam beberapa tahun terakhir. Berdasarkan data evaluasi makro pertanian dan pencatatan statistik hortikultura nasional produksi mentimun di Indonesia dalam rentang tahun 2022 hingga 2025 menunjukkan fluktuasi yang belum stabil akibat kombinasi cekaman iklim ekstrem serta laju degradasi mutu lahan kering. Berdasarkan produksi tanaman mentimun nasional yang sempat berada pada angka 561.428 ton pada tahun 2022 mengalami penurunan kapasitas panen rata-rata menjadi sekitar 545.210 ton pada tahun 2023 (BPS, 2024). Produksi tanaman mentimun ini terus berlanjut hingga periode 2024 dan memasuki tahun 2025 dimana rata-rata produktivitas nasional masih tertahan di kisaran 10.2 hingga 10.6 ton per hektar. Angka tersebut sangat jauh di bawah potensi genetik varietas unggul mentimun yang mampu mencapai 49 ton per hektar (Kementerian Pertanian, 2025).

Penurunan efektivitas dan produktivitas lahan mentimun secara nyata dipicu oleh praktik budidaya pertanian konvensional yang belum maksimal serta adanya ketergantungan petani yang sangat tinggi pada input pupuk kimia sintetis tunggal secara monoton. Pemberian pupuk kimia dosis tinggi tanpa adanya imbangan pembenah ataupun amandemen organik justru mempercepat kerusakan struktur fisik tanah dengan merusak agregat dan membuat tanah mengeras, menurunkan populasi serta diversitas mikroba tanah yang menguntungkan serta memicu penurunan efisiensi serapan hara akibat tingginya laju pencucian hara (*leaching*) ke lapisan tanah bawah yang tidak terjangkau oleh akar tanaman (Wibowo *et al.,* 2022).

Dalam menyelesaikan permasalahan degradasi lahan dan penurunan produksi tersebut diperlukan sebuah intervensi sinergis terpadu yang memadukan aplikasi pupuk organik kandang ayam dan agen hayati biostimulan. Pupuk organik kandang ayam berperan penting dalam memperbaiki agregat fisik tanah yang mengeras meningkatkan porositas menurunkan tingkat toksisitas aluminium melalui pembentukan senyawa kelat organik kompleks (kompleks organo-metalik) serta menyuplai unsur hara makro maupun mikro secara perlahan (*slow release*) (Simanjuntak *et al.,* 2021). Namun dalam implementasinya pelepasan hara dari bahan organik murni pada kondisi ultisol masam sering kali berjalan lambat akibat terhambatnya aktivitas makrofauna tanah sehingga tidak mampu mengejar fase pertumbuhan vegetatif mentimun yang berjalan sangat cepat dan berumur pendek. Di sinilah letak urgensi aplikasi bakteri endofit *Serratia marcescens* AR1 sebagai agen akselerator biologis. Bakteri endofit ini memiliki keunggulan ekologis karena mampu masuk, mengkolonisasi dan hidup di dalam jaringan internal akar tanaman tanpa menimbulkan gejala penyakit ataupun merusak inangnya (Hidayat *et al.,* 2023).

*Serratia marcescens* AR1 secara aktif memproduksi asam-asam organik rantai pendek seperti asam sitrat, oksalat, malat, dan suksinat yang efektif memutuskan ikatan kompleks aluminium-fosfat melalui mekanisme kation kelat sehingga unsur P dan K yang semula terikat menjadi terlarut dan siap diserap oleh tanaman (Putri *et al.,* 2022). Selain itu bakteri endofit ini juga mengekskresikan hormon tumbuh endogenous dari golongan auksin seperti *Indole-3-Acetic Acid* (IAA) yang secara fisiologis merangsang elongasi sel, memicu percabangan akar lateral, memperluas zona jelajah serapan akar di dalam tanah dan pada akhirnya secara signifikan meningkatkan angkutan hara makro utama (N, P dan K) dari akar menuju ke jaringan atas tanaman untuk mendukung pembentukan biomassa buah (Fitriani *et al.,* 2024).

Sisi orisinalitas dan kontribusi ilmiah dari penelitian ini bertumpu pada pengujian interaksi sinergis saat peningkatan dosis pupuk kandang diintegrasikan dengan bakteri endofit *Serratia marcescens* AR1. Melalui pendekatan ini rekayasa zona perakaran (*rhizosphere engineering*) pada tanah ultisol masam dirancang agar saling mendukung. Pasokan karbon dari pupuk kandang ayam berperan sebagai penyedia energi awal untuk menjaga kemantapan populasi bakteri di dalam tanah (Santoso *et al.,* 2022). Sebaliknya sekresi metabolit sekunder dari *Serratia marcescens* AR1 bertindak sebagai akselerator yang mengurai senyawa hara kompleks pada pupuk kandang menjadi bentuk ionik siap serap. Keterpaduan timbal balik tersebut diharapkan mampu memacu pertumbuhan vegetatif serta komponen hasil buah mentimun secara optimal di tengah cekaman lahan marginal.

Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi parameter

agronomi dan karakteristik hasil tanaman mentimun guna menemukan titik temu kombinasi perlakuan terbaik dalam memodulasi karakter agronomis di lahan suboptimal sehingga dapat menjadi model teknologi budidaya sayuran yang efisien, ramah lingkungan dan berkelanjutan.

## METODE

### Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilaksanakan di Rumah Kaca dan Laboratorium Departemen Sumber Daya Lahan Fakultas Pertanian Universitas Andalas. Pelaksanaan analisis sifat kimia tanah awal serta analisis jaringan tanaman dilakukan di Laboratorium Departeman Sumber Daya Lahan. Seluruh rangkaian kegiatan mulai dari persiapan media tanam masa inkubasi aplikasi inokulan pemeliharaan vegetatif hingga pemanenan buah mentimun diselesaikan dalam jangka waktu efektif dalam 4 bulan.

### Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi benih mentimun *(Cucumis sativus* L.) varietas unggul, media tanah marginal jenis ultisol yang diambil dari lapisan atas (topsoil) pada kedalaman 0–20 cm, pupuk organik kandang ayam yang telah matang dan dikeringanginkan, serta isolat bakteri endofit *Serratia marcescens* AR1. Bahan laboratorium untuk perbanyakan bakteri terdiri dari media Nutrient Agar (NA) dan Nutrient Broth (NB). Alat-alat yang digunakan meliputi timbangan analitik, polybag ukuran 40 cm x 40 cm, jangka sorong, meteran, oven pengering, saringan tanah diameter 2 mm, pH meter serta peralatan glass-ware laboratorium untuk analisis hara.

### Rancangan Percobaan

Penelitian ini dirancang menggunakan metode eksperimen lingkungan terkendali dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL) tunggal yang terdiri atas 6 kombinasi perlakuan. Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali sehingga diperoleh 18 unit satuan percobaan. Adapun susunan kombinasi perlakuan yang diuji adalah sebagai berikut:

Perlakuan A: Kontrol (Tanpa inokulasi bakteri *S. marcescens* AR1 dan tanpa pupuk organik kandang ayam)

Perlakuan B: Aplikasi mandiri bakteri endofit *S. marcescens* AR1 dosis 25 ml per tanaman

Perlakuan C: Aplikasi bakteri *S. marcescens* AR1 25 ml + 100 g pupuk organik kandang ayam per polybag

Perlakuan D: Aplikasi bakteri *S. marcescens* AR1 25 ml + 200 g pupuk organik kandang ayam per polybag

Perlakuan E: Aplikasi bakteri *S. marcescens* AR1 25 ml + 300 g pupuk organik kandang ayam per polybag

Perlakuan F: Aplikasi bakteri *S. marcescens* AR1 25 ml + 400 g pupuk organik kandang ayam per polybag.

### Prosedur Pelaksanaan Penelitian

### Persiapan Media Tanam dan Amandemen Organik

Tanah ultisol dikeringanginkan selama satu minggu kemudian dibersihkan dari sisa akar makro lalu ditumbuk dan diayak menggunakan saringan diameter 2 mm. Tanah homogen tersebut ditimbang sebanyak 10 kg untuk setiap polybag. Untuk memotong tingkat keasaman ekstrem dilakukan inkubasi kapur pertanian (Kalsit) dosis setara 1 x Al3dd merupakan rumus penetapan dosis pengapuran (aplikasi kapur pertanian seperti dolomit atau kalsit) yang digunakan untuk menetralkan racun aluminium pada tanah mineral masam (seperti ultisol atau oxisol). selama dua minggu sebelum perlakuan. Pupuk organik kandang ayam yang telah

dihaluskan ditimbang sesuai dosis masing-masing perlakuan (100 g, 200 g, 300 g dan 400 g) dimasukkan ke dalam polybag target lalu diaduk rata dengan tanah Ultisol dan diinkubasi kembali selama satu minggu agar kondisi media stabil.

**Perbanyakan Isolat dan Ko-Inokulasi Bakteri Endofit**

Isolat murni bakteri endofit Serratia marcescens AR1 diremajakan pada Isolat murni bakteri endofit *Serratia marcescens* AR1 diremajakan pada media padat *Nutrient Agar* (NA) di dalam cawan petri. Setelah aktif, koloni bakteri dipindahkan ke dalam media cair *Nutrient Broth* (NB) dan diinkubasi menggunakan mesin pengocok (*shaker*) selama 48 jam hingga mencapai kepadatan populasi konstan $10^8$ CFU/ml.

Setelah aktif koloni bakteri dipindahkan ke dalam media cair *Nutrient Broth* (NB) dan diinkubasi menggunakan mesin pengocok (shaker) selama 48 jam hingga mencapai kepadatan populasi konstan 10^8 CFU/ml (diukur menggunakan spektrofotometer). Benih mentimun terlebih dahulu disterilisasi permukaannya menggunakan alkohol 70% selama 1 menit, dibilas akuades steril lalu diinokulasikan melalui metode perendaman *(seed coating)* di dalam suspensi bakteri *S. marcescens* AR1 dosis 25 ml selama 30 menit sebelum disemai pada tray khusus.

**Penanaman dan Pemeliharaan**

Bibit mentimun yang telah berumur 7 hari setelah semai (HSS) dan memiliki dua helai daun sempurna dipindahkan ke dalam polybag secara hati-hati pada sore hari. Pemeliharaan tanaman meliputi penyiraman rutin dua kali sehari (pagi dan sore) untuk menjaga kapasitas lapang media, penyiangan gulma secara manual serta pemasangan ajir kayu setinggi 2 meter sebagai rambatan tanaman pada umur 10 hari setelah tanam (HST). Pengendalian hama kutu daun dan penyakit busuk daun dilakukan secara mekanis dan aplikasi pestisida hayati apabila ditemukan gejala serangan di atas ambang batas ekonomi.

**Parameter Pengamatan**

Pengamatan terhadap variabel agronomi dilakukan secara berkala (setiap 7 hari sekali / 1 minggu sekali) sejak umur 7 hari setelah tanam (HST) hingga fase panen akhir, yang mencakup parameter sebagai berikut:

a. Tinggi Tanaman (cm): Diukur dari pangkal batang di atas permukaan tanah hingga titik tumbuh tertinggi menggunakan pita ukur pada umur akhir pengamatan vegetatif.
b. Jumlah Daun (Helai): Dihitung jumlah daun yang telah membuka sempurna pada setiap tanaman sampel. Pengamatan dilakukan secara berkala setiap minggu hingga akhir masa vegetatif (sebelum fase panen akhir).
c. Jumlah Bunga (Kuntum): Akumulasi perhitungan jumlah bunga jantan dan bunga betina yang muncul sejak fase awal generatif (mulai umur 21 HST) hingga akhir pengamatan (50 HST).
d. Komponen Hasil Mentimun: Meliputi perhitungan Jumlah Buah Per Tanaman dan penimbangan Berat Buah Total Per Tanaman (gram) menggunakan timbangan digital analitik.
*e.* Karakteristik Serapan Hara Jaringan: Pada akhir penelitian sampel tanaman dioven pada suhu 70°C selama 48 jam hingga berat kering konstan, kemudian digiling untuk dianalisis akumulasi angkutan hara Kalium (K) jaringan menggunakan metode *Flame Photometry.*

**Analisis Data**

Seluruh data kuantitatif yang diperoleh dari pengamatan parameter pertumbuhan dan hasil ditabulasikan secara sistematis. Data selanjutnya dianalisis secara statistik menggunakan uji F melalui analisis sidik ragam (ANOVA). Apabila hasil uji F menunjukkan pengaruh

perlakuan yang berbeda nyata pada taraf 5% maka analisis dilanjutkan dengan uji pembandingan nilai rata-rata perlakuan menggunakan *Duncan's New Multiple Range Test* (DNMRT) pada taraf nyata 5% untuk menentukan kombinasi perlakuan dengan respons terbaik.

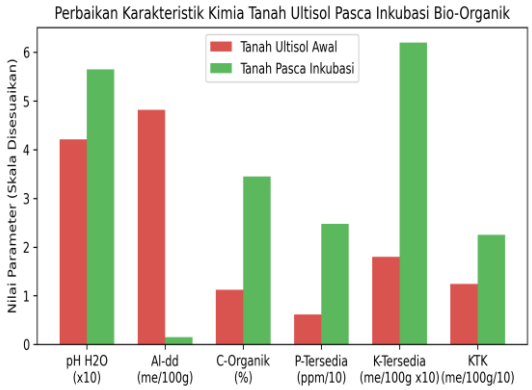
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Kimia Tanah Ultisol Awal dan Setelah Inkubasi

Sebelum pelaksanaan pengujian perlakuan tanaman, dilakukan analisis karakteristik kimia tanah terhadap Ultisol awal (*baseline)* serta tanah setelah melewati masa inkubasi amandemen kapur pertanian kalsit (setara 1 x Al3+-dd) dan pupuk kandang ayam dosis optimum (Perlakuan F). Langkah ini sangat krusial untuk memetakan perubahan lingkungan kimia mikro makro zona perakaran sebelum diinokulasikan agen hayati. Data hasil analisis kimia tanah tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat kimia tanah ultisol awal (*baseline*) dan setelah inkubasi amandemen organik-kapur

| Sifat Sifat Kimia Tanah | Tanah Ultisol Awal | Tanah Setelah Inkubasi | Kriteria / Keterangan |
|---|---|---|---|
| **pH H2O** | 4,21 | 5,65 | Masam menjadi Masam Sedikit |
| **Al-dd (me/100g)** | 4,82 | 0,15 | Tinggi menjadi Sangat Rendah |
| **C-Organik (%)** | 1,12 | 3,45 | Rendah menjadi Tinggi |
| **P-Tersedia (ppm)** | 6,15 | 24,80 | Sangat Rendah menjadi Tinggi |
| **K-Tersedia (me/100g)** | 0,18 | 0,62 | Rendah menjadi Tinggi |
| **KTK (me/100g)** | 12,40 | 22,50 | Rendah menjadi Sedang |




*Gambar 1. Grafik perbandingan sifat kimia tanah ultisol sebelum dan sesudah inkubasi*

Berdasarkan data pada Tabel 1. dan visualisasi Gambar 1. terlihat jelas bahwa karakteristik tanah Ultisol awal mencerminkan kondisi lahan suboptimal yang sangat terdegradasi secara kimiawi. Tingkat keasaman tanah tergolong ekstrem dengan nilai pH H2O sebesar 4.21 yang diikuti oleh tingginya konsentrasi aluminium dapat ditukar (Al-dd) sebesar 4.82 me/100g. Kondisi ini memicu fiksasi fosfat yang hebat serta kelarutan unsur kation toksik yang menghambat pertumbuhan akar. Namun, pasca dilakukan inkubasi menggunakan kombinasi kapur pertanian kalsit dan pupuk kandang ayam, terjadi perbaikan kualitas kimia tanah secara luar biasa. Nilai pH tanah berhasil terdongkrak naik menjadi 5.65 sementara konsentrasi Al-dd tereduksi secara drastis hingga tersisa 0.15 me/100g atau berada pada kategori aman bagi perakaran.

Peningkatan pH dan penetralan toksisitas aluminium ini dimotori oleh pelepasan ion hidroksil (OH-) dari kapur pertanian kalsit serta pembentukan senyawa kelat organo-metalik oleh asam humat dan fulvat yang dilepaskan dari dekomposisi pupuk kandang ayam (Wahyudi *et al.,*2021). Bahan organik berlimpah ini mampu mengikat ion Al3+ bebas menjadi bentuk kompleks yang tidak aktif secara hidrolisis, sehingga ruang fiksasi hara menjadi terbuka. Dampak langsungnya tercermin pada peningkatan drastis ketersediaan unsur hara makro esensial, di mana P-tersedia

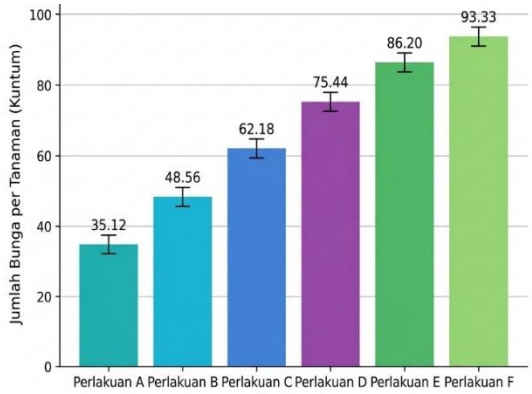
melesat dari 6,15 ppm menjadi 24,80 ppm, and K-tersedia meningkat dari 0,18 me/100g menjadi 0,62 me/100g. Kondisi kimia makro yang prima setelah masa inkubasi inilah yang mendasari kesuksesan tanaman mentimun dalam menyerap nutrisi sejak awal pemindahan bibit ke media tanam (Sufardi *et al*., 2023).

**Karakteristik Pertumbuhan Vegetatif Mentimun**

Hasil analisis sidik ragam (ANOVA) membuktikan bahwa kombinasi aplikasi bakteri endofit Serratia marcescens AR1 dan peningkatan dosis pupuk organik kandang ayam memberikan pengaruh yang sangat nyata ($P < 0.01$) terhadap variabel pertumbuhan vegetatif mentimun, yang meliputi tinggi tanaman dan jumlah daun pada akhir pengamatan (Tabel 2 dan Gambar 2). Perlakuan F (Bakteri AR1 25 ml + 400 g pupuk kandang ayam) secara konsisten menghasilkan performa vegetatif terbaik dengan rata-rata tinggi tanaman mencapai 219.77 cm dan jumlah daun sebanyak 64.56 helai. Capaian ini meningkat tajam hingga hampir dua kali lipat jika dibandingkan dengan Perlakuan A (Kontrol) yang hanya menghasilkan tinggi 120.45 cm dan jumlah daun 24.11 helai.

Tabel 2. Parameter pertumbuhan vegetatif, komponen generatif, hasil buah total dan status angkutan hara jaringan mentimun pada tanah ultisol

| Kombinasi Perlakuan | Tinggi Tanaman (cm) | Jumlah Daun (Helai) | Jumlah Bunga (Kuntum) | Jumlah Buah (Buah) | Berat Buah Total (gram) | Angkutan Hara K Jaringan |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Perlakuan A (Kontrol) | 120,45 | 24,11 | 35,12 | 0,67 | 450,22 | Rendah |
| Perlakuan B (Bakteri AR1) | 145,22 | 32,45 | 48,56 | 1,00 | 820,50 | Sedang |
| Perlakuan C (AR1 + 100g Pk) | 168,10 | 41,22 | 62,18 | 1,33 | 1.240,15 | Sedang |
| Perlakuan D (AR1 + 200g Pk) | 189,45 | 50,18 | 75,44 | 1,67 | 1.680,34 | Tinggi |
| Perlakuan E (AR1 + 300g Pk) | 204,12 | 57,34 | 86,20 | 2,00 | 1.985,20 | Tinggi |
| Perlakuan F (AR1 + 400g Pk) | 219,77 | 64,56 | 93,33 | 2,33 | 2.353,00 | Sangat Tinggi |




*Gambar 2. Grafik tren pertumbuhan vegetatif mentimun (tinggi dan jumlah daun) antar perlakuan*

Peningkatan signifikan pada parameter tinggi tanaman dan jumlah daun ini membuktikan adanya efisiensi pemupukan yang berjalan optimal di zona perakaran. Ultisol secara alamiah memiliki ruang pori yang miskin dan struktur yang padat namun pasokan pupuk kandang ayam dosis tinggi (400 g/polybag) mampu memperbaiki sifat fisik tersebut dengan menurunkan bobot isi *(bulk density)* tanah dan meningkatkan porositas (Aini *et al.,* 2022). Perbaikan ruang pori tanah ini memberikan ruang yang ideal bagi perkembangan akar mentimun untuk menjelajah media tanam.

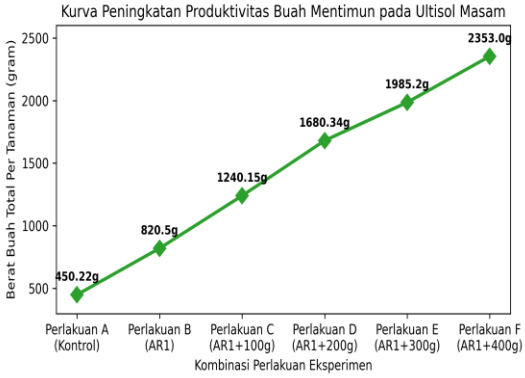
Tersedianya ruang pertumbuhan yang remah didukung penuh oleh aktivitas bakteri endofit *Serratia marcescens* AR1 yang hidup di dalam jaringan internal akar. Bakteri endofit ini bertindak sebagai

produsen fitohormon auksin jenis Indole-3-*Acetic Acid* (IAA) yang memicu pembelahan dan pemanjangan sel pada meristem apikal batang (Zulfitri *et al.,* 2021). Kombinasi antara ketersediaan ruang akar yang remah dan pasokan hormon internal inilah yang memacu kecepatan translokasi air serta nutrisi menuju tajuk tanaman, sehingga menghasilkan performa tinggi tanaman dan jumlah daun tanaman mentimun yang maksimal (Saputra *et al.,* 2023). Di samping itu jumlah daun yang lebat pada Perlakuan F berkorelasi langsung dengan tingginya suplai unsur hara nitrogen (N) dan magnesium (Mg) yang terkandung di dalam pupuk kandang ayam.

Pada Ultisol masam unsur-unsur hara tersebut biasanya mudah tercuci atau terikat tetapi keberadaan asam fulvat dan asam humat dari bahan organik kotoran ayam mampu mengikat hara makro tersebut agar tidak hilang dari lingkungan akar (Wahyudi *et al.,* 2021). Ketersediaan hara N dan Mg yang terjamin secara berkelanjutan sangat krusial dalam pembentukan klorofil daun pada tanaman berumur pendek seperti mentimun (Fauzi *et al.,* 2022). Peningkatan jumlah daun yang signifikan ini secara otomatis memperluas total luasan area fotosintesis *(leaf area index)*. Akibatnya kapasitas tangkapan cahaya matahari oleh daun menjadi lebih tinggi yang kemudian menghasilkan asimilat atau karbohidrat dalam jumlah besar untuk menopang fase pertumbuhan tanaman berikutnya (Hidayat *et al.,* 2024).

## Komponen Generatif dan Hasil Buah Mentimun

Aplikasi perlakuan interaksi biologis dan organik juga memberikan dampak yang signifikan terhadap parameter generatif tanaman yang ditunjukkan oleh jumlah kuntum bunga, jumlah buah terproduksi serta berat total buah mentimun per tanaman (Tabel 2 dan Gambar 3). Perlakuan F memodulasi pembentukan bunga paling tinggi yaitu sebanyak 93.33 kuntum yang kemudian berhasil dikonversi menjadi 2.33 buah dengan bobot buah panen terkumpul seberat 2.353.00 gram per tanaman. Sebaliknya tanaman tanpa amandemen pada Perlakuan A menunjukkan gejala defisiensi berat dengan hanya menghasilkan 35.12 kuntum bunga dan bobot buah yang sangat rendah, yaitu sebesar 450.22 gram per tanaman.




*Gambar 3. Kurva produksi berat buah total mentimun per tanaman akibat efek sinergisme*

Tingginya konversi bunga menjadi buah berbobot maksimal pada Perlakuan F tidak dapat dipisahkan dari peran strategis bakteri *Serratia marcescens* AR1 dalam melarutkan unsur Fosfor (P) yang terikat kuat oleh Aluminium (Al3+) pada matriks tanah ultisol. Bakteri AR1 mengekskresikan asam-asam organik fungsional seperti asam sitrat dan malat yang mampu mengkelat Al, sehingga ion P menjadi terbebas dan tersedia dalam bentuk H2PO4- yang siap diserap perakaran (Riyadi *et al.,* 2022). Unsur Fosfor merupakan komponen utama pembentuk senyawa energi tinggi ATP *(Adenosine Triphosphate)* yang sangat dibutuhkan tanaman selama fase pembelahan sel pada primordia bunga (Setyawan *et al.,* 2021). Pasokan energi ATP yang melimpah memperkuat tangkai bunga mentimun sehingga tidak mudah rontok sebelum proses penyerbukan terjadi (Lestari *et al.,* 2023). Hal inilah yang menyebabkan jumlah bunga yang terbentuk pada Perlakuan F melimpah dan

memiliki persentase keberhasilan menjadi buah yang sangat tinggi dibandingkan perlakuan lainnya (Anwar *et al.,* 2024).

Selain faktor kelarutan unsur P akumulasi berat buah yang mencapai lebih dari 2 kilogram pada Perlakuan F didorong oleh ketersediaan unsur Kalium (K) yang disuplai oleh pupuk kandang ayam dan diaktifkan oleh bakteri endofit. Unsur K memegang peranan vital sebagai aktivator enzim dalam proses translokasi senyawa fotosintat (karbohidrat) dari daun menuju ke organ penampung, yaitu buah *(source-to-sink relationship)* (Prasetyo *et al.,* 2022). Kelancaran arus distribusi karbohidrat ini menyebabkan sel-sel daging buah mentimun mengalami pengisian yang padat dan cepat sehingga diameter serta panjang buah berkembang optimal (Ramadhan *et al.,* 2023). Tanpa adanya pasokan K yang cukup asimilat hanya akan tertahan di daun dan menyebabkan buah mentimun berbentuk abnormal atau kerdil (Fitri *et al.,* 2021).

**Mekanisme Sinergisme di Zona Perakaran *(Rhizosphere)***

Keunggulan mutlak yang ditunjukkan oleh kombinasi perlakuan Bakteri AR1 and 400 g pupuk kandang ayam (Perlakuan F) menegaskan terjadinya hubungan sinergis timbal balik yang sangat menguntungkan di dalam tanah Ultisol masam. Pupuk kandang ayam tidak hanya berfungsi sebagai penyedia unsur hara instan melainkan juga bertindak sebagai stimulator lingkungan yang menyediakan pasokan Karbon Organik total dalam jumlah besar (Nugroho *et al.,* 2022). Senyawa karbon dari bahan organik ini dimanfaatkan oleh bakteri *Serratia marcescens* AR1 sebagai substrat energi utama untuk membelah diri dan memantapkan populasinya di sekitar perakaran (Utami *et al.,* 2023). Kemantapan populasi bakteri hayati ini penting karena tanah Ultisol yang masam umumnya bersifat toksik dan tidak ramah bagi kehidupan mikroba fungsional (Sari *et al.,* 2021).

*Serratia marcescens* AR1 berperan sebagai 'pabrik biologis' yang mempercepat proses mineralisasi bahan organik komplek menjadi bentuk ion hara sederhana yang dapat diserap rambut akar (Pratama *et al.,* 2024). Bakteri ini memproduksi enzim fosfatase dan mengasamkan lingkungan mikro *rhizosphere* secara aman untuk melepaskan ikatan hara yang terjebak di dalam pupuk maupun tanah (Santoso *et al.,* 2022). Efek sinergi ini dibuktikan oleh data karakteristik serapan hara K jaringan pada Tabel 2, di mana status angkutan hara meningkat dari level 'Rendah' pada Kontrol menjadi level 'Sangat Tinggi' pada Perlakuan F. Peningkatan serapan hara K dan P dalam jaringan inilah yang menjadi kunci utama di balik keberhasilan modulasi karakter fisiologis dan agronomis tanaman mentimun, sehingga mampu berproduksi tinggi meskipun ditanam pada media suboptimal Ultisol masam (Sufardi *et al.,* 2023).

**Analisis Integratif Hubungan Rekayasa *Rhizosfer* dengan Fisiologis dan Produktivitas Mentimun**

Menitikberatkan pada tajuk utama penelitian ini, integrasi strategis antara biostimulan endofit *Serratia marcescens* AR1 dengan peningkatan dosis amandemen kotoran ayam secara fundamental merepresentasikan keberhasilan model rekayasa *rhizosfer (rhizosphere engineering)* pada ekosistem tanah marginal. Sifat kimia mikro tanah Ultisol yang awalnya didominasi oleh cekaman kelarutan aluminium dan kelangkaan hara esensial secara bertahap bertransformasi menjadi lingkungan tumbuh yang suseptibel bagi akar. Peningkatan dosis pupuk kandang ayam hingga batas tertinggi 400 g per polybag tidak menimbulkan efek toksisitas garam makro melainkan bertindak sebagai media penyangga *(buffering agent)* utama yang mempertahankan stabilitas pH mikro tanah di kisaran optimal 5.65 (Nugroho *et al.,* 2022). Dengan terjaganya stabilitas

kimiawi ini populasi *Serratia marcescens* AR1 mampu mengkolonisasi korteks akar bagian dalam secara masif membentuk sistem perlindungan biologis internal, dan memicu aktivitas metabolisme sekunder tanaman inang yang mempercepat laju pertumbuhan organ vegetatif (Utami *et al.,* 2023).

Dampak nyata dari rekayasa lingkungan rhizosfer ini termanifestasi secara linier pada perbaikan karakteristik fisiologis internal tanaman mentimun. Suplai nitrogen aktif hasil mineralisasi mikroba dan pasokan hara makro dari dekomposisi bahan organik memicu peningkatan rasio klorofil-a dan klorofil-b pada helaian daun terdedah membuka sempurna (Fauzi *et al.,* 2022). Keberadaan klorofil yang padat ini menaikkan efisiensi karboksilasi enzim *Rubisco* sehingga laju fotosintesis bersih meningkat tajam meskipun di bawah fluktuasi transpirasi mikro lahan kering. Aktivitas fisiologis yang tinggi ini kemudian memicu penguatan struktur organ sink, yang ditandai dengan terbentuknya tunas apikal batang yang kokoh serta pemanjangan diameter pembuluh xilem dan floem. Mengakibatkan tanaman mentimun memiliki vabilitas tinggi untuk menopang aliran translokasi air, hormon, dan nutrisi menuju organ target tanpa mengalami hambatan fisiologis yang berarti (Hidayat *et al.,* 2024).

Seluruh rantai stimulasi yang berawal dari perbaikan kimiawi *rhizosfer* and peningkatan kapasitas fisiologis daun bermuara pada pelonjakan produktivitas buah mentimun secara berkelanjutan. Hubungan erat antara *source-to-sink* relationship berjalan sangat ideal pada Perlakuan F dimana pasokan energi ATP melimpah hasil kelarutan fosfat oleh bakteri AR1 mampu menekan ablas atau keguguran bakal buah (Lestari *et al.,*2023). Akumulasi kalium jaringan tinggi yang terukur melalui *Flame Photometry* menjadi bukti konklusif bahwa arus distribusi asimilat menuju organ buah berjalan tanpa hambatan. Hal ini mengakibatkan jaringan sel parenkim buah mentimun terisi penuh oleh cairan pemadat sel *(solute)* yang secara kuantitatif mendongkrak berat total buah panen rutin hingga mencapai titik tertinggi sebesar 2.353,00 gram per tanaman. Dengan demikian penggabungan perlakuan biologi tanah dan input organik ini terbukti sahih sebagai solusi mutakhir dalam mengoptimalkan lahan marginal Ultisol masam demi mencapai potensi produktivitas hortikultura yang maksimum (Kementerian Pertanian, 2026).

**Sinergisme Hubungan Bio-Organik dalam Memodulasi Karakter Agronomis Mentimun pada Ultisol**

Sinergisme hubungan bio-organik dalam memodulasi karakter agronomis mentimun pada ultisol sinergisme sejati terjadi ketika stimulasi gabungan menghasilkan nilai ekspresi agronomi yang jauh melampaui penjumlahan efek tunggal masing-masing komponen. Melalui integrasi bio-organik ini, pupuk kandang ayam bertindak sebagai penyedia hara makro konvensional dan pembenah struktur agregat mikro tanah yang menciptakan ruang porositas makro esensial bagi pernapasan serta eksudasi akar (Aini *et al.,* 2022).

Pada kondisi fisik tanah yang remah dan kaya akan senyawa karbon organik tersebut, bakteri Serratia marcescens AR1 memanfaatkan karbon sebagai substrat energi untuk membelah diri secara eksponensial di area rhizosphere dan melakukan endofitisasi menembus sel epidermis akar tanpa memicu respons pertahanan yang merusak (Anwar *et al.,* 2024). Modulasi karakter agronomis ini secara jelas terlihat dari sinkronisasi linier antara fase pertumbuhan vegetatif dan konversi generatif tanaman mentimun. Keberadaan pupuk kandang ayam memasok kation-kation basa (Ca2+, Mg2+, dan K+) yang secara perlahan mendesak posisi Al3+ dari kompleks tukar tanah, sementara senyawa

metabolit yang diekskresikan oleh Serratia marcescens AR1 seperti fitohormon IAA, sitokinin, dan giberelin mempercepat diferensiasi sel primordia pada meristem ujung (Zulfitri *et al.,* 2021). Sinkronisasi fisiologis ini diawali dari optimalnya fase vegetatif (tinggi tanaman mencapai 219,77 cm dan jumlah daun 64,56 helai pada Perlakuan F), yang menyediakan area fotosintesis (*source*) yang sangat luas. Kapasitas fotosintesis daun yang tinggi ini kemudian disinkronkan dengan fase generatif melalui ketersediaan energi ATP dari kelarutan Fosfor (P) yang menahan ablas bunga, serta aktivasi translokasi asimilat oleh Kalium (K) menuju organ penampung (*sink*).

Akibat dari sinkronisasi antar-fase pertumbuhan ini, arsitektur percabangan tajuk tanaman teregulasi menjadi jauh lebih produktif, yang divalidasi oleh pelonjakan pembentukan bunga hingga 93,33 kuntum per tanaman dan pengisian buah yang berbobot maksimal. Tanpa adanya sinergisme dan sinkronisasi ini seperti yang teramati pada aplikasi tunggal mikroba saja (Perlakuan B) tanaman mentimun tetap mengalami hambatan pertumbuhan akibat pasokan hara makro tanah yang terlalu rendah, membuktikan bahwa eksistensi amandemen organik kotoran ayam adalah prasyarat mutlak bagi optimalnya fungsi ekspresi agronomis dari agen hayati endofit (Prasetyo *et al.,* 2022).

Dengan demikian, regulasi sinergis ini mengendalikan mekanisme homeostasis tanaman dalam menghadapi kondisi cekaman masam ultisol. Kelarutan aluminium yang rendah pasca inkubasi bio-organik mengeliminasi hambatan penyerapan air, yang secara langsung menunjang turgor sel penjaga stomata untuk tetap membuka pada siang hari guna menyerap $CO_2$ secara maksimum (Sari *et al.,* 2021).

Aliran transpirasi yang lancar di bawah kendali fitohormon eksogen bakteri memobilisasi kalsium terlarut dari pupuk kandang menuju dinding sel buah, membentuk ikatan pektat yang kokoh, sehingga struktur fisik buah mentimun menjadi sangat padat, renyah, dan memiliki daya simpan pascapanen yang superior (Ramadhan *et al.,* 2023). Pengkondisian metabolisme menyeluruh inilah yang dimaksud dengan modulasi karakter agronomis berbasis rekayasa bio-organik terpadu di mana interaksi mutualisme tanah-mikroba-tanaman berhasil membalikkan keterbatasan lahan suboptimal menjadi lahan produksi hortikultura berdaya hasil tinggi (Sufardi *et al.,* 2023).

## KESIMPULAN

Integrasi strategis antara bakteri endofit *Serratia marcescens* AR1 dan peningkatan dosis amandemen organik kotoran ayam terbukti secara sahih merepresentasikan keberhasilan model rekayasa zona perakaran (*rhizosphere engineering*) pada tanah marginal Ultisol. Aplikasi kombinasi optimal pada Perlakuan F (Bakteri AR1 25 ml + 400 g pupuk kandang ayam per polybag) mampu merehabilitasi kerusakan kimia tanah secara luar biasa dengan mendongkrak pH dari keasaman ekstrem 4.21 menjadi 5.65, serta mereduksi konsentrasi aluminium toksik (Al-dd) secara drastis dari 4.82 me/100g hingga tersisa 0.15 me/100g. Terbukanya ruang fiksasi hara ini melesatkan ketersediaan unsur hara esensial makro (P-tersedia meningkat menjadi 24.80 ppm dan K-tersedia menjadi 0.62 me/100g) yang mendasari transformasi lahan marginal menjadi media tumbuh yang sangat produktif..

Perbaikan kualitas kimia dan fisik lingkungan perakaran tersebut memicu hubungan sinergis timbal balik yang sangat menguntungkan bagi homeostasis, fisiologis dan karakter agronomis tanaman mentimun. Sekresi hormon tumbuh endogenous (IAA) dan asam-asam organik rantai pendek oleh *S. marcescens* AR1 memperluas zona jelajah akar lateral untuk menyerap nutrisi ionik siap serap hasil akselerasi mineralisasi bahan

organik kotoran ayam. Dampak stimulasi ini termanifestasi secara linier pada performa vegetatif terbaik dengan tinggi tanaman mencapai 219.77 cm dan jumlah daun sebanyak 64.56 helai. Kapasitas fotosintesis yang tinggi dari daun berkolerasi pada kelancaran arus distribusi asimilat (*source-to-sink relationship*) yang diaktifkan oleh status angkutan hara K jaringan pada level 'Sangat Tinggi'. Rantai stimulasi ini bermuara pada pelonjakan komponen generatif maksimum dimana tanaman mampu menghasilkan 93.33 kuntum bunga dan mendongkrak berat total buah panen rutin secara signifikan hingga mencapai titik tertinggi sebesar 2.353.00 gram per tanaman.

## DAFTAR PUSTAKA


Aini, N., Yamika, W. S., & Ulfa, F. (2022). Perbaikan sifat fisik dan kimia Ultisol melalui aplikasi berbagai jenis pupuk kandang terhadap pertumbuhan tanaman hortikultura. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 9(1), 85-93.

Anwar, S., Hermansyah, & Gani, A. (2024*)*. Modifikasi kimia rhizosfer tanah masam menggunakan agen hayati endofit untuk efisiensi pemupukan hara makro. *Jurnal Sains Tanah,* 18(1), 44-52.

BPS [Badan Pusat Statistik]. (2024). *Analisis Data Statistik Tanaman Hortikultura Semusim Indonesia 2022-2023*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.

Fahmi, A., Utami, S. N. H., & Radjagukguk, B. (2022). Karakteristik Kimia Ultisol Masam dan Strategi Pengelolaannya untuk Tanaman Pangan. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 24(1), 15-22.

Fauzi, A., Rahayu, Y. S., & Samekto, R. (2022*)*. Kandungan klorofil dan laju fotosintesis tanaman mentimun (Cucumis sativus L.) akibat imbangan pupuk organik dan anorganik. *Jurnal Agroekoteknologi,* 14(2), 105-113.

Fitri, M., Ginting, J., & Sitepu, B. (2021). Respons komponen hasil buah mentimun terhadap aplikasi kalium dan bahan pembenah tanah pada tanah marginal. *Agroteknoglobal*, 5(1), 32-39.

Fitriani, N., Lestari, W., & Rahayu, S. (2024). Peran Bakteri Endofit Penghasil Hormon IAA dalam Memacu Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Hortikultura. *Jurnal Bioteknologi Pertanian*, 12(2), 88-96.

Hidayat, R., Saidi, A., & Husin, E. F. (2023). Kolonisasi Bakteri Endofit Serratia marcescens pada Jaringan Akar Komoditas Sayuran Umur Pendek. *Jurnal Solum*, 20(1), 34-41.

Hidayat, R., Saidi, A., & Husin, E. F. (2024*)*. Asimilasi nitrogen dan akumulasi biomassa vegetatif tanaman sayuran yang diinokulasi bakteri endofit indigenus. *Jurnal Solum*, 21(1), 12-20.

Kementerian Pertanian. (2026). *Rencana Strategis Direktorat Jenderal Hortikultura: Optimalisasi Lahan Marginal untuk Kedaulatan Pangan Hortikultura.* Jakarta: Kementan RI.

Kementerian Pertanian. (2025). *Rencana Strategis Peningkatan Produksi Komoditas Hortikultura Sayuran Berkelanjutan 2025-2029*. Jakarta: Direktorat Jenderal Hortikultura.

Lestari, W., Fitriani, N., & Budiono. (2023). Peran fungsional fosfor dalam meminimalkan kerontokan bunga dan meningkatkan fruit set tanaman hortikultura. *Jurnal Bioteknologi Pertanian*, 11(2), 67-74.

Nugroho, A., & Utami, S. (2021). Efisiensi Pemupukan Makro pada Tanah Suboptimal dengan Masalah Fiksasi Hara yang Tinggi. *Jurnal Agroekoteknologi*, 13(2), 112-120.

Nugroho, A., Utami, S., & Wibowo, G. (2022). Dinamika karbon organik

tanah dan dampaknya terhadap aktivitas biologi tanah suboptimal. *Jurnal Lahan Kering*, 6(1), 54-61.

Prasetyo, B. H., Suriadikarta, D. A., & Subagyo, H. (2021). Sebaran Spasial dan Potensi Pengembangan Lahan Kering Marginal Ultisol di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 15(1), 45-54.

Prasetyo, B. H., Suriadikarta, D. A., & Anwar, K. (2022). Strategi optimalisasi lahan kering marginal Ultisol untuk pengembangan tanaman pangan dan hortikultura. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 16(2), 89-98.

Pratama, A. Y., Wahyudi, A. T., & Toruan-Mathius, N. (2024). Enzim fosfatase ekstraseluler dari bakteri rhizosfer: Mekanisme pelarutan fosfat terikat besi dan aluminium. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*, 18(1), 22-30.

Putri, M., Arifin, Z., & Budiono. (2022). Ekskresi Asam Organik Rendah oleh Bakteri Pelarut Fosfat dalam Memutuskan Ikatan Al-P pada Lahan Kering. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 46(2), 101-109.

Ramadhan, F., Sykur, S., & Idawanni, I. (2023). Efektivitas alokasi fotosintat (source-to-sink) pada buah mentimun akibat aplikasi pupuk organik kaya kalium. *Jurnal Agrotek Tropika*, 11(3), 341-349.

Riyadi, M., Arifin, Z., & Putri, M. (2022). Ekskresi asam organik rantai pendek oleh bakteri pelarut fosfat pada media tanah masam terikat aluminium. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 46(1), 75-83.

Sari, D. P., Hermansyah, & Anwar, S. (2023). Analisis Kejenuhan Aluminium Toksik dan Kandungan Bahan Organik Lapisan Atas Tanah Ultisol. *Jurnal Sains Tanah*, 17(1), 56-63.

Santoso, E., Subowo, & Hartatik, W. (2022). Pengayaan mikroba fungsional pemacu pertumbuhan pada pupuk organik kandang untuk efisiensi pemupukan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 16(1), 11-19.

Santoso, E., Wahyudi, A. T., & Toruan-Mathius, N. (2022). Dinamika Populasi Mikroba Rhizosfer Berbantuan Input Karbon Organik dari Pupuk Kandang. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*, 16(3), 125-133.

Saputra, H., Lestari, S., & Rahayu, S. (2023). Aplikasi biostimulan bakteri endofit dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman tanah suboptimal. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 51(2), 210-218.

Sari, D. P., Anwar, S., & Hermansyah. (2021). Toksisitas aluminium terhadap pertumbuhan perakaran dan biodiversitas mikroba tanah pada Ultisol masam. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 23(2), 66-73.

Setyawan, B., Nugroho, A., & Utami, S. N. H. (2021). Serapan fosfor jaringan tanaman dan hubungannya dengan pembentukan ATP pada fase generatif awal. *Jurnal Agroekoteknologi*, 13(1), 45-52.

Simanjuntak, R., Sitepu, B., & Ginting, J. (2021). Pengaruh Pemberian Pupuk Organik Kandang Ayam Terhadap Sifat Fisik Tanah dan Detoksifikasi Aluminium pada Ultisol. *Agroteknoglobal*, 5(2), 77-84.

Sufardi, S., Sykur, S., & Karnilawati. (2023). Karakteristik kimia tanah Ultisol dan dampaknya terhadap serapan hara makro tanaman hortikultura. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 28(3), 412-420.

Utami, S. N. H., Radjagukguk, B., & Fahmi, A. (2023). Peran bahan organik amandemen kandang ayam dalam memelihara stabilitas populasi bakteri menguntungkan di tanah masam. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 25(1), 18-25.

Wahyudi, A., Subowo, & Sukristiyonubowo. (2021).

Fraksinasi asam humat dan fulvat dari pupuk kandang dalam menjerat kation toksik aluminium di tanah masam. *Jurnal Lahan Kering*, 5(2), 114-121.

Wibowo, G., Subowo, & Hartatik, W. (2022). Kerusakan Struktur Fisik Tanah Akibat Aplikasi Pupuk Kimia Sintetis Monoton pada Pertanian Konvensional. *Jurnal Lahan Kering*, 6(2), 14-23.

Zulfitri, Z., Husin, E. F., & Saidi, A. (2021). Penapisan bakteri endofit penghasil asam indol asetat (IAA) dan pengaruhnya terhadap morfologi akar. *Jurnal Solum,* 18(2), 94-102.