

PERBAIKAN LINGKUNGAN TUMBUH TANAMAN BAWANG MERAH (*ALLIUM ASCALONICUM* L.) MELALUI APLIKASI ABU KETEL DAN PUPUK ORGANIK CAIR BERTEKNOLOGI NANO

Nina Dwi Lestari^{1*}, Mariana Angelia², Retno Mulyaningrum³, Yulia Nuraini⁴, Ieke Wulan Ayu⁵

^{1,2,3,4} Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

⁵ Fakultas Pertanian, Universitas Samawa, Sumbawa Besar, Indonesia

Penulis Korespondensi: nd.lestari@ub.ac.id

Article Info	Abstrak
Article History <i>Received: 09 Juni 2025</i> <i>Revised: 14 Juni 2025</i> <i>Published: 30 Juni 2025</i>	Bawang merah (<i>Allium ascalonicum</i> L.) merupakan komoditas hortikultura yang potensial dikembangkan di Indonesia. Produksi bawang merah di Indonesia mengalami fluktuasi dan cenderung mengalami penurunan selama tiga tahun terakhir, sementara konsumsi bawang merah memiliki proyeksi tumbuh rata-rata 1,47% pertahun. Untuk memenuhi kebutuhan konsumsi bawang merah, petani cenderung menerapkan sistem pertanian intensif dengan input kimia tinggi yang berdampak pada penurunan kualitas tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel terhadap populasi bakteri pelarut fosfat, ketersediaan dan serapan fosfor, serta produksi bawang merah pada tanah Inseptisol Wajak. Penelitian dilaksanakan pada bulan November 2024 hingga Maret 2025 di greenhouse Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Kota Malang, Jawa Timur. Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri dari 6 perlakuan dan 4 ulangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni (P2) menghasilkan populasi bakteri pelarut fosfat tertinggi sebesar $2,16 \times 10^5$ CFU/g tanah. Perlakuan pupuk anorganik, pupuk organik cair berteknologi nano, dan abu ketel murni (P5) menghasilkan ketersediaan fosfor tertinggi sebesar 11,68 ppm. Perlakuan pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni (P2) menghasilkan serapan fosfor tertinggi sebesar 0,12 g/tanaman. Perlakuan pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni (P2) menghasilkan produksi bawang merah tertinggi yakni rata-rata jumlah umbi sebesar 23,75 buah/tanaman dan bobot kering umbi sebesar 11,8 g/tanaman.
Keywords <i>Bawang Merah;</i> <i>Pupuk Organik Cair</i> <i>Berteknologi Nano;</i> <i>Abu Ketel;</i> <i>Bakteri Pelarut Fostat;</i> <i>Fosfor;</i>	

PENDAHULUAN

Bawang merah (*Allium ascalonicum* L.) merupakan komoditas hortikultura yang potensial dikembangkan di Indonesia dengan tingkat konsumsi tinggi. Konsumsi bawang merah di Indonesia tahun 2023, diperkirakan mencapai sekitar 825.500 ton untuk konsumsi langsung di tingkat rumah tangga dan sekitar 2,96 kg konsumsi per kapita (Pusdatin, 2023). Konsumsi bawang merah cenderung mengalami peningkatan seiring bertambahnya jumlah penduduk dan kebutuhan bawang merah.

Produsen bawang merah terbesar di Indonesia berasal dari Provinsi Jawa Timur. Jawa Timur memberikan persentase kontribusi sebesar 24,41% terhadap total produksi bawang merah di Indonesia (Pusdatin, 2023). Namun, distribusi produksi bawang merah di Jawa Timur belum mengalami pemerataan, salah satunya di Kecamatan Wajak, Kabupaten Malang, yang belum memberikan kontribusi signifikan terhadap produksi bawang merah di Kabupaten Malang akibat budidaya bawang merah yang tidak memperhatikan kesesuaian lahan.

Tanah di Desa Sukolilo, Kecamatan Wajak memiliki ordo Inceptisol. Inceptisol merupakan tanah yang potensial sebagai lahan pertanian, namun manajemen yang tidak memperhatikan kesesuaian lahan menyebabkan masalah dalam ketersediaan dan serapan hara tanaman. Petani di Desa Sukolilo umumnya menerapkan sistem pertanian intensif dengan input kimia tinggi, seperti pupuk anorganik. Namun, penggunaan pupuk anorganik dalam jangka panjang dapat menurunkan kualitas kesuburan tanah, di antaranya penurunan kandungan bahan organik, populasi mikroba tanah, dan ketersediaan hara (Herdiyanto dan Setiawan, 2015).

Fosfor (P) merupakan unsur hara esensial yang memiliki peran krusial terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman bawang merah. Fosfor berperan dalam proses fotosintesis, penyimpanan energi, dan perkembangan akar tanaman (Khastini et al., 2024). Kandungan fosfor dalam tanah seringkali tergolong tinggi, akan tetapi ketersediaannya untuk diserap tanaman masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel terhadap lingkungan tumbuh tanaman bawang merah. Pupuk organik cair berteknologi nano bertujuan untuk menyediakan unsur hara esensial secara bertahap dan tepat sasaran karena ukuran partikel yang sangat kecil (Hakim et al., 2024). Pupuk organik cair berteknologi nano mengandung mikroba penting yang berperan untuk pertumbuhan tanaman, seperti bakteri pelarut fosfat yang membantu ketersediaan fosfor, sehingga dapat diserap tanaman. Optimalisasi peran pupuk organik cair berteknologi nano terhadap kualitas kesuburan tanah dapat dilakukan dengan pemberian pembenah tanah, yakni abu ketel untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Abu ketel sebagai pembenah tanah, telah mengandung hara esensial yang langsung dapat diserap tanaman, namun tidak sebanyak pupuk organik cair. Kandungan bahan organik pada abu ketel mampu memineralisasi fosfor dari senyawa penjerap fosfor sehingga menjadi tersedia bagi tanaman.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada bulan November 2024 hingga Maret 2025 di greenhouse Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya; Pabrik Gula Kreet Baru dan Industri Gula Desa Sukolilo, Kecamatan Wajak, Kabupaten Malang; Laboratorium Departemen Tanah Universitas Brawijaya; serta UPT Pengembangan Agribisnis Tanaman Pangan dan Hortikultura, Jawa Timur.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini, yakni cangkul, sekop, meteran, penggaris, timbangan, three way soil meter, kamera, karung, polybag, spidol, ember, tali rafia, semprotan, suntikan, pH meter dengan elektrode, fial film, timbangan analitik, mesin shaker, mortar, pistil, ayakan tanah 2 mm dan 0,5 mm, gelas ukur, gelas beaker, pipet, buret, penyangga statis, magnetic stirrer, labu erlenmeyer 500 ml dan 1 liter, botol kocok, tabung reaksi, spektrofotometer, botol plastik, mesin pengocok, pengaduk, kertas saring Whatman 42, spectronic 21, oven, unit destilator, alat destruksi, buret mikro, pengaduk magnetik, coolbox, rak tabung, cawan petri, autoclave, Laminar Air Flow Cabinet (LAFC), mikropipet, blue tip, vorteks, colony counter, dan plastic wrap. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini, yakni bibit

bawang merah varietas Batu Ijo; pupuk organik cair (POC) Bio7, abu ketel murni dan campuran, pupuk NPK 16:16:16, pupuk SP-36, pupuk urea, sampel tanah, aquades, H_3PO_4 , $K_2Cr_2O_7$, H_2SO_4 pekat, indikator difenilaminal, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, HCl 25%, $NaHCO_3$, KH_2PO_4 , ammonium molibdat, kalium antimonitrat, askorbat, HNO_3 , $HClO_3$, reagen B, media Nutrient Agar, media Pikovskaya, garam fisiologis, kapas, plastik wrap, dan label.

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri dari 6 perlakuan dan 4 ulangan, sehingga terdiri dari 24 unit percobaan. Perlakuan meliputi variasi penggunaan pupuk organik cair berteknologi nano, abu ketel, dan pupuk anorganik dengan rancangan penelitian, yakni kontrol (P0), pupuk organik cair berteknologi nano dosis 640 L.ha-1 (P1), abu ketel murni dosis 4,8 ton.ha-1 dan pupuk organik cair berteknologi nano dosis 640 L.ha-1 (P2), abu ketel campuran dosis 4,8 ton.ha-1 dan pupuk organik cair berteknologi nano dosis 640 L.ha-1 (P3), pupuk NPK 16:16:16 dosis 350 kg.ha-1; pupuk SP-36 dosis 250 kg.ha-1; dan pupuk urea 150 kg.ha-1 (P4), dan pupuk NPK 16:16:16 dosis 175 kg.ha-1; pupuk SP-36 dosis 125 kg.ha-1; pupuk urea dosis 75 kg.ha-1; pupuk organik cair berteknologi nano dosis 640 L.ha-1; dan abu ketel murni dosis 4,8 ton.ha-1 (P5).

Prosedur Penelitian meliputi: Persiapan Media Tanam. Media tanam diambil dari Desa Sukolilo, Kecamatan Wajak, Kabupaten Malang kemudian dikeringanginkan. Tanah sebanyak 3 kg dihomogenkan dengan pupuk kandang sapi dengan perbandingan 3:1, dimasukkan ke dalam polybag ukuran 20 cm x 20 cm. Setiap polybag diberi label perlakuan dan ulangan. Penanaman. Penanaman menggunakan bibit bawang merah varietas Batu Ijo. Bibit bawang merah yang digunakan dipotong 1/3 bagian, kemudian ditanam sedalam 5–10 cm di media tanam yang telah disiapkan pada polybag. Bibit bawang merah ditanam satu bibit dalam setiap polybag. Penyulaman dilakukan satu minggu setelah tanam untuk mengganti tanaman yang mati atau tumbuh tidak normal. Pemeliharaan. Pemeliharaan dalam penelitian ini dengan pengaplikasian abu ketel sebelum penanaman, pemupukan menggunakan pupuk organik cair Bio7 berteknologi nano dan pupuk anorganik (NPK, urea, SP-36), penyiangan gulma, pengecekan hama dan penyakit, serta penyiraman rutin pada taraf sebanyak 500 ml per polybag dengan tetap menjaga kelembaban media tanam. Pengamatan. Pengamatan dalam penelitian ini yakni lingkungan tumbuh tanaman bawang merah, di antaranya pH tanah, C-Organik, P-Total, P-Tersedia, serapan fosfor, total populasi bakteri, dan populasi bakteri pelarut fosfat yang diamati pada saat tanaman berumur 8 MST. Analisis Laboratorium. Sampel yang digunakan dalam analisis laboratorium terbagi menjadi sampel tanaman dan tanah. Sampel tanaman yang digunakan telah dikeringkan pada suhu 70°C selama 48 jam untuk analisis serapan fosfor. Sampel tanah yang digunakan telah dikeringanginkandan diayak dengan ayakan ukuran 2 mm untuk analisis pH dan 0,5 mm untuk analisis C-organik, P-total, dan P-tersedia serta sampel tanah yang disimpan dalam cool box pada suhu 2–4°C untuk analisis total populasi bakteri dan populasi bakteri pelarut fosfat. Analisis Data. Data hasil pengamatan diolah menggunakan Microsoft Excel, kemudian diuji normalitas dengan uji Shapiro-Wilk untuk mengetahui sebaran data. Jika data berdistribusi normal, analisis dilanjutkan dengan Analysis of Variance (ANOVA)

menggunakan R Studio berdasarkan Rancangan Acak Lengkap (RAL) pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap parameter yang diamati. Apabila terdapat pengaruh nyata, dilakukan uji lanjut Duncan Multiple Range Test (DMRT) pada taraf 5% untuk membandingkan perbedaan antar perlakuan. Kemudian, data dianalisis korelasi dan regresi untuk mengetahui hubungan antar variabel yang diamati.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Dasar Tanah

Analisis dasar tanah dilakukan pada sampel tanah yang berasal dari Desa Sukolilo, Kecamatan Wajak, Kabupaten Malang, Jawa Timur pada saat sebelum penanaman untuk mengetahui kondisi dan perkembangan tanah. Tanah di Desa Sukolilo, Kecamatan Wajak termasuk dalam ordo Inceptisol dengan tingkat kesuburan rendah. Hasil analisis awal, diketahui bahwa tanah di Desa Sukolilo memiliki pH aktual 6,1 dengan kriteria agak masam, C-organik 0,74% dengan kriteria rendah, P-Total 9,71 ppm dengan kriteria sangat rendah, P-Tersedia 8,01 ppm dengan kriteria rendah, total populasi bakteri 7×10^5 cfu/g tanah, dan populasi bakteri pelarut fosfat $2,3 \times 10^4$ cfu/g tanah (Tabel 1).

Tabel 1. Karakteristik Dasar Tanah

No	Parameter	Nilai	Kriteria*
1	pH H ₂ O	6,1	Agak Masam
2	C-organik (%)	0,74	Rendah
3	P-Total (ppm)	9,71	Rendah
4	P-Tersedia (ppm)	8,01	Rendah
5	Total Populasi Bakteri (x 10 ⁵ cfu/g tanah)	7	-
6	Populasi Bakteri Pelarut Fosfat (x 10 ⁴ cfu/g tanah)	2,3	-

Sumber: Badan Standarisasi Instrumen Pertanian (2023)

Kondisi tanah yang kurang subur pada Inceptisol di Desa Sukolilo, Kecamatan Wajak disebabkan oleh rendahnya input bahan organik dan aplikasi pupuk anorganik dengan taraf yang tinggi. Tanah di Desa Sukolilo memiliki pH aktual dengan kriteria agak masam dan C-organik dengan kriteria rendah, dikarenakan input bahan organik rendah yang diaplikasikan hanya pada saat pengolahan lahan dan dalam jangka panjang cenderung mengaplikasikan pupuk anorganik. Aplikasi pupuk anorganik tanpa diimbangi bahan organik akan menyebabkan kandungan C-Organik tanah menjadi rendah (Yuniarti et al., 2019). PH tanah dengan kriteria agak masam berdampak pada kandungan fosfor pada tanah dan ketersediaannya untuk diserap tanaman. Tanah yang cenderung masam, meningkatkan kelarutan sebagian besar unsur logam. Unsur-unsur logam pada tanah masam akan mengikat fosfor, sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Pada tanah masam, fosfor akan membentuk senyawa kompleks yang sukar larut dengan Al dan

Fe (Firnias, 2018). Kesuburan tanah yang rendah mempengaruhi lingkungan tumbuh bakteri. Bakteri mampu tumbuh dengan pH tanah yang netral, dengan kandungan bahan organik dan hara yang cukup untuk membantu metabolisme dan aktivitasnya di dalam tanah.

Serapan Fosfor

Serapan fosfor tanaman bawang merah umur 8 MST (Tabel 2) menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi pupuk organik cair nano dan abu ketel murni (P2) menghasilkan serapan fosfor tertinggi dibandingkan perlakuan lain. Perlakuan P2 menunjukkan nilai berbeda nyata dengan perlakuan lainnya, yakni P0, P1, P3, P4, dan P5. Hal tersebut menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni menunjukkan hasil yang berbeda nyata terhadap perlakuan tanpa pupuk dan tanpa pembenah tanah, pupuk organik cair berteknologi nano, dan pupuk anorganik.

Tabel 2. Pengaruh Pupuk Organik Cair Berteknologi Nano, Pupuk Anorganik, dan Abu Ketel terhadap Serapan Fosfor 8 MST

No	Perlakuan	Serapan Fosfor (g/tanaman)
1	P0 (Tanpa pupuk dan pembenah tanah)	0,06 cd
2	P1 (POC berteknologi nano dosis 4 mL/ 3 kg tanah)	0,08 b
3	P2 (POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel murni dosis 30 g / 3 kg tanah)	0,12 a
4	P3 (POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel campuran dosis 30 g / 3 kg tanah)	0,08 bc
5	P4 (NPK 16:16:16 dosis 4,7 g + SP-36 dosis 3,4 g + Urea dosis 2,72 gram/3 kg tanah)	0,03 e
6	P5 (NPK 16:16:16 dosis 2,35 g + POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel Murni 30 g/ 3 kg tanah)	0,04 d

Keterangan: Angka yang diikuti dengan huruf yang sama menunjukkan tidak terdapat beda nyata antar perlakuan menurut uji lanjut DMRT taraf 5%

Serapan fosfor yang tinggi pada perlakuan pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni disebabkan karena pupuk organik cair berteknologi nano yang mengefisienkan penyerapan unsur hara oleh tanaman. Pupuk berteknologi nano meningkatkan penyerapan hara pada tanaman dikarenakan pelepasan hara segera diserap oleh akar tanaman (Wibowo *et al.*, 2023). Kombinasi pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni juga mampu menciptakan kondisi lingkungan yang baik bagi pertumbuhan bakteri pelarut fosfat, sehingga dapat meningkatkan serapan fosfor pada tanaman. Bakteri pelarut fosfat akan mengubah fosfat tidak larut menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman dengan mensekresikan asam organik, yang kemudian bereaksi dengan agen penjerap fosfat di dalam tanah, yakni Ca, Al, dan Fe. Bakteri pelarut fosfat akan mensekresikan asam-asam organik, di antaranya asetat, glikolat, asam format, propionate, fumarat, laktat, dan suksinat untuk melarutkan fosfat di dalam tanah

(Permatasari dan Hidayanti, 2014). Pelarutan fosfat dari agen penjerap fosfat oleh asam-asam organik yang dihasilkan bakteri pelarut fosfat akan menyebabkan fosfat tersedia, sehingga meningkatkan serapan tanaman.

Analisis Sifat Kimia Tanah

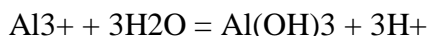
Analisis sifat kimia tanah pada hasil analisis laboratorium, di antaranya pH tanah Aktual, C-organik, P-Total, dan P-Tersedia. Analisis sifat kimia tanah dilakukan pada 6 perlakuan yang berbeda pada 8 MST.

Tabel 3. Hasil Analisis Kimia Tanah pada 8 MST

No	Perlakuan	pH tanah	C-Organik (%)	P-Total (mg/kg)	P-Tersedia (ppm)
1	P0 (Tanpa pupuk dan pembenah tanah)	6,57 c	0,83 c	9,8 f	8,36 f
2	P1 (POC berteknologi nano dosis 4 mL/ 3 kg tanah)	6,85 b	1,17 abc	10,93 e	8,81 e
3	P2 (POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel murni dosis 30 g / 3 kg tanah)	7,19 a	1,48 a	11,88 d	9,42 d
4	P3 (POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel campuran dosis 30 g / 3 kg tanah)	7,05 a	1,36 ab	12,7 c	10,06 c
5	P4 (NPK 16:16:16 dosis 4,7 g + SP-36 dosis 3,4 g + Urea dosis 2,72 gram/3 kg tanah)	5,84 e	0,98 bc	16,71 a	10,78 b
6	P5 (NPK 16:16:16 dosis 2,35 g + POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel Murni 30 g/ 3 kg tanah)	6,18 d	1,3 ab	14,78 b	11,68 a

Keterangan: Angka yang diikuti dengan huruf yang sama menunjukkan tidak terdapat beda nyata antar perlakuan menurut uji lanjut DMRT taraf 5%

Hasil analisis pH H₂O tanah menunjukkan bahwa pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni (P2) memberikan hasil terbaik. Pupuk organik cair berteknologi nano menghasilkan partikel bahan organik nano yang memudahkan bereaksi dengan ion H⁺, sehingga dapat menetralkan keasaman tanah. Bahan organik pada pupuk organik cair akan mengikat logam Al³⁺ yang merupakan sumber keasaman tanah, sehingga reaksi hidrolisis Al³⁺ tidak terjadi. Reaksi hidrolisis Al³⁺ akan melepaskan ion hidrogen (H⁺) sebagai berikut:



Bahan organik yang terkandung dalam pupuk organik cair dapat mengkhelat Al³⁺ membentuk kompleks Al-organik, sehingga tidak terjadi reaksi hidrolisis Al³⁺ (Rahmayanti et al., 2019). Kandungan bahan organik pada abu ketel mampu menurunkan kelarutan H⁺. Hidrolisis kation-kation basa pada bahan organik akan menetralkan H⁺ terlarut oleh ion OH⁻ yang dihasilkan, sehingga dapat meningkatkan pH tanah (Arifa et al., 2024).

Hasil analisis C-Organik menunjukkan bahwa pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni (P2) memberikan hasil terbaik. Mikroorganisme yang terkandung dalam pupuk organik cair membantu mempercepat penguraian bahan organik (Pradiksa et al., 2022). Abu ketel murni yang diaplikasikan sebagai tanah juga meningkatkan kandungan bahan organik pada tanah. Mikroba tanah menguraikan bahan organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana, seperti humus yang meningkatkan kandungan C-organik tanah. Didukung pernyataan Zendrato dan Lase (2024), mikroorganisme meningkatkan ketersediaan unsur hara tanah dengan

membantu menguraikan bahan organik. Ketersediaan unsur hara akan mendukung pertumbuhan tanaman dan produksi bahan organik baru yang kemudian menjadi sumber C-organik tanah.

Hasil analisis P-Total menunjukkan bahwa pupuk anorganik (P4) memberikan hasil terbaik. Pemberian pupuk anorganik yakni NPK dan SP-36 meningkatkan kandungan fosfor di dalam tanah karena mengandung fosfor dalam bentuk yang mudah larut dan dapat diserap tanaman. Sejalan dengan penelitian Lovitna et al. (2021) bahwa kombinasi pupuk NPK dan SP-36 dapat meningkatkan kandungan fosfor di dalam tanah yang dapat langsung diserap oleh tanaman. Pupuk urea berpengaruh meningkatkan fosfor di dalam tanah dengan mengurangi fiksasi fosfor oleh ion logam Al^{3+} dan Fe^{3+} . Urea memiliki peran melarutkan P dengan kompleksasi ion Fe dan Al di dalam tanah (Darso et al., 2023). Kombinasi pupuk anorganik NPK, SP-36, dan Urea memiliki peran sinergis untuk meningkatkan kandungan P di dalam tanah.

Hasil analisis P-Tersedia menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik cair berteknologi nano, pupuk anorganik, dan abu ketel murni (P5) memberikan hasil terbaik. Pupuk anorganik dapat meningkatkan ketersediaan fosfor dalam tanah karena mengandung fosfat anorganik yang mudah larut dan diserap tanaman. Pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni merupakan sumber bahan organik yang membantu melarutkan fosfor supaya dapat diserap tanaman. Hasil dekomposisi bahan organik, termasuk asam-asam organik membentuk ikatan khelasi dengan ion-ion logam, seperti Al dan Fe sehingga dapat melepaskan P yang terjerap oleh Al dan Fe (Permatasari dan Hidayanti, 2014).

Analisis Sifat Biologi Tanah

Analisis sifat biologi tanah pada hasil analisis laboratorium, meliputi total populasi bakteri dan populasi bakteri pelarut fosfat. Analisis biologi tanah dilakukan pada 6 perlakuan yang berbeda pada 8 MST.

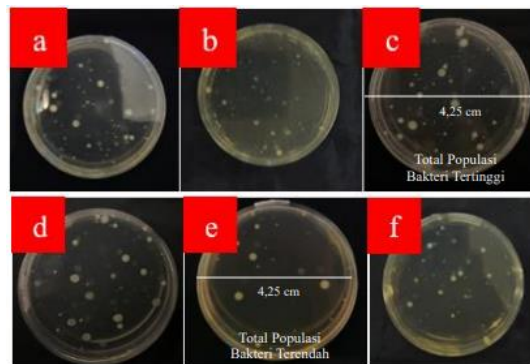
Tabel 4. Analisis Biologi Tanah

No	Perlakuan	Total Populasi Bakteri (x 10 ⁶ cfu/g tanah)	Populasi Bakteri Pelarut Fosfat (x 10 ⁵ cfu/g tanah)
1	P0 (Tanpa pupuk dan pembenah tanah)	1,75 bc	2 b
2	P1 (POC berteknologi nano dosis 4 mL/ 3 kg tanah)	1,75 bc	2 b
3	P2 (POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel murni dosis 30 g / 3 kg tanah)	2,17 a	2,2 a
4	P3 (POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel campuran dosis 30 g / 3 kg tanah)	1,85 ab	2,1 a
5	P4 (NPK 16:16:16 dosis 4,7 g + SP-36 dosis 3,4 g + Urea dosis 2,72 gram/3 kg tanah)	1,37 d	1,9 b
6	P5 (NPK 16:16:16 dosis 2,35 g + POC berteknologi nano dosis 4 mL + Abu Ketel Murni 30 g/ 3 kg tanah)	1,4 cd	2 b

Keterangan: Angka yang diikuti dengan huruf yang sama menunjukkan tidak terdapat beda nyata antar perlakuan menurut uji lanjut DMRT taraf 5%

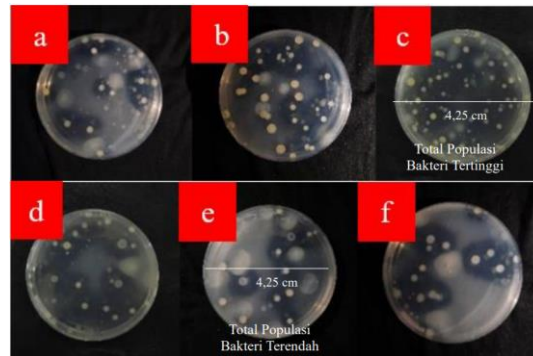
Isolasi total populasi bakteri dengan menggunakan media NA dilakukan pada pengenceran 10⁴, 10⁵, dan 10⁶ dengan pengulangan dua kali (duplo) pada setiap pengenceran. Hasil analisis menunjukkan bahwa pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni (P2)

memberikan hasil terbaik terhadap total populasi bakteri di dalam tanah. Pupuk organik cair berteknologi nano yang diaplikasikan telah terkandung beberapa bakteri, di antaranya ialah *Azospirillum* sp., *Bacillus* sp., dan *Pseudomonas* sp. (lampiran 3), sehingga meningkatkan total populasi bakteri di dalam tanah. Kombinasi pupuk organik cair berteknologi nano dengan abu ketel dapat meningkatkan total populasi bakteri di dalam tanah dikarenakan abu ketel mampu memberikan lingkungan yang baik bagi pertumbuhan mikroba tanah dengan menurunkan kemasaman tanah. Abu ketel merupakan salah satu sumber bahan organik di dalam tanah yang mengandung kation-kation basa yang berpengaruh terhadap kemasaman tanah. Hidrolisis kation-kation basa pada bahan organik akan menetralkan jumlah H^+ terlarut oleh ion OH^- yang dihasilkan, sehingga dapat meningkatkan pH tanah (Arifa *et al.*, 2024). PH tanah yang sesuai dapat menjadi lingkungan tumbuh yang baik bagi pertumbuhan bakteri. Isolat total populasi bakteri dengan menggunakan media NA.



Gambar 1. Total Populasi Bakteri pada Media Nutrient Agar pada skala 1:2 : a) P0, b) P1, c) P2, d) P3, e) P4, f) P5

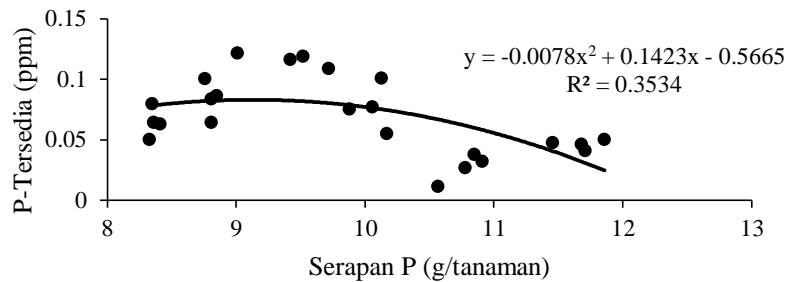
Isolasi populasi bakteri pelarut fosfat dengan menggunakan media Pikovskaya yang memiliki kandungan fosfat terikat yakni trikalsium fosfat ($Ca_3(PO_4)_2$) sebagai sumber fosfat. Hasil analisis menunjukkan bahwa pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni (P2) memberikan hasil terbaik terhadap total populasi bakteri di dalam tanah. Pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni merupakan sumber bahan organik yang dibutuhkan bakteri pelarut fosfat. Bakteri memerlukan bahan organik sebagai sumber energi dan makanan untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitasnya (Pratiwi *et al.*, 2019). Bahan organik pada pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel juga mengandung kation-kation basa yang berpengaruh dalam menciptakan lingkungan yang sesuai dengan pertumbuhan bakteri dengan menurunkan kemasaman tanah. Hidrolisis kation-kation basa pada bahan organik akan menetralkan jumlah H^+ terlarut oleh ion OH^- yang dihasilkan, sehingga dapat meningkatkan pH tanah (Arifa *et al.*, 2024). Pupuk organik cair berteknologi nano yang diaplikasikan juga telah mengandung berbagai macam mikroba menguntungkan, termasuk bakteri pelarut fosfat, sehingga setelah pengaplikasian pupuk mampu meningkatkan populasi bakteri pelarut fosfat dalam tanah. Kombinasi pupuk organik cair berteknologi nano dan abu ketel murni juga mampu menciptakan lingkungan yang baik untuk pertumbuhan bakteri pelarut fosfat.



Gambar 2. Total Populasi Bakteri pada Media Pikovskaya pada skala 1:2 : a) P0, b) P1, c) P2, d) P3, e) P4, f) P5

Pengaruh Populasi Bakteri Pelarut Fosfat terhadap Serapan Fosfor

Hubungan antara populasi bakteri pelarut fosfat terhadap serapan P memiliki korelasi positif ($r= 0,676^{**}$) dengan hasil uji regresi pada persamaan $y = 0,0329x^2 + 0,0459x - 0,1582$ memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,4575. Hasil uji regresi tersebut menunjukkan bahwa populasi bakteri pelarut fosfat mempengaruhi peningkatan serapan P dengan nilai 45,75%, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain (Gambar 3)

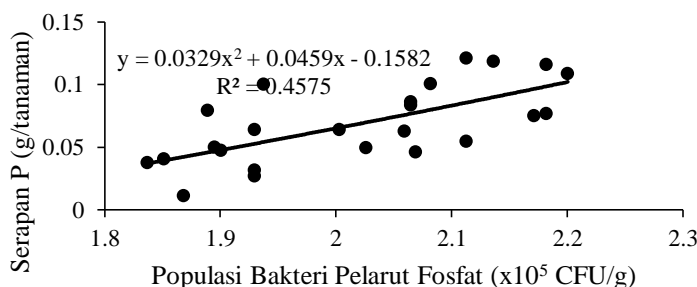


Gambar 3. Pengaruh Serapan Fosfor terhadap P-Tersedia

Bakteri pelarut fosfat berperan penting dalam mobilisasi dan transformasi fosfat dalam tanah. Mekanisme pelarutan fosfat oleh bakteri dapat secara kimia, dengan menghasilkan berbagai asam organik bermolekul rendah seperti oksalat, suksinat, tartat, laktat, sitrat, asetat, propionat, dan format yang menyebabkan penurunan pH dan meningkatkan kelarutan fosfat, serta dapat secara biologis dengan menghasilkan enzim fosfatase yang membantu melarutkan fosfat (Jumadi *et al.*, 2015). Pelarutan fosfat pada bakteri yang tidak memproduksi asam organik atau enzim juga dapat dilakukan, yakni dengan pelepasan proton (ion H^+) selama proses respirasi, asimilasi amonium (NH_4^+), serta adanya kompetisi antara anion organik dengan ortofosfat pada permukaan koloid (Jeksen *et al.*, 2018). Peningkatan populasi bakteri pelarut fosfat dapat meningkatkan fosfat yang tidak larut menjadi larut, sehingga tersedia di tanah dan dapat diserap tanaman. Dengan demikian, peningkatan populasi bakteri pelarut fosfat dapat meningkatkan serapan fosfor.

Pengaruh Serapan Fosfor terhadap P-Tersedia

Hubungan antara serapan fosfor terhadap P-Tersedia memiliki korelasi negatif ($r = -0,52^{**}$) dengan hasil uji regresi pada persamaan $y = -0,0078x^2 + 0,1423x - 0,5665$ memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,3534. Hasil uji regresi tersebut menunjukkan bahwa serapan fosfor mempengaruhi penurunan P-Tersedia dengan nilai 35,34%, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain (Gambar 4).



Gambar 4. Pengaruh Populasi Bakteri Pelarut Fosfat terhadap Serapan Fosfor

Tanaman bawang merah memanfaatkan fosfor yang tersedia dalam tanah sebagai unsur hara esensial yang berperan penting dalam pertumbuhan dan produksi tanaman. Fosfor berperan dalam sintesis asam nukleat, ATP, serta berbagai enzim yang mengatur obo tumbi energi dan pembelahan sel, sehingga ketersediaan P-tersedia sangat menentukan efisiensi pertumbuhan organ tanaman seperti daun, umbi, dan akar. Dengan demikian, penyerapan P-tersedia oleh tanaman menyebabkan penurunan konsentrasi fosfor dalam tanah. Penurunan PTersedia di dalam tanah mengalami penurunan karena ditranslokasikan ke tanaman (Nasution *et al.*, 2014).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pupuk cair organik berteknologi nano dan abu ketel memberikan pengaruh nyata terhadap ketersediaan dan serapan fosfor, serta populasi bakteri pelarut fosfat dalam tanah. Pupuk cair organik berteknologi nano dan abu ketel murni, serta pupuk anorganik, menunjukkan pengaruh terbaik pada ketersediaan fosfor sebesar 39,71% dibandingkan perlakuan tanpa pupuk dan tanpa pembenah tanah, 32,58% dibandingkan perlakuan pupuk cair organik berteknologi nano, dan 8,35% dibandingkan perlakuan pupuk anorganik. Selain itu, pupuk cair organik berteknologi nano dan abu ketel murni juga memberikan hasil terbaik pada serapan fosfor sebesar 200% terhadap perlakuan tanpa pupuk dan tanpa pembenah tanah, 50% terhadap perlakuan pupuk cair organik berteknologi nano, dan 300% terhadap perlakuan pupuk anorganik. Penggunaan pupuk cair organik berteknologi nano dan abu ketel murni juga meningkatkan populasi bakteri pelarut fosfat sebesar 10% dibandingkan perlakuan tanpa pupuk dan tanpa pembenah tanah, 10% terhadap perlakuan pupuk cair organik berteknologi nano, serta 15,8% terhadap perlakuan pupuk anorganik. Dengan demikian, adapun saran untuk penelitian ini, yakni diperlukan adanya penelitian lebih lanjut terkait pengaplikasian pupuk organik cair berteknologi nano yang efektif terhadap produksi tanaman bawang merah, pengaplikasian abu ketel berteknologi nano, serta karakterisasi bakteri untuk mengetahui kemampuan bakteri melarutkan fosfat.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifa, M. L. F., Razie, F., & Syaifuddin, S. (2024). Pengaruh Pupuk Cair terhadap pH, Fe-larut, dan C-organik di Tanah Sulfat Masam Desa Danda Jaya. *Acta Solum*, 2(3), 145-151. <https://doi.org/10.20527/actasolum.v2i3.2516>
- Badan Standarisasi Instrumen Pertanian. 2023. Petunjuk Teknis Edisi 3: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Darso, W. A., Kaya, E., & La Habi, M. (2023). Pengaruh Pupuk Organik Cair dan Urea terhadap Kemasaman, N-total, Serapan N, serta Produksi Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L) pada Regosol. *Jurnal Budidaya Pertanian*, 19(2), 142–148. <https://doi.org/10.30598/jbdp.2023.19.2.142>
- Firnia, D. (2018). Dinamika Unsur Fosfor pada tiap Horison Profil Tanah Masam. *Jurnal Agroekoteknologi*, 10(1), 45-52. <http://dx.doi.org/10.33512/j.agrtek.v10i1.5464>
- Hakim, A. N., Hidayat, T., & Utama, N. A. (2024). Pengaruh abu sekam nano terhadap umur simpan bibit kentang (*Solanum tuberosum* L.) dan keterbawaan penyakit hawar daun (*Phytophthora infestans* (Mont.) De Bary). In *Prosiding Seminar Nasional Kedaulatan Pertanian*, 1(1), 372–381.
- Herdianto, D., & Setiawan, A. (2015). Upaya Peningkatan Kualitas Tanah melalui Sosialisasi Pupuk Hayati, Pupuk Organik, dan Olah Tanah Konservasi di Desa Sukamanah dan Desa Nanggerang Kecamatan Cigalong Kabupaten Tasikmalaya. *Dharmakarya: Jurnal Aplikasi Ipteks untuk Masyarakat*, 4(1). <https://doi.org/10.24198/dharmakarya.v4i1.9039>
- Jeksen, J., & Mutiara, C. (2018). Pengaruh Sumber Bahan Organik yang Berbeda terhadap Kualitas Pembuatan Mikroorganisme Lokal (MOL). *Agrica*, 11(1), 60–72. <https://doi.org/10.37478/agr.v11i1.23>
- Jumadi, O., Liawati, L., & Hartono, H. (2015). Produksi Zat Pengatur Tumbuh IAA (Indole Acetic Acid) dan Kemampuan Pelarutan Posfat pada Isolat Bakteri Penambat Nitrogen Asal Kabupaten Takalar. *Jurnal Bionature*, 16(1), 43–48.
- Khastini, R. O., Avilia, A., Salsabila, N., Febrianty, R. E., Aisy, R., & Frandista, S. C. (2024). Literature review: Peranan Acaulospora terhadap penyerapan fosfor pada akar tanaman singkong. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 11(2), 301–308. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.2.1>
- Lovitna, G., Nuraini, Y., & Istiqomah, N. (2021). Pengaruh Aplikasi Bakteri Pelarut Fosfat dan Pupuk Anorganik Fosfat terhadap Populasi Bakteri Pelarut Fosfat, P-Tersedia, dan Hasil Tanaman Jagung pada Alfisol. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 8(2), <https://doi.org/437-449.10.21776/ub.Jtsl.2021.008.2.15>
- Nasution, R. M., Sabrina, T., & Fauzi, F. (2014). Pemanfaatan jamur pelarut fosfat dan mikoriza untuk meningkatkan ketersediaan dan serapan P tanaman jagung pada tanah alkalin. *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Sumatera Utara*, 2(3), 99463. <https://doi.org/10.32734/jaet.v2i3.7448>
- Permatasari, A. D., & Nurhidayati, T. (2014). Pengaruh Inokulan Bakteri Penambat Nitrogen, Bakteri Pelarut Fosfat dan Mikoriza Asal Desa Condro, Lumajang, Jawa Timur terhadap Pertumbuhan Tanaman Cabai Rawit. *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, 3(2), 44–48. <https://doi.org/10.1234/pomits.v3i2.2014>
- Pradiksa, O. I., Setyati, W. A., & Widianingsih. (2022). Pengaruh Bioaktivator EM4 terhadap Proses Degradasi Pupuk Organik Cair Serasah *Cymodocea* 70obo tumb. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*, 16(2), 123–134. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jmr/article/view/33771>
- Pratiwi, Y. I., Nisak, F., & Gunawan, B. (2019). Peningkatan Manfaat Pupuk Organik Cair Urine Sapi: Teknologi Tepat Guna dalam Upaya Meningkatkan Produk Pertanian. *Uwais Inspirasi Indonesia*.
- Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Kementerian Pertanian. (2023). Komoditas Pertanian Subsektor Hortikultura. https://satudata.pertanian.go.id/assets/docs/publikasi/Outlook_Bawang_Merah_2023.pdf
- Rahmayanti, F. D. (2020). Pemanfaatan Limbah Cangkang Telur Sebagai Pupuk Makro (Ca) Pada Tanaman Bawang Merah Agrisia: *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 12(2), 1–9.
- Wibowo, A. S., Endrawati, T., Sarjani, A., & Puspitorini, P. (2023). Konsentrasi dan frekuensi pemberian pupuk majemuk berteknologi nano untuk meningkatkan pertumbuhan dan hasil panen tanaman okra (*Abelmoschus esculentus*). *Viabel: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Pertanian*, 17(2), 98–108. <https://doi.org/10.35457/73obo.v17i2.3131>
- Yuniarti, A., Damayani, M., & Nur, D. M. (2019). Efek pupuk 73obo tu dan pupuk N, P, K terhadap C-organik, N-total, C/N, serapan N, serta hasil padi hitam pada Inceptisols. *Jurnal Pertanian*, 3(2), 90-105. <https://doi.org/10.35760/jpp.2019.v3i2.2205>
- Zendrato, I. N., & Lase, N. K. (2024). Peran Mikroorganisme dalam Meningkatkan Kualitas Tanah dan Toleransi Tanaman terhadap Cekaman Abiotik. *Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 1(2), 94–100. <https://doi.org/10.70134/penarik.v1i2.200>