

POPULASI AZOTOBACTER DAN AKTIVITAS MIKROORGANISME PADA RIZOSER KOPI ARABIKA YANG TERCEMAR HERBISIDA BERBAHAN AKTIF GLIFOSAT

(Azotobacter population and microorganism activity in Arabica coffee rhizosphere contaminated with herbicide containing glyphosate)

Zikri Syah Putra¹, Fikrinda Fikrinda¹, Raichan Izzati^{1*}

¹Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala

*Corresponding author: raichanizzati@usk.ac.id

Abstrak. *Azotobacter* adalah salah satu mikroba yang dapat digunakan untuk pupuk hayati. *Azotobacter* memiliki peran penting dalam fiksasi nitrogen dan produksi hormon tumbuh, sementara herbisida glifosat dapat meninggalkan residu di dalam tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis populasi *Azotobacter* dan aktivitas mikroorganisme tanah pada rizosfer kopi Arabika yang terpapar herbisida berbahan aktif glifosat. Metode yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan menghitung populasi *Azotobacter* menggunakan metode Pour Plate dan laju respirasi dengan metode modifikasi Verstraete. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kompos secara umum meningkatkan populasi *Azotobacter*, dengan populasi tertinggi pada dosis 5 kg tanaman⁻¹. Pemberian herbisida glifosat tanpa kompos juga meningkatkan populasi *Azotobacter* dibandingkan dengan perlakuan tanpa herbisida dan kompos, yang diduga karena herbisida mampu memacu pertumbuhan mikroba. Aplikasi herbisida glifosat menunjukkan efek bergantung pada dosis terhadap laju respirasi. Ini mengindikasikan adanya ambang batas di mana glifosat dapat berubah dari berpotensi menguntungkan menjadi merugikan bagi aktivitas metabolik *Azotobacter*. Secara keseluruhan, temuan ini menyoroti interaksi yang kompleks antara herbisida, kompos, dan komunitas mikroba tanah.

Kata kunci : *Azotobacter*, herbisida glifosat, kopi Arabika, populasi mikroorganisme, respirasi tanah.

Abstract. *Azotobacter* is one of the microbes that can be used as a biofertilizer. It plays an important role in nitrogen fixation and the production of growth hormones, while the herbicide glyphosate can leave residues in the soil. This study aimed to analyze the population of *Azotobacter* and the activity of soil microorganisms in the rhizosphere of Arabica coffee exposed to glyphosate-based herbicide. The method used was a descriptive quantitative approach by counting the *Azotobacter* population using the Pour Plate method and measuring the respiration rate using the modified Verstraete method. The results showed that compost addition generally increased the *Azotobacter* population, with the highest population observed at a dose of 5 kg plant⁻¹. The application of glyphosate herbicide without compost also increased the *Azotobacter* population compared to treatments without herbicide and compost, presumably because the herbicide was able to stimulate microbial growth. Glyphosate herbicide application showed a dose-dependent effect on the respiration rate, indicating a threshold at which glyphosate could shift from being potentially beneficial to harmful for the metabolic activity of *Azotobacter*. Overall, these findings highlight the complex interactions among herbicides, compost, and soil microbial communities.

Keywords: *Azotobacter*, glyphosate herbicide, Arabica coffee, microbial population, soil respiration.

PENDAHULUAN

Kopi Arabika (*Coffea arabica*) merupakan salah satu komoditas perkebunan unggulan Indonesia yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Indonesia menempati posisi keempat sebagai negara penghasil kopi Arabika terbesar dunia setelah Brasil, Vietnam, dan Kolombia (Alexander et al., 2019). Beberapa provinsi yang menjadi sentra produksi kopi Arabika yaitu Sumatra Utara, Sumatra Selatan, Lampung, Jawa Timur, dan Aceh (BPS, 2020), dengan Dataran Tinggi Gayo (Kabupaten Bener Meriah, Aceh Tengah, dan Gayo Lues) sebagai salah satu daerah penghasil utama.

Produktivitas kopi Arabika sangat dipengaruhi oleh kesehatan tanaman serta kondisi rizosfer, yaitu daerah di sekitar perakaran tempat mikroba berinteraksi. Mikroba rizosfer berperan penting dalam menunjang pertumbuhan tanaman, salah satunya *Azotobacter*. Genus

ini diketahui mampu memfiksasi nitrogen, menghasilkan zat pemacu tumbuh seperti giberelin, sitokinin, dan asam indol asetat (IAA), sehingga dapat mempercepat pertumbuhan akar (Roni & Lindawati, 2014; Asmiaty Sahur, 2021). Selain itu, beberapa spesies *Azotobacter* juga memiliki kemampuan mendegradasi residu herbisida (Nibal Moussa & Abdul Hasan, 2025).

Herbisida, khususnya glifosat, banyak digunakan petani kopi Arabika untuk mengendalikan gulma. Namun, penggunaan berlebih menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti nekrosis pada tanaman muda, pencemaran air, berkurangnya keanekaragaman hayati, serta akumulasi residu dalam tanah. Penelitian menunjukkan bahwa *Azotobacter sp.* dapat memanfaatkan glifosat sebagai sumber karbon dan fosfor, dengan tingkat degradasi 79–81% dalam waktu 1–2 bulan (Nibal Moussa & Abdul Hasan, 2025). Temuan ini mengindikasikan potensi besar *Azotobacter* dalam meremediasi lahan terkontaminasi herbisida.

Penelitian mengenai isolasi dan pemanfaatan *Azotobacter* penting dilakukan untuk mendukung budidaya kopi Arabika berkelanjutan. Selain berperan sebagai agen bioremediasi, *Azotobacter* juga dapat meningkatkan kesuburan tanah melalui fiksasi nitrogen dan produksi hormon tumbuh alami. Hal ini diharapkan dapat membantu petani mengurangi ketergantungan pada bahan kimia berbahaya, menekan biaya produksi, serta menjaga keberlanjutan ekosistem pertanian kopi.

METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di kebun kopi Arabika, Desa Lampahan, Kabupaten Bener Meriah. Isolasi *Azotobacter* dan pengukuran respirasi tanah dilakukan di Laboratorium Biologi Tanah Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala. Berlangsung dari bulan Februari hingga Juni 2025.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen pada kebun kopi Arabika yang telah tercemar herbisida berbahan aktif glifosat. Selanjutnya isolasi *Azotobacter* pada sampel tanah yang telah tercemar herbisida glifosat dan pemberian pupuk organik.

Pelaksanaan Penelitian

Pembuatan Pupuk Kompos

Pembuatan kompos dimulai dengan menggumpulkan bahan-bahan seperti kulit kopi sebanyak 500 kg, daun lamtoro sebanyak 200 kg, tanaman titonia sebanyak 150 kg dan gulma sebanyak 150 kg disekitaran kebun kopi. Setelah dikumpulkan cincang ketiga bahan (daun lamtoro, titonia dan gulma) menjadi ukuran yang lebih kecil untuk mempercepat terjadinya dekomposisi. Setelah itu campur dan aduk hingga merata keempat bahan tersebut diatas permukaan lantai. Selanjutnya beri taburan dedak sebanyak 2 kg dan dicampur hingga merata. Masukkan bahan tersebut kedalam bak-bak pembuatan pupuk dan dibagi kedalam lima bak, masing-masing bak berisi 200 kg bahan kompos. Proses memasukkan bahan-bahan kedalam bak dilakukan secara berlapis dan setiap lapisan diberikan larutan EM4 yang dicampurkan dengan gula merah. Dalam 1 ton bahan pupuk organik dibutuhkan sebanyak 1 liter EM4. Proses pengaktifan bakteri EM4 yaitu dengan mencampurkan 1 liter EM4 dengan 10 liter air dan 1 kg gula merah. Setelah itu campurkan dengan 100 liter air bersih untuk menyiram keseluruhan bahan tersebut sampai dalam keadaan lembab. Terakhir tutup masing-masing bak tersebut dengan terpal plastik. setelah dua minggu dilakukan pembalikan dengan

memberikan larutan EM4 dan dilihat kelembabannya, ditunggu selama 60 hari sampai warna pupuk organik berwarna coklat kehitaman, tidak menimbulkan bau yang menyengat dan teksturnya sudah menjadi lebih kecil atau hancur.

Penyemprotan Herbisida Berbahan Aktif Glifosat

Penyemprotan herbisida memiliki tata cara seperti :

- Waktu Penyemprotan dilakukan saat tidak ada angin kencang untuk menghindari drift (penyebaran herbisida ke tanaman kopi) dan pada saat cuaca cerah. Hindari menyemprot saat hujan karena herbisida bisa tercuci.
- Semprotkan herbisida hanya pada gulma, hindari mengenai batang, daun, atau buah tanaman kopi. Gunakan nozel (alat penyemprot) yang sesuai dan atur tekanan semprotan agar tidak terlalu tinggi.

Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah diambil dari rizosfer tanaman kopi arabika yang menggunakan herbisida berbahan aktif glifosat, sampel diambil menggunakan bor tanah dari permukaan hingga kedalaman 0 – 20 cm dengan jarak 110 cm dari pohon kopi dan telah disemprot herbisida berbahan aktif glifosat setelah 28 hari penyemprotan. Sampel tersebut berasal dari rizosfer tanaman kopi Arabika Desa Lampahan yang mendapatkan perlakuan herbisida berbahan aktif glifosat. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak 12 (dua belas) sesuai dengan jenis perlakuan, adapun jenis perlakuan yang diberikan adalah :

Tabel 1. Jenis Perlakuan

Perlakuan	Keterangan perlakuan	
	Herbisida	Kompos
A	Tidak diberi herbisida	0 ton/ha (0 kg/tanaman)
B	Tidak diberi herbisida	4 ton/ha (2,5 kg/tanaman)
C	Tidak diberi herbisida	8 ton/ha (5 kg/tanaman)
D	Tidak diberi herbisida	12 ton/ha (7,5 kg/tanaman)
E	Herbisida 1 liter	0 ton/ha (0 kg/tanaman)
F	Herbisida 1 liter	4 ton/ha (2,5 kg/tanaman)
G	Herbisida 1 liter	8 ton/ha (5 kg/tanaman)
H	Herbisida 1 liter	12 ton/ha (7,5 kg/tanaman)
I	Herbisida 2 liter	0 ton/ha (0 kg/tanaman)
J	Herbisida 2 liter	4 ton/ha (2,5 kg/tanaman)
K	Herbisida 2 liter	8 ton/ha (5 kg/tanaman)
L	Herbisida 2 liter	12 ton/ha (7,5 kg/tanaman)

Isolasi *Azotobacter*

Sampel tanah ini diisolasi menggunakan Metode Pour Plate yaitu dengan berbagai macam tahapan, yaitu tahapan pengenceran, penyediaan Media Agar Ashby, tahap isolasi, dan tahap respirasi. Pada tahap pengenceran sebanyak 90 mL larutan fisiologis steril (NaCl 0,85%) dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 mL dan masing-masing 9 mL ke empat tabung reaksi steril. Seluruh wadah disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 20 menit. Sebanyak 10 g sampel tanah ditambahkan ke dalam erlenmeyer berisi larutan fisiologis, kemudian dikocok pada 150 rpm selama 30 menit untuk memperoleh suspensi

tanah dengan pengenceran 10^{-1} . Selanjutnya, 1 mL suspensi dari pengenceran 10^{-1} dipindahkan secara aseptis ke tabung pertama yang berisi 9 mL larutan fisiologis steril untuk memperoleh pengenceran 10^{-2} . Proses pengenceran bertingkat dilanjutkan dengan cara yang sama hingga mencapai pengenceran 10^{-5} . Selanjutnya dilakukan penyimpanan dengan cara ditimbang sebanyak 6,105 g dan dilarutkan dalam 150 ml aquades. Setelah itu larutan tersebut diautoklaf selama 20 menit pada suhu 121°C .

Tahap isolasi sampel tanah hasil dua pengenceran terakhir diambil untuk dituang secara pour plate. Sebanyak 1 ml suspensi pupuk dari seri pengenceran terakhir diinokulasi dengan media NA didalam cawan petri. Setelah itu diinkubasi pada suhu 30°C selama 2×24 jam dan amati setiap hari mikroorganisme yang tumbuh. Koloni yang tumbuh pada kedua cawan tersebut kemudian dipilih colonial yang relatif terpisah dari koloni lain agar mudah diamati. Dan yang terakhir adalah tahap respirasi, pengukuran respirasi tanah dilakukan menggunakan metode modifikasi Verstraete. Sebanyak 100 g sampel tanah dari setiap perlakuan dimasukkan ke dalam toples berukuran 10 L yang telah berisi botol film berisi 5 mL KOH 0,1 N dan 10 mL H_2O . Toples ditutup rapat hingga kedap udara menggunakan lakban, kemudian diinkubasi selama satu minggu pada kondisi gelap dan suhu kamar. Setelah inkubasi, larutan KOH dititrasi untuk menentukan jumlah CO_2 yang dihasilkan.

Proses titrasi dilakukan dengan memindahkan larutan KOH ke dalam erlenmeyer, menambahkan dua tetes indikator fenolftalein hingga berwarna merah muda, kemudian dititrasi dengan HCl hingga warna hilang (bening). Setelah itu, ditambahkan dua tetes metil oranye dan dilanjutkan titrasi dengan HCl hingga warna berubah dari kuning menjadi merah muda. Volume HCl yang digunakan mencerminkan jumlah CO_2 yang difiksasi. Prosedur yang sama dilakukan untuk kontrol.

Jumlah CO_2 dihitung dengan menggunakan formula:

$$r = 1 + ((a-b) \times t \times 120) / n$$

Keterangan:

a = ml HCl untuk sampel tanah

b = ml HCl untuk control

t = normalitas HCl

n = jumlah hari inkubasi

r = jumlah C- CO_2 yang dihasilkan tiap gram tanah lembab per hari

Respirasi Tanah (Aktivitas Mikroorganisme Tanah)

Timbang cawan dan catat beratnya, kemudian masukkan 10 g tanah dan catat berat tanah basa dan cawan. Keringkan tanah dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam hingga beratnya stabil. Dinginkan di dalam desikator selama 10 menit dan timbang kembali cawan berisi sampel tanah tersebut.

Perhitungan:

$$KA = (BB (\text{tanah+cawan}) - BKO (\text{Tanah+cawan})) / (BB (\text{Tanah+cawan}) - \text{Berat Cawan})$$

Keterangan:

KA : Kadar Air

BB : Berat Basah

BKO : Berat Kering Oven

HASIL DAN PEMBAHASAN

Populasi *Azotobacter*

Hasil isolasi mikroorganisme pada sampel tanah disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Total *Azotobacter* Pada Rizosfer Kopi Arabika Yang Mendapat Perlakuan Glifosat

No.	Perlakuan	Herbisida	Kompos	Total Mikroorganisme <i>Azotobacter</i> (x 10 ⁵ SPK g ⁻¹ BKM)
1	A	Tidak diberi herbisida	0 kg/tanaman	4,73
2	B	Tidak diberi herbisida	2,5 kg/tanaman	21,4
3	C	Tidak diberi herbisida	5 kg/tanaman	87,9
4	D	Tidak diberi herbisida	7,5 kg/tanaman	30,1
5	E	Herbisida 1 liter	0 kg/tanaman	25,5
6	F	Herbisida 1 liter	2,5 kg/tanaman	22,4
7	G	Herbisida 1 liter	5 kg/tanaman	55,0
8	H	Herbisida 1 liter	7,5 kg/tanaman	27,7
9	I	Herbisida 2 liter	0 kg/tanaman	35,4
10	J	Herbisida 2 liter	2,5 kg/tanaman	25,5
11	K	Herbisida 2 liter	5 kg/tanaman	40,1
12	L	Herbisida 2 liter	7,5 kg/tanaman	13,4

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 2, populasi total mikroorganisme *Azotobacter* pada perlakuan A adalah $4,73 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM, di mana perlakuan ini tidak diberi herbisida dan kompos (0 kg/tanaman). Sementara itu, pada perlakuan E, populasi *Azotobacter* tercatat sebesar $25,5 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Perlakuan E juga tidak diberi kompos, tetapi mendapat perlakuan herbisida sebanyak 1 liter. Perbandingan ini menunjukkan bahwa populasi *Azotobacter* pada perlakuan yang diberi herbisida (Perlakuan E) lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan tanpa herbisida (Perlakuan A). Menurut penelitian (Setiawan, 2024) hal ini disebabkan karena pemberian herbisida berbahan aktif glifosat dapat memacu pertumbuhan mikroba dalam tanah serta mampu meningkatkan kandungan bahan organik di tanah.

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 2. pada perlakuan yang tidak diberi herbisida, peningkatan jumlah kompos secara umum menunjukkan peningkatan populasi *Azotobacter*. Perlakuan A (0 kg/tanaman kompos) memiliki populasi *Azotobacter* terendah yaitu $4,73 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Peningkatan jumlah kompos menjadi 2,5 kg/tanaman pada perlakuan B menyebabkan peningkatan signifikan populasi *Azotobacter* menjadi $21,4 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Populasi tertinggi tercatat pada perlakuan C (2,5 kg/tanaman kompos) dengan $87,9 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM, menunjukkan efek positif optimal dari kompos pada dosis ini. Namun, ketika dosis kompos ditingkatkan lagi pada perlakuan C (7,5 kg/tanaman kompos), populasi *Azotobacter* sedikit menurun menjadi $30,1 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM, meskipun masih jauh lebih tinggi daripada tanpa kompos. Dosis pupuk organik/kompos yang moderat umumnya sudah cukup efisien untuk memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman, sementara penerapan dosis berlebih berisiko menimbulkan masalah agronomi dan lingkungan. Aplikasi kompos yang terlalu tinggi apalagi jika kompos belum matang dapat menyebabkan fitotoksisitas (menurunkan perkecambahan dan pertumbuhan akar), immobilisasi nitrogen sementara oleh aktivitas mikroba yang tinggi, peningkatan salinitas atau kelebihan hara, serta

potensi akumulasi logam berat dan kontaminan lain yang merugikan tanaman dan lingkungan sekitar. Oleh karena itu, rekomendasi dosis harus didasarkan pada uji tanah, indeks kematangan kompos dan pedoman aplikasi yang kontekstual agar tidak terjadi pemborosan atau kerusakan tanaman. (Lončarić 2024; Tsabedze 2025; Urra 2019).

Data populasi *Azotobacter* untuk perlakuan A, E, dan I menunjukkan variasi yang cukup besar. Perlakuan A memiliki populasi *Azotobacter* terendah di antara ketiganya, yaitu $4,73 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Angka ini sangat jauh di bawah perlakuan E yang tercatat $25,5 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Sementara itu, perlakuan I menunjukkan populasi *Azotobacter* yang lebih tinggi lagi, yaitu $35,4 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Perbandingan ini menunjukkan bahwa perlakuan I menghasilkan populasi *Azotobacter* tertinggi di antara ketiga perlakuan tersebut, diikuti oleh E, dan A menjadi yang terendah. Perlakuan A tidak diberi herbisida dan tidak diberi kompos, yang menghasilkan populasi *Azotobacter* terendah di antara ketiganya. Ini menunjukkan bahwa tanpa penambahan kompos dan tanpa aplikasi herbisida, kondisi lingkungan mungkin tidak optimal untuk pertumbuhan *Azotobacter*. Di sisi lain, perlakuan E menerima herbisida 1 liter tanpa kompos, namun menunjukkan peningkatan populasi *Azotobacter* dibandingkan perlakuan A. Ini menarik karena meskipun ada aplikasi herbisida, populasi *Azotobacter* masih lebih tinggi. Terakhir, perlakuan I menerima herbisida 2 liter tanpa kompos, dan justru menunjukkan populasi *Azotobacter* tertinggi dari ketiganya.

Perbedaan ini bisa mengindikasikan bahwa jenis atau dosis herbisida (glifosat) yang berbeda mungkin memiliki efek yang bervariasi pada *Azotobacter*. sangat relevan dan didukung oleh prinsip efek yang bergantung pada dosis (dose-dependent effect). Dosis herbisida yang rendah menciptakan lingkungan yang lebih baik bagi *Azotobacter* dengan menyingkirkan kompetitor. Sebaliknya, konsentrasi herbisida yang terlalu tinggi dapat menjadi racun langsung yang menghambat pertumbuhan bakteri tersebut.

Data populasi *Azotobacter* untuk perlakuan B, F, dan J menunjukkan variasi yang menarik meskipun semuanya menerima jumlah kompos yang sama (2,5 kg/tanaman). Perlakuan B, yang tidak diberi herbisida, memiliki populasi *Azotobacter* sebesar $21,4 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Angka ini sedikit lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan F, yang menerima herbisida 1 liter, dengan populasi $22,4 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Populasi *Azotobacter* tertinggi di antara ketiganya ditemukan pada perlakuan J, yang menerima herbisida 2 liter, dengan $25,5 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Perbandingan ini menunjukkan bahwa, dengan jumlah kompos yang sama, aplikasi herbisida glifosat pada dosis 1 liter dan 2 liter tidak mengurangi populasi *Azotobacter*, melainkan justru sedikit meningkatkannya dibandingkan dengan kondisi tanpa herbisida.

Penjelasan atas hasil perbandingan ini menunjukkan fenomena yang tidak lazim jika diasumsikan bahwa herbisida selalu bersifat negatif terhadap mikroorganisme tanah. Dalam kasus ini, meskipun semua perlakuan menerima 2,5 kg⁻¹ kompos yang berfungsi sebagai peningkat kesuburan tanah dan nutrisi bagi mikroorganisme, adanya herbisida glifosat pada dosis 1 liter (F) dan 2 liter (J) tidak menghambat pertumbuhan *Azotobacter*. Bahkan, perlakuan dengan herbisida (khususnya 2 liter pada J) menunjukkan populasi *Azotobacter* yang sedikit lebih tinggi. Hal ini bisa jadi disebabkan oleh beberapa faktor: pertama, *Azotobacter* pada jenis tanah ini mungkin memiliki tingkat toleransi tertentu terhadap glifosat pada konsentrasi yang digunakan. Kedua, glifosat dapat mempengaruhi mikroorganisme lain di dalam tanah secara berbeda, mungkin mengurangi populasi pesaing *Azotobacter* sehingga memberikan ruang bagi *Azotobacter* untuk tumbuh lebih dominan. Ketiga, ada kemungkinan bahwa glifosat atau produk degradasi glifosat pada konsentrasi tertentu dapat dimanfaatkan atau diubah oleh *Azotobacter* sebagai sumber karbon atau nutrisi lain, meskipun ini membutuhkan penelitian lebih lanjut untuk dikonfirmasi. Secara keseluruhan, temuan ini

menyoroti kompleksitas interaksi antara herbisida, bahan organik (kompos), dan komunitas mikroba tanah.

Data populasi *Azotobacter* untuk perlakuan D H, dan L menunjukkan tren yang menarik dengan jumlah kompos yang sama (7,5 kg/tanaman). Perlakuan D yang tidak diberi herbisida, memiliki populasi *Azotobacter* tertinggi di antara ketiganya, yaitu $30,1 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Ketika herbisida 1 liter diaplikasikan pada perlakuan H, populasi *Azotobacter* sedikit menurun menjadi $27,7 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM. Penurunan yang lebih signifikan terlihat pada perlakuan L, yang menerima herbisida 2 liter, dengan populasi *Azotobacter* hanya $13,4 \times 10^5$ SPK g⁻¹ BKM.

Penjelasan atas hasil perbandingan ini menunjukkan bahwa, dengan dosis kompos yang tinggi (7,5 kg/tanaman), penambahan herbisida glifosat cenderung mengurangi populasi *Azotobacter*. Perlakuan tanpa herbisida (D) memungkinkan *Azotobacter* untuk mencapai populasi tertinggi, menunjukkan bahwa dosis kompos 7,5 kg/tanaman menciptakan lingkungan yang sangat mendukung tanpa gangguan dari herbisida. Namun, seiring dengan peningkatan dosis herbisida (dari 1 liter pada H menjadi 2 liter pada L), terjadi penurunan yang progresif pada populasi *Azotobacter*. Hal ini mengindikasikan bahwa pada dosis kompos yang tinggi ini, efek negatif herbisida menjadi lebih dominan dan menghambat pertumbuhan *Azotobacter*. Penurunan yang lebih tajam pada dosis herbisida 2 liter menunjukkan bahwa konsentrasi glifosat yang lebih tinggi memiliki efek toksik yang lebih besar pada *Azotobacter*, bahkan dengan adanya suplai kompos yang melimpah.

Respirasi Tanah (Aktivitas Mikroorganisme Tanah)

Respirasi pada *Azotobacter* merupakan proses metabolik penting yang berperan dalam melindungi enzim nitrogenase dari kerusakan akibat oksigen, sekaligus menyediakan energi untuk aktivitas seluler bakteri tersebut.

Tabel 3. Respirasi Bakteri *Azotobacter*

No	Perlakuan	Herbisida	Kompos	Laju Respirasi
				(mg C-CO ₂ kg ⁻¹ BKM hari ⁻¹)
1	A	Tidak diberi herbisida	0 kg/tanaman	2,57
2	B	Tidak diberi herbisida	2,5 kg/tanaman	4,80
3	C	Tidak diberi herbisida	5 kg/tanaman	3,43
4	D	Tidak diberi herbisida	7,5 kg/tanaman	2,53
5	E	Herbisida 1 liter	0 kg/tanaman	5,16
6	F	Herbisida 1 liter	2,5 kg/tanaman	7,02
7	G	Herbisida 1 liter	5 kg/tanaman	2,75
8	H	Herbisida 1 liter	7,5 kg/tanaman	4,55
9	I	Herbisida 2 liter	0 kg/tanaman	2,66
10	J	Herbisida 2 liter	2,5 kg/tanaman	1,66
11	K	Herbisida 2 liter	5 kg/tanaman	3,15
12	L	Herbisida 2 liter	7,5 kg/tanaman	3,52

Perlakuan A (0 kg/tanaman kompos) menunjukkan laju respirasi terendah di antara perlakuan A,B,C dan D, yaitu $2,57 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ BKM hari}^{-1}$. Peningkatan jumlah kompos menjadi 600 gr/tanaman pada perlakuan B menyebabkan peningkatan laju respirasi yang signifikan menjadi $4,80 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ BKM hari}^{-1}$. Namun, ketika jumlah kompos ditingkatkan lebih lanjut pada perlakuan C (5 kg/tanaman), laju respirasi menurun menjadi

3,43 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Penurunan ini berlanjut pada perlakuan D (7,5 kg/tanaman kompos) menjadi 2,53 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹, yang bahkan sedikit lebih rendah dari perlakuan A. Ini menunjukkan bahwa penambahan kompos pada awalnya meningkatkan laju respirasi *Azotobacter*, mencapai puncaknya pada dosis 2,5 kg/tanaman, namun kemudian terjadi penurunan pada dosis kompos yang lebih tinggi.

Menurut (Bayraktaroğlu et al., 2012) Penjelasan atas pola ini menunjukkan bahwa laju respirasi CO₂ tanah meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan dosis kompos, menunjukkan bahwa penambahan bahan organik memang memicu aktivitas mikroba. Namun, para peneliti menemukan bahwa laju respirasi CO₂ mulai menurun ketika dosis kompos mencapai tingkat tertinggi. Ini mengindikasikan bahwa ada titik di mana penambahan kompos yang berlebihan tidak lagi menguntungkan bagi aktivitas mikroba. Penambahan kompos pada awalnya menyediakan sumber karbon dan energi yang melimpah bagi *Azotobacter*, mendukung peningkatan aktivitas metabolisme dan respirasi. Puncak laju respirasi pada 2,5 kg/tanaman kompos menunjukkan dosis optimal untuk mendukung aktivitas bakteri. Namun, penurunan laju respirasi pada dosis kompos yang lebih tinggi (C dan D) bisa disebabkan oleh beberapa faktor. Penambahan kompos dalam jumlah sangat besar dapat memicu peningkatan kompetisi mikroba lain untuk sumber daya dan oksigen, atau dapat mengubah kondisi lingkungan mikro tanah (misalnya, aerasi) menjadi kurang optimal bagi *Azotobacter*.

Data laju respirasi *Azotobacter* untuk perlakuan B, F, dan J menunjukkan variasi yang cukup besar meskipun semuanya menerima jumlah kompos yang sama (2,5 kg/tanaman). Perlakuan B, yang tidak diberi herbisida, memiliki laju respirasi sebesar 4,80 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Angka ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan F, yang menerima herbisida 1 liter, dengan laju respirasi tertinggi sebesar 7,02 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Namun, ketika dosis herbisida ditingkatkan menjadi 2 liter pada perlakuan J, laju respirasi menurun drastis menjadi 1,66 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa dengan penambahan 2,5 kg/tanaman kompos, aplikasi herbisida pada dosis 1 liter dapat secara signifikan meningkatkan laju respirasi *Azotobacter*. Fenomena ini bisa disebabkan oleh herbisida pada dosis tertentu yang mungkin mengurangi populasi mikroorganisme pesaing, sehingga memberikan keunggulan bagi *Azotobacter* untuk memanfaatkan sumber daya yang tersedia dari kompos. Namun, ketika dosis herbisida ditingkatkan menjadi 2 liter, efeknya menjadi berbalik. Penurunan drastis laju respirasi pada perlakuan J mengindikasikan bahwa pada konsentrasi yang lebih tinggi, glifosat mulai menunjukkan efek toksik atau menghambat aktivitas metabolisme *Azotobacter*, meskipun terdapat kompos sebagai sumber nutrisi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aktivitas respirasi *Azotobacter* tetap stabil atau bahkan sedikit meningkat pada dosis herbisida lapangan, namun menurun secara signifikan ketika dosis melebihi ambang tertentu (Meena et al., 2020; Sándor et al., 2020; Omar & Abd-Alla, 1992).

Data laju respirasi *Azotobacter* untuk perlakuan C, G, dan K menunjukkan variasi dengan jumlah kompos yang sama (5 kg/tanaman). Perlakuan C, yang tidak diberi herbisida, memiliki laju respirasi tertinggi di antara kelompok ini, yaitu 3,43 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Ketika herbisida 1 liter diaplikasikan pada perlakuan 'G', laju respirasi menurun menjadi 2,75 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Namun, menariknya, laju respirasi sedikit meningkat kembali pada perlakuan K yang menerima herbisida 2 liter, menjadi 3,15 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa dengan dosis kompos yang tinggi (5 kg/tanaman), aplikasi herbisida 1 liter tampaknya memiliki efek penghambatan pada respirasi *Azotobacter*. Namun, peningkatan dosis herbisida menjadi 2 liter tidak menyebabkan penurunan yang lebih lanjut sebaliknya, laju respirasi sedikit pulih. Fenomena ini bisa

disebabkan oleh beberapa faktor. Herbisida glifosat pada dosis 1 liter (G) mungkin memiliki efek toksik atau menghambat aktivitas metabolisme bakteri. Namun, pada dosis yang lebih tinggi (2 liter pada K), mungkin terjadi degradasi glifosat yang lebih cepat atau mikroorganisme lain yang sensitif terhadap dosis ini telah berkurang, sehingga mengurangi kompetisi dan memungkinkan *Azotobacter* untuk meningkatkan aktivitasnya. Hal ini menyoroti bahwa interaksi antara herbisida, kompos, dan aktivitas mikroba sangat kompleks dan tidak selalu menunjukkan pola linier.

Data laju respirasi *Azotobacter* untuk perlakuan D, H, dan L menunjukkan variasi dengan jumlah kompos yang sama (7,5 kg/tanaman). Perlakuan D, yang tidak diberi herbisida, memiliki laju respirasi sebesar 2,53 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Menariknya, ketika herbisida 1 liter diaplikasikan pada perlakuan H, laju respirasi meningkat secara signifikan menjadi 4,55 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Namun, ketika dosis herbisida ditingkatkan menjadi 2 liter pada perlakuan L, laju respirasi menurun menjadi 3,52 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa dengan penambahan kompos yang tinggi (7,5 kg/tanaman), aplikasi herbisida pada dosis 1 liter justru mendorong laju respirasi *Azotobacter*, mencapai nilai tertinggi di antara ketiga perlakuan ini. Hal ini bisa terjadi karena adanya interaksi kompleks antara herbisida dan mikroorganisme tanah. Dosis herbisida 1 liter mungkin mengurangi populasi mikroorganisme pesaing *Azotobacter*, sehingga bakteri ini memiliki akses lebih besar terhadap nutrisi dari kompos untuk meningkatkan aktivitas metabolisme dan respirasinya. Namun, peningkatan dosis herbisida menjadi 2 liter menunjukkan efek yang kurang menguntungkan, meskipun laju respirasi masih lebih tinggi daripada perlakuan tanpa herbisida. Ini mengindikasikan bahwa pada dosis herbisida yang lebih tinggi, glifosat mungkin mulai menimbulkan efek toksik atau menghambat aktivitas metabolisme *Azotobacter*, meskipun suplai nutrisi dari kompos sudah memadai.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa populasi *Azotobacter* tertinggi diperoleh pada perlakuan dengan dosis kompos 5 kg per tanaman tanpa penambahan herbisida, yaitu sebesar $87,9 \times 10^5$, sedangkan populasi terendah tercatat pada perlakuan tanpa kompos dan tanpa herbisida dengan jumlah $4,73 \times 10^5$. Laju respirasi tertinggi ditemukan pada perlakuan dengan nilai 7,02 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹, sedangkan laju respirasi terendah tercatat sebesar 1,66 mg C-CO₂ kg⁻¹ BKM hari⁻¹. Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan kompos dan dosis herbisida yang tepat dapat memengaruhi aktivitas mikroba tanah secara signifikan.

Berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar petani mempertimbangkan penggunaan kompos dengan dosis antara 2,5–5 kg per tanaman serta herbisida berbahan aktif glifosat sebanyak 1 liter per hektar, karena kombinasi ini terbukti dapat mendukung peningkatan populasi *Azotobacter* sekaligus menjaga aktivitas respirasi mikroorganisme tanah, sehingga mendukung keseimbangan ekosistem tanah dan kesehatan tanaman kopi Arabika.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander I, Nadapdap HJ. 2019. Analisis daya saing ekspor biji kopi Indonesia di pasar global tahun 2002–2017. *JSEP* 12(2): 1–16.
- BPS. 2020. Statistik Kopi Indonesia 2020. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- Lončarić Z. 2024. The evaluation of compost maturity and ammonium content: implications for phytotoxicity. *Agronomy* 14(11): 2636. MDPI.

- Meena RS, Kumar S, Datta R, Lal R, Vijayakumar V, Brtnicky M, Sharma MP. 2020. Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: a review. *Land* 9(2): 34. MDPI.
- Mousa N, Abdul Hassan M. 2025. Biodegradation of glyphosate by four plant growth promoting bacteria (4PGPB). *Pollution* 11(1): 15–22.
- Omar SA, Abd-Alla MH. 1992. Effect of pesticides on growth, respiration and nitrogenase activity of *Azotobacter* and *Azospirillum*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 8(3): 326–328.
- Roni N, Lindawati S. 2014. Kajian partial bakteri penambat nitrogen nonsimbiotik asal rizosfer tanaman gamal sebagai plant growth promoting pada lahan sistem tiga strata Pecatu. *Pastura* 7(2): 78–82.
- Sahur A. 2021. Teknologi Mikroba: Actinomycetes dan Rhizobium untuk Perbaikan Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Kedelai.
- Sándor Z, Ragán P, Vágó I, Kiss A. 2020. Effect of herbicides on soil respiration: a case study conducted at Debrecen-Látókép Plant Cultivation Experimental Station. *Environmental Monitoring and Assessment* 192(2): 1–12. Springer.
- Setiawati MR, Suryatmana P, Herdiyantoro D, Ilmiyati Z. 2024. Karakteristik pertumbuhan dan waktu generasi isolat *Azotobacter* sp. dan bakteri endofitik asal ekosistem lahan sawah. *Jurnal Agroekoteknologi* 6(1): 12–20.
- Tsabadze SA. 2025. Phytotoxicity and quality in compost: a concise review of causes and testing. *Journal of Compost Science* (2025). Springer.
- Urra J. 2019. Potential benefits and risks for soil health derived from organic amendments. *Agronomy* 9(9): 542. MDPI.