

Analisis Pertumbuhan Tanaman serta Komponen Hasil Kedelai Edamame pada Berbagai Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati di Tanah Gambut

Analysis Growth and Yield Components of Edamame Soybean due to Different Dosages and Application Timings of Biological Fertilizers on Peat Soil

Nadya Muliandari^{1*}, Dwi Zulfita¹, Safriadi¹, Dermawati Sitorus¹

¹Universitas Tanjungpura. Jalan Purnama 2, Kecamatan Pontianak Selatan, Kota Pontianak, Kalimantan Barat. 78117,

²Universitas Tanjungpura. Jalan Purnama 1, Kecamatan Pontianak Selatan, Kota Pontianak, Kalimantan Barat. 78121,

³Universitas Tanjungpura. Jalan H. Said Tebas, Kecamatan Tebas, Kabupaten Sambas, Kalimantan Barat. 79461,

⁴Universitas Tanjungpura. Jalan Kapur Raya, Kecamatan Sei Raya, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat. 78234.

*E-mail: nadyamuliandari@faperta.untan.ac.id,

Submitted: 30/09/2025, Accepted: 31/10/2025, Published: -.

ABSTRAK

Kedelai edamame dapat tumbuh dengan baik di daerah dengan iklim tropis serta subtropis. Kondisi iklim Indonesia dengan suhu berkisar antara 22 – 32°C serta curah hujan berkisar antara 1.000 – 5.000 mm/tahun sesuai untuk pertumbuhan tanaman ini. Edamame juga mampu beradaptasi pada kondisi bahan organik yang tinggi seperti pada tanah gambut. Salah satu upaya yang bisa dilakukan untuk memperbaiki produktivitas tanah gambut dengan pemberian pupuk hayati mengandung mikroba untuk meningkatkan kesuburan tanah. Waktu aplikasi pupuk hayati berkaitan dengan efektivitas penyerapan unsur hara oleh tanaman. Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh interaksi antar dosis yang diberikan dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap karakter morfofisiologi dan hasil kedelai edamame pada tanah gambut. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei – September 2024 di Kelurahan Bansir Darat, Kecamatan Pontianak Tenggara. Penelitian ini dirancang menggunakan metode RAK faktorial dengan tiga ulangan, yang mencakup dua faktor sebagai variabel perlakuan dosis pupuk hayati (D) yaitu $d_1 = 50$ kg/ha, $d_2 = 75$ kg/ha dan $d_3 = 100$ kg/ha; faktor kedua adalah waktu aplikasi pupuk hayati (W) yaitu $w_1 = 2$ dan 4 MST (Minggu Setelah Tanam) dan $w_2 = 2, 4$ dan 6 MST. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan pupuk hayati sebanyak 75 kg/ha yang diberikan pada minggu ke-2 dan ke-4 menunjukkan pertumbuhan tanaman serta komponen hasil edamame terbaik di tanah gambut. Aplikasi pupuk hayati juga berpengaruh dalam meningkatkan pH, kandungan C-Organik, N-Total dan C/N rasio pada tanah gambut.

Kata Kunci: Gambut, Kedelai Edamame, Pupuk Hayati.

ABSTRACT

Edamame soybean grows in tropical and subtropical climates. Indonesia's climate conditions are suitable for the growth of edamame in temperatures around 22 - 32°C and rainfall between 1.000 – 5.000 mm/year. Edamame also able to adapt in the conditions of high organic matter land such as peat soil. Attempt to improve peat soil productivity is by providing biofertilizers containing microbes to increase soil fertility. The timing of biofertilizer application is related to the effectiveness of

nutrient absorption by plants. This research aims to obtain the interaction of dosage and time of biofertilizer application on the morphophysiological characteristics and yield of edamame soybean on peat soil. This research conducted from May – September 2024 at Bansir Darat village, Southeast Pontianak Subdistrict. A factorial Randomized Block Design was implemented in this research, consisting of three replications and two experimental factors including the dosage of biofertilizer (D) namely $d_1 = 50 \text{ kg / ha}$, $d_2 = 75 \text{ kg / ha}$ and $d_3 = 100 \text{ kg / ha}$; the second factor is time of biofertilizer application (W) namely $w_1 = 2$ and 4 WAP (Weeks After Planting) and $w_2 = 2, 4$ and 6 WAP. The interaction of biofertilizer at dosage of 75 kg/ha and the application time of biofertilizer 2 and 4 WAP provided the best analysis of plant growth and edamame yield components on peat soil. The application of biofertilizer also gave effect on increasing pH, C-Organic content, N-Total and C/N ratio on peat soil.

Keywords: Biofertilizer, Edamame Soybean, Peat.



Copyright © 2025 Author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

PENDAHULUAN

Edamame merupakan varietas *Glycine max* L. yang dipetik ketika polongnya masih muda dan berwarna hijau, yaitu pada saat bijinya telah terisi hampir penuh, sekitar 80–90%. Sayuran ini memiliki kandungan gizi yang cukup tinggi, diantaranya nilai gizi 582 kkal per 100 gram, protein sebanyak 11,4 gram, karbohidrat 7,4 gram, dan lemak 6,6 gram. Edamame juga mengandung berbagai vitamin seperti vitamin A (karoten) sebanyak 100 mg per 100 gram, vitamin B1 sebesar 0,27 mg, B2 sebanyak 0,14 mg, B3 sebesar 1 mg, serta vitamin C sebanyak 27%. Selain vitamin, edamame juga mengandung mineral penting seperti Kandungan nutrisi mencakup fosfor sebesar 140 mg, kalsium 70 mg, zat besi 1,7 mg, dan kalium 140 mg dalam setiap 100 gramnya. (Nguyen, 2018).

Penyebaran lahan gambut yang luas di Kalimantan Barat berpotensi tinggi untuk dikembangkan sebagai area tanaman kedelai edamame karena kandungan bahan organiknya yang

tinggi. Lahan gambut yang dimanfaatkan sebagai media tanam kedelai edamame masih mengalami sejumlah kendala dalam penggunaannya. Purwanto (2016) mengatakan bahwa kendala lain adalah tanah memiliki tingkat kesuburan yang tidak seragam.

Tanah gambut memiliki kandungan bahan organik serta kemampuan menahan air yang tinggi. Hasil analisis tanah pada lokasi penelitian menunjukkan memiliki pH H_2O sebesar 4,2 dan pH KCl sebesar 3,8, yang tergolong masam. Kandungan C-organik sangat tinggi yaitu 35,6%, menunjukkan tanah kaya bahan organik. Kandungan nitrogen total (N-total) juga tinggi, yaitu 1,2%, sedangkan rasio C/N bernilai 30 yang termasuk kategori sedang hingga tinggi dengan derajat kematangan bahan organik tergolong hemik atau gambut setengah matang.

Menurut Pangudijatno (1987) dan Sarief (1990), sebagian besar tanah gambut umumnya memiliki kadar unsur hara makro seperti fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg)

yang rendah, begitu pula dengan unsur mikro seperti tembaga (Cu), seng (Zn), aluminium (Al), besi (Fe), dan mangan (Mn). Rasio nilai C/N yang cukup tinggi menyebabkan sebagian besar nitrogen hasil dekomposisi dari bahan organik tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman, karena digunakan terlebih dahulu oleh mikroorganisme tanah.

Pertumbuhan serta perkembangan tanaman yang sehat direfleksikan oleh status hara yang optimal, konsentrasi hara beserta besarnya serapan hara N, P dan K di dalam jaringan tanaman (Zubachtirodin et. al., 2011). Salah satu upaya yang bisa diterapkan untuk meningkatkan kandungan hara tanah yaitu dengan melakukan penanaman tanaman leguminosa seperti edamame. Tanaman leguminosa mampu menaikkan unsur hara nitrogen dalam tanah dengan adanya fiksasi nitrogen yang dilakukan bintil akar tanaman (Muliandari et al., 2018).

Kegiatan pemupukan dilakukan guna menyediakan nutrisi yang diperlukan tanaman. Menurut Pranata (2010), pupuk hayati merupakan jenis pupuk yang mengandung mikroorganisme yang hidup di dalam tanah dan berfungsi memfasilitasi perubahan senyawa kimia menjadi bentuk yang lebih mudah diasimilasi oleh akar tanaman. Aplikasi pupuk hayati diharapkan dapat memperbaiki kondisi kesuburan tanaman dan mendongkrak hasil panen.

Pemupukan idealnya memperhatikan ketepatan waktu aplikasi untuk hasil yang optimal. Menurut Pertiwi dan Ardian (2016), pemupukan sebaiknya dilakukan secara berkala karena keterbatasan serapan

nutrien oleh sistem perakaran tanaman. Atas dasar itu, penting untuk memperhatikan takaran dan jarak waktu pemberian pupuk agar penggunaannya lebih efektif. Selain itu, Soetejo dan Kartasapoetra (1988) dalam Jumini et al. (2012) menekankan bahwa ketepatan waktu dalam pemberian pupuk untuk tanaman mampu memengaruhi pertumbuhan tanaman.

Analisis pertumbuhan tanaman merupakan metode untuk memantau perubahan fotosintesis dengan mengukur jumlah bahan kering yang dihasilkan. Pertumbuhan tanaman sebenarnya dapat diamati tanpa merusak tanaman, misalnya melalui pengukuran tinggi tanaman atau jumlah daunnya. Namun, metode ini sering kali kurang akurat secara kuantitatif. Oleh karena itu, akumulasi bahan kering lebih banyak dipilih sebagai indikator pertumbuhan karena lebih menggambarkan kemampuan tanaman menyerap energi matahari melalui fotosintesis, serta mencerminkan pengaruh berbagai faktor lingkungan yang berinteraksi dengan tanaman (Annisa et al., 2018).

Penggunaan pupuk hayati merupakan produk yang layak konsumsi, menjaga kesehatan publik, serta berkelanjutan bagi lingkungan. Pupuk hayati merupakan pupuk yang mengandung mikroba bermanfaat yang dapat mendukung proses biologis untuk menyuburkan tanah secara alami serta membantu memulihkan atau meningkatkan kesuburan tanah secara alami melalui proses biologis. Hasil demplot tanaman kedelai di Pasuruan menunjukkan bahwa penambahan pupuk hayati bersama 1,5 ton kompos mampu

meningkatkan hasil panen hingga 2,74 ton per hektar. Sebaliknya, budidaya kedelai secara konvensional dengan ketiadaan pupuk hayati menyebabkan produksi terbatas pada 1,92 ton per hektar.

Suryana (2012) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa pemberian pupuk secara bertahap pada kedelai, yaitu aplikasi pada umur 1 MST, 3 MST, dan fase berbunga penuh terbukti mampu mendongkrak produktivitas. Sementara itu, Saragih et al. (2016) menemukan bahwa pemupukan jagung sebanyak dua kali, yakni pada 1 MST dan awal fase pembungaan, dapat meningkatkan capaian produksi hingga mencapai 10,65 ton per hektar.

Riset ini bertujuan guna mendapatkan interaksi dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap analisis dinamika pertumbuhan dan elemen hasil tanaman edamame yang ditanam pada tanah gambut.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei – September 2024. Penelitian dilaksanakan di Kelurahan Bansir Darat, Kecamatan Pontianak Tenggara. Berbagai bahan yang dipergunakan selama pelaksanaan penelitian ini terdiri dari benih kedelai edamame varietas Ryoko 75, tanah gambut dengan tingkat kematangan hemik, pupuk hayati Petro Biofertil, pupuk Urea, SP-36 dan KCl, kapur dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) dengan efektivitas netralisasi 97,77% dan pupuk kandang ayam.

Beberapa yang digunakan untuk mendukung jalannya penelitian ini

meliputi meteran, cangkul, arit, gembor, pisau, timbangan digital, gunting, ember plastik, penggaris, oven, gelas ukur 1000 ml, hand sprayer, termohigrometer, pagar, kasa, polynet, label, kamera digital, perlengkapan alat tulis, serta pH meter.

Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu Rancangan Acak Kelompok (RAK) secara faktorial dengan tiga kali ulangan. Faktor perlakuan berupa dosis pupuk hayati (D) terdiri dari tiga taraf yaitu d_1 (50 kg/ha), d_2 (75 kg/ha) dan d_3 (100 kg/ha). Faktor waktu aplikasi pupuk hayati Petro Biofertil (W) terdiri dari dua taraf yaitu w_1 (2 dan 4 MST) dan w_2 (2, 4, dan 6 MST). Waktu aplikasi pupuk hayati pada umur 2 dan 4 MST, artinya $\frac{1}{2}$ bagian diaplikasikan pada 2 MST serta $\frac{1}{2}$ bagian diaplikasikan pada saat 4 MST. Sedangkan waktu aplikasi pupuk hayati pada umur 2, 4, dan 6 MST, artinya $\frac{1}{3}$ bagian diaplikasikan pada 2 MST, $\frac{1}{3}$ bagian pada 4 MST, serta $\frac{1}{3}$ bagian lagi diaplikasikan pada 6 MST.

Cara Kerja

Pelaksanaan penelitian ini dimulai dari persiapan media tanam diantaranya : pengolahan tanah, pemberian bahan amelioran dolomit dan pupuk kandang ayam yang dilakukan 2 minggu sebelum tanam). Setelah tercampur kemudian diinkubasi selama 2 minggu. Selanjutnya dilakukan penanaman edamame sebanyak 2 biji per lubang tanam. Pemupukan dengan formulasi Urea, SP-36, dan KCl sebagai sumber N, P, dan K dilakukan 2 minggu setelah tanam serta aplikasi pupuk hayati dilakukan sesuai perlakuan diantaranya 2, 4 dan 6 MST, Pemeliharaan tanaman diantaranya: penyiraman dilakukan, penyiangan gulma dan pembumbunan dilakukan setiap hari /

melihat kondisi lapangan. Serta dilakukan juga pencegahan secara dini (preventif) terhadap hama dan penyakit dilakukan dengan menggunakan pestisida berbasis bahan alami pada satu minggu sekali setelah tanam hingga satu minggu sebelum panen. Panen edamame dilakukan pada umur 65 HST dengan memperhatikan ciri fisiologis yaitu polong sudah terisi > 90% serta berwarna hijau.

Analisis Data

Aspek (variabel) yang dinilai dalam penelitian untuk menilai pertumbuhan tanaman meliputi indeks luas daun (ILD), total luas daun, laju asimilasi bersih (LAB), laju pertumbuhan tanaman (LPT), serta bobot kering tanaman. Sementara itu, variabel yang diamati sebagai komponen hasil mencakup jumlah polong segar berisi per tanaman, persentase polong hampa per tanaman, dan bobot polong segar berisi per tanaman.

Tabel 1. Indeks Luas Daun (ILD) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	2,55 b	3,67 b	2,96 b
75	4,97 a	3,43 b	4,20 a
100	2,90 b	2,61 b	2,76 b
Rerata	3,48 a	3,14 a	(+)

KK (%) = 20,40

Keterangan : Tanda (+) menunjukkan terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Berdasarkan Tabel 1, mengindikasikan adanya perbedaan akibat perlakuan pemberian dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap ILD tanaman kedelai edamame. Aplikasi pupuk hayati pada beragam variasi dosis dan waktu memberikan pengaruh yang bervariasi terhadap nilai Indeks Luas Daun (ILD). Perbedaan nilai ILD tersebut terjadi karena distribusi daun dalam tajuk

Data hasil observasi dianalisis secara statistik menggunakan metode analisis varians (ANOVA) atau uji F. Jika hasil uji F atau analisis ragam menunjukkan adanya pengaruh perlakuan yang signifikan dari perlakuan atau interaksinya, langkah berikutnya adalah melakukan uji lanjutan menggunakan Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada tingkat signifikansi 5%. Seluruh data dianalisis melalui perangkat lunak Statistical Analysis System (SAS).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Indeks Luas Daun

Hasil sidik ragam terhadap Indeks Luas Daun (ILD) menunjukkan bahwa dosis pupuk hayati berpengaruh terhadap ILD. Waktu aplikasi pupuk hayati tidak berpengaruh terhadap ILD kedelai edamame. Terjadi interaksi antara dosis serta waktu aplikasi pupuk hayati terhadap ILD (Tabel 1).

tanaman yang menyebabkan intensitas cahaya yang diserap oleh setiap helai daun menjadi tidak sama. Jumlah cahaya yang jatuh pada permukaan daun sangat dipengaruhi oleh adanya naungan dari daun-daun di lapisan atas (Indradewa et al., 2018).

Indeks Luas Daun (ILD) dihitung berdasarkan luas total daun per satuan luas lahan, dengan hanya

memperhitungkan daun yang tetap aktif dalam melakukan fotosintesis, yang dapat dikenali dengan adanya keberadaan klorofil atau warna hijau pada daun. ILD merepresentasikan perbandingan antara luas permukaan daun dengan luas lahan yang digunakan tanaman (Gardner et al., 1985). Tabel 1 menunjukkan bahwa rerata ILD kedelai edamame pada berbagai perlakuan Taraf dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati berkisar antara 2,55 – 4,97. Tanaman kedelai edamame pada interaksi pupuk hayati dosis 75 kg/ha dan waktu aplikasi pupuk hayati 2 dan 4 MST menghasilkan ILD yang tertinggi yaitu 4,97 dan berbeda nyata jika dibandingkan dengan interaksi lainnya.

Variasi peningkatan nilai ILD yang bervariasi pada setiap dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati dipengaruhi oleh sebaran daun dalam tajuk mengakibatkan cahaya yang mencapai permukaan pada tiap helai daun berbeda. Intensitas cahaya yang diterima setiap daun bergantung pada sejauh mana daun-daun di lapisan atas memberikan bayangan atau menutupi daun di bawahnya (Indradewa et al., 2015). Besarnya luas daun turut memengaruhi nilai Indeks Luas Daun (ILD) pada tanaman edamame.

Besar kecilnya Indeks Luas Daun (ILD) dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk tingkat intersepsi cahaya yang diserap oleh tanaman. Meningkatnya jumlah cahaya matahari yang diserap oleh tanaman, maka semakin tinggi pula nilai Indeks Luas Daun (ILD) yang dihasilkan. Jumlah energi yang dipancarkan oleh sinar matahari yang dapat diintersepsi dipengaruhi oleh sifat optik tajuk tanaman, seperti posisi daun, luas permukaan daun, dan periode umur tanaman (Yuwariah et al., 2017). Nilai

ILD secara nyata dipengaruhi oleh variasi dosis dan waktu pemberian pupuk hayati. Interaksi antara kedua perlakuan tersebut mampu meningkatkan ILD secara signifikan, sehingga memberikan dampak yang berbeda terhadap pertumbuhan tanaman kedelai edamame.

Interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati dapat memperbaiki ketersediaan air dan unsur hara dalam tanah, sehingga mendukung berlangsungnya proses fotosintesis secara optimal. Kondisi ini menyebabkan nilai ILD yang terbentuk sudah mencukupi kebutuhan tanaman edamame untuk menghasilkan bahan kering secara maksimal. Nilai ILD yang ideal tersebut juga menunjukkan bahwa tanaman kedelai edamame memperoleh intensitas cahaya yang mencukupi untuk menunjang proses fotosintesis secara efisien.

Menurut Gardner et. al. (1985) bahwa ILD pada rentang 3–5 dianggap cukup untuk mendukung produksi bahan kering maksimum pada tanaman budidaya. Berdasarkan hasil penelitian, ILD yang dicapai oleh tanaman kedelai edamame menunjukkan nilai yang berkisar antara 2,55 – 4,97. Pada keadaan ini tanaman sudah dapat menghasilkan produksi bahan kering yang optimal. Menurut Bhaskara dan Efendi (2023) Indeks Luas Daun menunjukkan nilai kemampuan total permukaan daun yang berfungsi dalam penyerapan radiasi matahari yang berpotensi untuk diubah menjadi energi untuk proses fotosintesis. Nilai ILD yang besar dapat menghasilkan fotosintat tanaman yang lebih banyak.

ILD memiliki keterkaitan yang erat dengan jumlah daun. Peningkatan nilai ILD menunjukkan peningkatan jumlah daun, yang merupakan akibat dari

tingginya hasil fotosintat dalam proses fotosintesis.

Luas Daun

Data hasil uji sidik ragam menunjukkan pengaruh terhadap luas daun tanaman kedelai edamame saat umur 6 MST mengindikasikan bahwa dosis dan

waktu aplikasi pupuk hayati tidak memberikan dampak terhadap luas daun tanaman. Tidak terjadi interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap luas daun tanaman kedelai edamame saat umur 6 MST (Tabel 2).

Tabel 2. Luas Daun (cm²) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	2931,7	2020,6	2476,2
75	2984,0	2058,2	2521,1
100	2340,8	1567,7	1954,3
Rerata	2752,2	1882,2	(-)

KK (%) = 17,74

Keterangan : Tanda (-) menunjukkan tidak terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Tabel 2. mengungkapkan bahwa tanaman kedelai edamame pada perlakuan berbagai dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati mempunyai luas daun yang tidak berbeda. Nilai rerata tanaman kedelai edamame pada berbagai perlakuan dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati dalam kisaran 1567 cm² – 2984,0 cm².

Tidak adanya perbedaan luas daun pada berbagai kombinasi dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati mengindikasikan bahwa unsur hara, terutama unsur makro, telah tersedia dalam jumlah yang memadai untuk mendukung perkembangan luas daun tanaman.

Pupuk hayati yang diberikan dalam variasi dosis dan waktu aplikasi mampu meningkatkan ketersediaan komponen nutrisi makro di dalam tanah. Salah satu fungsi utama pupuk hayati adalah merangsang proses metabolik mikroorganisme yang menguntungkan seperti *Pseudomonas* yang membantu pelarutan fosfor (P), serta *Azotobacter* yang berperan dalam fiksasi nitrogen (N), dengan demikian unsur hara makro

menjadi lebih mudah diserap oleh tanaman (Milne et al., 2007).

Daun berperan sebagai organ utama dalam tanaman karena merupakan tempat terjadinya proses fotosintesis. Efisiensi tanaman dalam kaitannya dengan kemampuan tanaman untuk berfotosintesis sangat ditentukan oleh luas permukaan daunnya, di mana Semakin besar area daun, semakin tinggi pula intensitas cahaya yang dapat diserap. Wibowo et al. (2012) menyatakan bahwa luas daun mencerminkan intensitas cahaya dalam proses fotosintesis. Semakin lebar bidang permukaan daun, maka aktivitas fotosintesis yang terjadi juga meningkat, sehingga jumlah fotosintat yang terbentuk selama proses fotosintesis pun akan lebih banyak.

Laju Asimilasi Bersih

Berdasarkan sidik ragam, Laju Asimilasi Bersih menunjukkan bahwa dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati tidak memberikan dampak pada Laju Asimilasi Bersih. Terjadi interaksi antara

dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap Laju Asimilasi Bersih (Tabel 3).

Tabel 3. menunjukkan bahwa kedelai edamame pada interaksi pupuk hayati dosis 75 kg/ha dan waktu aplikasi pupuk hayati 2 dan 4 MST menghasilkan Laju Asimilasi Bersih yang tertinggi yaitu

0,30 g/dm²/minggu dan Menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan Laju Asimilasi Bersih (LAB) pada interaksi pupuk hayati dosis 100 kg/ha dan waktu aplikasi pupuk hayati 2 dan 4 MST.

Tabel 3. Laju Asimilasi Bersih (g/dm²/minggu) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	0,23 ab	0,25 ab	0,24 a
75	0,30 a	0,21 ab	0,25 a
100	0,19 b	0,23 ab	0,21 a
Rerata	0,24 a	0,23 a	(+)

KK (%) = 19,76

Keterangan : Tanda (+) menunjukkan terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Hal ini menyebabkan perbedaan dalam laju fotosintesis berdampak pada variasi akumulasi bahan kering hasil fotosintesis. Perbedaan Laju Asimilasi Bersih (LAB) ini terjadi sebagai akibat dari tidak tersedianya efek naungan progresif antar daun yang seiring dengan peningkatan luas daun. Pada tanaman kedelai edamame, nilai Indeks Luas Daun (ILD) yang telah mencapai tingkat optimal terbukti mampu meningkatkan LAB.

ILD yang optimal memungkinkan pemanfaatan cahaya matahari secara lebih maksimal untuk proses fotosintesis, sehingga berdampak positif terhadap peningkatan LAB. LAB juga berkontribusi terhadap pembentukan bobot kering tanaman dan cenderung meningkat sejalan dengan naiknya rasio luas daun. Selain itu, nilai LAB juga dapat berubah mengikuti tahapan pertumbuhan tanaman (Mahmudi et al., 2022).

Goldsworthy dan Fisher (1984) menjelaskan bahwa Laju Asimilasi Bersih (LAB) atau laju per satuan luas daun

Berperan sebagai ukuran efisiensi setiap satuan luas daun dalam mendukung proses fotosintesis yang berkontribusi terhadap pertambahan bobot kering tanaman. Sementara itu, menurut Briggs et al. (1920) yang dikutip oleh Goldsworthy dan Fisher (1984), LAB didefinisikan sebagai peningkatan bobot kering tanaman per satuan waktu dan per satuan luas daun.

Laju Pertumbuhan Tanaman

Berdasarkan hasil sidik ragam, Laju Pertumbuhan Tanaman menyatakan bahwa dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati tidak berpengaruh terhadap Laju Pertumbuhan Tanaman. Terjadi interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap Laju Pertumbuhan Tanaman (Tabel 4).

Laju pertumbuhan tanaman secara signifikan dipengaruhi oleh interaksi dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati. Laju pertumbuhan tanaman yang tertinggi dihasilkan tanaman kedelai edamame pada interaksi pupuk hayati dosis 75 kg/ha dan waktu aplikasi pupuk hayati 2 dan 4

MST yaitu 0,73 (g/m²/minggu) dan berbeda secara signifikan bila dibandingkan dengan Laju Pertumbuhan

Tanaman pada interaksi dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati lainnya.

Tabel 4. Laju Pertumbuhan Tanaman (g/m²/minggu) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	0,54 b	0,56 b	0,55 a
75	0,73 a	0,51 b	0,62 a
100	0,51 b	0,53 b	0,52 a
Rerata	0,59 a	0,54 a	(+)

KK (%) = 15,70

Keterangan : Tanda (+) menunjukkan terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Interaksi antara berbagai dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati memberikan pengaruh terhadap Laju Pertumbuhan Tanaman (LPT) kedelai edamame (Tabel 4), yang menyatakan bahwa tiap kombinasi perlakuan yang dilakukan menghasilkan nilai LPT yang berbeda. Laju pertumbuhan mencerminkan kemampuan tanaman dalam memproduksi bahan kering per satuan luas lahan dalam kurun waktu tertentu. Gardner et al. (1985) menyatakan bahwa LPT merupakan peningkatan bobot tanaman per satuan luas lahan dalam satuan waktu tertentu.

Nilai ILD dan LAB pada tanaman kedelai edamame yang diberikan perlakuan berbagai dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati selama masa pertumbuhan menunjukkan hasil yang baik, sehingga mendukung peningkatan aktivitas fotosintesis. Namun, peningkatan tersebut berbeda-beda tergantung pada jenis perlakuan yang diberikan.

Berat Kering Tanaman

Berdasarkan pengujian analisis ragam dapat disimpulkan bahwa pemberian pupuk hayati dengan berbagai dosis dan waktu aplikasi tidak memberikan dampak yang nyata terhadap berat kering tanaman kedelai edamame. Namun, terdapat interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati yang Berperan dalam menentukan berat kering tanaman pada umur 6 MST (Tabel 5).

Tabel 5 memperlihatkan adanya perbedaan hasil dari interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap berat kering tanaman kedelai edamame, yang menunjukkan bahwa setiap kombinasi perlakuan menghasilkan berat kering yang berbeda. Berat kering tertinggi diperoleh dari perlakuan kombinasi pupuk hayati dengan dosis 75 kg/ha dan waktu aplikasi pada 2 dan 4 MST, yaitu sebesar 26,54 g dan hasil tersebut berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan interaksi lainnya.

Tabel 5. Berat Kering Tanaman (g) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	19,29 b	20,10 b	19,70 a
75	26,54 a	18,52 b	22,53 a
100	18,34 b	19,15 b	18,74 a
Rerata	21,39 a	19,26 a	(+)

KK (%) = 15,98

Keterangan : Tanda (+) menunjukkan terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Hal ini mengindikasikan bahwa pemberian pupuk hayati dengan berbagai dosis dan waktu aplikasi dapat mendorong pertumbuhan tanaman kedelai edamame secara lebih optimal. Menurut Steiner et al. (2003), pemberian pupuk hayati dalam variasi dosis dan waktu dapat menstimulasi aktivitas mikroba dalam tanah secara lebih optimal, yang pada akhirnya dapat memperbaiki ketersediaan unsur hara bagi tanaman.

Luas daun yang terbentuk sangat berpengaruh terhadap produksi biomassa tanaman, mengingat peran penting daun sebagai organ utama dalam proses fotosintesis. Suminarti (2010) menyatakan bahwa akumulasi bobot kering mencerminkan kemampuan efektivitas tanaman dalam membentuk asimilat. Dalam kaitannya dengan hal tersebut, tanaman kedelai edamame yang menerima perlakuan dengan berbagai kombinasi dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati menunjukkan kapasitas yang berbeda dalam menghasilkan asimilat. Perbedaan ini berkaitan erat dengan variasi laju metabolisme tanaman, terutama aktivitas fotosintesis.

Perbedaan jumlah daun menyebabkan variasi pada nilai ILD dan LAB, sehingga meskipun laju fotosintesisnya sama, jumlah asimilat yang dihasilkan tetap berbeda. Akibatnya, bobot kering tanaman kedelai edamame

juga bervariasi pada setiap kombinasi interaksi perlakuan antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati.

Kenaikan bobot kering tanaman mencerminkan berlangsungnya proses pertumbuhan yang efektif sebagai hasil dari aktivitas fotosintesis. Fotosintat dihasilkan sebagai hasil dari aktivitas fotosintesis pada daun yang kemudian dialirkan ke bagian-bagian tanaman seperti batang, akar, daun, buah, dan biji. Bobot kering tanaman mencerminkan akumulasi senyawa organik yang bergantung pada laju fotosintesis serta efisiensi proses absorpsi hara oleh sistem perakaran.

Nutrisi esensial yang mudah diserap oleh tanaman berfungsi dalam mengaktifkan proses sintesis pati, yang secara tidak langsung akan mempercepat jalannya fotosintesis. Hasil fotosintesis ini akan dipindahkan dari daun ke buah, yang pada akhirnya meningkatkan bobot kering tanaman, namun dapat mengurangi asimilasi CO₂ dan menyebabkan distribusi fotosintat ke organ tanaman lain menjadi lebih sedikit.

Jumlah Polong Segar Berisi per Tanaman

Menurut hasil sidik ragam, aplikasi berbagai dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah polong segar

berisi per tanaman kedelai edamame. Namun demikian, terdapat interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati yang memberikan pengaruh terhadap jumlah polong segar berisi per tanaman, sebagaimana yang disajikan pada Tabel 6.

Berdasarkan Tabel 6, terlihat adanya perbedaan yang signifikan dari interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap jumlah polong segar berisi per tanaman kedelai edamame. Perlakuan dengan dosis pupuk hayati 75 kg/ha yang diberikan pada 2 dan

4 MST menghasilkan jumlah polong segar berisi tertinggi, yaitu sebanyak 71,67 polong per tanaman, dan menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan kombinasi perlakuan lainnya.

Ini berhubungan dengan serapan hara P dan serapan hara K pada interaksi pupuk hayati dosis 75 kg/ha dan waktu aplikasi pupuk hayati 2 dan 4 MST juga menghasilkan serapan hara P dan serapan hara K yang paling banyak sehingga unsur hara Fosfat mencukupi untuk pertumbuhan dan hasil kedelai edamame.

Tabel 6. Jumlah Polong Segar Berisi per Tanaman (polong) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	53,67 b	57,83 b	55,75 a
75	71,67 a	54,33 b	63,00 a
100	57,17 b	55,83 b	56,50 a
Rerata	60,83 a	56,00 a	(+)

KK (%) = 12,02

Keterangan : Tanda (+) menunjukkan terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Menurut Suwardi et al. (2021) pupuk fosfor (P) berkaitan erat dengan perannya terhadap penyediaan energi dalam proses pembentukan sel baru dan pembelahan sel. Peran unsur hara Kalium (K) mencakup stimulasi terhadap peningkatan jumlah polong, presentase polong isi dan berat polong/tanaman. Pemberian pupuk hayati disertai dengan waktu aplikasinya yang tepat, mengoptimalkan pemanfaatan unsur hara yang terkandung dalam pupuk hayati tersebut mudah diakses dan diserap oleh sistem perakaran tanaman.

Persentase Polong Segar Hampa per Tanaman

Hasil sidik ragam terhadap persentase polong segar hampa per

tanaman kedelai edamame, menunjukkan bahwa berbagai dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati tidak berpengaruh terhadap persentase polong segar hampa/tanaman. Tidak terjadi interaksi pada berbagai dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap persentase polong segar hampa per tanaman kedelai edamame (Tabel 7).

Berdasarkan Tabel 7, tidak ditemukan perbedaan yang signifikan akibat interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap persentase polong segar hampa per tanaman kedelai edamame. Semua perlakuan menunjukkan hasil yang serupa dalam hal persentase polong hampa. Rata-rata persentase polong segar hampa yang dihasilkan per tanaman berkisar antara 5,10% hingga 9,86%.

Tabel 7. Persentase Polong Segar Hampa per Tanaman (polong) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	8,89	7,57	8,23
75	6,32	9,86	8,09
100	5,10	9,37	7,23
Rerata	6,77	8,93	(-)

KK (%) = 16,93

Keterangan : Tanda (-) menunjukkan tidak terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Wahyudin et al. (2017) menjelaskan bahwa terbentuknya polong hampa disebabkan oleh rendahnya ketersediaan unsur hara mikro dan kalium. Semakin tinggi kandungan kalium dalam tanah, maka proses pembentukan serta pengisian polong akan berlangsung lebih optimal. Kalium berperan penting dalam mengurangi jumlah polong hampa sekaligus meningkatkan produktivitas tanaman, seperti jumlah cabang yang menghasilkan dan jumlah polong segar berisi.

Berat Polong Segar per Tanaman

Analisis ragam memperlihatkan bahwa pemberian pupuk hayati dengan berbagai dosis berpengaruh signifikan terhadap berat polong segar per tanaman kedelai edamame. Namun, waktu aplikasi pupuk hayati tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap variabel tersebut. Meskipun demikian, terdapat interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati yang memengaruhi berat polong segar per tanaman, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Berat Polong Segar per Tanaman (g) Kedelai Edamame pada Dosis dan Waktu Aplikasi Pupuk Hayati

Dosis Pupuk Hayati (kg/ha)	Waktu Aplikasi Pupuk Hayati (MST)		Rerata
	2, 4	2, 4, 6	
50	154,09 c	179,51 bc	166,80 b
75	239,08 a	211,70 ab	225,39 a
100	173,18 bc	168,77 bc	170,72 b
Rerata	188,78 a	186,49 a	(+)

KK (%) = 13,54

Keterangan : Tanda (+) menunjukkan terjadi interaksi antar faktor. Angka di dalam kolom atau baris yang diikuti dengan huruf yang sama berarti tidak berbeda menurut uji jarak berganda Duncan taraf 5%.

Tabel 8 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan hasil akibat interaksi antara dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati terhadap berat polong segar per tanaman kedelai edamame. Perlakuan dengan pupuk hayati dosis 75 kg/ha yang diaplikasikan pada 2 dan 4 MST menghasilkan berat polong segar

tertinggi, yaitu sebesar 239,08 g per tanaman. Akan tetapi, hasil tersebut tidak menunjukkan perbedaan signifikan dibandingkan perlakuan yang menggunakan dosis yang sama dan waktu aplikasi pada 2, 4, dan 6 MST.

Kondisi ini dapat disebabkan oleh penggunaan berbagai dosis dan waktu

aplikasi pupuk hayati yang mampu meningkatkan penyerapan unsur hara N, P, dan K oleh tanaman. Semakin tinggi tingkat penyerapan hara, maka hasil tanaman pun cenderung lebih optimal. Menurut Lehmann dan Joseph (2009), pupuk hayati dapat memperbaiki penyerapan hara dengan meningkatkan potensi tanah dalam menyerap dan menahan air, meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), serta menyediakan unsur hara penting bagi tanaman, sehingga mengarah pada peningkatan kualitas kesuburan tanah yang meningkat. Pemberian pupuk hayati ke dalam tanah dengan waktu aplikasi yang tepat juga berperan dalam memperbaiki ketersediaan hara dan mendukung pertumbuhan mikroorganisme tanah. Salah satu fungsi penting pupuk hayati adalah menyediakan lingkungan yang sesuai bagi perkembangan mikroba menguntungkan (Widowati, 2010).

Semakin aktif mikroorganisme dalam tanah, maka ketersediaan unsur hara akan semakin tinggi, yang memungkinkan tanaman menyerap hara dengan lebih optimal dan berkontribusi pada peningkatan hasil panen (Chan et al., 2007). Pupuk hayati mengandung inokulan mikroorganisme yang terdiri dari fungi, bakteri hingga alga yang berperan dalam memfasilitasi ketersediaan hara pada tanah serta berperan dalam mensubstitusi hingga >50% pupuk kimia (Yuli et al., 2021).

Distribusi hasil asimilasi ke bagian tanaman dipengaruhi oleh variasi dosis pupuk hayati yang digunakan (Prakoso et al., 2018). Peningkatan berat polong selama fase generatif juga dapat terjadi karena tersedianya air dalam jumlah yang memadai, mengingat bobot polong sangat bergantung pada ketersediaan air selama

masa tanam. Tanaman polong membutuhkan elemen hara utama seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) yang berfungsi dalam mendukung proses pertumbuhan, pembentukan bunga, dan pengisian polong. Pemberian pupuk susulan yang sesuai dalam hal dosis, jenis, waktu, cara, dan lokasi akan memungkinkan penyerapan unsur hara secara maksimal oleh tanaman (Pratama et al., 2017).

Hubungan Pupuk Hayati terhadap Kesuburan Tanah Gambut

Setelah tanah gambut diberikan perlakuan pupuk hayati, terlihat adanya peningkatan yang cukup nyata pada parameter kesuburan tanah. Nilai pH tanah meningkat dari 4,2 menjadi 5,5 (pH H₂O) dan dari 3,8 menjadi 4,8 (pH KCl), menunjukkan bahwa tanah menjadi menurun kemasamannya. Hal ini disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme dalam pupuk hayati yang dapat menetralkan asam organik melalui proses dekomposisi dan fiksasi ion-ion basa.

Peningkatan pH ini disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme yang bekerja seperti amelioran alami. Mikroba seperti *Bacillus* dan *Trichoderma* mampu menurunkan keasaman tanah melalui beberapa mekanisme biokimia. Selama proses dekomposisi bahan organik, mikroba ini menghasilkan amonia (NH₃) yang kemudian berubah menjadi amonium (NH₄⁺). Proses ini mengonsumsi ion hidrogen (H⁺) sehingga menurunkan keasaman tanah (Zhang et al., 2025).

Kandungan C-organik dan N-total juga meningkat, masing-masing menjadi 38,2% dan 1,5%. Hal ini menandakan bahwa pupuk hayati membantu mempercepat dekomposisi bahan organik, menghasilkan humus yang lebih stabil,

serta meningkatkan aktivitas mikroba yang menambah nitrogen alami di tanah. Rasio C/N turun menjadi 25, menandakan keseimbangan antara karbon dan nitrogen semakin baik, sehingga unsur hara lebih mudah diserap tanaman.

Perlakuan pupuk hayati secara signifikan meningkatkan kandungan karbon total (C-organik) dan nitrogen total (N-total) pada tanah gambut. Aktivitas mikroorganisme berperan dalam mempercepat proses dekomposisi bahan organik dan memperkaya kandungan karbon tanah. Peningkatan C-organik dan N-total terjadi karena mikroorganisme mempercepat siklus karbon dan nitrogen melalui mineralisasi dan imobilisasi hara, yang sekaligus menambah bahan organik aktif di dalam tanah. Nilai C/N yang ideal ini juga menandakan bahwa bahan organik yang ditambahkan melalui biofertilizer telah mengalami proses dekomposisi yang baik, menghasilkan humus matang yang memperbaiki struktur dan kesuburan tanah gambut. Nilai C/N yang ideal ini juga menandakan bahwa bahan organik yang ditambahkan melalui biofertilizer telah mengalami proses dekomposisi yang baik, menghasilkan humus matang yang memperbaiki struktur dan kesuburan tanah gambut (Adam et al., 2025).

KESIMPULAN

Interaksi antara berbagai dosis dan waktu aplikasi pupuk hayati berpengaruh terhadap analisis pertumbuhan dan komponen hasil tanaman kedelai edamame pada tanah gambut. Perlakuan dengan dosis pupuk hayati 75 kg/ha dan aplikasi pada 2 dan 4 MST menunjukkan respons pertumbuhan yang paling baik terhadap pertumbuhan tanaman dan komponen hasil kedelai edamame di tanah

gambut. Aplikasi pupuk hayati juga berpengaruh dalam meningkatkan pH, kandungan C-Organik, N-Total dan C/N rasio pada tanah gambut.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, S., Mohd Nor, M. N., Hani, N. W., Boll Kassim, N. Q., Othman, N. M. I., Abu Sari, N., & Alias, M. L. (2025). Effects of Integrating Biofertilizers with Chemical Fertilizers on Soil Physico-chemical Properties and Oil Palm Yield. *Malaysian Journal of Soil Science*, 29, 417–426.
- Bhaskara, S. Y., & Efendi, D. (2023). Rasio Daun per Buah dan Indeks Luas Daun Tanaman Manggis (*Garcinia mangostana* L.) di Kebun Percobaan Tajur dan Pasirkuda, Bogor. *Buletin Agrohorti*, 11(3), 338–345.
- Muliandari, N., Setiawan, A., & Sudiarso, D. (2018). Pengaruh Aplikasi Pupuk Kandang Kambing dan PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) pada Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Edamame (*Glycine max* (L) Merrill). *Jurnal Produksi Tanaman*, 6(10), 2687–2695.
- Prakoso, D. I., Indradewa, D., & Sulistyaningsih, E. (2018). Pengaruh Dosis Urea terhadap Pertumbuhan dan Hasil Kedelai (*Glycine max* L. Merr.) Kultivar Anjasmoro. *Vegetalika*, 7(3), 16.
- Pratama, B. J., Nurmiaty, Y., & Nurmauli, N. (2017). Pengaruh Dosis Pupuk NPK Majemuk Susulan Saat Awal Berbunga (R1) pada Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kedelai (*Glycine max* [L.] Merrill). *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 17(2), 138–144.
- Suwardi, F., Efendi, R., & Suriani, F.

- (2021). Aplikasi Pupuk Fosfor terhadap Pertumbuhan, Hasil Biji, dan Gula Brix Tanaman Sorgum. *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 5(1), 8–17.
- Yuli Ataribaba, Petrus Selestinus Peten, & Carolina Diana Mual. (2021). Pengaruh Pupuk Hayati terhadap Pertumbuhan Tanaman Sawi (*Brassica juncea* L.) di Kampung Sidomulyo, Distrik Oransbari, Kabupaten Manokawari Selatan, Provinsi Papua Barat. *Jurnal Triton*, 12(2), 66–78.
- Zhang, X., Zhang, L., Liu, J., Shen, Z., Liu, Z., Gu, H., Hu, X., Yu, Z., Li, Y., Jin, J., & Wang, G. (2025). Biofertilizers Enhance Soil Fertility and Crop Yields Through Microbial Community Modulation. *Agronomy*, 15(7), 1–20.