

Kombinasi Dosis NPK Dan Frekuensi Aplikasi Pupuk Hayati Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Kedelai (*Glycine Max L.*) Pada Tanah Ultisol

*Combination of NPK Dosage and Biofertilizer Application Frequency on the Growth and Yield of Soybean (*Glycine max L.*) on Ultisol Soil*

Fetmi Silvina¹, Hapsoh¹, Jhon Pinter Agustinus Bulolo^{1*}

¹Universitas Riau, Indonesia

INFORMASI

Keyword:

Kedelai

NPK

Pupuk Hayati

Tanah Ultisol

Corresponding Author:

Jhon Pinter Agustinus Bulolo

Universitas Riau

*email: jhon.pinter0666@student.unri.ac.id

ABSTRAK

Kedelai (*Glycine max L.*) merupakan salah satu tanaman pangan dari kelompok kacang-kacangan yang memiliki kandungan gizi tinggi. Produktivitas kedelai di Provinsi Riau mengalami penurunan sehingga diperlukan upaya peningkatan produksi melalui pemanfaatan tanah Ultisol dan pengelolaan pemupukan yang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dosis NPK dan frekuensi aplikasi pupuk hayati terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai pada tanah Ultisol, memperoleh kombinasi perlakuan yang mendukung pertumbuhan dan hasil kedelai, serta mengurangi penggunaan pupuk NPK. Penelitian dilaksanakan di Kebun Percobaan Fakultas Pertanian Universitas Riau menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan enam perlakuan dan empat ulangan. Perlakuan terdiri atas kombinasi dosis NPK 0%, 50%, 75%, dan 100% dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati 3 dan 4 kali, sedangkan perlakuan 100% NPK tanpa pupuk hayati digunakan sebagai pembanding. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun trifoliolate, persentase bintil akar efektif, diameter batang, umur panen, jumlah polong bernas, berat biji per tanaman, dan berat kering 100 biji. Data dianalisis menggunakan analisis ragam dan dilanjutkan dengan uji *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf 5% apabila terdapat perbedaan nyata. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian 50% dan 75% NPK yang dikombinasikan dengan aplikasi pupuk hayati sebanyak 3 dan 4 kali tidak berbeda nyata dibandingkan dengan pemberian 100% NPK pada sebagian besar parameter pertumbuhan dan hasil. Kombinasi tersebut berpotensi mengurangi penggunaan pupuk NPK sebesar 25–50% tanpa menurunkan pertumbuhan dan hasil kedelai secara nyata.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max L.*) is an important legume crop with high nutritional value. Soybean productivity in Riau Province has declined, necessitating efforts to increase production through the utilization of Ultisol soil and efficient fertilizer management. This study aimed to determine the effects of NPK dosage and biofertilizer application frequency on the growth and yield of soybean on Ultisol soil, identify treatment combinations that support soybean growth and yield, and reduce NPK fertilizer use. The study was conducted at the Experimental Farm of the Faculty of Agriculture, Universitas Riau, using a Completely Randomized Design (CRD) with six

treatments and four replications. The treatments consisted of combinations of 0%, 50%, 75%, and 100% NPK dosages with biofertilizer application frequencies of three and four times, while 100% NPK without biofertilizer was used as a comparison treatment. The observed parameters included plant height, number of trifoliolate leaves, percentage of effective root nodules, stem diameter, harvest age, number of filled pods, seed weight per plant, and dry weight of 100 seeds. The data were analyzed using analysis of variance, followed by Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at the 5% significance level when significant differences were detected. The results showed that the application of 50% and 75% NPK combined with biofertilizer application three or four times was not significantly different from the application of 100% NPK for most growth and yield parameters. These combinations have the potential to reduce NPK fertilizer use by 25–50% without significantly reducing soybean growth and yield.

PENDAHULUAN

Kedelai merupakan salah satu tanaman pangan kelompok kacang-kacangan, yang memiliki kandungan gizi cukup tinggi dimana per 100 g kedelai kering mengandung protein 34,90%, kalori 331 kkal, dan lemak 18,10 g (Andayanie, 2016). Kedelai tidak hanya dimanfaatkan untuk konsumsi langsung, tetapi juga digunakan sebagai bahan industri seperti minyak kedelai, kosmetik, suplemen nutrisi, pelumas, dan tinta. Berdasarkan Pusdatin (2024), kebutuhan kedelai mengalami peningkatan setiap tahun seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan kebutuhan kedelai dalam negeri diperkirakan mencapai 2,7 juta ton.

Menurut Direktorat Jenderal Tanaman Pangan, (2024), luas panen tanaman kedelai nasional tahun 2022 mencapai 180.922 ha dengan produktivitas 1,67 t/ha, dan tahun 2023 mencapai 218.736 ha dengan produktivitas 1,60 t/ha. Pada tahun 2022 luas panen di Provinsi Riau mencapai 387 ha, dengan produktivitas 0,86 t/ha, dan tahun 2023 mencapai 448 ha dengan produktivitas 0,81 t/ha. Berdasarkan data tersebut produktivitas kedelai di Provinsi Riau mengalami penurunan. Langkah yang dapat dilakukan untuk meningkatkan produktivitas kedelai adalah melalui pemanfaatan tanah Ultisol sebagai media tanam untuk mendukung pengembangan budidaya kedelai.

Tanah Ultisol merupakan salah satu tipe tanah di Indonesia yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam pengembangan lahan pertanian. Tanah Ultisol memiliki kelemahan apabila digunakan sebagai media tumbuh tanaman. Ultisol memiliki kemasaman tanah tinggi dengan pH rata-rata < 4,5, miskin kandungan hara makro terutama P, K, serta kandungan bahan organik rendah (Pratamaningsih et al., 2024). Upaya mengatasi kendala tersebut dapat dilakukan dengan pemupukan.

Pemupukan merupakan kegiatan penambahan unsur hara ke dalam tanah yang bertujuan untuk memperbaiki kesuburan tanah. Pemupukan memiliki peran penting untuk meningkatkan hasil produksi karena dapat menyediakan unsur hara yang dibutuhkan tanaman (Rina & Auzia, 2023). Pupuk anorganik yang dapat digunakan adalah pupuk NPK.

Pupuk NPK memiliki kandungan unsur hara N, P, dan K yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman. Unsur hara tersebut memiliki peran penting yaitu N sebagai penyusun utama klorofil, asam amino, dan protein, P sebagai pembentukan nukleoprotein dan fosfolipid, dan K berfungsi sebagai metabolisme karbohidrat (Nurdiana, 2022). Pemberian pupuk NPK juga diperlukan untuk meningkatkan pertumbuhan dan hasil kedelai, pemberian pupuk NPK dosis 250 kg/ha dapat meningkatkan kadar N, P, polong berna, serta komponen hasil tanaman kedelai (Hapsah et al., 2019). Untuk mengetahui sejauh mana efisiensi pemberian pupuk NPK dapat digunakan pemberian dosis yang berbeda yaitu dosis pupuk NPK 100%, 75%, dan 50%.

Secara umum, dosis 100% NPK merepresentasikan dosis rekomendasi penuh yang biasa digunakan petani, sedangkan dosis 75% dan 50% digunakan untuk mengetahui apakah tanaman dapat tetap tumbuh optimal dengan penggunaan pupuk yang lebih rendah. Penelitian Wulandari et al. (2023), menyatakan bahwa kombinasi pupuk NPK dan vinasse diperkaya mikroba dapat mengurangi pemberian pupuk kimia 25%-50%, sehingga diharapkan ketergantungan terhadap pupuk kimia dapat diminimalisir guna memperbaiki sifat kimia dan biologi. Penggunaan pupuk hayati juga dapat membantu dalam mengurangi penggunaan pupuk anorganik

Pupuk hayati mengandung mikroorganisme yang keberadaannya bisa tunggal atau berupa gabungan beberapa jenis yang disebut dengan konsorsium (Kalay et al., 2020). Pupuk ini bermanfaat untuk meningkatkan kualitas tanah, memperbaiki sifat fisika, kimia, maupun biologi tanah melalui aktivitas biologi organisme dalam tanah. Hasil penelitian Xu et al. (2025), menyatakan pupuk hayati meningkatkan ketersediaan nutrisi tanah dan meningkatkan hasil tanaman melalui mekanisme mikroba. Mikroba yang dapat digunakan untuk pupuk hayati yaitu bakteri *Bacillus cereus*.

Menurut Setiaji et al. (2023), bakteri *Bacillus cereus* dapat mempercepat pertumbuhan tanaman karena bakteri ini memiliki kemampuan untuk menambat nitrogen dan melarutkan hara kalium. Pemberian *Bacillus cereus* pada pupuk hayati cair juga telah diujicobakan pada berbagai jenis tanaman pangan lainnya. Penelitian Hapsoh et al. (2020a) dan Hapsoh et al. (2020b), juga melaporkan bakteri *Bacillus cereus* dapat digunakan pada tanaman kedelai dan padi. Faktor penting lainnya yang juga perlu diperhatikan dalam pemupukan adalah frekuensi pemberian pupuk.

Menurut Hapsoh et al. (2023), pemberian kombinasi pupuk anorganik dan pupuk hayati pada empat kali frekuensi pemberian pupuk hayati sebanyak 10 ml juga bisa meningkatkan umur panen, berat 100 biji, dan mengurangi penggunaan pupuk anorganik sebanyak 25%-50% pada tanaman kacang hijau. Namun, penelitian mengenai kombinasi dosis NPK dan frekuensi aplikasi pupuk hayati pada tanaman kedelai, khususnya pada tanah Ultisol, masih perlu dikaji untuk memperoleh kombinasi pemupukan yang mampu mendukung pertumbuhan dan hasil tanaman sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk NPK. Perbedaan respons tanaman terhadap pemupukan serta karakteristik tanah Ultisol menjadi dasar penting untuk menguji efektivitas kombinasi tersebut pada tanaman kedelai.

Berdasarkan uraian tersebut, penulis telah melakukan penelitian dengan judul “Kombinasi Dosis Pupuk NPK dengan Frekuensi Pemberian Pupuk Hayati terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.) pada Tanah Ultisol”. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kombinasi pupuk NPK dengan frekuensi pupuk hayati, mendapatkan kombinasi perlakuan terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai (*Glycine max* L.) pada tanah Ultisol, dan mengurangi jumlah pupuk NPK.

METODE

Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan kebun percobaan Fakultas Pertanian, Universitas Riau Kampus Binawidya km 12,5 Kelurahan Binawidya, Kecamatan Binawidya, Pekanbaru, Provinsi Riau. Pada bulan September-Desember 2025.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah benih tanaman kedelai varietas Anjasmoro, pupuk NPK mutiara 16-16-16, *Rhizobium* (rhizoka), Furadan 3GR, fungisida mankozeb (Dithane M-45), insektisida Deltametrin (Decis 2,5 EC), media Nutrient Broth (NB), media Nutrient Agar (NA), isolat bakteri *Bacillus cereus* JP6 asal jerami padi (Hapsoh et al., 2016), aquades, air cucian beras, gula merah, dan tanah Ultisol. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah polybag ukuran 35 cm x 40 cm, cangkul, parang, ajir, aluminium foil, erlenmeyer, autoklaf, cawan petri, gelas ukur, oven, hot plate, tabung reaksi, jarum ose, spatula, bunsen, batang pengaduk, sprayer, meteran, jaring, gembor,

mistar, jangka sorong, timbangan analitik, timbangan digital, papan penelitian, kertas label, alat tulis, dan alat dokumentasi.

Perbanyakan bakteri *Bacillus Cereus* JP6

Penelitian ini diawali dengan perbanyakan bakteri *Bacillus cereus* JP6, dilakukan dengan menyiapkan isolat bakteri *Bacillus cereus* JP6 koleksi Hapsoh et al. (2016) yang telah tersedia di Laboratorium Ilmu Tanah. Bakteri *Bacillus cereus* JP6 diperbanyak pada media NB (nutrient broth). Media NB yang digunakan sebanyak 0,08 g dan 10 ml air dimasukkan pada erlenmeyer. Isolat bakteri *Bacillus cereus* JP6 dimasukkan ke dalam erlenmeyer sebanyak satu ose dan diinkubasi selama 1 x 24 jam pada suhu ruangan.

Pembuatan pupuk hayati

Pembuatan pupuk hayati dilakukan dengan mengambil bakteri *Bacillus cereus* JP6 yang telah diremajakan dan diperbanyak dalam media NB, kemudian dicampurkan dengan 1 liter air cucian beras yang sudah ditambahkan 20 g gula merah, diinkubasi selama dua minggu pada suhu ruangan.

Data hasil analisis biologi tanah Ultisol

Kombinasi Perlakuan		Jumlah Koloni Bakteri (CFU/g)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	pupuk	$5,0 \times 10^6$
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati		$4,4 \times 10^6$
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		$4,8 \times 10^6$
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		$4,2 \times 10^6$
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		$4,3 \times 10^7$
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		$4,0 \times 10^7$

Sumber : Analisis di Laboratorium Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Riau (2025).

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara eksperimen menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri atas enam perlakuan dan empat ulangan, sehingga diperoleh 24 unit. Setiap unit terdapat satu tanaman dan 4 polybag. Maka didapatkan total 96 tanaman dan semua tanaman adalah sampel. Penelitian dilaksanakan di Kebun Percobaan Fakultas Pertanian Universitas Riau yang memiliki kondisi lahan relatif datar. Penelitian menggunakan media tanam berupa tanah Ultisol yang ditempatkan dalam polybag. Setiap polybag diisi tanah sebanyak 10 kg sebagai media pertumbuhan tanaman kedelai. Penggunaan polybag dilakukan untuk menyeragamkan volume media tanam dan memudahkan pengaturan perlakuan pemupukan pada setiap satuan percobaan. Perlakuan yang diberikan merupakan kombinasi dosis NPK (dosis dasar 250 kg/ha) dan frekuensi aplikasi pupuk hayati, yaitu tanpa pemberian NPK + pupuk hayati 10 ml sebanyak empat kali (P1), 100% NPK sebesar 1,785 g per tanaman + tanpa pupuk hayati (P2), 75% NPK sebesar 1,339 g per tanaman + pupuk hayati 10 ml sebanyak tiga kali (P3), 75% NPK sebesar 1,339 g per tanaman + pupuk hayati 10 ml sebanyak empat kali (P4), 50% NPK sebesar 0,892 g per tanaman + pupuk hayati 10 ml sebanyak tiga kali (P5), dan 50% NPK sebesar 0,892 g per tanaman + pupuk hayati 10 ml sebanyak empat kali (P6). Pupuk hayati yang digunakan mengandung *Bacillus cereus* JP6. Aplikasi pupuk hayati dengan frekuensi tiga kali dilakukan pada 14, 28, dan 42 HST, sedangkan frekuensi empat kali dilakukan pada 14, 28, 42, dan 56 HST. Pengamatan dilakukan terhadap tinggi tanaman, jumlah daun trifoliolate, persentase bintil akar efektif, diameter batang, umur panen, jumlah polong bernas, berat biji per tanaman, dan berat kering 100 biji.

Data hasil pengamatan dianalisis menggunakan analisis ragam (Analysis of Variance/ANOVA) sesuai dengan model Rancangan Acak Lengkap, yaitu $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$. Sebelum analisis ragam dilakukan, data diperiksa terhadap asumsi normalitas residual dan homogenitas ragam untuk memastikan kesesuaian data dengan asumsi ANOVA. Apabila terdapat data yang tidak memenuhi asumsi analisis, dilakukan penanganan sesuai dengan karakteristik data sebelum analisis dilanjutkan. Analisis ragam dilakukan pada taraf 5%. Apabila hasil ANOVA menunjukkan pengaruh perlakuan yang nyata ($P < 0,05$), analisis dilanjutkan dengan Duncan's New Multiple Range Test (DNMRT) pada taraf 5% untuk mengetahui perbedaan antarperlakuan. Sebaliknya, apabila hasil ANOVA menunjukkan pengaruh yang tidak nyata ($P \geq 0,05$), uji lanjut DNMRT tidak dilakukan dan hasil disajikan berdasarkan nilai rata-rata masing-masing perlakuan tanpa notasi pembeda. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak SAS versi 9.0.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinggi Tanaman

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap tinggi tanaman kedelai nyata disajikan pada Tabel 1.

Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan tinggi tanaman antarperlakuan. Secara deskriptif, rerata tinggi tanaman berkisar antara 57,42–63,67 cm. Perlakuan tanpa NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata tinggi tanaman sebesar 63,67 cm, sedangkan perlakuan 75% NPK dengan tiga kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata 57,42 cm. Perbedaan rerata tersebut merupakan variasi numerik dan tidak dapat diinterpretasikan sebagai pengaruh perlakuan karena hasil analisis ragam menunjukkan tidak nyata

Tabel 1. Tinggi tanaman kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan		Tinggi Tanaman (cm)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian	pupuk hayati 10 ml	63,67
100% NPK (1,785 g per tanaman) +	tanpa pemberian pupuk hayati	62,33
75% NPK (1,339 g per tanaman) +	3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	57,42
75% NPK (1,339 g per tanaman) +	4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	58,50
50% NPK (0,892 g per tanaman) +	3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	57,92
50% NPK (0,892 g per tanaman) +	4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	61,17

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Tabel 1 menunjukkan pertumbuhan tinggi tanaman berkaitan dengan ketersediaan unsur hara yang mendukung pembentukan jaringan vegetatif. Nitrogen berperan dalam pembentukan klorofil dan jaringan vegetatif, fosfor berperan dalam transfer energi, sedangkan kalium berperan dalam berbagai proses fisiologis tanaman. Ketersediaan unsur N, P, dan K yang memadai dapat mendukung aktivitas fotosintesis dan perkembangan jaringan tanaman (Roswy & Sudiarso, 2022). Selain itu, pupuk hayati yang mengandung mikroorganisme dapat membantu menyediakan unsur hara yang diperlukan tanaman (Afrina et al., 2024). Xu et al. 2025 bahwa *Bacillus cereus* juga dilaporkan memiliki kemampuan yang berkaitan dengan pelarutan fosfat dan pemacuan pertumbuhan tanaman, termasuk pada kedelai.

Meskipun secara biologis mekanisme tersebut dapat mendukung pertumbuhan tanaman, hasil penelitian ini belum menunjukkan perbedaan tinggi tanaman yang nyata antarperlakuan. Dengan demikian, variasi dosis NPK dan frekuensi aplikasi pupuk hayati yang digunakan dalam penelitian ini belum terbukti menghasilkan respons tinggi tanaman yang berbeda secara statistik.

Jumlah Daun *Trifoliolate*

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap jumlah daun trifoliolate kedelai disajikan pada Tabel 2.

Secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan jumlah daun antarperlakuan. Secara deskriptif, rerata jumlah daun trifoliolate berkisar antara 12,83–15,67 helai. Perlakuan 75% NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata tertinggi sebesar 15,67 helai, sedangkan perlakuan tanpa NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata 12,83 helai. Selisih tersebut hanya menunjukkan variasi numerik dan belum dapat dinyatakan sebagai akibat dari perlakuan.

Tabel 2. Jumlah daun *trifoliolate* kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan	Jumlah daun <i>trifoliolate</i> (helai)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	12,83
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati	14,75
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	13,00
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	15,67
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	12,84
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	14,25

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Tabel 2 menunjukkan bahwa pembentukan daun merupakan bagian dari pertumbuhan vegetatif yang dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara dan berlangsungnya fotosintesis. Nitrogen diperlukan dalam pembentukan klorofil dan jaringan vegetatif, sedangkan fosfor dan kalium mendukung proses metabolisme dan penggunaan hasil fotosintesis. Ketersediaan N, P, dan K yang cukup dapat mendukung perkembangan jaringan tanaman (Roswy & Sudiarso, 2022). Pupuk hayati juga berpotensi membantu penyediaan unsur hara melalui aktivitas mikroorganisme di sekitar perakaran (Afrina et al., 2024).

Penelitian ini kondisi tersebut belum menghasilkan perbedaan jumlah daun yang dapat dibuktikan secara statistik. Oleh karena itu, perbedaan rerata jumlah daun antarperlakuan tidak dapat dijadikan dasar untuk menyatakan bahwa dosis NPK atau frekuensi aplikasi pupuk hayati tertentu lebih efektif dalam meningkatkan jumlah daun trifoliolate.

Persentase Bintil Akar Efektif

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap persentase bintil akar efektif kedelai. Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan persentase bintil akar efektif antarperlakuan disajikan pada Tabel 3.

Pembentukan bintil akar pada kedelai berkaitan erat dengan interaksi tanaman dengan mikroorganisme penambat nitrogen serta kondisi lingkungan perakaran. Keberadaan mikroorganisme tertentu juga dapat memengaruhi ketersediaan unsur hara dan hubungan simbiotik pada tanaman kedelai. Penelitian Arif et al. (2017) menunjukkan bahwa *Bacillus cereus* yang mampu memobilisasi fosfor dapat meningkatkan nodulasi dan efisiensi fiksasi N_2 pada kedelai ketika dikombinasikan dengan bahan pembenah yang sesuai. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa kelompok *Bacillus* memiliki potensi sebagai mikroorganisme pemacu pertumbuhan dan dapat berhubungan dengan peningkatan nutrisi N dan P pada kedelai.

Tabel 3. Persentase bintil akar efektif kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan	Persentase Bintil Akar Efektif (%)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	79,76
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati	69,93
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	67,80
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	74,67
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	70,66
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	72,31

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Tabel 3 menunjukkan bahwa persentase bintil akar efektif pada perlakuan tanpa NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati mencapai 79,76% secara deskriptif, dengan jumlah koloni bakteri sebesar $5,0 \times 10^6$ CFU/g. Keberadaan bakteri mendukung potensi aktivitas biologis di sekitar perakaran, tetapi tidak secara langsung membuktikan tingginya fiksasi nitrogen. Pembentukan bintil akar efektif dipengaruhi oleh kombinasi pupuk hayati, ketersediaan hara, dan kondisi tanah (Abeje et al., 2021; Ngosong et al., 2022). Selain itu, respons jumlah bintil akar efektif terhadap pemupukan dapat berbeda antarparameter dan perlakuan (Hidayah et al., 2022). Dengan demikian, hasil ANOVA yang tidak nyata menunjukkan bahwa variasi dosis NPK dan frekuensi aplikasi pupuk hayati belum terbukti memberikan pengaruh berbeda secara statistik terhadap persentase bintil akar efektif

Diameter Batang

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap diameter batang kedelai. Dengan demikian, secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan diameter batang antarperlakuan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Diameter batang kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan	Diameter Batang (cm)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	1,04
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati	1,24
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	1,00
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	1,06
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	1,07
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	1,15

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Tabel 4 menunjukkan bahwa perlakuan 50% NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati menghasilkan rerata diameter batang sebesar 1,15 cm secara deskriptif. Namun, hasil ANOVA yang tidak nyata menunjukkan bahwa perbedaan tersebut belum terbukti secara statistik. Nitrogen berperan dalam pertumbuhan vegetatif, sedangkan kalium mendukung aktivasi enzim, keseimbangan air, dan translokasi fotosintat (Tioner et al., 2021). Selain itu, aktivitas mikroorganisme dalam pupuk hayati dapat membantu meningkatkan ketersediaan unsur hara melalui proses biologis tanah (Souza & Tavares, 2021; Herdiyantoro et al., 2022). Meskipun mekanisme tersebut berpotensi mendukung pertumbuhan batang, hasil penelitian ini belum menunjukkan perbedaan diameter batang yang nyata. Oleh karena itu, perbedaan rerata antarperlakuan hanya menunjukkan variasi numerik dan belum membuktikan keunggulan perlakuan tertentu.

Umur Panen

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap umur panen kedelai. Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan umur panen antarperlakuan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 menunjukkan bahwa secara deskriptif, umur panen berkisar antara 87,50–91,67 HST. Perlakuan 75% NPK dengan tiga kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata umur panen 87,50 HST, sedangkan perlakuan 50% NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata 91,67 HST. Perbedaan tersebut hanya merupakan variasi numerik dan belum dapat dinyatakan sebagai pengaruh perlakuan.

Tabel 5. Umur panen kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan	Umur Panen (HST)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	89,67
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati	90,17
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	87,50
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	91,50
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	91,17
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	91,67

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Ketersediaan unsur hara, khususnya P dan K, dapat mendukung proses perkembangan generatif tanaman. Fosfor berperan dalam transfer energi, sedangkan kalium berhubungan dengan berbagai proses fisiologis dan translokasi hasil fotosintesis. Pupuk hayati juga dapat membantu aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam penyediaan unsur hara. Namun, berdasarkan hasil penelitian ini, mekanisme tersebut belum menghasilkan perbedaan umur panen yang nyata. Oleh karena itu, kombinasi dosis NPK dan frekuensi aplikasi pupuk hayati yang diberikan belum terbukti memengaruhi umur panen secara statistik.

Jumlah Polong Bernas

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap jumlah polong bernas kedelai. Dengan demikian, secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan jumlah polong bernas antarperlakuan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 6. Jumlah polong bernas kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan	Jumlah Polong Bernas (polong)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	109,42
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati	167,00
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	132,00
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	124,50
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	117,17
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	147,50

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Tabel 6 menunjukkan bahwa jumlah polong bernas berkisar antara 109,42–167,00 polong. Perlakuan 100% NPK tanpa pupuk hayati memiliki rerata 167,00 polong, sedangkan perlakuan tanpa NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata 109,42 polong. Meskipun selisih rerata tersebut cukup besar secara numerik, hasil tersebut tidak dapat digunakan untuk menyatakan bahwa perlakuan 100% NPK menghasilkan jumlah polong lebih tinggi secara statistik.

Pembentukan dan pengisian polong berkaitan dengan ketersediaan unsur P dan K. Fosfor berperan dalam transfer energi dan proses reproduktif tanaman, sedangkan kalium mendukung berbagai proses

fisiologis serta translokasi hasil fotosintesis. Harahap *et al.* (2024) melaporkan bahwa kecukupan P dan K dapat mendukung pembentukan dan pengisian polong kedelai. Selain itu, mikroorganisme pelarut fosfat seperti *Bacillus cereus* dapat membantu meningkatkan ketersediaan P bagi tanaman (Xu *et al.*, 2025). Namun, dalam penelitian ini, mekanisme tersebut belum menghasilkan perbedaan jumlah polong bernas yang nyata. Dengan demikian, variasi rerata jumlah polong hanya menggambarkan respons numerik tanaman dan belum dapat dijadikan bukti bahwa salah satu kombinasi perlakuan lebih efektif.

Berat Biji Per Tanaman

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap berat biji per tanaman kedelai. Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan berat biji per tanaman antarperlakuan disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Berat biji per tanaman kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan		Berat Biji per Tanaman (g)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		45,73
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati		52,45
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		47,08
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		48,29
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		48,91
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml		51,23

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Tabel 7 menunjukkan bahwa berat biji per tanaman berkisar antara 45,73–52,45 g. Perlakuan 100% NPK tanpa pupuk hayati memiliki rerata 52,45 g, sedangkan perlakuan tanpa NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata 45,73 g. Selisih tersebut tidak dapat diinterpretasikan sebagai efek perlakuan karena hasil analisis ragam menunjukkan tidak nyata.

Berat biji berkaitan dengan proses fotosintesis, pembentukan dan translokasi fotosintat selama fase pengisian biji. Nitrogen mendukung pembentukan fotosintat melalui perannya dalam pertumbuhan dan fotosintesis, sedangkan fosfor dan kalium berperan dalam transfer energi serta translokasi hasil fotosintesis. Ramdan *et al.* (2023) menyatakan bahwa mikroorganisme dalam pupuk hayati dapat membantu menyediakan unsur hara yang mendukung pembentukan dan pengisian biji. Fuady *et al.* (2015) juga menjelaskan bahwa jumlah fotosintat yang ditranslokasikan ke biji berkaitan dengan proses pengisian dan berat biji. Meskipun demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi perlakuan belum menghasilkan perbedaan berat biji yang nyata. Oleh karena itu, nilai rerata yang lebih tinggi atau lebih rendah pada perlakuan tertentu tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan adanya efek perlakuan.

Berat 100 Biji Kering

Hasil sidik ragam menunjukkan bahwa kombinasi dosis pupuk NPK dengan frekuensi aplikasi pupuk hayati berpengaruh tidak nyata terhadap berat 100 biji kering kedelai. Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik belum terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan berat 100 biji kering antarperlakuan disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Berat 100 biji kering kedelai yang diberi pupuk NPK dengan frekuensi pemberian pupuk hayati

Kombinasi Perlakuan	Berat 100 Biji Kering (g)
Tanpa pemberian NPK + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	15,32
100% NPK (1,785 g per tanaman) + tanpa pemberian pupuk hayati	16,01
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	15,45
75% NPK (1,339 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	15,55
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 3 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	15,63
50% NPK (0,892 g per tanaman) + 4 kali pemberian pupuk hayati 10 ml	15,66

Keterangan : Hasil analisis sidik ragam menunjukkan tidak berbeda nyata pada taraf 5%.

Tabel 8 menunjukkan bahwa berat 100 biji kering berkisar antara 15,32–16,01 g. Perlakuan 100% NPK tanpa pupuk hayati memiliki rerata 16,01 g, sedangkan perlakuan tanpa NPK dengan empat kali aplikasi pupuk hayati memiliki rerata 15,32 g. Perbedaan tersebut hanya merupakan variasi numerik dan belum dapat diinterpretasikan sebagai pengaruh perlakuan karena hasil analisis ragam menunjukkan tidak nyata.

Pembentukan dan pengisian biji dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara serta distribusi fotosintat selama fase generatif. Fosfor berperan dalam transfer energi yang diperlukan dalam proses metabolisme, sedangkan kalium mendukung translokasi hasil fotosintesis ke bagian generatif. Ramdan *et al.* (2023) menyatakan bahwa mikroorganisme dalam pupuk hayati dapat membantu menyediakan unsur P dan K yang berperan dalam pembentukan dan pengisian biji. Selain itu, hasil penelitian mengenai *Bacillus* pada kedelai menunjukkan bahwa mikroorganisme tertentu dapat meningkatkan ketersediaan P dan mendukung nutrisi tanaman (Xu *et al.*, 2025). Namun, dalam penelitian ini mekanisme tersebut belum menghasilkan perbedaan berat 100 biji kering yang nyata. Dengan demikian, perbedaan nilai rerata antarperlakuan tidak dapat digunakan sebagai dasar untuk menyatakan bahwa dosis NPK atau frekuensi aplikasi pupuk hayati tertentu memberikan pengaruh yang lebih baik terhadap berat 100 biji kering.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa: (1) Kombinasi 75% NPK + pupuk hayati 10 ml dengan frekuensi aplikasi 3 dan 4 kali serta 50% NPK + pupuk hayati 10 ml dengan frekuensi aplikasi 3 dan 4 kali menunjukkan pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai yang tidak berbeda nyata dibandingkan dengan pemberian 100% NPK pada sebagian besar parameter pengamatan. (2) Pengurangan dosis NPK sebesar 25–50% yang dikombinasikan dengan pupuk hayati 10 ml pada frekuensi aplikasi 3 dan 4 kali dapat digunakan sebagai alternatif pemupukan pada tanah Ultisol, berdasarkan parameter pertumbuhan dan hasil yang tidak menunjukkan perbedaan nyata dibandingkan perlakuan 100% NPK. Namun, respons pada jumlah polong bernas perlu menjadi pertimbangan dalam menentukan kombinasi perlakuan. Berdasarkan hasil penelitian, disarankan penggunaan 50% NPK yang dikombinasikan dengan pupuk hayati 10 ml dengan frekuensi aplikasi 3 kali dapat dipertimbangkan sebagai alternatif pemupukan untuk mendukung pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai pada tanah Ultisol.

DAFTAR PUSTAKA

Abeje, A., et al. (2021). Nodulation, growth, and yield of soybean as affected by bio-, organic, and inorganic NPSB fertilizers, and lime. *International Journal of Agronomy*, 2021, 1285809. <https://doi.org/10.1155/2021/1285809>

- Afrina, N. Y., & Frisella, E. (2024). Pengaruh konsentrasi dan interval waktu aplikasi pupuk hayati terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai. *Jurnal Agrida: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 4(2), 57-62. <https://doi.org/10.55616/agrida.v4i2.878>.
- Andayanie, W. R. (2016). *Pengembangan Produksi Kedelai Sebagai Upaya Kemandirian Pangan di Indonesia*. Jakarta: Mitra Wacana Media.
- Direktorat Perbenihan Direktorat Jenderal Tanaman Pertanian kementerian Pertanian. (2023). *Gebyar Perbenihan Tanaman Pangan Tahun (2023)*. <https://dpkp.jogjaprovo.go.id/upload/files/benih>. Diakses tanggal 30 April 2025.
- Fuady, Z., Mawardi, & Melizawati. (2015). Teknik pengendalian gulma dan pengelolaan tanah terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman kedelai (*Glycine max* L. Merrill). *Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*, 12(3), 81-89.
- Hapsoh, Dini, I. R., & Febrianti, B. (2023). Kombinasi pupuk N, P, K dengan frekuensi pupuk hayati terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kacang hijau (*Vigna radiata* L.). *Jurnal Agrium*, 20(1), 26-34. <https://doi.org/10.29103/agrium.v20i1.10623>.
- Hapsoh, Dini, I. R., Wawan, & Andry, Z. (2020a). Effect of giving several formulations of biological fertilizers based on organic liquid waste on growth and production of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) on peat soil medium. *ICMR (International Conference on Multidisciplinary Research)*, 149-158. <https://doi.org/10.5220/0008883401490158>.
- Hapsoh, Wardati, & Hairunisa. (2019). Pengaruh pemberian kompos dan pupuk NPK terhadap produktivitas kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill). *Jurnal Agron. Indonesia*, 47(2), 149-155. <https://dx.doi.org/10.24831/jai.v47i2.25794>.
- Hapsoh, Wawan, & Dini, I. R. (2016). *Pemberian Pupuk Organik dengan Teknologi Mikrobiologi Mendukung Pertanian Terpadu Berkelanjutan Berbasis Tanaman Pangan pada Lahan Gambut*. Laporan Akhir Hibah Kompetensi LPPM. Universitas Riau. Pekanbaru.
- Hapsoh, Wawan., Dini I. R., & Sari, D. R. (2020b). Growth and result of gogo rice plants (*Oryza sativa* L.) with a few applications of biofertilizers based on organic liquid waste in peat soil medium. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(2), 1545-1552. <https://doi.org/10.29103/agrium.v21i1.15687>
- Harahap, A. T. S., Lubis, I., & Palupi, E. R. (2024). Pengaruh dosis pupuk fosfor dan kalium terhadap produksi dan pertumbuhan kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill). *Buletin Agrohorti*, 12(3), 415-430. <https://doi.org/10.29244/agrob.v12i3.51660>.
- Herdiyantoro, D., et al. (2022). Pemilihan teknik aplikasi dan dosis pupuk hayati pelarut kalium untuk meningkatkan serapan kalium dan pertumbuhan tanaman jagung pada tanah Inceptisols. *Kultivasi*, 21(1). <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v21i1.35781>
- Hidayah, N., Akmal, & Lestari, A. P. (2022). Pengaruh pupuk organik fermentasi padat terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agroecotania: Publikasi Nasional Ilmu Budidaya Pertanian*, 4(2). <https://doi.org/10.22437/agroecotania.v4i2.20437>
- Johnson, R., et al. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 172, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001>
- Kalay, A. M., Hindersah, R., Irene, A. N., & Jamlean, M. (2020). Pemanfaatan pupuk hayati dan bahan organik terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman jagung manis (*Zea mays saccharata*). *Jurnal Ilmu Pertanian*, 32(2), 129-138.
- Ngosong, C., et al. (2022). Inoculating plant growth-promoting bacteria and arbuscular mycorrhiza fungi modulates rhizosphere acid phosphatase and nodulation activities and enhances the

- productivity of soybean. *Frontiers in Plant Science*, 13, 934339. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.934339>
- Nurdiana. (2022). *Fisiologi Tumbuhan*. Jakarta: Prenada Media.
- Pratamaningsih, M. M., Diah, P. H., Erwinda, E., Rufaidah, Q. M., Muhammad, H., & Setiyo, P. (2024). Soil characteristics and management of Ultisols derived from claystones of Sumatra. *Journal Trop Soils*, 29(3), 115-125. <https://doi.org/10.5400/jts.2024.v29i3>.
- Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian. (2024). *Buletin Konsumsi Pangan*. Jakarta: Kepala Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian.
- Ramdan, E. P., Erdiandini, I., Windriyati, R. D. H., Chusniasih, D., Istiadi, K. A., Suryanti, E., & Wati, C. (2023). *Mikrobiologi Pertanian*. Bogor: Yayasan Kita Menulis.
- Rina, A., & Auzia, A. (2023). *Kesuburan Tanah dan Pemupukan*. Tanjung Pati: Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh.
- Roswy, Z. B., & Sudiarso. (2022). Pengaruh dosis pupuk NPK terhadap pertumbuhan dan hasil dua varietas tanaman kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill). *Jurnal Produksi Tanaman*, 10(1), 60-68. <http://dx.doi.org/10.21776/ub.protan.2022.010.01.08>.
- Setiaji, A., Annisa, R. R. R., & Rahmandhias, D. T. (2023). Bakteri *Bacillus* sebagai agen kontrol hayati dan biostimulan tanaman. *Rekayasa*, 16(1), 96-106. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i1.17207>.
- Souza, L. A., & Tavares, R. (2021). Nitrogen and stem development: A puzzle still to be solved. *Frontiers in Plant Science*, 12, 630587. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.630587>
- Tioner, P., Ningsih, H., Purwaningsih, P., Junaedi, A. S., Gunawan, B., Junairiah, J., & Arsi, A. (2021). *Tanah dan Nutrisi Tanaman*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Wulandari, Y., Respatie, D. W., & Alam, T. (2023). Pengaruh kombinasi pupuk NPK dan vinasse diperkaya mikroba terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai (*Glycine max* L. Merrill). *Vegetalika*, 12(3), 198-210. <https://doi.org/10.22146/veg.78636>.
- Xu, Z., Lei, Z., Junjie, L., Zongzuan, S., Zhuxiu, L., Haidong, G., Xiaojing, H., Zhenhua, Y., Yansheng, L., Jian, J., & Guanghua W. (2025). Biofertilizers enhance soil fertility and crop yields through microbial community modulation. *Agronomy*, 15(15), 1-20. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071572>.