

Efektivitas *Inokulasi Rhizobium* dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Pembentukan Bintil Akar pada Tanaman Kacang Hijau (*Vigna Radiata* L)

Safarinda Nurdianawati^{1*}, Reza Septianugraha²

¹Universitas Halim Sanusi PUI, Jl. Pelajar Pejuang 45 No. 31, Kec. Lengkong, Kota Bandung, Jawa Barat

²Universitas Sali Al-Aitaam Bandung, Jl. Aceng Jl. Ciganitri, Kec. Bojongsoang, Kab. Bandung, Jawa Barat
safarinda7@gmail.com

Abstract

Mung bean (*Vigna radiata* L.) is an important legume crop in agricultural and food systems due to its nutritional value, short growth duration, and adaptability to various production environments. One of the important biological characteristics of legumes is their ability to establish symbiotic associations with nitrogen-fixing bacteria, including *Rhizobium* and related nodule-forming bacteria. This symbiotic interaction results in the formation of root nodules that serve as sites for biological nitrogen fixation. This study aimed to analyze the effectiveness of *Rhizobium* inoculation in improving plant growth and root nodule formation in mung bean based on scientific publications from 2019 to 2025. A literature review using a descriptive-comparative approach was conducted. Scientific journal articles and academic books concerning *Rhizobium* inoculation, nodulation, biological nitrogen fixation, mung bean growth, and productivity were reviewed. The results indicate that *Rhizobium* inoculation generally has positive effects on root nodule formation, root and shoot growth, biomass accumulation, and yield components of mung bean. Previous studies have demonstrated that inoculation can increase the number of effective nodules, although its effectiveness is strongly influenced by plant-bacteria compatibility, indigenous rhizobial populations, phosphorus and molybdenum availability, nitrogen supply, soil pH, and environmental conditions. Therefore, *Rhizobium* inoculation has considerable potential as a biofertilization strategy for improving nitrogen-use efficiency and supporting sustainable mung bean production. The selection of inoculants adapted to local soil conditions and compatible with the host genotype is essential for achieving optimal nodulation and plant growth.

Keywords: Mung Bean, *Rhizobium*, Inoculation, Root Nodules, Biological Nitrogen Fixation, Plant Growth.

Abstrak

Kacang hijau (*Vigna radiata* L.) merupakan salah satu tanaman legum yang memiliki nilai penting dalam sistem pertanian dan pangan karena mengandung protein, karbohidrat, vitamin, mineral, serta memiliki umur panen relatif pendek. Salah satu karakteristik biologis tanaman legum adalah kemampuannya membentuk hubungan simbiotik dengan bakteri penambat nitrogen, termasuk kelompok *Rhizobium* dan bakteri bintil akar terkait. Simbiosis tersebut menghasilkan pembentukan bintil akar yang menjadi tempat berlangsungnya fiksasi nitrogen atmosfer. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas inokulasi *Rhizobium* terhadap pertumbuhan dan pembentukan bintil akar tanaman kacang hijau berdasarkan hasil penelitian yang dipublikasikan selama periode 2019–2025. Metode yang digunakan adalah kajian literatur dengan pendekatan deskriptif-komparatif. Literatur diperoleh dari artikel jurnal ilmiah dan buku akademik yang membahas inokulasi *Rhizobium*, nodulasi, fiksasi nitrogen biologis, pertumbuhan, dan produktivitas kacang hijau. Hasil kajian menunjukkan bahwa inokulasi *Rhizobium* secara umum memberikan kecenderungan positif terhadap pembentukan bintil akar, pertumbuhan akar dan tajuk, akumulasi biomassa, serta komponen hasil tanaman kacang hijau. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa inokulasi dapat meningkatkan jumlah bintil efektif, sedangkan keberhasilannya sangat dipengaruhi oleh kompatibilitas antara tanaman dan strain bakteri, keberadaan populasi rhizobia indigenous, ketersediaan fosfor dan molibdenum, dosis nitrogen, pH tanah, serta kondisi lingkungan. Dengan demikian, inokulasi *Rhizobium* berpotensi menjadi salah satu strategi biofertilisasi untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan nitrogen dan mendukung budidaya kacang hijau yang lebih berkelanjutan. Penggunaan inokulan yang adaptif terhadap kondisi tanah dan kompatibel dengan varietas tanaman menjadi faktor penting dalam memperoleh respons nodulasi dan pertumbuhan yang optimal.

Kata Kunci: Kacang Hijau, *Rhizobium*, Inokulasi, Bintil Akar, Fiksasi Nitrogen, Pertumbuhan Tanaman.

Copyright (c) 2026 Safarinda Nurdianawati, Reza Septianugraha

✉ Corresponding author: Safarinda Nurdianawati

Email Address: safarinda7@gmail.com (Jl. Pelajar Pejuang 45 No. 31, Kota Bandung, Jawa Barat)

Received 01 August 2026, Accepted 10 August 2026, Published 23 August 2026

PENDAHULUAN

Kacang hijau (*Vigna radiata* L.) merupakan tanaman legum yang mempunyai peranan penting dalam sistem pertanian karena memiliki siklus pertumbuhan relatif singkat, dapat dibudidayakan pada berbagai kondisi lahan, dan menghasilkan biji dengan kandungan protein yang cukup tinggi. Tanaman ini juga memiliki kemampuan biologis untuk berasosiasi dengan bakteri penambat nitrogen sehingga kebutuhan nitrogen tanaman tidak seluruhnya bergantung pada pupuk nitrogen anorganik. Kemampuan tersebut menjadikan kacang hijau sebagai salah satu tanaman yang potensial dalam mendukung sistem pertanian berkelanjutan.

Nitrogen merupakan salah satu unsur hara makro yang sangat diperlukan dalam pertumbuhan tanaman. Unsur tersebut berperan dalam pembentukan protein, asam nukleat, klorofil, enzim, serta berbagai senyawa metabolit yang berkaitan dengan pertumbuhan tanaman. Kekurangan nitrogen dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman terhambat, ukuran daun lebih kecil, warna daun menjadi lebih pucat, serta menurunkan pembentukan biomassa. Sebaliknya, penggunaan pupuk nitrogen secara berlebihan dapat meningkatkan biaya produksi dan menimbulkan risiko kehilangan nitrogen melalui pencucian, volatilisasi, maupun emisi lingkungan.

Salah satu mekanisme biologis yang dapat membantu menyediakan nitrogen bagi tanaman legum adalah fiksasi nitrogen biologis atau biological nitrogen fixation (BNF). Dalam sistem ini, bakteri penambat nitrogen melakukan reduksi nitrogen atmosfer menjadi bentuk nitrogen yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Hubungan simbiotik antara tanaman legum dan rhizobia merupakan salah satu bentuk BNF yang paling penting dalam sistem pertanian. Goyal et al. (2021) menjelaskan bahwa kemampuan fiksasi nitrogen simbiotik dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara genotipe tanaman, strain rhizobia, serta kondisi lingkungan. (Frontiers)

Dalam hubungan simbiotik tersebut, bakteri yang kompatibel dengan tanaman menginfeksi jaringan akar dan merangsang pembentukan bintil akar. Bintil akar kemudian berkembang sebagai struktur khusus yang menyediakan lingkungan sesuai untuk aktivitas fiksasi nitrogen. Nitrogenase yang terdapat pada sistem simbiotik tersebut memungkinkan nitrogen atmosfer diubah menjadi bentuk nitrogen tereduksi yang dapat digunakan tanaman.

Pembentukan bintil akar bukan sekadar indikator keberadaan bakteri pada akar, tetapi juga merupakan salah satu indikator penting keberhasilan proses simbiosis. Semakin banyak bintil yang efektif, secara umum semakin besar peluang berlangsungnya fiksasi nitrogen. Namun, jumlah bintil saja tidak selalu mencerminkan tingkat fiksasi nitrogen karena efektivitas bintil juga dipengaruhi oleh aktivitas bakteri, kondisi fisiologis tanaman, ketersediaan hara, serta faktor lingkungan.

Proses pembentukan bintil diawali oleh komunikasi molekuler antara tanaman dan bakteri. Akar tanaman menghasilkan senyawa tertentu yang dapat menarik dan mengaktifkan bakteri. Selanjutnya, bakteri menghasilkan sinyal yang dikenal sebagai Nod factors. Sinyal tersebut memicu respons akar, termasuk perubahan rambut akar dan pembentukan struktur infeksi yang memungkinkan bakteri

memasuki jaringan tanaman. Pembentukan bintil kemudian berlangsung melalui proses perkembangan jaringan yang dikendalikan oleh interaksi antara faktor tanaman dan bakteri. Mekanisme komunikasi tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan nodulasi sangat bergantung pada kompatibilitas antara pasangan tanaman dan bakteri (Ma et al., 2021). (Frontiers)

Dalam praktik budidaya, keberadaan rhizobia indigenous di dalam tanah tidak selalu menjamin pembentukan bintil yang optimal. Populasi bakteri lokal dapat memiliki kemampuan nodulasi yang berbeda-beda. Selain itu, beberapa strain indigenous mungkin mampu menginfeksi tanaman tetapi tidak menghasilkan fiksasi nitrogen yang tinggi. Kondisi tersebut menjadi salah satu alasan mengapa inokulasi dengan strain yang memiliki efektivitas tinggi masih diperlukan.

Mendoza-Suárez et al. (2021) menjelaskan bahwa keberhasilan inokulasi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan bakteri membentuk bintil, tetapi juga oleh kemampuan strain inokulan bersaing dengan populasi rhizobia yang telah berada di dalam tanah. Kompetisi tersebut dapat menentukan strain mana yang akhirnya menguasai bintil akar. Oleh karena itu, keberadaan strain lokal menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaan inokulan komersial. (Frontiers)

Kacang hijau memiliki hubungan yang cukup luas dengan bakteri pembentuk bintil akar. Penelitian mengenai isolasi rhizobia pada kacang hijau di Myanmar menunjukkan keberadaan berbagai strain bakteri pada bintil akar tanaman, dengan dominasi kelompok Bradyrhizobium. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa komunitas bakteri yang berasosiasi dengan kacang hijau dapat berbeda berdasarkan lingkungan geografis dan karakteristik tanah (2024). (Springer)

Inokulasi Rhizobium pada tanaman kacang hijau telah banyak diteliti. Salah satu penelitian pada kondisi lapangan menunjukkan bahwa pemberian inokulasi Rhizobium bersama nitrogen dalam dosis rendah dapat meningkatkan pertumbuhan, bobot kering tanaman, panjang akar, bobot kering akar, jumlah polong, bobot 100 biji, dan hasil biji. Penelitian tersebut juga menunjukkan kecenderungan penurunan nodulasi ketika dosis nitrogen meningkat. Temuan ini menunjukkan bahwa nitrogen tersedia dalam jumlah tinggi tidak selalu menguntungkan hubungan simbiotik karena tanaman dapat mengurangi ketergantungannya terhadap fiksasi nitrogen biologis (2021). (Taylor & Francis Online)

Penelitian lain menunjukkan bahwa strain Bradyrhizobium dari tanah tropis dapat meningkatkan nodulasi, pertumbuhan, dan fiksasi nitrogen pada kacang hijau. Namun, pemberian nitrogen mineral juga dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dalam kondisi tertentu sekaligus menurunkan nodulasi. Hal tersebut menunjukkan adanya keseimbangan antara nitrogen mineral yang tersedia di tanah dan kebutuhan tanaman untuk mempertahankan simbiosis dengan bakteri penambat nitrogen (2022). (ScienceDirect)

Efektivitas inokulasi juga dapat dipengaruhi oleh unsur fosfor dan molibdenum. Fosfor diperlukan untuk berbagai proses metabolisme tanaman dan berkaitan erat dengan perkembangan bintil serta aktivitas fiksasi nitrogen. Kekurangan fosfor dapat menghambat proses fiksasi nitrogen karena pembentukan dan aktivitas bintil membutuhkan energi yang cukup. Janati et al. (2021) menjelaskan

bahwa status fosfor tanaman, khususnya pada jaringan bintil, berperan penting dalam pengaturan BNF pada tanaman legum. (Frontiers)

Molibdenum juga memiliki arti penting karena merupakan unsur yang berkaitan dengan sistem nitrogenase. Penelitian pada kacang hijau menunjukkan bahwa kombinasi fosfor, molibdenum, dan inokulasi *Rhizobium* dapat meningkatkan sejumlah parameter pertumbuhan, nodulasi, komponen hasil, serta hasil biji dibandingkan beberapa perlakuan tanpa inokulasi (Siddiqui et al., 2024). (Asian Soil Science Journal)

Penelitian terbaru juga memperlihatkan bahwa pengaruh inokulasi tidak selalu berdiri sendiri. Dalam penelitian mengenai manajemen hara terpadu pada kacang hijau, kombinasi pupuk NPK, vermikompos, *Rhizobium*, dan bakteri pelarut fosfat menghasilkan pertumbuhan dan jumlah bintil efektif yang lebih tinggi dibandingkan kontrol. Pada dua musim pengamatan, perlakuan tersebut menghasilkan tinggi tanaman, jumlah cabang, jumlah daun, akumulasi bahan kering, indeks luas daun, serta jumlah bintil efektif yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan kontrol (Pal et al., 2024). (Asian Soil Science Journal)

Penelitian pada tahun 2024 juga melaporkan bahwa perlakuan rhizobia pada kacang hijau menghasilkan jumlah bintil rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan kontrol. Pada umur 45 hari setelah tanam, perlakuan rhizobia menghasilkan rata-rata 24,6 bintil per tanaman, sedangkan kontrol menghasilkan sekitar 10,3 bintil per tanaman. Meskipun analisis statistik dalam penelitian tersebut menunjukkan perbedaan yang tidak nyata untuk perlakuan yang diuji, kecenderungan biologis peningkatan jumlah bintil tetap terlihat (2024). (DOI)

Hasil penelitian lain pada tahun 2025 juga menunjukkan bahwa inokulasi *Rhizobium* dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil kacang hijau. Penelitian tersebut menguji inokulasi *Rhizobium* bersama beberapa tingkat nitrogen dan menemukan bahwa perlakuan inokulasi memberikan respons pertumbuhan dan hasil yang lebih tinggi dibandingkan tanpa inokulasi (Komal et al., 2025). (Agronomy Journal)

Berdasarkan uraian tersebut, inokulasi *Rhizobium* mempunyai prospek sebagai salah satu teknologi sederhana untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan nitrogen pada kacang hijau. Namun, efektivitasnya tidak bersifat universal karena dipengaruhi oleh strain, varietas tanaman, kondisi tanah, ketersediaan hara, dosis inokulan, dan faktor lingkungan.

Oleh sebab itu, kajian terhadap efektivitas inokulasi *Rhizobium* pada tanaman kacang hijau penting dilakukan untuk memperoleh pemahaman mengenai hubungan antara inokulasi, pembentukan bintil akar, pertumbuhan vegetatif, serta potensi peningkatan hasil tanaman.

Tujuan kajian ini adalah menganalisis efektivitas inokulasi *Rhizobium* dalam meningkatkan pertumbuhan dan pembentukan bintil akar pada tanaman kacang hijau (*Vigna radiata* L.) berdasarkan hasil penelitian ilmiah yang diterbitkan pada periode 2019–2025.

METODE

Desain Kajian

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur (literature review) dengan pendekatan deskriptif-komparatif. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi, membandingkan, dan mensintesis hasil penelitian mengenai penggunaan Rhizobium atau rhizobia pada tanaman kacang hijau (*Vigna radiata* L.).

Kajian literatur dipilih karena efektivitas inokulasi Rhizobium dapat dipengaruhi oleh banyak faktor sehingga analisis terhadap berbagai penelitian diperlukan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif. Parameter yang dibandingkan meliputi pertumbuhan tanaman, pertumbuhan akar, jumlah bintil akar, bintil efektif, biomassa, komponen hasil, dan hasil biji.

Sumber Data

Sumber data terdiri atas artikel jurnal ilmiah dan buku akademik yang diterbitkan pada rentang tahun 2019–2025. Literatur diperoleh melalui penelusuran basis data dan laman penerbit ilmiah menggunakan kata kunci seperti "Rhizobium inoculation mung bean", "Vigna radiata rhizobium", "mungbean root nodulation", "biological nitrogen fixation legume", dan "mung bean growth rhizobium". Artikel yang diprioritaskan adalah artikel yang secara langsung membahas tanaman kacang hijau dan inokulasi rhizobia atau artikel yang membahas mekanisme simbiosis legum-rhizobia yang relevan untuk menjelaskan mekanisme pertumbuhan dan pembentukan bintil akar.

Kriteria Literatur

Literatur dimasukkan apabila memenuhi beberapa kriteria, yaitu:

1. diterbitkan pada periode 2019–2025;
2. berasal dari jurnal ilmiah atau buku akademik;
3. membahas *Rhizobium*, rhizobia, fiksasi nitrogen, nodulasi, atau pertumbuhan tanaman legum;
4. memiliki relevansi dengan tanaman kacang hijau atau mekanisme simbiosis legum-rhizobia;
5. menyediakan informasi yang dapat digunakan untuk membandingkan pertumbuhan, nodulasi, biomassa, atau hasil tanaman.

Literatur yang tidak memiliki hubungan langsung dengan topik, artikel populer tanpa dasar ilmiah, dan sumber yang tidak dapat diverifikasi dikeluarkan dari kajian.

Teknik Analisis

Data literatur dianalisis secara deskriptif-komparatif. Informasi dari masing-masing sumber dikelompokkan berdasarkan variabel yang diamati, yaitu:

Kelompok Variabel	Parameter
Pertumbuhan vegetatif	tinggi tanaman, jumlah daun, jumlah cabang
Pertumbuhan akar	panjang akar, bobot kering akar
Nodulasi	jumlah bintil, jumlah bintil efektif
Biomassa	bobot kering tanaman
Komponen hasil	jumlah polong, jumlah biji, bobot 100 biji
Hasil	hasil biji
Faktor pendukung	nitrogen, fosfor, molibdenum, pH, kondisi lingkungan

Hasil penelitian kemudian dibandingkan untuk melihat pola umum pengaruh inokulasi *Rhizobium*. Sintesis tidak dimaksudkan untuk menghitung effect size secara meta-analitik, melainkan untuk menjelaskan kecenderungan biologis dan faktor yang menyebabkan perbedaan respons antarpelelitian.

HASIL DAN DISKUSI

Pengaruh Inokulasi Rhizobium terhadap Pertumbuhan Tanaman

Hasil kajian menunjukkan bahwa inokulasi *Rhizobium* secara umum mempunyai kecenderungan meningkatkan pertumbuhan tanaman kacang hijau. Peningkatan tersebut dapat terlihat pada tinggi tanaman, jumlah cabang, perkembangan daun, biomassa, serta pertumbuhan akar.

Salah satu mekanisme utama yang menjelaskan respons tersebut adalah meningkatnya ketersediaan nitrogen melalui proses fiksasi nitrogen biologis. Nitrogen yang difiksasi oleh bakteri dapat digunakan tanaman untuk pembentukan berbagai senyawa nitrogen, terutama asam amino dan protein. Peningkatan status nitrogen tanaman selanjutnya dapat mendukung pembentukan daun dan perkembangan jaringan vegetatif.

Goyal et al. (2021) menjelaskan bahwa simbiosis legum-rhizobia memungkinkan tanaman memperoleh nitrogen melalui proses yang melibatkan interaksi kompleks antara tanaman dan bakteri. Efisiensi sistem tersebut sangat ditentukan oleh kompatibilitas antara tanaman dan strain rhizobia serta kondisi lingkungan. (Frontiers)

Pada penelitian lapangan terhadap kacang hijau, pemberian *Rhizobium* menghasilkan respons positif terhadap tinggi tanaman, bobot kering tanaman, panjang akar, bobot kering akar, jumlah polong, bobot 100 biji, dan hasil biji. Menariknya, kombinasi nitrogen dalam dosis relatif rendah dengan inokulasi *Rhizobium* memberikan performa yang baik, sedangkan peningkatan dosis nitrogen cenderung menekan nodulasi (2021). (Taylor & Francis Online)

Temuan tersebut mempunyai implikasi penting dalam pengelolaan pemupukan. Tanaman legum tidak selalu memerlukan nitrogen mineral dalam jumlah tinggi apabila sistem simbiosisnya berjalan dengan baik. Pemberian nitrogen dalam jumlah berlebihan dapat mengurangi keuntungan biologis dari inokulasi karena tanaman memperoleh nitrogen secara langsung dari tanah dan mengurangi kebutuhan untuk mempertahankan hubungan simbiotik.

Dengan demikian, penggunaan *Rhizobium* sebaiknya tidak hanya dipandang sebagai penambahan mikroorganisme ke dalam tanah, tetapi sebagai bagian dari strategi pengelolaan nitrogen. Inokulasi yang efektif dapat membantu mengurangi ketergantungan terhadap nitrogen mineral sekaligus mempertahankan produktivitas tanaman.

Pengaruh terhadap Pertumbuhan Akar

Akar merupakan organ utama dalam interaksi antara tanaman dan rhizobia. Sebelum terbentuknya bintil, akar harus mengenali keberadaan bakteri yang sesuai melalui mekanisme

komunikasi molekuler. Proses tersebut kemudian mengarah pada kolonisasi dan pembentukan struktur bintil.

Inokulasi yang berhasil dapat meningkatkan perkembangan sistem akar secara langsung maupun tidak langsung. Secara langsung, beberapa rhizobia memiliki kemampuan menghasilkan senyawa pemacu pertumbuhan tanaman. Secara tidak langsung, peningkatan ketersediaan nitrogen dapat meningkatkan status fisiologis tanaman sehingga mendukung perkembangan akar dan tajuk.

Rhizobia tidak hanya berfungsi sebagai organisme penambat nitrogen. Kajian mengenai rhizobia sebagai mikroorganisme pemacu pertumbuhan tanaman menunjukkan bahwa kelompok bakteri tersebut dapat menghasilkan berbagai molekul yang berpotensi mendukung pertumbuhan tanaman, termasuk senyawa yang berkaitan dengan regulasi pertumbuhan dan nutrisi tanaman. (Frontiers)

Penelitian terhadap kacang hijau juga menunjukkan peningkatan panjang dan bobot kering akar pada perlakuan inokulasi Rhizobium. Perkembangan akar yang lebih baik dapat memperluas area eksplorasi tanah sehingga meningkatkan kemampuan tanaman memperoleh air dan unsur hara. Kondisi tersebut kemudian dapat memperkuat pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Pengaruh terhadap Pembentukan Bintil Akar

Pembentukan bintil akar merupakan indikator penting dalam mengevaluasi keberhasilan inokulasi Rhizobium. Bintil terbentuk setelah terjadi rangkaian interaksi molekuler antara bakteri dan tanaman. Bakteri yang berhasil memasuki jaringan akar kemudian berkembang dalam struktur khusus yang memungkinkan terjadinya fiksasi nitrogen.

Hasil kajian memperlihatkan bahwa inokulasi umumnya meningkatkan jumlah bintil pada tanaman kacang hijau. Penelitian pada tahun 2024 menunjukkan bahwa perlakuan rhizobia menghasilkan rata-rata 24,6 bintil per tanaman pada umur 45 hari setelah tanam, sedangkan kontrol menghasilkan sekitar 10,3 bintil. Namun, perbedaan statistik antarperlakuan dalam penelitian tersebut dinyatakan tidak nyata. (DOI)

Temuan tersebut menunjukkan pentingnya membedakan antara respons biologis dan signifikansi statistik. Peningkatan jumlah bintil secara numerik belum tentu berarti bahwa perlakuan memberikan perbedaan statistik yang signifikan. Oleh karena itu, evaluasi efektivitas inokulasi sebaiknya tidak hanya didasarkan pada jumlah bintil, tetapi juga pada efektivitas bintil, biomassa, kandungan nitrogen tanaman, dan hasil.

Penelitian pada 2024 mengenai manajemen nutrisi terpadu melaporkan bahwa perlakuan yang menggabungkan sumber nutrisi dan Rhizobium menghasilkan jumlah bintil efektif yang lebih tinggi. Perlakuan 75% NPK + vermikompos + Rhizobium + PSB menghasilkan sekitar 43,8 dan 46,4 bintil efektif per tanaman pada dua musim penelitian, sedangkan kontrol menghasilkan sekitar 31,3 dan 33,2 bintil. (Asian Soil Science Journal)

Hasil tersebut menunjukkan bahwa inokulasi *Rhizobium* dapat memberikan hasil lebih baik apabila didukung oleh kondisi nutrisi yang sesuai. Dengan kata lain, inokulasi tidak selalu bekerja secara terpisah dari faktor kesuburan tanah.

Efektivitas Bintil Lebih Penting daripada Jumlah Bintil

Jumlah bintil akar merupakan parameter yang mudah diamati, tetapi tidak selalu menggambarkan tingkat fiksasi nitrogen secara akurat. Bintil dapat memiliki ukuran dan aktivitas yang berbeda. Bintil yang aktif biasanya mempunyai karakter fisiologis yang berbeda dari bintil yang tidak aktif.

Oleh karena itu, penelitian mengenai inokulasi *Rhizobium* sebaiknya membedakan antara total jumlah bintil dan jumlah bintil efektif. Parameter tambahan seperti warna bagian dalam bintil, bobot bintil, kandungan nitrogen, atau pengukuran aktivitas nitrogenase dapat memberikan informasi lebih akurat mengenai keberhasilan simbiosis.

Kebede (2021) menekankan bahwa efektivitas BNF pada sistem pertanian dipengaruhi oleh pemilihan genotipe legum, inokulasi dengan rhizobia yang kompatibel, praktik agronomi, dan sistem budidaya. Dengan demikian, keberhasilan inokulasi tidak dapat hanya dinilai berdasarkan keberadaan bakteri pada akar. (Frontiers)

Pengaruh Nitrogen terhadap Nodulasi

Salah satu temuan penting dalam kajian ini adalah adanya hubungan negatif antara nitrogen mineral dalam jumlah tinggi dan pembentukan bintil akar. Ketika nitrogen tersedia dalam jumlah cukup tinggi, tanaman cenderung mengurangi investasi metabolik untuk membentuk dan mempertahankan hubungan simbiotik.

Penelitian terhadap kacang hijau menunjukkan bahwa peningkatan dosis nitrogen secara umum menurunkan nodulasi. Kombinasi nitrogen dosis rendah dengan inokulasi *Rhizobium* memberikan pertumbuhan dan nodulasi yang lebih baik dibandingkan beberapa perlakuan nitrogen yang lebih tinggi (2021). (Taylor & Francis Online)

Fenomena tersebut dapat dijelaskan melalui mekanisme regulasi tanaman terhadap status nitrogen. Ketika tanaman memperoleh nitrogen mineral yang cukup, kebutuhan terhadap nitrogen hasil fiksasi simbiotik menjadi lebih rendah. Akibatnya, tanaman dapat menghambat proses pembentukan bintil.

Temuan tersebut penting bagi petani karena penggunaan pupuk nitrogen berlebihan pada tanaman legum dapat mengurangi keuntungan ekologis dari BNF. Strategi yang lebih tepat adalah menggunakan nitrogen secara efisien dan mempertimbangkan kontribusi nitrogen yang diperoleh melalui simbiosis.

Peranan Fosfor dalam Efektivitas Inokulasi

Fosfor merupakan unsur yang sangat penting dalam sistem simbiosis legum-rhizobia. Fiksasi nitrogen membutuhkan energi dalam jumlah besar sehingga metabolisme bintil sangat bergantung pada ketersediaan energi yang memadai.

Kajian Janati et al. (2021) menunjukkan bahwa kekurangan fosfor dapat menghambat BNF pada tanaman legum. Status fosfor pada tanaman dan bintil memiliki hubungan dengan perkembangan nodul dan aktivitas fiksasi nitrogen. (Frontiers)

Pada kacang hijau, penelitian tahun 2024 menunjukkan bahwa kombinasi fosfor, molibdenum, dan inokulasi Rhizobium menghasilkan respons yang baik terhadap tinggi tanaman, jumlah cabang, jumlah polong, panjang polong, jumlah biji per polong, bobot 100 biji, dan hasil biji. Perlakuan dengan fosfor tinggi, molibdenum, dan inokulasi juga menghasilkan jumlah bintil yang lebih tinggi dibandingkan sejumlah perlakuan lainnya. (Asian Soil Science Journal)

Hal tersebut memperlihatkan bahwa efektivitas inokulasi perlu dilihat sebagai bagian dari sistem pengelolaan hara. Inokulan yang baik tidak dapat bekerja secara maksimal apabila tanaman mengalami kekurangan unsur hara yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan aktivitas simbiosis.

Peranan Molibdenum

Molibdenum mempunyai hubungan khusus dengan fiksasi nitrogen karena berperan dalam sistem enzim nitrogenase. Nitrogenase merupakan kompleks enzim utama yang memungkinkan mikroorganisme mengikat nitrogen atmosfer.

Dengan demikian, kekurangan molibdenum dapat membatasi proses fiksasi nitrogen meskipun bakteri mampu membentuk bintil. Oleh sebab itu, pengelolaan molibdenum perlu dipertimbangkan pada tanah yang mempunyai ketersediaan unsur tersebut rendah.

Hasil penelitian Siddiqui et al. (2024) mendukung pentingnya kombinasi fosfor, molibdenum, dan Rhizobium. Perlakuan kombinasi tersebut memberikan hasil lebih baik pada sejumlah karakter pertumbuhan dan produksi kacang hijau. (Asian Soil Science Journal)

Kompetisi dengan Rhizobia Indigenous

Efektivitas inokulan juga sangat dipengaruhi oleh populasi rhizobia yang telah terdapat secara alami di dalam tanah. Tanah yang sebelumnya sering ditanami legum dapat mempunyai populasi rhizobia indigenous dalam jumlah tinggi.

Keberadaan rhizobia indigenous dapat memberikan dua kemungkinan. Pertama, bakteri indigenous dapat membantu membentuk bintil sehingga tanaman tetap memperoleh manfaat BNF. Kedua, bakteri indigenous dapat bersaing dengan strain inokulan dan mengurangi keberhasilan kolonisasi strain yang diberikan.

Mendoza-Suárez et al. (2021) menempatkan kompetisi, okupansi bintil, dan persistensi strain sebagai faktor penting dalam keberhasilan simbiosis rhizobia-legum. (Frontiers)

Penelitian isolasi rhizobia pada kacang hijau di Myanmar juga memperlihatkan keberagaman strain yang terdapat pada bintil akar. Dari 55 isolat yang diperoleh, sebagian besar teridentifikasi sebagai Bradyrhizobium, sedangkan sebagian lainnya termasuk Ensifer. Hal tersebut memperlihatkan bahwa tanaman kacang hijau dapat berinteraksi dengan komunitas bakteri yang beragam (2024). (Springer)

Karena itu, inokulasi sebaiknya menggunakan strain yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kondisi tanah dan memiliki kompatibilitas baik dengan varietas kacang hijau yang digunakan.

Pengaruh Kondisi Lingkungan

Efektivitas simbiosis juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Faktor pH tanah, kelembapan, temperatur, salinitas, ketersediaan oksigen, dan keberadaan unsur hara dapat memengaruhi kelangsungan hidup bakteri serta pembentukan bintil.

Hawkins dan Oresnik (2022) menjelaskan bahwa rhizobia menghadapi berbagai tekanan selama proses pembentukan simbiosis, termasuk pH rendah, tekanan osmotik, stres oksidatif, dan kondisi oksigen rendah. Kemampuan bakteri menghadapi tekanan tersebut dapat menentukan keberhasilan pembentukan hubungan simbiotik dengan tanaman. (Frontiers)

Kondisi kekeringan juga menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan. Penelitian terhadap bakteri bintil akar kacang hijau yang toleran terhadap kekeringan menunjukkan bahwa beberapa isolat mempunyai kemampuan toleransi yang berbeda terhadap tekanan kekeringan. Inokulasi bakteri tertentu bahkan mampu meningkatkan biomassa tajuk pada kondisi ketersediaan air rendah. (ScienceDirect)

Hal tersebut menunjukkan bahwa pemilihan inokulan sebaiknya tidak hanya berdasarkan kemampuan fiksasi nitrogen, tetapi juga berdasarkan kemampuan bertahan pada kondisi lingkungan tempat tanaman dibudidayakan.

Inokulasi dan Produktivitas Tanaman

Tujuan akhir penerapan inokulasi *Rhizobium* bukan hanya meningkatkan jumlah bintil, tetapi meningkatkan produktivitas tanaman secara keseluruhan. Oleh sebab itu, hubungan antara nodulasi dan hasil perlu menjadi perhatian.

Penelitian pada kacang hijau menunjukkan bahwa peningkatan nodulasi dapat diikuti dengan peningkatan beberapa komponen hasil. Penelitian mengenai jumlah bintil pada fase vegetatif kacang hijau menunjukkan bahwa inokulasi menghasilkan peningkatan jumlah bintil dan bintil efektif pada beberapa waktu pengamatan. Jumlah bintil juga memiliki korelasi positif dengan sejumlah komponen hasil tanaman. (Journal Universitas Gadjah Mada)

Penelitian tersebut memberikan indikasi bahwa nodulasi pada fase vegetatif dapat menjadi salah satu indikator awal potensi produktivitas. Namun, hubungan tersebut tidak selalu bersifat linear karena hasil akhir tanaman tetap dipengaruhi oleh fotosintesis, ketersediaan air, nutrisi, genotipe, dan kondisi lingkungan selama fase reproduktif.

Inokulasi dalam Sistem Nutrisi Terpadu

Pendekatan yang lebih realistis dalam budidaya kacang hijau adalah mengintegrasikan inokulasi dengan pengelolaan hara. *Rhizobium* dapat dipadukan dengan pupuk organik, pupuk fosfor, pupuk kalium, atau mikroorganisme lain seperti bakteri pelarut fosfat.

Penelitian Pal et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi NPK, vermikompos, *Rhizobium*, dan PSB memberikan pertumbuhan dan nodulasi yang tinggi. Hasil tersebut menunjukkan adanya

kemungkinan efek komplementer antara mikroorganisme dan sumber hara. (Asian Soil Science Journal)

Integrasi tersebut dapat memberikan beberapa keuntungan. Pupuk organik dapat menyediakan bahan organik dan memperbaiki lingkungan tanah, sementara mikroorganisme dapat membantu menyediakan atau meningkatkan ketersediaan unsur tertentu. Rhizobium kemudian menjalankan fungsi spesifik dalam fiksasi nitrogen.

Pendekatan seperti ini lebih sesuai dengan prinsip pertanian berkelanjutan karena tidak mengandalkan satu input secara berlebihan.

Perbandingan Hasil Penelitian 2019–2025

Secara umum, hasil penelitian yang dikaji dapat dirangkum sebagai berikut:

Periode	Fokus Penelitian	Temuan Utama
2021	Nitrogen dan inokulasi <i>Rhizobium</i>	Inokulasi meningkatkan sejumlah karakter pertumbuhan dan hasil; nitrogen tinggi cenderung menurunkan nodulasi
2021	Interaksi legum-rhizobia	Keberhasilan BNF dipengaruhi genotipe tanaman, strain bakteri, dan lingkungan
2021	Kompetisi rhizobia	Strain inokulan harus bersaing dengan rhizobia indigenous untuk menguasai bintil
2022	<i>Bradyrhizobium</i> dan kacang hijau	Strain tertentu meningkatkan nodulasi, pertumbuhan, dan fiksasi nitrogen
2024	Rhizobia dan kacang hijau	Inokulasi menunjukkan kecenderungan peningkatan jumlah bintil
2024	Fosfor, molibdenum, dan <i>Rhizobium</i>	Kombinasi perlakuan meningkatkan pertumbuhan, nodulasi, dan hasil
2024	Nutrisi terpadu	Kombinasi NPK, vermikompos, <i>Rhizobium</i> , dan PSB meningkatkan pertumbuhan dan bintil efektif
2024	Isolasi rhizobia	Ditemukan keragaman rhizobia yang berasosiasi dengan kacang hijau
2025	Nutrisi dan inokulasi	Inokulasi menunjukkan potensi meningkatkan pertumbuhan dan hasil
2025	<i>Rhizobium</i> dan molibdenum	Kombinasi inokulasi dan nutrisi berpotensi meningkatkan nodulasi, pertumbuhan, dan hasil

Tabel tersebut menunjukkan bahwa hasil penelitian cenderung konsisten dalam memperlihatkan manfaat inokulasi, tetapi tingkat responsnya berbeda antarpelitian. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena strain bakteri yang digunakan tidak sama, kondisi tanah berbeda, varietas tanaman berbeda, dan perlakuan nutrisi yang digunakan berbeda.

Mekanisme Efektivitas Inokulasi

Berdasarkan sintesis literatur, mekanisme efektivitas inokulasi Rhizobium dapat dijelaskan melalui beberapa tahap. Pertama, strain bakteri yang diberikan harus mampu bertahan pada lingkungan rizosfer. Kedua, bakteri harus mampu mengenali tanaman inang dan melakukan kolonisasi akar. Ketiga, terjadi komunikasi molekuler yang melibatkan sinyal tanaman dan bakteri. Keempat, terbentuk struktur infeksi dan bintil akar. Kelima, bakteri menjalankan fiksasi nitrogen di dalam bintil.

Pada tingkat fisiologis, nitrogen yang tersedia dari hasil fiksasi membantu tanaman membentuk protein, klorofil, enzim, dan jaringan baru. Kondisi tersebut dapat meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan mendukung pembentukan komponen hasil.

Dengan demikian, hubungan antara inokulasi dan pertumbuhan bukanlah hubungan yang sederhana. Inokulasi → nodulasi → fiksasi nitrogen → peningkatan status nitrogen tanaman → peningkatan pertumbuhan → peningkatan potensi hasil merupakan rangkaian proses yang dipengaruhi banyak faktor.

Efektivitas Inokulasi sebagai Teknologi Pertanian Berkelanjutan

Penggunaan *Rhizobium* mempunyai prospek dalam mendukung pertanian berkelanjutan karena dapat meningkatkan pemanfaatan nitrogen biologis. BNF dapat mengurangi sebagian kebutuhan tanaman terhadap pupuk nitrogen mineral.

Kebede (2021) menjelaskan bahwa pemanfaatan legum dan BNF dapat memberikan manfaat terhadap kesuburan tanah, ketersediaan nitrogen, serta efisiensi sistem produksi. Pemanfaatan tersebut akan lebih optimal apabila disertai pemilihan genotipe, strain rhizobia yang kompatibel, dan praktik agronomi yang sesuai. (Frontiers)

Selain itu, penggunaan mikroorganisme sebagai input biologis dapat mendukung pengurangan penggunaan pupuk kimia secara berlebihan. Namun, inokulasi tidak dapat dipandang sebagai pengganti mutlak semua pupuk. Tanaman tetap membutuhkan fosfor, kalium, sulfur, dan unsur mikro dalam jumlah tertentu.

Strategi yang lebih tepat adalah mengombinasikan BNF dengan pemupukan berimbang berdasarkan kebutuhan tanaman dan kondisi tanah.

Faktor-Faktor Penentu Keberhasilan Inokulasi

Berdasarkan berbagai penelitian yang dikaji, terdapat beberapa faktor utama yang menentukan efektivitas inokulasi *Rhizobium* pada kacang hijau.

1. Pertama, kompatibilitas strain dan tanaman. Strain yang efektif pada satu varietas atau wilayah belum tentu memberikan respons yang sama pada varietas dan wilayah lainnya.
2. Kedua, populasi rhizobia indigenous. Populasi lokal dapat membantu atau justru berkompetisi dengan inokulan.
3. Ketiga, ketersediaan nitrogen. Nitrogen mineral dalam dosis tinggi dapat menekan pembentukan bintil.
4. Keempat, fosfor. Ketersediaan fosfor yang memadai diperlukan untuk mendukung metabolisme dan perkembangan bintil.
5. Kelima, molibdenum. Unsur ini berkaitan dengan sistem nitrogenase sehingga ketersediaannya dapat berpengaruh terhadap fiksasi nitrogen.
6. Keenam, pH tanah. Kondisi pH yang tidak sesuai dapat menghambat aktivitas dan kelangsungan hidup bakteri.

7. Ketujuh, kelembapan dan temperatur. Kondisi lingkungan yang ekstrem dapat mengurangi aktivitas bakteri dan keberhasilan nodulasi.
8. Kedelapan, kualitas inokulan. Kepadatan sel, viabilitas, umur kultur, metode aplikasi, dan penyimpanan inokulan dapat menentukan keberhasilan inokulasi.

Implikasi bagi Budidaya Kacang Hijau

Berdasarkan hasil kajian, penggunaan Rhizobium dapat dipertimbangkan sebagai salah satu komponen teknologi budidaya kacang hijau. Aplikasi inokulan dapat dilakukan melalui perlakuan benih atau metode lain sesuai karakter produk inokulan.

Namun, sebelum aplikasi pada skala luas, sebaiknya dilakukan pengujian pendahuluan pada kondisi tanah dan varietas yang digunakan. Pengujian tersebut penting karena respons inokulasi sangat bergantung pada kondisi lokal.

Parameter yang sebaiknya diamati tidak hanya tinggi tanaman, tetapi juga jumlah dan efektivitas bintil, panjang akar, bobot kering akar, bobot kering tajuk, kandungan nitrogen tanaman, jumlah polong, bobot biji, dan hasil. Dengan demikian, efektivitas inokulasi dapat dinilai secara lebih komprehensif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur tahun 2019–2025, inokulasi Rhizobium memiliki potensi positif dalam meningkatkan pertumbuhan dan pembentukan bintil akar pada tanaman kacang hijau (*Vigna radiata* L.). Inokulasi dapat meningkatkan jumlah bintil, bintil efektif, pertumbuhan akar, pertumbuhan tajuk, biomassa, serta beberapa komponen hasil tanaman.

Efektivitas tersebut berkaitan dengan kemampuan rhizobia membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman dan melakukan fiksasi nitrogen biologis. Nitrogen hasil fiksasi dapat mendukung pembentukan protein, klorofil, jaringan vegetatif, dan perkembangan tanaman secara keseluruhan.

Namun, keberhasilan inokulasi tidak bersifat mutlak. Respons tanaman dipengaruhi oleh kompatibilitas strain bakteri dengan varietas kacang hijau, populasi rhizobia indigenous, dosis nitrogen, ketersediaan fosfor dan molibdenum, pH tanah, kelembapan, temperatur, serta kualitas inokulan.

Pemberian nitrogen dalam jumlah tinggi dapat menekan pembentukan bintil, sehingga penggunaan pupuk nitrogen perlu dilakukan secara efisien. Sebaliknya, pengelolaan fosfor dan molibdenum yang memadai dapat mendukung proses nodulasi dan fiksasi nitrogen.

Dengan demikian, inokulasi Rhizobium dapat dipandang sebagai salah satu teknologi biofertilisasi yang potensial untuk meningkatkan efisiensi nitrogen pada budidaya kacang hijau dan mendukung sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

Penelitian lanjutan perlu dilakukan melalui percobaan lapangan dengan menggunakan beberapa strain Rhizobium, varietas kacang hijau, dan tingkat dosis inokulan. Pengamatan sebaiknya mencakup jumlah bintil, jumlah bintil efektif, bobot bintil, pertumbuhan akar dan tajuk, kandungan nitrogen tanaman, serta hasil biji.

Penelitian juga perlu menguji interaksi inokulasi *Rhizobium* dengan dosis nitrogen, fosfor, dan molibdenum untuk memperoleh kombinasi pemupukan yang paling efisien. Selain itu, pengujian strain lokal perlu dikembangkan karena adaptasi bakteri terhadap kondisi tanah setempat merupakan salah satu faktor penting dalam keberhasilan inokulasi.

REFERENSI

- Awasthi, L. K., Pandey, L., & Chalise, D. (2025). Effect of *Rhizobium* and molybdenum on growth, root nodulation and yield of mung bean (*Vigna radiata* L.) in Tikapur, Kailali. *Journal of Tikapur Multiple Campus*, 8, 141–163. <https://doi.org/10.3126/jotmc.v8i8.75977> (ResearchGate)
- Goyal, R. K., Mattoo, A. K., & Schmidt, M. A. (2021). Rhizobial–host interactions and symbiotic nitrogen fixation in legume crops toward agriculture sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 12, 669404. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.669404> (Frontiers)
- Hawkins, J. P., & Oresnik, I. J. (2022). The *Rhizobium*-legume symbiosis: Co-opting successful stress management. *Frontiers in Plant Science*, 12, 796045. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.796045> (Frontiers)
- Janati, W., Benmrid, B., Elhaissofi, W., Zeroual, Y., Nasielski, J., & Bargaz, A. (2021). Will phosphate bio-solubilization stimulate biological nitrogen fixation in grain legumes? *Frontiers in Agronomy*, 3, 637196. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.637196> (Frontiers)
- Kebede, E. (2021). Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 767998. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.767998> (Frontiers)
- Komal, Kaur, V., Singh, B., & Singh, B. (2025). To study the effect of *Rhizobium* culture and nitrogen level performance on growth attributes and yield of mung bean crop (*Vigna radiata* L.). *International Journal of Agriculture Sciences*, 8(4). <https://www.agronomyjournals.com/archives/2025.v8.i4.D.2775> (Agronomy Journal)
- Ma, Y., & Chen, R. (2021). Nitrogen and phosphorus signaling and transport during legume–*Rhizobium* symbiosis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 683601. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.683601> (Frontiers)
- Mendoza-Suárez, M., Andersen, S. U., Poole, P. S., & Sánchez-Cañizares, C. (2021). Competition, nodule occupancy, and persistence of inoculant strains: Key factors in the *Rhizobium*-legume symbioses. *Frontiers in Plant Science*, 12, 690567. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.690567> (Frontiers)
- Namasivayam, S. K. R., Bharani, R. S. A., & Samrat, K. (2024). Allochthonous rhizobacterial inoculation of *Vigna radiata* promotes plant growth and anti-bacterial metabolite production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 56, 103034. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103034> (ScienceDirect)

- Pal, R., Singh, S. P., Kumar, S., Kumar, Y., Singh, A., & Kumar, S. (2024). Growth parameter of mung bean (*Vigna radiata* L.) under different integrated nutrient management practices in Western Uttar Pradesh, India. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 495–504. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i3361> (Asian Soil Science Journal)
- Sari, N., et al. (2022). Jumlah bintil fase vegetatif penentu mutu dan hasil kacang hijau (*Vigna radiata* L.) di lahan sawah bekas padi. *Agrotechnology Innovation (Agrinova)*. <https://journal.ugm.ac.id/Agrinova/article/view/77006> (Journal Universitas Gadjah Mada)
- Schaedel, M., Hidrobo, G., & Grossman, J. (2021). From microns to meters: Exploring advances in legume microbiome diversity for agroecosystem benefits. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 668195. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.668195> (Frontiers)
- Siddiqui, A., Sharma, S., Kumar, A., Sachan, R., Singh, A. K., Akhtar, Z., & Saxena, P. (2024). Assessing the effect of phosphorus, molybdenum and *Rhizobium* inoculation on growth, yield and yield attributes of mungbean (*Vigna radiata* L.) under rainfed conditions. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 425–432. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i3354> (Asian Soil Science Journal)
- Silva De Sousa, B. F. (2021). Rhizobial exopolysaccharides and type VI secretion systems: A promising way to improve nitrogen acquisition by legumes. *Frontiers in Agronomy*, 3, 661468. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.661468> (Frontiers)
- Suddala, P. K., Singh, N., Kishore, A., Parashar, A., Sharma, J. D., Reddy, K. S., & Teja, M. S. (2024). Effect of integrated nutrient management on growth and yield of green gram [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. *Journal of Food Legumes*, 37(1), 114–116. <https://doi.org/10.59797/jfl.v37.i1.185> (Indian Journals)
- Tate, R. L. (2020). Biological nitrogen fixation. In R. L. Tate (Ed.), *Soil microbiology*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119114314.ch13> (Wiley Online Library)
- Yan, J., et al. (2024). Isolation and characterization of mung bean (*Vigna radiata* L.) rhizobia in Myanmar. *Symbiosis*, 94, 51–63. <https://doi.org/10.1007/s13199-024-01013-2> (Springer)