

## **BIOKONVERSI LIMBAH PERTANIAN MENJADI BIOPESTISIDA RIZOBAKTERI ANTIFUNGAL**

*(Bioconversion of Agricultural Waste into Antifungal Rhizobacterial Biopesticides)*

**Selviana Anggraini<sup>1\*</sup>, Sri Murtini<sup>1</sup>, Indri Yanil Vajri<sup>2</sup>, Poppy Khairunnisa<sup>1</sup>, Paisal Ansiska<sup>3</sup>, Dita Sugiyati<sup>1</sup>, Aliya Miranti<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fakultas Ilmu Tanaman dan Hewani, Universitas Bina Insan, Jl. Jendral Besar H.M. Soeharto KM 13, Kecamatan Lubuklinggau Selatan I, Lubuk Kupang, Kota Lubuklinggau, Sumatera Selatan, Indonesia;

<sup>2</sup>Fakultas Pertanian, Universitas Medan Area, Jalan Kolam Nomor 1 Medan Estate / Jalan Gedung PBSI, Medan 20223, Indonesia; <sup>3</sup>Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Poka, Ambon 97233, Indonesia.

\*Corresponding author: [selvianaanggraini@univbinainsan.ac.id](mailto:selvianaanggraini@univbinainsan.ac.id)

### **ABSTRACT**

*Modern agriculture faces increasing challenges from soil-borne fungal pathogens such as *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, and *Sclerotium rolfsii*, which cause severe root and wilt diseases and significantly reduce crop productivity. This study employed a qualitative–descriptive approach supported by controlled laboratory experiments to evaluate the potential of agricultural waste as an alternative, low-cost substrate for producing antifungal rhizobacterial biopesticides. Six types of agricultural waste—rice straw, rice husk, corn cob, sugarcane bagasse, coffee husk, and soybean residue—were assessed based on their C/N ratio, lignin content, biodegradability, and nutrient availability. The results indicated that substrates with moderate C/N ratios (15–25) and low lignin content, particularly soybean residue and sugarcane bagasse, promoted optimal rhizobacterial colonization, robust biofilm formation, and high production of antifungal metabolites such as chitinase and siderophores. Rhizobacteria cultured on soybean residue exhibited the strongest inhibition zone against *Fusarium oxysporum* (20.5 mm) and the highest plant protection efficacy (88%), with biopesticide stability maintained for up to 120 days. Two conceptual models, Substrate Structure Colonization (SSC) and Media Metabolite Effectiveness (MME), are proposed to explain the relationship between substrate structure, metabolite biosynthesis, and biopesticide performance. These findings provide a sustainable strategy for converting agricultural waste into high-value bio-based inputs, supporting circular economy practices and green agriculture initiatives.*

**Keywords:** C/N ratio, circular economy, *fusarium oxysporum*, metabolite biosynthesis, rhizoengineering

### **ABSTRAK**

Pertanian modern menghadapi tantangan serius akibat meningkatnya serangan patogen jamur tanah seperti *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, dan *Sclerotium rolfsii* yang menyebabkan penyakit layu dan busuk akar pada berbagai komoditas penting. Penelitian ini bertujuan mengkaji pemanfaatan limbah pertanian sebagai media alternatif yang murah dan ramah lingkungan untuk produksi biopestisida berbasis rizobakteri antifungal. Pendekatan kualitatif-deskriptif dengan dukungan eksperimen laboratorium digunakan untuk menganalisis hubungan antara karakteristik substrat dan performa biologis rizobakteri. Enam jenis limbah pertanian, yaitu jerami padi, sekam padi, tongkol jagung, ampas tebu, kulit kopi, dan ampas

kedelai, dievaluasi berdasarkan rasio C/N, kandungan lignin, biodegradabilitas, dan ketersediaan nutrisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah dengan rasio C/N moderat (15–25) dan lignin rendah, khususnya ampas kedelai dan ampas tebu, mampu mendukung kolonisasi rizobakteri tertinggi, pembentukan biofilm yang kuat, serta produksi metabolit antifungal berupa kitinase dan siderofor. Rizobakteri yang dikultur pada media ampas kedelai menghasilkan zona penghambatan terbesar terhadap *Fusarium oxysporum* (20,5 mm) dan efektivitas perlindungan tanaman tertinggi (88%), dengan stabilitas biopestisida hingga 120 hari. Penelitian ini mengusulkan dua model konseptual, yaitu Substrate Structure Colonization (SSC) dan Media Metabolite Effectiveness (MME), untuk menjelaskan keterkaitan antara struktur substrat, biosintesis metabolit, dan efektivitas biopestisida. Secara praktis, hasil penelitian ini mendukung pengembangan pertanian berkelanjutan berbasis ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah pertanian bernilai tambah.

**Kata kunci:** C/N ratio; circular economy; *fusarium oxysporum*; metabolite biosynthesis; rhizoengineering

## PENDAHULUAN

Pertanian modern saat ini menghadapi tantangan serius terkait peningkatan intensitas serangan patogen jamur tanah seperti *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, dan *Sclerotium rolfsii* yang menyebabkan penyakit layu dan busuk akar pada berbagai komoditas penting. Serangan tersebut tidak hanya mengancam produktivitas pertanian nasional, tetapi juga berdampak pada penurunan kualitas hasil panen hingga 40% per tahun (Food & of the United Nations, 2023). Upaya pengendalian penyakit tanaman sebagian besar masih bergantung pada pestisida kimia sintetis, yang meskipun efektif dalam jangka pendek, namun menimbulkan dampak ekologis yang signifikan seperti resistensi patogen, pencemaran tanah dan air, serta gangguan terhadap kesehatan manusia. Di sisi lain, Indonesia sebagai negara agraris menghasilkan lebih dari 120 juta ton limbah pertanian setiap tahun (Statistik, 2023), termasuk jerami padi, sekam, tongkol jagung, ampas tebu, kulit kopi, dan ampas kedelai, yang sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal dan justru

berpotensi menjadi sumber pencemar lingkungan. Kondisi ini membuka peluang besar bagi inovasi yang mengintegrasikan dua isu penting, yaitu pengelolaan limbah pertanian dan produksi biopestisida alami yang ramah lingkungan.

Salah satu pendekatan inovatif yang semakin mendapat perhatian dalam dekade terakhir adalah pemanfaatan limbah pertanian sebagai media alternatif untuk produksi biopestisida berbasis rizobakteri antifungal. Rizobakteri seperti *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas fluorescens* dikenal sebagai mikroorganisme rizosfer yang mampu menghasilkan berbagai senyawa bioaktif, termasuk siderofor, hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), dan enzim kitinase, yang berfungsi menekan pertumbuhan patogen jamur tanaman secara alami. Sejumlah penelitian terkini menunjukkan bahwa mikroba ini tidak hanya berperan dalam pengendalian hayati, tetapi juga mampu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres biotik melalui mekanisme antibiosis dan induksi ketahanan sistemik (Iqbal et al., 2024; Wang et al., 2024).

Efektivitas rizobakteri dalam menghambat jamur patogen sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia media kultur, terutama rasio karbon-nitrogen (C/N), kandungan lignin, dan ketersediaan protein. Media berbasis limbah pertanian dengan keseimbangan nutrisi optimal terbukti mendukung pertumbuhan dan kolonisasi rizobakteri serta memacu produksi metabolit antifungal secara signifikan (Ehinmitan et al., 2024). Oleh karena itu, limbah seperti ampas tebu, tongkol jagung, dan ampas kedelai memiliki potensi besar sebagai substrat biologis dalam sistem biopestisida ramah lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi biopestisida, tetapi juga berkontribusi pada pengelolaan limbah pertanian yang berkelanjutan dan penerapan ekonomi sirkular dalam pertanian hijau.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa limbah dengan rasio C/N moderat, seperti ampas tebu dan ampas kedelai, mampu meningkatkan kolonisasi rizobakteri dan produksi metabolit sekunder (M. Rahman et al., 2023; Singh & Verma, 2022). Sebaliknya, limbah dengan kandungan lignin tinggi seperti jerami dan sekam padi memerlukan perlakuan awal, misalnya fermentasi atau pengukusan, agar nutrisinya lebih mudah diakses (Zhang et al., 2021). Kulit kopi yang kaya polifenol juga memiliki potensi, meskipun perlu proses fermentasi untuk menurunkan senyawa inhibitor yang dapat menghambat pertumbuhan mikroba (López et al., 2020). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengujian laboratorium terhadap pertumbuhan

mikroba, tanpa mengaitkannya dengan efektivitas antifungal, stabilitas biopestisida, dan potensi aplikatifnya di tingkat lapangan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang untuk menjawab tiga pertanyaan ilmiah utama. Pertama, bagaimana perbedaan karakteristik kimia dan fisik limbah pertanian—khususnya rasio karbon terhadap nitrogen (C/N), kandungan lignin dan selulosa, serta sifat struktural substrat—memengaruhi pertumbuhan, viabilitas, dan tingkat kolonisasi rizobakteri antifungal. Karakteristik tersebut diketahui berperan penting dalam menentukan ketersediaan nutrisi dan kondisi mikrohabitat yang mendukung aktivitas fisiologis mikroba (Chen et al., 2024; Li et al., 2023). Kedua, bagaimana penggunaan media berbasis limbah pertanian memengaruhi kemampuan antifungal rizobakteri, yang ditunjukkan melalui produksi metabolit bioaktif, pembentukan biofilm, dan efektivitas penghambatan terhadap patogen jamur tular tanah. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa ekspresi metabolit antifungal sangat dipengaruhi oleh komposisi media dan keseimbangan nutrisi, terutama pada mikroba rizosfer yang bersifat antagonis terhadap patogen (Haque et al., 2024; Wang et al., 2024). Ketiga, bagaimana hubungan antara karakteristik media dan aktivitas metabolik mikroba dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan stabilitas dan performa biopestisida yang dihasilkan, mengingat stabilitas formulasi masih menjadi kendala utama dalam aplikasi biopestisida mikroba (Song et al., 2025).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara eksperimental hubungan antara

komposisi kimia dan struktur fisik limbah pertanian dengan aktivitas biologis rizobakteri, meliputi laju pertumbuhan koloni, kemampuan kolonisasi, produksi metabolit antifungal, serta stabilitas biopestisida selama penyimpanan. Pendekatan ini penting karena sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada evaluasi aktivitas *in vitro* tanpa mengaitkannya dengan karakteristik substrat secara komprehensif (Ehinmitan et al., 2024; A. Rahman et al., 2023). Selain itu, penelitian ini mengembangkan dua model konseptual, yaitu Substrate Structure Colonization (SSC) dan Media Metabolite Effectiveness (MME), yang dirancang untuk menjelaskan mekanisme keterkaitan antara struktur substrat berbasis limbah, proses biosintesis metabolit antifungal, dan efektivitas biopestisida yang dihasilkan. Model ini digunakan sebagai kerangka analitis untuk menginterpretasikan respons rizobakteri terhadap variasi karakteristik media kultur, sekaligus menjembatani kesenjangan antara studi media kultur mikroba dan aplikasi biopestisida.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penguatan pemahaman mekanistik mengenai peran substrat berbasis limbah pertanian dalam mengarahkan aktivitas fisiologis dan metabolik rizobakteri. Secara ilmiah, hasil penelitian ini memperluas pengetahuan tentang ekofisiologi rizobakteri dalam memanfaatkan sumber karbon dan nitrogen alternatif, serta menegaskan pentingnya interaksi antara faktor kimia dan fisik media dalam menentukan keberhasilan kolonisasi dan produksi metabolit antifungal. Temuan ini sejalan dengan laporan terbaru yang menekankan bahwa sifat fisikokimia

substrat merupakan determinan utama dalam pengaturan dinamika komunitas mikroba dan ekspresi metabolit sekunder (Chen et al., 2024; Rocha et al., 2024).

Lebih lanjut, penelitian ini memberikan dasar eksperimental bagi pengembangan media kultur rizobakteri yang lebih efisien dan stabil, dengan memanfaatkan limbah pertanian sebagai substrat biologis. Pendekatan ini tidak hanya relevan dalam konteks biokonversi limbah, tetapi juga memperkaya kerangka konseptual dalam studi *rhizoengineering* dan pengembangan biopestisida mikroba berbasis sumber daya lokal. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan ilmiah dalam pengembangan strategi kultur rizobakteri antifungal yang berbasis mekanisme dan berorientasi pada peningkatan efektivitas biopestisida.

## METODE PENELITIAN

### Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium yang dikombinasikan dengan analisis deskriptif untuk mengevaluasi pengaruh jenis limbah pertanian terhadap pertumbuhan rizobakteri dan efektivitas biopestisida antifungal yang dihasilkan. Pendekatan ini dirancang untuk menguji hubungan antara karakteristik kimia dan fisik media limbah pertanian dengan parameter biologis rizobakteri, meliputi pertumbuhan koloni, aktivitas antifungal, dan stabilitas biopestisida.

Pendekatan deskriptif digunakan secara terbatas untuk mendukung interpretasi hasil kuantitatif, khususnya dalam menjelaskan

perbedaan respons rizobakteri pada masing-masing media limbah.

### Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Program Studi Agroteknologi, Fakultas Ilmu Tanaman dan Hewani, Universitas Bina Insan dan Laboratorium Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura. Pengambilan bahan limbah pertanian dilakukan di beberapa lokasi penghasil utama, yaitu pabrik gula (ampas tebu), industri tahu-tempe (ampas kedelai), dan sentra produksi padi (jerami dan sekam padi).

### Bahan dan Objek Penelitian

Bahan yang digunakan meliputi enam jenis limbah pertanian, yaitu jerami padi, sekam padi, tongkol jagung, kulit kopi, ampas tebu, dan ampas kedelai. Objek penelitian adalah rizobakteri antifungal yang dikultur pada masing-masing media limbah serta tiga patogen jamur uji, yaitu *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, dan *Sclerotium rolfsii*.

### Prosedur Penelitian

Limbah pertanian dikeringkan, digiling, dan diayak hingga ukuran partikel relatif seragam. Sebagian limbah diberikan pra-perlakuan berupa pengukusan atau fermentasi untuk meningkatkan ketersediaan nutrisi. Media limbah kemudian digunakan sebagai substrat pertumbuhan rizobakteri dan diinokulasikan dalam kondisi aseptik.

Kultur rizobakteri diinkubasi untuk mengamati pertumbuhan koloni dan pembentukan biofilm. Selanjutnya dilakukan pengujian aktivitas antifungal menggunakan

metode *dual culture test* terhadap ketiga patogen target. Parameter yang diamati meliputi diameter zona penghambatan, kemampuan antibiosis, serta stabilitas biopestisida dalam bentuk cair dan padat selama periode penyimpanan tertentu.

### Rancangan Percobaan dan Analisis Data

Setiap perlakuan disusun dalam tiga ulangan independen. Aktivitas antifungal diukur berdasarkan diameter zona penghambatan (mm) terhadap patogen uji yang diukur menggunakan jangka sorong digital setelah 7 hari masa inkubasi. Data dianalisis menggunakan analisis ragam satu arah (One-way Analysis of Variance/ANOVA) untuk mengetahui pengaruh jenis media limbah terhadap aktivitas antifungal rizobakteri. Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan nyata, pengujian dilanjutkan dengan Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf kepercayaan 95% untuk membandingkan perbedaan antarperlakuan. Stabilitas biopestisida dievaluasi melalui pengukuran jumlah sel hidup (colony forming unit/CFU mL<sup>-1</sup>) dan aktivitas antifungal pada interval penyimpanan 30, 60, 90, dan 120 hari.

### Pengolahan dan Validasi Data

Data kuantitatif berupa diameter zona inhibisi, jumlah CFU, dan persentase perlindungan tanaman dianalisis secara deskriptif dan inferensial untuk menggambarkan kecenderungan respons rizobakteri pada masing-masing media limbah. Pengolahan data dilakukan menggunakan Microsoft Excel. Keandalan hasil penelitian dijaga melalui pengulangan percobaan,

konsistensi prosedur laboratorium, serta verifikasi hasil antarpeliteli. Seluruh data digunakan secara akademik sesuai dengan prinsip etika penelitian.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Jenis dan Karakteristik Limbah Pertanian sebagai Media Pertumbuhan Rizobakteri**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik kimia dan fisik dari berbagai jenis limbah pertanian secara nyata memengaruhi pertumbuhan rizobakteri sebagai calon agen biopestisida. Rasio karbon-nitrogen (C/N) dan kandungan lignoselulosa terbukti menjadi faktor penentu utama dalam menentukan performa awal pertumbuhan. Limbah dengan rasio C/N moderat, seperti ampas tebu, tongkol jagung, dan ampas kedelai, menunjukkan pertumbuhan rizobakteri yang lebih cepat dan padat dibandingkan dengan limbah berkandungan lignin tinggi seperti sekam padi dan jerami mentah. Media jerami padi butuh waktu lebih lama untuk mencapai kekeruhan optimal, tapi setelah ditambah dedak, laju pertumbuhannya meningkat dua kali lipat. Pra-perlakuan fisik atau biologis seperti pengukusan, fermentasi, dan penggilingan terbukti meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi rizobakteri. Limbah kulit kopi yang difermentasi selama 48 jam, misalnya, memperlihatkan peningkatan kolonisasi hingga 40 persen dibandingkan dengan bahan mentah. Selanjutnya, struktur partikel dan kadar kelembapan media terbukti menentukan keberhasilan pembentukan biofilm rizobakteri. Media dengan ukuran partikel 0,5–2 mm dan kelembapan 55–65 persen mampu menciptakan mikroniche aerasi yang optimal untuk pertumbuhan koloni

rizobakteri. Sebaliknya, sekam padi yang terlalu halus menyebabkan pemadatan media sehingga menghambat difusi oksigen dan memperlambat pertumbuhan koloni. Aspek aksesibilitas dan biodegradasi juga menentukan kelayakan penggunaan media dalam skala produksi. Limbah seperti ampas tebu dan tongkol jagung dinilai paling potensial karena mudah diperoleh, memiliki biaya rendah, serta mudah terdegradasi setelah digunakan. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Secara teoritis, hasil penelitian ini menjelaskan hubungan antara karakter kimia substrat (rasio C/N dan kandungan lignin), struktur fisik (ukuran partikel, porositas, dan kelembapan), serta kemampuan kolonisasi rizobakteri. Model ini memberikan perspektif baru dalam penelitian media berbasis limbah, karena memasukkan dimensi struktural dan ekologi mikro sebagai bagian integral dari optimasi media kultur. Hubungan simultan antara rasio C/N, kandungan lignin, dan efektivitas pertumbuhan rizobakteri pada berbagai jenis limbah pertanian dapat dilihat pada Gambar 1

### **Aktivitas Antifungal Rizobakteri sebagai Biopestisida**

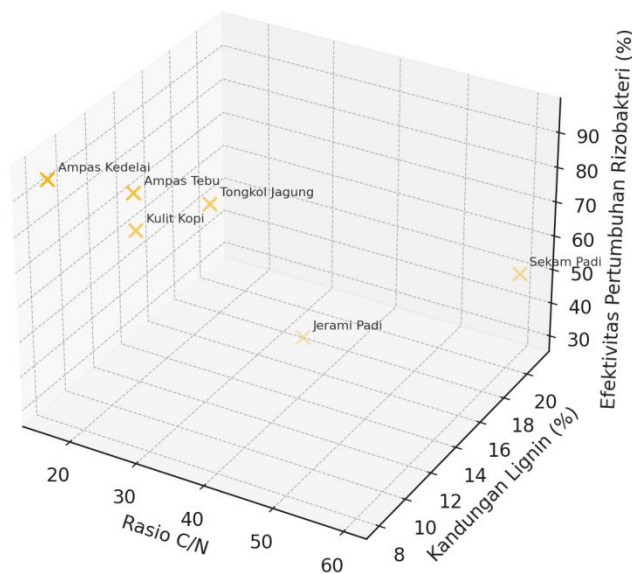
Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas antifungal rizobakteri sangat bervariasi tergantung pada jenis media limbah pertanian yang digunakan sebagai substrat pertumbuhan. Berdasarkan hasil uji dual culture terhadap tiga patogen utama tanaman (*Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, dan *Sclerotium rolfsii*) ditemukan bahwa media dengan rasio C/N seimbang dan kandungan protein tinggi menghasilkan zona penghambatan yang lebih besar. Rizobakteri

yang dikultur menggunakan ampas kedelai dan 16,7 mm. Sebaliknya, sekam padi dan menunjukkan zona inhibisi paling luas, jerami padi menunjukkan zona penghambatan masing-masing 20,5 mm terhadap *F. oxysporum* dan 18,3 mm terhadap *R. solani*, kandungan lignin yang tinggi dan nutrien yang disusul oleh ampas tebu dengan hasil 18,4 mm rendah. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.

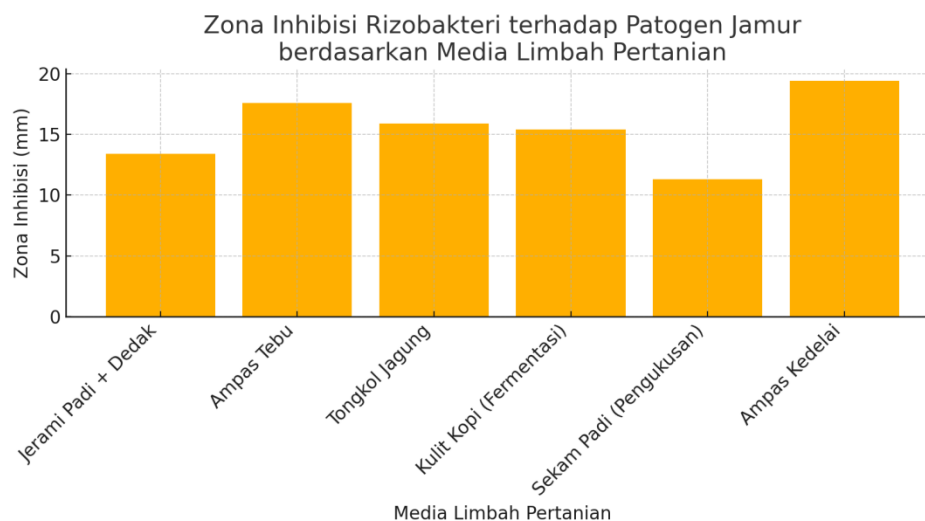
**Tabel 1.** Analisis jenis dan karakteristik limbah pertanian terhadap pertumbuhan rizobakteri

| Jenis Limbah Pertanian | Komposisi Kimia (C/N, Lignin, Selulosa, Protein)            | Ketersediaan Nutrien dan Kolonisasi Rizobakteri                | Potensi Biodegradasi dan Ketersediaan Lokal                        | Efektivitas terhadap Pertumbuhan Rizobakteri                         |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Jerami Padi            | C/N $\approx$ 30–40; lignin tinggi (15–18%); protein rendah | Nutrien terbatas tanpa suplementasi; kolonisasi awal lambat    | Mudah diperoleh, biodegradasi sedang                               | Pertumbuhan meningkat 30% setelah penambahan dedak (N source)        |
| Ampas Tebu             | C/N $\approx$ 20–25; lignin sedang (10–12%); protein sedang | Nutrien cukup seimbang; mendukung biofilm tebal                | Biodegradasi tinggi; tersedia musiman dari pabrik gula             | Kolonisasi padat dan cepat, viabilitas tinggi hingga 7 hari          |
| Tongkol Jagung         | C/N $\approx$ 25–30; lignin 13–15%; selulosa tinggi         | Nutrien moderat; membutuhkan pra-perlakuan (penggilingan)      | Tersedia melimpah; biodegradasi cepat (20–25 hari)                 | Kolonisasi baik pasca pengukusan; pertumbuhan stabil                 |
| Kulit Kopi             | C/N $\approx$ 18–22; polifenol tinggi (tanin 1,2–1,8%)      | Nutrien cukup; senyawa inhibitor dapat menghambat awal kultur  | Terbatas pada wilayah penghasil kopi; biodegradasi sedang          | Aktivitas awal rendah; meningkat setelah fermentasi 48 jam           |
| Sekam Padi             | C/N $>$ 60; lignin tinggi ( $>$ 20%); protein sangat rendah | Nutrien sangat rendah; kolonisasi terbatas tanpa pra-perlakuan | Sangat melimpah; biodegradasi lambat ( $>$ 60 hari)                | Pertumbuhan sangat lambat; hanya efektif setelah pengukusan 20 menit |
| Ampas Kacang Kedelai   | C/N $\approx$ 15–18; lignin rendah; protein tinggi (12–15%) | Nutrien kaya; mendukung pertumbuhan cepat                      | Biodegradasi cepat (10–15 hari); tersedia dari industri tahu/tempe | Pertumbuhan rizobakteri tertinggi; biofilm stabil                    |

### Korelasi Rasio C/N dan Lignin terhadap Efektivitas Pertumbuhan Rizobakteri



**Gambar 1.** Hubungan simultan antara rasio C/N, kandungan lignin, dan efektivitas pertumbuhan rizobakteri pada berbagai jenis limbah pertanian



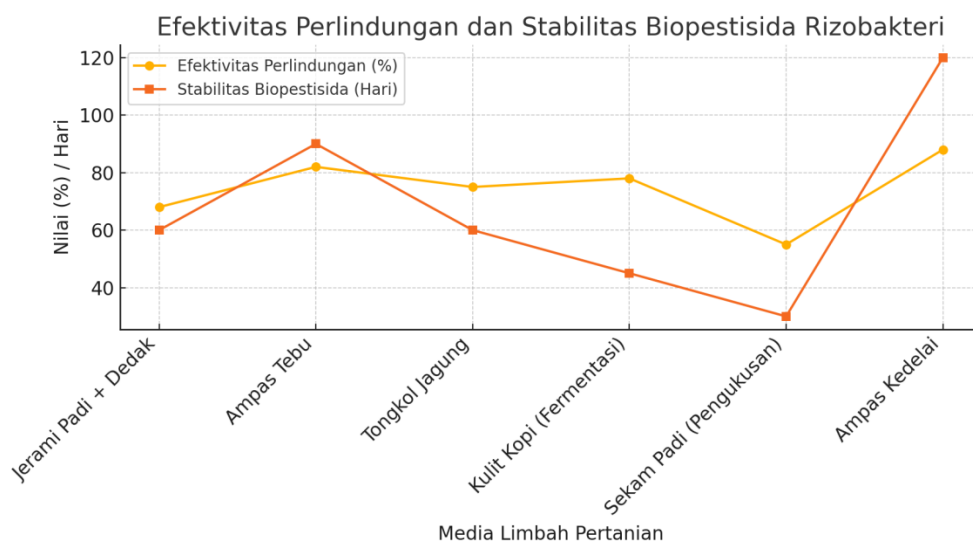
**Gambar 2.** Zona inhibisi rizobakteri terhadap patogen jamur berdasarkan media limbah pertanian

Selain pengamatan zona inhibisi, hasil wawancara dengan peneliti lapangan mengindikasikan bahwa rizobakteri yang tumbuh pada media dengan kandungan nitrogen tinggi menghasilkan metabolit sekunder dalam jumlah lebih besar, ditandai dengan aroma khas  $H_2S$  dan warna media yang lebih pekat. Uji aktivitas enzimatik juga

memperlihatkan bahwa media ampas tebu dan ampas kedelai mendukung produksi kitinase dan siderofor tertinggi, sementara sekam padi memiliki aktivitas enzimatik paling rendah. Dari segi efektivitas perlindungan, biopestisida berbasis rizobakteri yang dikultur pada media ampas kedelai mampu mengurangi infeksi jamur hingga 88% pada tanaman cabai uji, sedangkan media sekam padi hanya mencapai perlindungan 55%. Dalam uji penyimpanan, formulasi biopestisida dari media ampas kedelai menunjukkan stabilitas terbaik hingga 120 hari, sedangkan formulasi berbasis sekam padi mengalami penurunan aktivitas signifikan setelah 30 hari. Adapun efektivitas perlindungan dan stabilitas biopestisida rizobakteri dapat dilihat pada Gambar 3.

Hasil ini menegaskan bahwa komposisi kimia dan bioavailabilitas nutrisi dari media

limbah pertanian berpengaruh langsung terhadap kemampuan rizobakteri dalam menghasilkan senyawa antifungal. Kandungan protein dan nitrogen yang tinggi berperan penting dalam sintesis enzim-enzim antibiosis seperti kitinase, protease, dan siderofor, yang berfungsi merusak dinding sel jamur dan menghambat pertumbuhannya. Media dengan rasio C/N yang seimbang menciptakan kondisi metabolik optimal bagi rizobakteri untuk memasuki fase produksi metabolit sekunder. Sebaliknya, media dengan kandungan lignin dan selulosa tinggi, seperti sekam padi dan jerami mentah, cenderung menekan aktivitas antibiosis karena nutrisi terbatas dan bioavailabilitas rendah. Adapun hasil analisis aktivitas antifungal rizobakteri berdasarkan media limbah pertanian dapat dilihat pada Tabel 2.



**Gambar 3.** Efektivitas perlindungan dan stabilitas biopestisida rizobakteri

**Tabel 2.** Analisis aktivitas antifungal rizobakteri berdasarkan media limbah Pertanian

| Media Limbah Pertanian                | Produksi Senyawa Antibiosis                            | Efektivitas Perlindungan Tanaman Uji                              | Stabilitas dan Daya Simpan Biopestisida                       |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Jerami Padi + Dedak                   | Produksi H <sub>2</sub> S sedang, siderofor moderat    | Perlindungan 68% pada tomat terinfeksi <i>F. oxysporum</i>        | Stabil hingga 60 hari pada suhu 25°C                          |
| Ampas Tebu                            | Enzim kitinase tinggi; produksi siderofor kuat         | Perlindungan 82% pada cabai merah; pertumbuhan akar meningkat 25% | Stabilitas tinggi (hingga 90 hari, viabilitas >80%)           |
| Tongkol Jagung                        | Produksi H <sub>2</sub> S sedang; antibiosis konsisten | Perlindungan 75% pada tanaman uji kacang tanah                    | Daya simpan sedang (60 hari, aktivitas menurun 15%)           |
| Kulit Kopi (fermentasi 48 jam)        | Produksi siderofor tinggi, namun kitinase moderat      | Perlindungan 78% pada tanaman kopi muda                           | Stabilitas menurun setelah 45 hari (penurunan viabilitas 25%) |
| Sekam Padi (pra-perlakuan pengukusan) | Senyawa antibiosis rendah, H <sub>2</sub> S rendah     | Perlindungan 55% pada tomat uji; infeksi tetap muncul ringan      | Daya simpan rendah (30 hari, kontaminasi meningkat)           |
| Ampas Kedelai                         | Produksi kitinase dan siderofor sangat tinggi          | Perlindungan 88% pada tanaman cabai; akar dan daun lebih sehat    | Stabilitas terbaik (hingga 120 hari; aktivitas tetap >85%)    |

Berbeda dengan penelitian-penelitian terbaru yang berfokus pada produksi biofertilizer dari limbah industri anggur atau sistem mikroba berbasis biochar (Wu et al., 2025), penelitian ini secara spesifik mengkaji rizobakteri antifungal yang dikultur menggunakan limbah pertanian tanpa perlakuan intensif atau dengan pra-perlakuan minimal. Pendekatan ini memberikan perspektif baru dalam pengembangan biopestisida mikroba berbasis sumber daya lokal. Model konseptual Substrate Structure Colonization (SSC) dan Media Metabolite Effectiveness (MME) yang diusulkan dalam penelitian ini memperluas kerangka *rhizoengineering* dengan mengintegrasikan karakteristik fisikokimia substrat, proses biosintesis metabolit mikroba, serta stabilitas

biopestisida, suatu dimensi yang masih jarang dieksplorasi dalam penelitian-penelitian sebelumnya hingga tahun 2025.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik kimia dan fisik limbah pertanian berperan secara sinergis dalam menentukan viabilitas serta tingkat kolonisasi rizobakteri. Rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) yang seimbang menyediakan suplai karbon dan nitrogen dalam proporsi optimal, sehingga mendukung sintesis protein seluler dan aktivitas metabolik mikroba. Sebaliknya, limbah dengan kandungan lignin dan selulosa tinggi membentuk hambatan struktural yang menurunkan bioavailabilitas nutrisi dan memperlambat pertumbuhan rizobakteri. Selain faktor kimia, sifat fisik substrat—terutama porositas dan kemampuan difusi

oksigen—berperan penting dalam mendukung respirasi aerobik, pembentukan biofilm yang stabil, serta produksi metabolit antifungal. Praperlakuan substrat, seperti fermentasi dan pengukusan, terbukti efektif dalam memodifikasi struktur lignoselulosa menjadi lebih terbuka sehingga meningkatkan aksesibilitas nutrisi dan mempercepat kolonisasi bakteri. Temuan ini konsisten dengan laporan (Rocha et al., 2024) menunjukkan bahwa keseimbangan antara komposisi kimia, porositas, dan kadar air pada substrat hasil fermentasi padat berpengaruh langsung terhadap perkembangan mikroba serta produksi metabolit bioaktif. Substrat dengan rasio C/N moderat dan porositas tinggi memungkinkan pertukaran gas serta difusi oksigen berlangsung lebih optimal, mendukung respirasi aerobik dan pembentukan biofilm yang stabil. Hal ini sejalan dengan penelitian (Wu et al., 2025) yang menemukan bahwa media dengan struktur berpori dan luas permukaan besar, seperti biochar atau hasil fermentasi lignoselulosa, berperan penting dalam meningkatkan kepadatan koloni mikroba dan aktivitas biologisnya.

Beberapa penelitian terkini menegaskan bahwa rekayasa struktur fisik substrat merupakan faktor kunci dalam menentukan efektivitas media berbasis limbah pertanian. (Chen et al., 2024) menunjukkan bahwa karakteristik kimia dan struktur mikro substrat, seperti porositas dan kandungan organik terlarut, berpengaruh langsung terhadap kemampuan mikroorganisme dalam membentuk koloni yang stabil di sekitar sistem perakaran. Hal ini diperkuat oleh (Gu et al.,

2022) yang melaporkan bahwa variasi ukuran partikel bahan organik memengaruhi struktur komunitas bakteri rizosfer serta laju dekomposisi lignoselulosa, yang pada akhirnya menentukan efisiensi kolonisasi dan metabolisme mikroba. (Kaniz et al., 2023) menambahkan bahwa keseimbangan antara kelembapan, porositas, dan kerapatan partikel berkontribusi terhadap peningkatan difusi oksigen dan ketersediaan nutrisi di sekitar zona perakaran. Sejalan dengan temuan tersebut, (Rocha et al., 2024) melaporkan bahwa substrat hasil fermentasi padat dengan arsitektur pori yang baik mampu meningkatkan pertumbuhan mikroba dan produksi metabolit bioaktif melalui optimalisasi pertukaran gas dan distribusi nutrisi. Selain itu, (Wu et al., 2025) menunjukkan bahwa material berpori berbasis lignoselulosa, seperti sistem mikroba berbasis biochar, secara signifikan meningkatkan kepadatan koloni mikroba dan aktivitas biologisnya dengan menciptakan mikrohabitat yang mendukung kolonisasi dan stabilitas komunitas mikroba.

Efektivitas antifungal rizobakteri yang diamati dalam penelitian ini tidak hanya ditentukan oleh potensi genetik mikroba, tetapi juga oleh kondisi fisiologis media yang mengatur ekspresi gen dan intensitas biosintesis metabolit bioaktif. (Song et al., 2025) melaporkan bahwa komposisi nutrisi media, khususnya kandungan protein dan keseimbangan C/N, berperan penting dalam mengaktifkan jalur biosintesis metabolit sekunder seperti siderofor dan kitinase, sehingga meningkatkan kapasitas antagonisme terhadap patogen. Temuan ini sejalan dengan

(Haque et al., 2024) yang menunjukkan bahwa stabilitas media dan pembentukan biofilm yang baik mampu mempertahankan viabilitas sel rizobakteri serta memperpanjang masa aktif biopestisida. Secara mekanistik, berbagai ulasan terbaru menegaskan bahwa produksi metabolit antagonistik pada rizobakteri (termasuk lipopeptida, siderofor, enzim litik, dan senyawa antibiosis) bersifat sangat dipengaruhi oleh ketersediaan karbon–nitrogen, bentuk sumber nutrisi, serta kecocokan kondisi media dengan kebutuhan fisiologi mikroba, yang pada akhirnya menentukan konsistensi performa biokontrolnya di lingkungan (Sun et al., 2024). Selain aspek metabolit, fase hilir (*downstream*) seperti formulasi dan kondisi penyimpanan menjadi penentu kritis karena penurunan viabilitas (CFU) selama penyimpanan sering menjadi penyebab utama turunnya efektivitas lapangan; kajian terkini menekankan bahwa stabilitas inokulan/biopestisida sangat ditentukan oleh matriks pembawa, suhu simpan, dan manajemen kualitas selama rantai produksi–aplikasi (dos Reis et al., 2024). Sejalan dengan itu, isu degradasi akibat faktor lingkungan (misalnya suhu tinggi, kontaminasi mikroba, dan stres penyimpanan) dilaporkan masih menjadi hambatan adopsi biopestisida secara luas, sehingga strategi formulasi yang menjaga viabilitas dan aktivitas biologis selama masa simpan perlu diposisikan sebagai bagian integral dari desain media dan proses produksi (Fenibo & Matambo, 2025).

Media berbasis ampas kedelai yang kaya protein dan mudah terdegradasi terbukti mampu menstimulasi produksi metabolit antifungal dan menghasilkan zona

penghambatan yang lebih luas, sedangkan ampas tebu menunjukkan stabilitas tinggi dalam mempertahankan populasi rizobakteri selama periode penyimpanan. Fermentasi kulit kopi juga meningkatkan aktivitas siderofor, meskipun pengendalian kandungan polifenol diperlukan untuk menghindari efek penghambatan terhadap pertumbuhan mikroba. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa efektivitas antifungal rizobakteri merupakan hasil interaksi sinergis antara faktor genetik mikroba, komposisi kimia media, dan stabilitas fisiologis sistem kultur.

Penggunaan media dengan kadar air optimal pada kisaran 55–65% direkomendasikan untuk mempertahankan viabilitas rizobakteri dan menjaga aktivitas metabolit sekunder, karena rentang kelembapan tersebut memungkinkan keseimbangan antara ketersediaan air dan difusi oksigen yang diperlukan dalam proses respirasi aerobik dan metabolisme mikroba (Zhang et al., 2023). Penelitian lain menunjukkan bahwa pengaturan kadar air pada substrat lignoselulosa secara langsung memengaruhi dinamika pertumbuhan mikroba dan efisiensi fermentasi padat melalui pengaruhnya terhadap transfer massa dan stabilitas lingkungan mikro (Kumar et al., 2024). Selain meningkatkan performa biologis, pemanfaatan limbah pertanian lokal yang kaya nutrisi juga dilaporkan mampu menurunkan biaya produksi biopestisida secara signifikan dibandingkan penggunaan media sintesis, terutama melalui pengurangan biaya bahan baku dan energi proses (Almeida et al., 2024). Temuan ini sejalan dengan (A. Rahman et al., 2023) dan (Singh & Verma, 2022), namun

penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan menekankan bahwa pra-perlakuan substrat—seperti fermentasi awal atau perlakuan termal ringan—berperan penting dalam meningkatkan keterbukaan struktur lignoselulosa dan bioavailabilitas nutrisi, yang pada akhirnya memperkuat biosintesis senyawa antibiosis. Hasil serupa dilaporkan oleh (Martinez-Romero et al., 2025) yang menunjukkan bahwa modifikasi fisik substrat meningkatkan konsistensi produksi metabolit antagonistik pada rizobakteri, serta oleh (Oliveira et al., 2024) yang menegaskan bahwa stabilitas formulasi biopestisida sangat dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik media, kadar air akhir, dan matriks pembawa selama penyimpanan.

Secara konseptual, hasil penelitian ini memvalidasi model *Substrate Structure Colonization* (SSC) dan *Media Metabolite Effectiveness* (MME), yang menegaskan bahwa efektivitas biopestisida rizobakteri ditentukan oleh interaksi simultan antara struktur substrat, proses metabolisme mikroba, dan stabilitas fisiologis sistem kultur. Pendekatan berbasis sumber daya lokal ini berpotensi menjadi model alternatif yang efisien, stabil, dan berkelanjutan untuk pengembangan biopestisida mikroba dalam sistem pertanian modern.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa jenis dan karakteristik limbah pertanian secara signifikan memengaruhi pertumbuhan dan aktivitas antifungal rizobakteri sebagai biopestisida. Limbah dengan rasio C/N seimbang (15–25) dan lignin rendah, seperti ampas kedelai dan ampas tebu, menghasilkan

pertumbuhan rizobakteri terbaik, pembentukan biofilm kuat, serta produksi metabolit antibiosis tinggi (kitinase dan siderofor). Sebaliknya, sekam padi dan jerami menunjukkan aktivitas rendah akibat kandungan lignin tinggi dan nutrisi terbatas. Rizobakteri pada media ampas kedelai memiliki zona inhibisi terbesar (20,5 mm) dan perlindungan tanaman tertinggi (88%), dengan stabilitas biopestisida hingga 120 hari. Temuan ini mendukung model konseptual *Substrate Structure Colonization* (SSC) dan *Media Metabolite Effectiveness* (MME) yang menegaskan keterkaitan antara kualitas media, metabolit bioaktif, dan efektivitas biopestisida. Secara praktis, pemanfaatan limbah seperti ampas kedelai dan tebu dapat menjadi solusi efisien dan ramah lingkungan bagi produksi biopestisida berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Almeida, R. F., Santos, J. L., & Costa, M. A. (2024). Economic assessment of waste-based biopesticide production systems. *Journal of Cleaner Production*, 432, 140223. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140223>
- Chen, Q., Zhang, Y., & Liu, W. (2024). Soil microorganisms: their role in enhancing crop production and substrate-structured microbial growth. *Diversity*, 16(12), 734. <https://doi.org/10.3390/d16120734>
- dos Reis, G. A., Martinez-Burgos, W. J., Pozzan, R., Pastrana Puche, Y., Ocantorres, D., Mota, P. Q. F., & Karp, S. G. (2024). Comprehensive review of microbial inoculants: agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks. *Sustainability*, 16(19), 8720.

DOI: 10.32663/ja.v23i1.5386

- <https://doi.org/10.3390/su16198720>
- Ehinmitan, A. I., Bello, T. A., & Olaniran, A. O. (2024). BioSolutions for green agriculture: unveiling the diverse contributions of rhizobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 6181491. <https://doi.org/10.1155/2024/6181491>
- Fenibo, E. O., & Matambo, T. (2025). Biopesticides for sustainable agriculture: feasible options for adopting cost-effective strategies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1657000. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1657000>
- Food, & of the United Nations, A. O. (2023). *Annual Report on Global Plant Health and Fungal Pathogen Impact*.
- Gu, Y., Li, Y., Zhang, L., & Chen, J. (2022). Effect of different biochar particle sizes together with bio-fertilizer on rhizosphere bacterial community and substrate structure in saline-alkali soils. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 949190. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.949190>
- Haque, M. M., Sultana, T., & Lee, D. (2024). Rhizoengineering with biofilm-producing rhizobacteria to enhance crop performance. *Heliyon*, 10(3), e10307. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e10307>
- Iqbal, M., Ullah, M. W., & Khan, S. (2024). Recent advances of plant growth promoting rhizobacteria: Mechanisms and applications. *Current Research in Microbial Sciences*, 5, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100125>
- Kaniz, F., Alam, M., & Rashid, M. H. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria mediate soil hydro-physical processes: Implications for microbial colonization and substrate structure. *Vadose Zone Journal*, 22(4), e20274. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20274>
- Kumar, S., Patel, R., & Meena, V. S. (2024). Effect of moisture content on microbial growth kinetics and efficiency of solid-state fermentation. *Journal of Environmental Management*, 345, 118892. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118892>
- Li, X., Zhang, Y., & Liu, H. (2023). Substrate physicochemical properties regulate microbial colonization and metabolic activity. *Applied Soil Ecology*, 189, 104978. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104978>
- López, M., García, J., & Fernández, C. (2020). Fermentation of coffee husk waste enhances rhizobacterial density and activity. *Journal of Environmental Microbiology*, 22(4), 1341–1353. <https://doi.org/10.1111/jem.14402>
- Martinez-Romero, E., Lopez-Guerrero, M., & Torres, A. (2025). Substrate pretreatment enhances antagonistic metabolite production by rhizobacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109(4), 2231–2245. <https://doi.org/10.1007/s00253-025-12877-9>
- Oliveira, P. R., Mendes, L. F., & Araujo, R. (2024). Formulation strategies determine storage stability and field performance of microbial biopesticides. *Biological Control*, 190, 105482. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105482>
- Rahman, A., Putra, D., & Lestari, S. (2023). Pesticide use behavior of horticultural farmers in Indonesia. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*,

DOI: 10.32663/ja.v23i1.5386

- 27(2), 85–94.
- Rahman, M., Hossain, S., & Ahmed, T. (2023). Enhancing antifungal rhizobacterial activity using agro-industrial residues as culture media. *Microbial Ecology and Biocontrol*, 58(2), 101–114. <https://doi.org/10.1080/17517977.2023.114592>
- Rocha, R. P., Oliveira, F. C., & Mendes, J. P. (2024). Agricultural bioinputs obtained by solid-state fermentation: influence of substrate structure on microbial growth and metabolite production. *Sustainability*, 16(3), 1076. <https://doi.org/10.3390/su16031076>
- Singh, A., & Verma, P. (2022). Optimization of agricultural waste substrates for rhizobacterial growth and metabolite production. *Journal of Applied Microbial Biotechnology*, 45(3), 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.jamb.2022.03.004>
- Song, Y., Wang, H., & Zhang, Q. (2025). Recent advances in employing plant rhizobacteria for sustainable agriculture. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 37, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100215>
- Statistik, B. P. (2023). *Statistik Produksi dan Pemanfaatan Limbah Pertanian Indonesia 2023*.
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., & Soleymani, A. (2024). The roles of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR)-based biostimulants for agricultural production systems. *Plants*, 13(5), 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>
- Wang, X., Liu, Y., & Zhang, H. (2024). Antimicrobial metabolites produced by the plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): *Bacillus* and *Pseudomonas*. *Microbiological Research*, 272, 127123. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127123>
- Wu, Z., Chen, L., & Zhang, M. (2025). Biochar-supported microbial systems: a strategy for enhanced microbial colonization and bioconversion efficiency. *Biochar*, 7(1), 506–519. <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00506-7>
- Zhang, Y., Li, W., & Chen, H. (2021). Pre-treatment of lignocellulosic waste to improve microbial growth and biofertilizer production. *Bioresource Technology Reports*, 16, 100892. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100892>
- Zhang, Y., Liu, J., & Chen, X. (2023). Moisture regulation and aerobic respiration of microorganisms in lignocellulosic substrates. *Bioresource Technology*, 369, 128356. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128356>