

## Streptomyces spp. as a Biological Control Agent for *Xanthomonas oryzae*: A Strategy to Improve National Food Security; Review Article

Bahtiar Rahmadani<sup>1\*</sup>, Nabila Revicha S.<sup>1</sup>, Zidan Zifa D.<sup>1</sup>, Abraham Febiano K.<sup>1</sup>, Loekas Soesanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Progam Studi Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Jendral Soedirman, Purwokerto, Indonesia;

### Article History

Received : April 16<sup>th</sup>, 2026

Revised : April 30<sup>th</sup>, 2026

Accepted : May 04<sup>th</sup>, 2026

\*Corresponding Author:

**Bahtiar Rahmadani**, Progam Studi Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Jendral Soedirman, Purwokerto, Indonesia;  
Email:

[rahmadanibahtiar2@gmail.com](mailto:rahmadanibahtiar2@gmail.com)

**Abstract:** National food security faces serious challenges due to bacterial leaf blight in rice caused by *Xanthomonas oryzae*. This article aims to analyze the potential of *Streptomyces* spp. as biological control agents to suppress the development of this pathogen through a literature study approach. The method employed was a systematic review of national and international scientific journals discussing antagonistic mechanisms, secondary metabolite production, and the role of rhizobacteria in enhancing rice plant resistance. The findings indicate that *Streptomyces* spp. inhibit the growth of *Xanthomonas oryzae* by producing antibiotics, lytic enzymes, and inducing systemic resistance in rice plants. Furthermore, their application may reduce dependence on chemical pesticides, making them more environmentally friendly. Therefore, the utilization of *Streptomyces* spp. represents a promising biological strategy to improve rice productivity and strengthen national food security.

**Keywords:** Bacterial Leaf Blight, *Streptomyces* spp., *Xanthomonas oryzae*.

### Pendahuluan

Ketahanan pangan merupakan kondisi terpenuhinya kebutuhan pangan bagi seluruh individu secara cukup, aman, dan bergizi guna menunjang kehidupan yang aktif dan sehat (Hadi *et al.*, 2019). Konsep ini tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan pangan, tetapi juga mencakup aspek aksesibilitas, stabilitas, dan pemanfaatan pangan secara berkelanjutan. Seiring dengan pertumbuhan penduduk global, kebutuhan pangan diproyeksikan terus meningkat secara signifikan, khususnya di negara berkembang, bahkan diperkirakan meningkat sekitar 60% pada tahun 2030 dan dapat mencapai dua kali lipat pada tahun 2050 (Rozi *et al.*, 2023). Oleh karena itu, peningkatan produksi pangan menjadi salah satu fokus utama dalam pembangunan pertanian modern.

Konteks sistem pangan nasional, tanaman padi (*Oryza sativa* L.) memiliki peran strategis karena beras merupakan makanan pokok bagi sebagian besar masyarakat Indonesia. Keberhasilan produksi padi sangat dipengaruhi

oleh faktor biotik dan abiotik yang saling berinteraksi dalam sistem budidaya. Salah satu faktor biotik yang penting adalah keberadaan patogen penyebab penyakit tanaman yang dapat menurunkan hasil dan kualitas panen (Sulaeman & Rahmawati, 2023).

Permasalahan utama dalam produksi padi saat ini adalah tingginya intensitas serangan penyakit, khususnya penyakit hawar daun bakteri yang disebabkan oleh *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. Patogen ini memiliki kemampuan penyebaran yang cepat melalui air, benih, serta sisa tanaman yang terinfeksi, dan dapat bertahan di lingkungan sebagai sumber inokulum (Ritbamrung *et al.*, 2025). Serangan penyakit ini dapat menyebabkan kehilangan hasil yang signifikan, bahkan mencapai 10–50% pada kondisi yang mendukung perkembangan patogen (Xu *et al.*, 2022). Upaya pengendalian yang umum dilakukan masih bergantung pada pestisida kimia, yang dalam jangka panjang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, kesehatan manusia, serta memicu resistensi patogen.

Sebagai alternatif, pendekatan pengendalian hayati berkembang sebagai metode yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu mikroorganisme yang memiliki potensi besar sebagai agen pengendali hayati adalah bakteri dari genus *Streptomyces*. Bakteri ini diketahui mampu menghasilkan berbagai metabolit sekunder, seperti antibiotik dan enzim litik, yang bersifat antimikroba sehingga dapat menghambat pertumbuhan patogen tanaman, termasuk *Xanthomonas oryzae* (Le *et al.*, 2022). Selain itu, *Streptomyces* juga dilaporkan mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman serta menginduksi ketahanan sistemik terhadap serangan patogen. Pendekatan ini menunjukkan kebaruan (*state of the art*) dalam sistem pengelolaan penyakit tanaman yang lebih berkelanjutan dan mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia (Pandit *et al.*, 2022).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi *Streptomyces* spp. sebagai agen pengendali hayati terhadap *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* pada tanaman padi. Penelitian ini memiliki urgensi dalam mendukung pengembangan teknologi pertanian berkelanjutan guna meningkatkan produktivitas padi serta memperkuat ketahanan pangan nasional. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai sumber ilmiah yang relevan.

## Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur, yaitu dengan mengumpulkan data dari berbagai penelitian yang telah dipublikasikan sebelumnya. Data diperoleh dari artikel jurnal ilmiah, buku, dan sumber ilmiah lain yang relevan dengan topik penelitian. Penelusuran literatur dilakukan melalui database ilmiah seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan SpringerLink. Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis secara deskriptif kualitatif dengan cara membandingkan dan mengkaji hasil penelitian yang berkaitan untuk memperoleh kesimpulan sesuai dengan tujuan penelitian.

## Hasil dan Pembahasan

### Karakteristik *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* sebagai Patogen Tanaman Padi

*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* adalah bakteri patogen yang menyebabkan penyakit hawar daun bakteri (HDB) atau sering disebut penyakit kresak pada tanaman. Patogen ini menginfeksi jaringan daun tanaman padi terutama pada sistem pembuluh xilem sehingga mengganggu pengangkutan air dan nutrisi dalam tanaman. Infeksi oleh bakteri ini menyebabkan munculnya gejala klorosis di ujung daun yang kemudian berlanjut menjadi nekrosis dan pengeringan daun secara bertahap. Pada kondisi serangan yang parah, penyakit ini dapat menyebabkan kerusakan daun yang luas sehingga mengurangi proses fotosintesis dan berdampak pada penurunan hasil panen secara signifikan (Xu *et al.*, 2022).

Selain menimbulkan kerusakan fisik pada tanaman, *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* juga memiliki kemampuan beradaptasi yang tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan. Patogen ini dapat bertahan pada sisa tanaman, air irigasi, atau benih yang terinfeksi sehingga berpotensi menjadi sumber inokulum untuk siklus infeksi berikutnya di lahan pertanian. Keragaman genetik yang tinggi pada populasi bakteri ini juga mempengaruhi tingkat virulensi serta kemampuannya beradaptasi terhadap berbagai varietas padi yang dibudidayakan (Chien *et al.*, 2019). Bahkan, penggunaan varietas unggul secara luas sejak periode Revolusi Hijau diketahui mempengaruhi struktur populasi patogen ini melalui tekanan seleksi yang mendorong munculnya galur patogen yang lebih adaptif (Quibod *et al.*, 2020). Oleh karena itu, penyakit hawar daun bakteri menjadi salah satu ancaman utama dalam produksi padi dan memerlukan strategi pengendalian yang efektif dan berkelanjutan.

### Karakteristik *Streptomyces* spp. dan Potensinya sebagai Agen Biokontrol

*Streptomyces* spp. adalah kelompok bakteri Gram-positif aerob yang termasuk dalam kelompok aktinomiset dan sering ditemukan di tanah. Bakteri ini memiliki struktur hifa seperti miselium sehingga secara morfologi sering terlihat seperti jamur. *Streptomyces* dikenal memiliki kemampuan metabolik yang sangat bervariasi, terutama dalam memproduksi berbagai enzim hidrolitik ekstraseluler seperti protease, amilase, selulase, dan kitinase yang berperan dalam proses penguraian bahan organik di tanah

(Schrempf *et al.*, 2023). Selain itu, kelompok bakteri ini juga dikenal sebagai salah satu penghasil utama metabolit sekunder bioaktif seperti antibiotik, senyawa antijamur, serta berbagai senyawa antimikroba lainnya yang banyak digunakan dalam bidang farmasi, industri, dan pertanian.

Dalam ekosistem tanah, beberapa spesies *Streptomyces* juga dapat berkembang sebagai endofit di jaringan tanaman dan berfungsi sebagai bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPB). Bakteri ini dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui berbagai cara seperti produksi hormon pertumbuhan tanaman, pelarutan fosfat, serta peningkatan ketersediaan unsur hara di sekitar akar tanaman (Vurukonda *et al.*, 2018). Selain itu, kemampuan memproduksi berbagai metabolit sekunder yang bersifat antimikroba menjadikan *Streptomyces* spp. sebagai salah satu mikroorganisme yang potensial dikembangkan sebagai agen pengendali hayati dalam sistem pertanian berkelanjutan (Khan *et al.*, 2023). Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa isolat *Streptomyces* mampu menekan perkembangan berbagai patogen tanaman baik yang disebabkan oleh bakteri maupun jamur melalui cara antagonisme, kompetisi nutrisi, dan produksi senyawa antimikroba (Le *et al.*, 2022; Nazari *et al.*, 2023).

### **Mekanisme Antagonisme *Streptomyces* terhadap Patogen Tanaman**

Potensi *Streptomyces* spp. sebagai agen pengendali hayati terutama berkaitan dengan kemampuannya dalam menghasilkan berbagai metabolit sekunder yang bersifat antibakteri dan antijamur. Salah satu mekanisme utama yang berperan dalam pengendalian patogen adalah produksi antibiotik yang mampu menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen di lingkungan rizosfer. Senyawa antibiotik yang dihasilkan oleh *Streptomyces* dapat merusak struktur sel patogen, menghambat sintesis protein, serta mengganggu proses metabolisme sel sehingga pertumbuhan patogen menjadi terhambat (Khan *et al.*, 2023).

Selain produksi antibiotik, *Streptomyces* spp. juga menghasilkan berbagai enzim litik seperti kitinase, glukonase, dan protease yang mampu mendegradasi komponen struktural pada dinding sel mikroorganisme patogen. Aktivitas enzimatik ini menyebabkan kerusakan pada

struktur sel patogen sehingga menghambat pertumbuhan dan perkembangan patogen di lingkungan tanaman. Selain itu, mekanisme kompetisi nutrisi dan ruang juga berperan penting dalam menekan populasi patogen di daerah perakaran tanaman. Dengan kemampuan kolonisasi yang baik pada rizosfer, *Streptomyces* dapat mendominasi lingkungan mikro di sekitar akar sehingga mengurangi peluang patogen untuk berkembang (Nazari *et al.*, 2023).

Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa *Streptomyces* mampu menginduksi ketahanan sistemik pada tanaman terhadap serangan patogen. Mekanisme ini terjadi melalui stimulasi sistem pertahanan tanaman sehingga tanaman menjadi lebih responsif terhadap infeksi patogen. Aktivasi sistem pertahanan ini dapat meningkatkan produksi senyawa pertahanan tanaman seperti fenolik dan enzim pertahanan yang berperan dalam menekan perkembangan penyakit tanaman (Vurukonda *et al.*, 2018).

### **Potensi Pemanfaatan *Streptomyces* spp. dalam Pengendalian Hawar Daun Bakteri**

Pemanfaatan *Streptomyces* spp. sebagai agen pengendali hayati terhadap *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam sistem budidaya padi. Beberapa penelitian melaporkan bahwa isolat *Streptomyces* mampu menghambat pertumbuhan bakteri patogen penyebab penyakit tanaman melalui mekanisme antagonisme yang melibatkan produksi senyawa antibakteri dan enzim litik. Kemampuan ini menjadikan *Streptomyces* sebagai kandidat penting dalam pengembangan agen biokontrol untuk mengurangi perkembangan penyakit hawar daun bakteri pada tanaman padi (Le *et al.*, 2022).

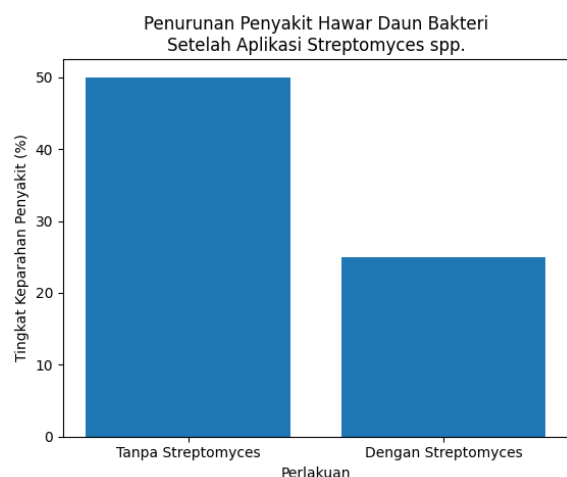
Selain kemampuannya dalam menekan pertumbuhan patogen, penggunaan *Streptomyces* spp. juga memiliki keuntungan dari aspek keberlanjutan lingkungan. Penggunaan agen hayati dapat mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, pengembangan teknologi berbasis mikroorganisme seperti *Streptomyces* menjadi salah satu pendekatan yang relevan dalam mendukung sistem pertanian berkelanjutan sekaligus meningkatkan produktivitas tanaman padi. Dengan demikian, pemanfaatan

*Streptomyces spp.* sebagai agen pengendali hayati memiliki potensi besar untuk dikembangkan dalam strategi pengelolaan penyakit tanaman padi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

### Keunggulan dan Kelemahan *Streptomyces spp.* Sebagai pengendali *Xanthomonas oryzae*

*Streptomyces spp.* memiliki potensi besar sebagai agen biokontrol terhadap *Xanthomonas oryzae* melalui berbagai mekanisme, seperti produksi metabolit sekunder (antibiotik dan enzim hidrolitik), antibiosis, penghambatan biofilm dan quorum sensing, serta induksi ketahanan tanaman melalui peningkatan enzim pertahanan seperti peroksidase, polifenol oksidase, dan fenilalanin amonia liase. Selain ramah lingkungan, kemampuannya berkolonisasi di rizosfer memungkinkan perlindungan yang lebih berkelanjutan dibandingkan pestisida kimia.

Namun, penerapannya di lapangan masih menghadapi beberapa kendala, seperti efektivitas yang tidak konsisten akibat pengaruh faktor lingkungan (suhu, kelembapan, pH tanah, dan interaksi mikroba), respons pengendalian yang lebih lambat, serta tantangan dalam formulasi, stabilitas, umur simpan, dan metode aplikasi. Selain itu, adanya variasi kemampuan antar strain menuntut seleksi strain unggul untuk hasil yang optimal. Secara keseluruhan, meskipun memiliki keterbatasan, *Streptomyces spp.* tetap menjadi agen pengendali hayati yang menjanjikan untuk pengelolaan penyakit hawar daun bakteri pada padi secara berkelanjutan (Le *et al.*, 2022).



**Gambar 1.** Diagram Penurunan Penyakit Hawar

### Daun Bakteri

**Tabel 1.** Penurunan Penyakit Hawar Daun Bakteri

No	Perlakuan	Tingkat Keparahan Penyakit (%)	Keterangan
1.	Tanpa <i>Streptomyces spp.</i>	50%	Keparahan penyakit tinggi karena tidak ada agen biokontrol yang menekan pertumbuhan patogen. Terjadi penurunan keparahan penyakit akibat aktivitas antagonis dan induksi ketahanan tanaman.
2.	Dengan <i>Streptomyces spp.</i>	25%	

### Hasil Penelitian dari (He *et al.*, 2025; Nurwulan *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2024; Jaivel *et al.*, 2025; Shi *et al.*, 2021.)

Hasil dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa aktinobakteria, khususnya dari genus *Streptomyces*, memiliki potensi yang besar sebagai agen pengendali hayati terhadap bakteri *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, penyebab penyakit hawar daun bakteri pada tanaman padi. Isolat aktinobakteria yang diperoleh dari rizosfer tanaman padi dilaporkan mampu menghambat pertumbuhan patogen melalui uji antagonis secara *in vitro*, yang ditunjukkan dengan terbentuknya zona hambat di sekitar koloni bakteri antagonis. Kemampuan penghambatan tersebut umumnya berkaitan dengan produksi metabolit sekunder, enzim hidrolitik, serta senyawa antibakteri yang dapat mengganggu pertumbuhan patogen. Sejalan dengan hal tersebut, beberapa isolat *Streptomyces* juga diketahui menghasilkan senyawa bioaktif yang bersifat antibakteri terhadap berbagai patogen tanaman termasuk *Xanthomonas* (Singh *et al.*, 2024).

Penelitian lain menunjukkan bahwa *Streptomyces roseovorticillatus* mampu menghasilkan senyawa antibakteri berupa carbazomycin B yang efektif dalam menghambat

pertumbuhan *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. Senyawa tersebut bekerja dengan merusak struktur sel bakteri patogen sehingga pertumbuhan bakteri dapat ditekan. Pengujian pada tanaman padi di rumah kaca menunjukkan bahwa aplikasi kultur fermentasi bakteri tersebut mampu menurunkan tingkat keparahan penyakit dibandingkan dengan tanaman kontrol (Shi *et al.*, 2021). Selain itu, penelitian terbaru juga melaporkan isolasi spesies baru yaitu *Streptomyces shaowuensis* strain HSW2009 dari rizosfer padi yang mampu menghasilkan metabolit antibiotik Piericidin A1. Senyawa tersebut diketahui memiliki aktivitas antibakteri terhadap *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* dengan nilai EC50 sebesar 6,363 mg/L dan mampu menurunkan panjang lesi penyakit pada daun padi secara signifikan (He *et al.*, 2025).

Selain melalui produksi senyawa antibakteri, *Streptomyces* juga dilaporkan mampu menekan faktor virulensi patogen serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap infeksi penyakit. Isolat aktinobakteria dari rizosfer padi diketahui mampu menghambat pembentukan biofilm, produksi eksopolisakarida (EPS), serta motilitas *Xanthomonas oryzae*, yang merupakan faktor penting dalam proses infeksi patogen (Nurwulan *et al.*, 2022). Di sisi lain, aplikasi *Streptomyces* pada tanaman padi juga dapat meningkatkan aktivitas enzim pertahanan tanaman seperti peroksidase, polifenol oksidase, dan fenilalanin amonia liase sehingga mampu menurunkan tingkat insidensi penyakit hawar daun bakteri (Jaivel *et al.*, 2025). Secara keseluruhan, berbagai hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *Streptomyces spp.* memiliki mekanisme pengendalian yang beragam terhadap *Xanthomonas oryzae*, meliputi produksi antibiotik, penghambatan faktor virulensi patogen, serta induksi ketahanan tanaman.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur, *Streptomyces spp.* memiliki potensi yang signifikan sebagai agen pengendali hayati terhadap *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*, penyebab penyakit hawar daun bakteri pada tanaman padi. Kemampuan bakteri ini dalam menghasilkan berbagai metabolit sekunder seperti antibiotik, enzim hidrolitik, serta kemampuannya dalam berkompetisi di lingkungan rizosfer dan

menginduksi ketahanan tanaman menjadikannya efektif dalam menekan perkembangan patogen. Oleh karena itu, pemanfaatan *Streptomyces spp.* sebagai agen biokontrol dapat menjadi alternatif pengendalian penyakit yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, sekaligus berpotensi mendukung peningkatan produktivitas padi serta ketahanan pangan.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada seluruh peneliti dan akademisi yang karya ilmiahnya telah menjadi sumber referensi dalam penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada berbagai penyedia basis data ilmiah, yang telah menyediakan akses terhadap literatur yang relevan dan berkualitas. Selain itu, penulis turut mengapresiasi semua pihak yang telah memberikan kontribusi secara tidak langsung, baik berupa data, informasi, maupun wawasan, sehingga artikel ini dapat tersusun dengan baik dan sistematis.

## Referensi

- Chien, C. C., Chou, M. Y., Chen, C. Y., & Shih, M. C. (2019). Analysis of genetic diversity of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* populations in Taiwan. *Scientific Reports*, 9(1), 316. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36528-1>
- Fanzo, J. (2023). Achieving food security through a food systems lens. In *Resilience and food security in a food systems context* (pp. 31–52). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5_2)
- Hadi, A., Rusli, B., & Alexandri, M. B. (2019). Dampak undang-undang nomor 12 tentang pangan terhadap ketahanan pangan Indonesia. *Responsive: Jurnal Pemikiran dan Penelitian Administrasi, Sosial, Humaniora dan Kebijakan Publik*, 2(4), 173–181. <https://doi.org/10.24198/responsive.v2i3.26085>
- He, J., Zhang, Y., Liu, Q., Wang, X., & Chen, H. (2025). *Streptomyces shaowuensis* sp. nov., a novel actinomycete isolated from rice rhizosphere producing Piericidin A1 with

- antibacterial activity against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *Microbiological Research*, 284, 127742. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2025.127742>
- Jaivel, N., Suthin Raj, T., & Karthikeyan, G. (2025). Formulation of *Streptomyces* sp. TC1 and its efficacy against bacterial leaf blight of rice caused by *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *International Journal of Environmental and Plant Biology*, 12(5) 1–10. <https://doi.org/10.23910/2/2025.6183>
- Khan, S., Srivastava, S., Karnwal, A., & Malik, T. (2023). *Streptomyces* as a promising biological control agent for plant pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1285543. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1285543>
- Le, K. D., Yu, N. H., Park, A. R., Park, D. J., Kim, C. J., & Kim, J. C. (2022). *Streptomyces* sp. AN090126 as a biocontrol agent against bacterial and fungal plant diseases. *Microorganisms*, 10(4), 791. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040791>
- Manikas, I., Ali, B. M., & Sundarakani, B. (2023). A systematic literature review of indicators measuring food security. *Agriculture & Food Security*, 12(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00414-4>
- Nazari, M. T., Schommer, V. A., Braun, J. C. A., dos Santos, L. F., Lopes, S. T., Simon, V., & Piccin, J. S. (2023). Using *Streptomyces* spp. as plant growth promoters and biocontrol agents. *Rhizosphere*, 27, 100741. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100741>
- Nurwulan, S., Risdiyanto, I., & Widodo, W. (2022). Actinobacteria from rice rhizosphere suppress virulence factors of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *Agronomy*, 11, 2567. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122567>
- Pandit, M. A., Kumar, J., Gulati, S., Bhandari, N., Mehta, P., Katyayal, R., Rawat, C. D., Mishra, V., & Kaur, J. (2022). Major biological control strategies for plant pathogens. *Pathogens*, 11(2), 273. <https://doi.org/10.3390/pathogens11020273>
- Quibod, I. L., Atieza-Grande, G., Oreiro, E. G., Palmos, D., Nguyen, M. H., Coronejo, S. T., & Oliva, R. (2020). The Green Revolution shaped the population structure of the rice pathogen *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *The ISME Journal*, 14(2), 492–505. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0545-2>
- Ritbamrung, O., Inthima, P., Ratanasut, K., Sujipuli, K., Rungrat, T., & Buddhachat, K. (2025). Evaluating *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* infection dynamics in rice for distribution routes and environmental reservoirs by molecular approaches. *Scientific Reports*, 15(1), 1408. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01408-0>
- Rodríguez Coca, L. I., García González, M. T., Gil Unday, Z., Jiménez Hernández, J., Rodríguez Jáuregui, M. M., & Fernández Cancio, Y. (2023). Effects of sodium salinity on rice (*Oryza sativa* L.) cultivation: A review. *Sustainability*, 15(3), 1804. <https://doi.org/10.3390/su15031804>
- Rozi, F., Santoso, A. B., Mahendri, I. G. A. P., Hutapea, R. T. P., Wamaer, D., Siagian, V., Elisabeth, D. A. A., Sugiono, S., Handoko, H., Subagio, H., & Syam, A. (2023). Indonesian market demand patterns for food commodity sources of carbohydrates in facing the global food crisis. *Heliyon*, 9(6), e16809. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16809>
- Schrempf, H., Koebsch, I., Walter, S., Engelhardt, H., & Meschke, H. (2023). Protein secretion by *Streptomyces*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12489-0>
- Shi, W., Li, Y., Yuan, X., Wang, X., Zhang, Y., & Li, J. (2021). Inhibitory effects of carbazomycin B produced by *Streptomyces roseovorticillatus* against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.705298>
- Singh, R., Kumar, V., Singh, P., & Gupta, A. (2024). Antibacterial potential of

- Streptomyces spp.* against plant pathogenic bacteria including *Xanthomonas*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12789-5>
- Sulaeman, D., & Rahmawati, I. (2023). Penguatan kebijakan ketahanan pangan: Sinergi multi-pemangku kepentingan dalam peningkatan produksi padi. *JISoH: Journal of Indonesian Social and Humanities*, 3(2), 123–134. <https://doi.org/10.52496/jisoh.v3i2.49745>
- Vurukonda, S. S. K. P., Giovanardi, D., & Stefani, E. (2018). Plant growth promoting and biocontrol activity of *Streptomyces spp.* as endophytes. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(4), 952. <https://doi.org/10.3390/ijms19040952>
- Xu, Z., Zhou, Y., Yang, B., & Wang, G.-L. (2022). Transcription activator-like effectors in *Xanthomonas oryzae*: Mechanisms, functions, and applications. *Phytopathology Research*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s42483-022-00121-0>
- Zheng, D., Wang, H., Zhong, H., Ke, W., Hu, H., Sun, M., & Ruan, L. (2021). Elucidation of the pathogenicity-associated regulatory network in *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *mSystems*, 6(2), e01128-20. <https://doi.org/10.1128/mSystems.01128-20>