

In Vitro Antifungal Activity of Streptomyces and Bacillus Isolates against *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense*

Febry Nurhidayati^{1*} & Gen Adi Wisanggeni²

¹Program Studi Diploma Tiga Agribisnis, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret, Indonesia;

²Jurusan Pertanian, Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Perikanan, dan Kelautan, Universitas Bangka Belitung, Indonesia;

Article History

Received : August 29th, 2025

Revised : September 06th, 2025

Accepted : September 20th, 2025

*Corresponding Author: **Febry**

Nurhidayati, Program Studi

Diploma Tiga Agribisnis,

Sekolah Vokasi, Universitas
Sebelas Maret, Indonesia;

Email:

febry.nurhidayati@staff.uns.ac.id

Abstract: *Fusarium* wilt disease caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* (Foc) represents a major constraint to banana production, leading to severe yield and quality losses. The use of biological control agents (BCAs) such as *Streptomyces* and *Bacillus* offers an environmentally sustainable alternative to manage this pathogen. This study aimed to evaluate the antagonistic activity, culture filtrate effects, volatile organic compounds, and compatibility of *Streptomyces* S01, *Bacillus* B01, and *Bacillus* B16 isolates against Foc under in vitro conditions. A completely randomized design (CRD) with three replications was employed. Results indicated that *Streptomyces* S01 was the most effective isolate, achieving 84.12% inhibition in the dual culture assay, 69.96% in the culture filtrate test, and 41.4% through volatile compound activity. Isolates *Bacillus* B16 and *Bacillus* B01 showed moderate efficacy, with *Bacillus* B16 exhibiting superior performance in the volatile assay (28.8%). Compatibility tests revealed that *Streptomyces* S01 + *Bacillus* B16 and *Bacillus* B01 + *Bacillus* B16 were mutually compatible, while *Streptomyces* S01 + *Bacillus* B01 displayed incompatibility. These findings suggest that *Streptomyces* S01, particularly in combination with *Bacillus* B16, holds strong potential as a microbial consortium for the biological control of *Fusarium* wilt in banana cultivation.

Keywords: Foc (*Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense*), bacillus, streptomyces, compatibility.

Pendahuluan

Pisang (*Musa* spp.) adalah komoditas tropis yang memiliki nilai ekonomi signifikan, tidak hanya sebagai sumber pangan tetapi juga sebagai komoditas penting dalam perdagangan internasional. Selain dikonsumsi segar, buah ini juga menjadi bahan baku bagi berbagai produk olahan yang memberi kontribusi signifikan terhadap perekonomian masyarakat, terutama di negara-negara berkembang. Indonesia sendiri tercatat sebagai produsen pisang terbesar di Asia Tenggara, dengan kontribusi yang cukup besar terhadap total produksi dunia (Arango-Isaza et al., 2020).

Secara agronomis, keberlanjutan produksi pisang menghadapi ancaman serius dari penyakit layu *Fusarium* yang disebabkan oleh *Fusarium*

oxysporum f.sp. *cubense* (Foc) (Fang et al., 2021). *Fusarium* dapat bertahan di tanah dalam bentuk klamidospora, sehingga metode rotasi tanaman maupun penggunaan fungisida sintesis seringkali kurang efektif untuk menekannya (Nurfadilah et al., 2022). Infeksi biasanya bermula dari akar dan menyebar ke jaringan xilem, menyebabkan gangguan transpor air serta nutrisi hingga mengakibatkan kelayuan total (Zheng et al., 2022). Kehadiran ras tropis 4 (TR4) memperburuk situasi karena tingkat virulensinya tinggi terhadap hampir semua kultivar pisang, termasuk varietas yang sebelumnya dianggap toleran (Bubici et al., 2019; Li et al., 2023).

Tingginya virulensi TR4 serta kemampuan adaptasinya yang luas membuat pengendalian berbasis varietas tahan menjadi kurang efektif. Upaya konvensional melalui rotasi tanaman

maupun aplikasi fungisida sintesis juga terbukti tidak mampu menekan perkembangan penyakit secara optimal. Kondisi ini menimbulkan permasalahan serius dalam menjaga produktivitas pisang di berbagai negara penghasil utama, termasuk Indonesia, sehingga dibutuhkan pendekatan pengendalian yang lebih efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Penggunaan agens pengendali hayati (APH) menjadi salah satu alternatif yang prospektif dalam menekan Foc (Compant et al., 2021). Mikroorganisme seperti *Streptomyces* dan *Bacillus* diketahui menghasilkan berbagai metabolit bioaktif, termasuk antibiotik, enzim hidrolitik, dan lipopeptida, yang terbukti efektif menghambat pertumbuhan patogen (Fira et al., 2018; Radhakrishnan et al., 2022). Selain itu, kedua genus ini mampu berkolonisasi pada perakaran tanaman dan menciptakan zona proteksi mikroba (de los Santos-Villalobos et al., 2023). Beberapa penelitian bahkan melaporkan adanya efek sinergis dari kombinasi *Streptomyces* dan *Bacillus* dalam mengendalikan penyakit pada berbagai tanaman, termasuk tomat dan pisang (Kawicha et al., 2023; Laili et al., 2015).

Namun, kajian mengenai efektivitas kombinasi tersebut terhadap Foc masih relatif terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi aktivitas antagonistik, pengaruh filtrat kultur, senyawa volatil, serta kompatibilitas isolat *Streptomyces* dan *Bacillus* terhadap Foc secara *in vitro*. Temuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan ilmiah bagi pengembangan strategi pengendalian hayati yang lebih berkelanjutan dan aplikatif untuk mengatasi layu Fusarium pada pisang.

Bahan dan Metode

Tempat dan waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di UPT Laboratorium Terpadu, Universitas Sebelas Maret, Surakarta. Seluruh rangkaian pengujian dilakukan secara *in vitro* untuk menilai potensi isolat bakteri antagonis pada *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* (Foc).

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan meliputi isolat *Streptomyces* S01, *Bacillus* B01, *Bacillus* B16, kombinasi keduanya, serta isolat Foc.

Streptomyces S01 berasal dari rizosfer jagung, *Bacillus* B01 dari rizosfer tebu, *Bacillus* B16 berasal dari endofit pisang, dan Foc merupakan isolat koleksi Laboratorium Hama Penyakit dan Tanaman FP UNS. Media kultur yang dipakai antara lain Potato Dextrose Agar (PDA), Nutrient Agar (NA), dan Nutrient Broth (NB). Selain itu, digunakan pula bahan tambahan berupa air steril, akuades, etanol 70%, dan kertas saring Whatman No. 1. Peralatan penelitian mencakup cawan petri steril, jarum ose, mikropipet, autoklaf, laminar air flow, inkubator, shaker, jangka sorong digital, serta timbangan analitik.

Rancangan penelitian

Percobaan dilakukan menggunakan desain Rancangan Acak Lengkap (RAL) sederhana (non-faktorial), dengan perlakuan berupa aplikasi agens pengendali hayati (APH) baik secara tunggal maupun kombinasi, serta satu kontrol. Isolat *Streptomyces* dan *Bacillus* diuji terhadap isolat Foc. Setiap perlakuan dilakukan dalam tiga ulangan.

Uji antagonisme

Uji antagonisme dilaksanakan dengan pendekatan kultur ganda (*dual culture*). (Slightom et al., 2021). Potongan koloni Foc berusia tujuh hari berdiameter 5 mm dibuat dengan cork borer, kemudian ditempatkan di bagian tengah media PDA segar. Isolat bakteri ditanam pada jarak 2,5 cm dari tepi koloni jamur. Pada perlakuan kombinasi, masing-masing isolat bakteri diletakkan pada sisi berlawanan. Semua cawan diinkubasi pada suhu ruang (27–28 °C) selama tujuh hari.

Uji filtrat kultur bakteri

Filtrat bakteri diperoleh dengan menumbuhkan isolat dalam NB menggunakan shaker (150 rpm) selama 72 jam. Kultur disentrifugasi dengan kecepatan 10.000 rpm selama 15 menit, selanjutnya disaring memakai kertas saring Whatman No. 1 untuk memperoleh filtrat (Hanif et al., 2021). Filtrat steril dicampurkan ke dalam PDA cair (± 45 °C) dengan konsentrasi 20% (v/v), kemudian dituangkan ke cawan petri. Potongan koloni Foc (diameter 5 mm) diletakkan di tengah media, lalu diinkubasi selama tujuh hari pada suhu ruang.

Uji senyawa volatil

Uji pengaruh senyawa volatil dilakukan dengan metode *sealed plate* (Guo et al., 2020). Satu cawan berisi isolat bakteri pada NA dipasangkan secara terbalik dengan cawan berisi potongan koloni Foc pada PDA, kemudian disegel menggunakan parafilm. Cawan pasangan tersebut diinkubasi pada suhu ruang selama tujuh hari, dan diameter koloni Foc diamati setiap hari.

Uji kompatibilitas

Kompatibilitas antar isolat bakteri diuji menggunakan metode gores silang pada NA (Goudjal et al., 2021). Isolat pertama digores lurus pada permukaan media dan diinkubasi 24 jam. Setelah itu, isolat kedua digores tegak lurus melintasi garis pertama dengan jarak 2–3 mm. Setelah inkubasi 48 jam, diamati ada tidaknya zona penghambatan di titik pertemuan.

Parameter pengamatan dan analisis data

Parameter yang diamati meliputi persentase penghambatan pertumbuhan (Inhibition Percentage, IP) yang dihitung berdasarkan perbedaan radius koloni antara perlakuan dan kontrol (Singh et al., 2020). Pada uji filtrat dan uji senyawa volatil, nilai IP ditentukan dari persentase penurunan diameter koloni Foc dibandingkan kontrol. Sementara itu, uji kompatibilitas dianalisis secara kualitatif dengan melihat pembentukan zona hambat antar isolat. Analisis ragam (ANOVA) digunakan untuk menguji data pada taraf kepercayaan 95%, kemudian uji DMRT diterapkan jika terdapat perbedaan yang signifikan.

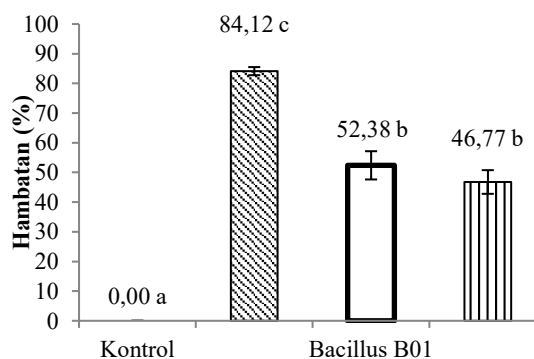
Hasil dan Pembahasan

Uji Antagonisme

Hasil uji antagonisme *in vitro* menunjukkan bahwa isolat *Streptomyces* S01 merupakan agens paling efektif dalam menghambat pertumbuhan *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc), dengan tingkat penghambatan mencapai 84,12%. Sebaliknya, kedua isolat *Bacillus* (B01 dan B16) hanya memperlihatkan aktivitas antagonistik sedang, masing-masing sebesar 52,38% dan 46,77% (Gambar 1). Perbedaan efektivitas ini menggambarkan adanya variasi kemampuan antar isolat dalam menghasilkan senyawa

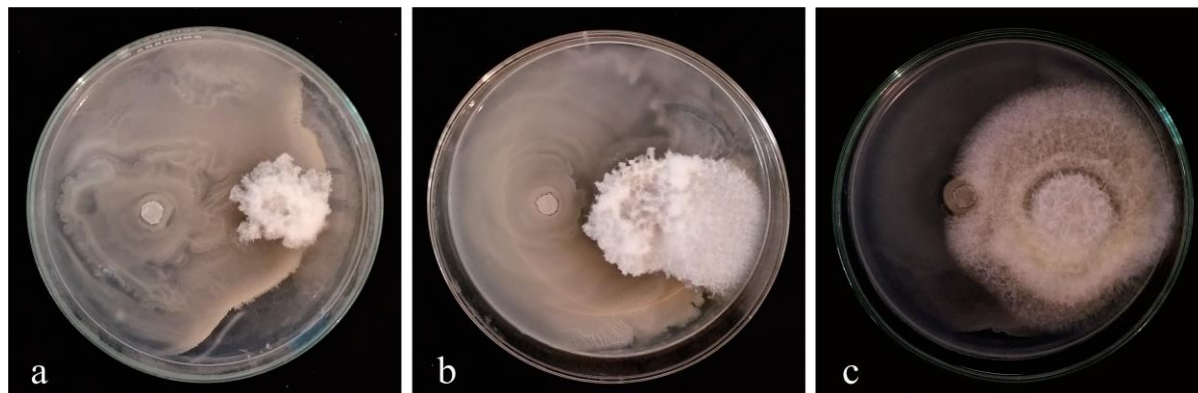
penghambat dan bersaing dengan patogen. Melalui interaksi langsung (Gambar 2), isolat bakteri dapat menghambat pertumbuhan *Fusarium* dengan memanfaatkan kompetisi ruang, sekresi metabolit antimikroba, maupun aktivitas enzim hidrolitik yang merusak dinding sel jamur (Wang et al., 2022).

Tingginya efektivitas *Streptomyces* S01 mengindikasikan adanya produksi metabolit sekunder antijamur yang lebih kuat dan kemampuan kolonisasi yang optimal pada medium padat. Beberapa studi melaporkan bahwa genus *Streptomyces* mampu menghasilkan senyawa antibiotik seperti streptomycin, nystatin, dan fungisida alami lainnya yang dapat berdifusi dengan cepat dan menghambat pertumbuhan miselium patogen (Nurkanto et al., 2021; Olanrewaju & Babalola, 2022).



Gambar 1. Penghambatan Foc oleh agens pengendali hayati berdasarkan diameter koloni. Keterangan : Nilai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Fadhillah et al. (2023) yang melaporkan bahwa isolat *Streptomyces* lokal mampu menekan pertumbuhan *Fusarium oxysporum* pada tanaman hortikultura dengan tingkat hambatan lebih dari 80%. Sementara itu, efektivitas *Bacillus* B01 dan B16 yang berada pada kisaran 46–52% dapat dikaitkan dengan mekanisme pengendalian berbasis senyawa volatil, enzim litik, dan produksi biosurfaktan (Setiawati et al., 2020). Meskipun nilainya lebih rendah dibanding *Streptomyces*, kedua isolat *Bacillus* tetap menunjukkan potensi antagonis yang relevan untuk dikombinasikan dalam formulasi konsorsium pengendalian hayati.



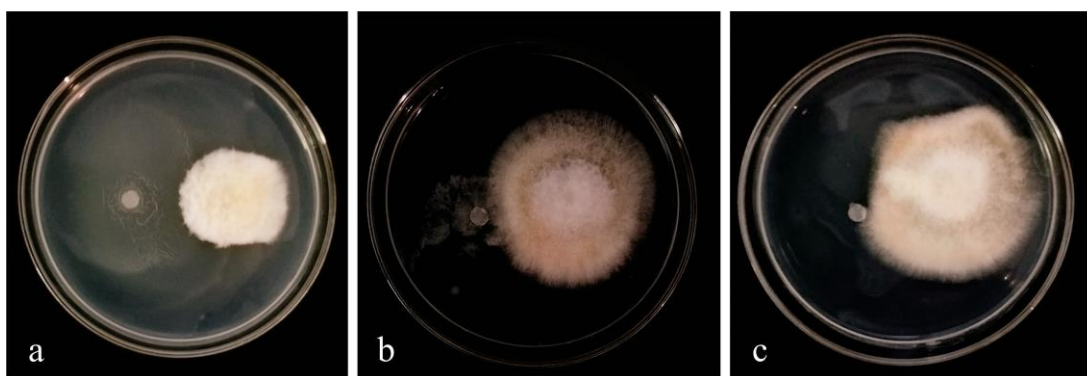
Gambar 2. Visualisasi hasil uji antagonisme isolat bakteri terhadap koloni Foc: (a) *Streptomyces* S01, (b) *Bacillus* B01 dan (c) *Bacillus* B16.

Uji Filtrat

Pengujian menggunakan filtrat kultur bakteri memperlihatkan bahwa *Streptomyces* S01 tetap menjadi isolat dengan aktivitas penghambatan paling tinggi terhadap Foc, dengan nilai inhibisi mencapai 69,96%. Sementara itu, filtrat dari *Bacillus* B01 dan B16 efektivitasnya lebih rendah, masing-masing sebesar 48,89% dan 39,17% (Gambar 4). Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan penghambatan tidak hanya berasal dari keberadaan sel bakteri, tetapi juga dipengaruhi oleh senyawa bioaktif yang dilepaskan ke dalam media selama fase pertumbuhan. Senyawa bioaktif yang dihasilkan, seperti antibiotik,

siderofor, dan enzim hidrolitik (Gambar 3), telah dilaporkan berkontribusi dalam mekanisme antifungal (Hanif et al., 2017).

Tingginya nilai hambatan pada *Streptomyces* S01 mengindikasikan bahwa senyawa bioaktif yang diproduksi memiliki sifat antijamur yang kuat, stabil, dan mampu berdifusi secara efektif meskipun telah dipisahkan dari biomassa sel. Beberapa studi melaporkan bahwa genus ini mampu menghasilkan senyawa seperti filipin, aktinomycin D, dan poliketida lainnya yang dapat merusak membran hifa serta menghambat pertumbuhan patogen tular tanah (Qi et al., 2021; Al-Ali et al., 2021).

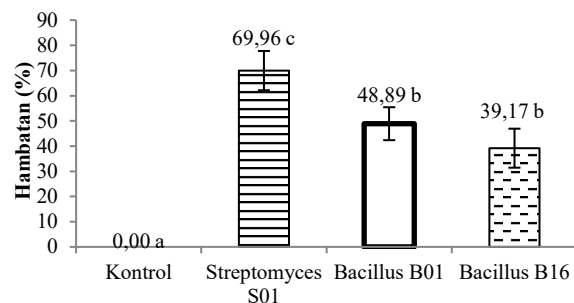


Gambar 3. Hasil uji filtrat isolat bakteri terhadap pertumbuhan koloni Foc: (a) *Streptomyces* S01, (b) *Bacillus* B01 dan (c) *Bacillus* B16

Perbedaan kemampuan hambatan antar isolat kemungkinan besar disebabkan oleh variasi jenis dan konsentrasi metabolit yang terbentuk selama proses fermentasi.

Streptomyces dikenal memproduksi beragam senyawa bioaktif dengan spektrum pengendalian luas, sementara *Bacillus* umumnya menghasilkan lipopeptida seperti surfaktin, fengisin, dan iturin

yang mekanisme kerjanya melibatkan kerusakan struktur membran sel jamur (Setiawati et al., 2020; Haddad et al., 2020).



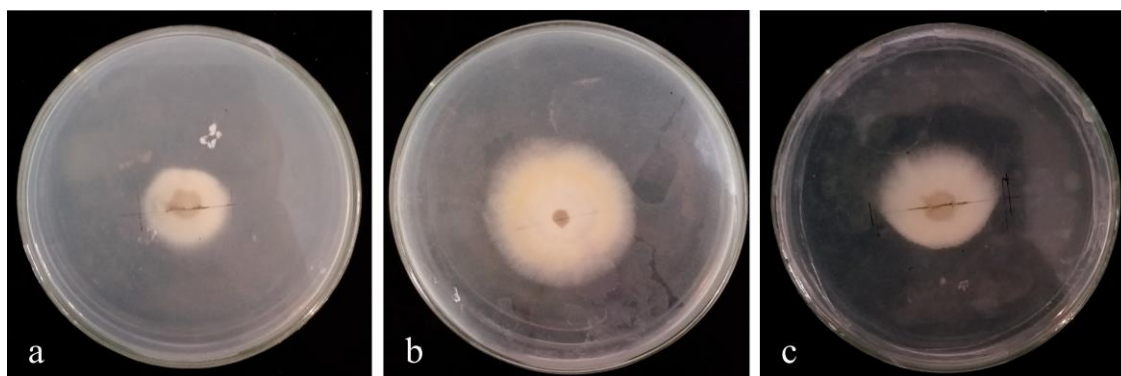
Gambar 4. Pengaruh filtrat agens pengendali hayati terhadap pertumbuhan Foc
Keterangan : Nilai dengan huruf yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%

He et al. (2022) melaporkan bahwa perbedaan profil metabolit antar spesies atau strain bakteri dapat memengaruhi tingkat penghambatan yang dihasilkan. Temuan serupa juga disampaikan Nugroho et al. (2022), bahwa optimasi media fermentasi dan kondisi inkubasi mampu meningkatkan produksi metabolit antijamur hingga dua kali lipat. Dengan

demikian, pemilihan isolat unggul disertai pengaturan kondisi produksi yang tepat menjadi kunci dalam meningkatkan kinerja filtrat sebagai agens pengendalian hayati yang efektif.

Uji Senyawa Volatil

Pengujian senyawa volatil menunjukkan variasi kemampuan hambatan pertumbuhan Foc antar isolat bakteri. Perlakuan *Streptomyces* S01 menghasilkan diameter koloni terkecil, yaitu 2,93 cm, yang setara dengan penghambatan sebesar 41,40% dibanding kontrol. *Bacillus* B16 menempati urutan kedua dengan diameter koloni 3,56 cm (hambatan 28,80%), sedangkan *Bacillus* B01 memiliki hambatan terendah, yaitu 13,40% (diameter 4,33 cm) (Tabel 1). Perbedaan ini kemungkinan terjadi karena senyawa volatil yang dihasilkan *Streptomyces* S01 memiliki potensi lebih besar dalam menghambat Foc dibandingkan kedua isolat *Bacillus*. Menurut Guo et al. (2020), mekanisme penghambatan melalui senyawa volatil menjadi salah satu strategi penting dalam interaksi mikroba karena dapat menciptakan zona proteksi tanpa memerlukan kontak fisik dengan patogen (Gambar 5).



Gambar 5. Hasil uji volatil agens pengendalian hayati terhadap pertumbuhan koloni Foc: (a) *Streptomyces* S01, (b) *Bacillus* B01 dan (c) *Bacillus* B16

Senyawa volatil yang dihasilkan oleh bakteri tanah dapat berupa alkohol, keton, ester, terpenoid, dan senyawa aromatik yang bekerja dengan menghambat sintesis protein, merusak membran sel, dan mengganggu metabolisme energi patogen (Choudoir et al., 2019). Almario et al. (2021) melaporkan bahwa senyawa 2,3-butanediol dan asetoin dapat bekerja secara sinergis dalam menghambat pertumbuhan *Fusarium*, meskipun tidak terjadi kontak

langsung antara mikroorganisme penghasil senyawa dan patogen. Sementara itu, Schöller et al. (2021) melaporkan bahwa senyawa volatil yang diproduksi oleh *Actinomycetes*, termasuk *Streptomyces*, mampu menghambat perkembangan *Fusarium* hingga 70% pada uji in vitro. Winarto et al. (2021) juga menegaskan potensi aplikasinya untuk pengendalian patogen di lingkungan tertutup seperti rumah kaca atau gudang penyimpanan, di mana difusi senyawa

volatil dapat berlangsung optimal dan stabil.

Tabel 1. Persentase hambatan pertumbuhan *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* oleh senyawa volatil bakteri

Perlakuan	Rata-rata Diameter koloni (cm)	Persentase hambatan (%)
Kontrol	5,00	0,00
<i>Streptomyces</i> S01	2,93	41,40
<i>Bacillus</i> B01	4,33	13,40
<i>Bacillus</i> B16	3,56	28,80

Uji Kompatibilitas

Hasil uji kompatibilitas menunjukkan bahwa kombinasi *Streptomyces* S01 dengan *Bacillus* B16 bersifat kompatibel, ditandai

dengan tidak adanya zona hambat pada titik pertemuan koloni, sehingga kombinasi ini berpotensi digunakan sebagai konsorsium agens hayati. Sebaliknya, kombinasi S01 dengan B01 menimbulkan zona hambatan, yang mengisyaratkan bahwa meskipun keduanya efektif secara individual, aplikasi gabungan berpotensi menimbulkan interaksi negatif yang dapat menurunkan efektivitas konsorsium. Fenomena ini dapat disebabkan oleh produksi metabolit antibakteri oleh *Streptomyces* yang secara alami mampu menekan bakteri gram positif lain (Rismayani et al., 2021). Menurut Goudjal et al., (2021) pemilihan kombinasi agens pengendali hayati perlu memperhatikan interaksi antar-isolat agar aplikasi di lapangan tidak saling menghambat.

Tabel 2. Evaluasi kompatibilitas antar isolat agens hayati

Kombinasi agens hayati	Pembentukan zona hambat	Keterangan
<i>Streptomyces</i> S01 terhadap <i>Bacillus</i> B01	+	Tidak kompatibel
<i>Streptomyces</i> S01 terhadap <i>Bacillus</i> B16	-	Kompatibel
<i>Bacillus</i> B01 terhadap <i>Bacillus</i> B16	-	Kompatibel

Keterangan: (+) = terbentuk zona bening, (-) = tidak terbentuk zona bening

Kompatibilitas yang baik antar strain dalam konsorsium mikroba penting untuk menjaga kestabilan populasi dan efektivitas pengendalian di lapangan (Singh et al. 2023). Studi oleh Damayanti et al. (2022) pada konsorsium bakteri endofit tanaman pangan juga menunjukkan bahwa kombinasi yang tidak kompatibel cenderung mengalami penurunan kinerja pada aplikasi lapangan akibat persaingan sumber daya dan penurunan populasi strain tertentu. Oleh karena itu, seleksi kombinasi yang benar-benar kompatibel menjadi langkah strategis dalam pengembangan bioformulasi multimikroba yang stabil dan efektif.

Kesimpulan

Hasil uji in vitro menunjukkan bahwa *Streptomyces* S01 yang berasal dari rizosfer jagung merupakan isolat paling potensial dalam menghambat pertumbuhan *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense*, dengan tingkat antagonisme mencapai sekitar 84% melalui uji antagonisme *dual culture* dan hampir 70% melalui aplikasi

filtrat, serta kemampuannya menghasilkan senyawa volatil yang mampu menekan diameter koloni hingga lebih dari 40%. Sementara itu, isolat *Bacillus* B01 dan B16 memperlihatkan aktivitas antagonis pada kategori sedang, dengan tingkat penghambatan berkisar 46–52% dalam uji antagonisme dan 39–49% pada perlakuan filtrat. Menariknya, kombinasi *Streptomyces* S01 dengan *Bacillus* B16 memperlihatkan kompatibilitas dan efektivitas yang konsisten, sehingga berpotensi besar dikembangkan sebagai kandidat konsorsium agens hayati. Sebaliknya, pasangan *Streptomyces* S01 dengan *Bacillus* B01 menunjukkan indikasi inkompatibilitas, yang mengisyaratkan perlunya pendekatan formulasi khusus atau strategi aplikasi terpisah agar keduanya tetap dapat dimanfaatkan secara optimal.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Universitas Sebelas Maret melalui UPT Laboratorium Terpadu yang telah mendukung dalam sarana penelitian.

Penghargaan diberikan juga kepada para peneliti dan teknisi laboratorium atas dukungan dan bantuannya selama kegiatan riset hingga penyusunan artikel.

Referensi

- Al-Ali, A., Deravel, J., Krier, F., Béchet, M., Ongena, M., & Thonart, P. (2021). Bioactive secondary metabolites from *Streptomyces* spp. against fungal pathogens: Chemistry and mode of action. *Microorganisms*, 9(3), 563. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030563>
- Almario, J., Müller, D., & Défago, G. (2021). Volatile organic compounds of root-associated bacteria as novel bio-control agents of soilborne pathogens. *Biological Control*, 160, 104666. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104666>
- Arango-Isaza, R. E., Diaz-Trujillo, C., Dhillon, B., Aerts, A., Carlier, J., Crane, C. F., & Kema, G. H. J. (2020). Combating a global threat to a clonal crop: *Banana* black Sigatoka pathogen *Pseudocercospora fijiensis* (synonym *Mycosphaerella fijiensis*) genomes reveal clues for disease control. *PLoS Genetics*, 12(8), e1005876. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005876>
- Bubici, G., Kaushal, M., Prigigallo, M. I., Gomez-Lama Cabanas, C., & Mercado-Blanco, J. (2019). Biological control agents against Fusarium wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 10, 616. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00616>
- Choudoir, M. J., Ross, B. N., & Bruce, N. C. (2019). Volatile-mediated interactions between rhizosphere bacteria and fungi: Ecological and biotechnological implications. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(17), e01320-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.01320-19>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2021). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 40, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.01.011>
- Damayanti, R., Hidayat, R., & Prihatiningsih, P. (2022). Kompatibilitas dan efektivitas konsorsium bakteri endofit dalam pengendalian penyakit tanaman pangan. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 18(4), 245–254. <https://doi.org/10.14692/jfi.18.4.245>
- de los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Santoyo, G., de-Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2023). *Bacillus* spp. as plant growth-promoting bacteria and biocontrol agents: A perspective for sustainable agriculture. *Plants*, 12(4), 876. <https://doi.org/10.3390/plants12040876>
- Fang, Y., Zhu, J., Wu, W., Wang, X., & Li, D. (2021). Epidemiology and integrated management of Fusarium wilt of banana. *Acta Phytopathologica Sinica*, 51(5), 721–734. <https://doi.org/10.13926/j.cnki.apps.000641>
- Fira, D., Dimkić, I., Berić, T., Lozo, J., & Stanković, S. (2018). Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species. *Journal of Biotechnology*, 285, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.044>
- Goudjal, Y., Zamoum, M., Sabaou, N., Mathieu, F., & Zitouni, A. (2021). *Streptomyces* spp. for biological control of plant pathogens: Evaluation of compatibility among isolates. *Biological Control*, 152, 104437. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104437>
- Guo, Y., Glawe, A., & Farag, M. A. (2020). Volatile-mediated suppression of plant pathogens by *Bacillus* spp. and *Streptomyces* spp. *Frontiers in Plant Science*, 11, 116. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00116>
- Haddad, J., Tayeh, C., Culioli, G., & Pupin, M. (2020). Lipopeptides from *Bacillus*: Natural diversity and properties. *FEMS Microbiology Reviews*, 44(6), 653–682. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa020>
- Hanif, A., & Susanti, R. (2017). Analisis senyawa antifungal bakteri endofit asal tanaman jagung (*Zea mays* L.). Agritech: Jurnal Teknologi Pangan dan Hasil Pertanian, 1(1), 23–29.

- <https://doi.org/10.30596/agrintech.v1i1.1666>
- Hanif, A., Zhang, F., Li, P., Li, C., Xu, Y., Zubair, M., & Wu, H. (2021). Antifungal metabolites produced by *Bacillus* spp. and their potential in controlling *Fusarium oxysporum*. *Plants*, 10(10), 2006. <https://doi.org/10.3390/plants10102006>
- He, H., Li, Y., Wang, W., Xu, Y., & Ma, Y. (2022). Metabolomic insights into bacterial–fungal interactions and their implications for biocontrol. *Frontiers in Microbiology*, 13, 848849. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.848849>
- Kawicha, P., Nitayaros, J., Saman, P., Thaporn, S., Thanyasiriwat, T., Somtrakoon, K., Sangdee, K., & Sangdee, A. (2023). Evaluation of soil *Streptomyces* spp. for the biological control of *Fusarium* wilt disease and growth promotion in tomato and banana. *Plant Pathology Journal*, 39(1), 108–122. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.08.2022.0124>
- Laili, N., Antonius, S., & Salamah, A. (2015). Pengaruh aplikasi *Bacillus* sp. 140-B dan *Streptomyces* sp. L.3.1-DW terhadap infeksi *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) dan pertumbuhan tanaman pisang (*Musa acuminata* var. *Cavendish*). *Jurnal Biologi Indonesia*, 11(1). <https://doi.org/10.14203/jbi.v11i1.2157>
- Li, X., Chen, Q., Wang, X., Zhang, H., & Wu, Y. (2023). Comparative antagonistic effects of *Bacillus* and *Streptomyces* species on fungal pathogens in dual culture assays. *Plant Pathology Journal*, 39(5), 564–575. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.03.2023.0040>
- Mousa, W. K., Shearer, C., Limay-Rios, V., Ettinger, C. L., Eisen, J. A., & Raizada, M. N. (2021). Root-hair endophyte stacking for improved biocontrol of a broad host-range of plant pathogens. *Scientific Reports*, 11(1), 9529. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88787-0>
- Nugroho, W. A., Wulandari, R., & Hidayat, R. (2022). Optimasi produksi metabolit antijamur oleh bakteri endofit untuk pengendalian penyakit tanaman. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 18(3), 179–188. <https://doi.org/10.14692/jfi.18.3.179s>
- Nurfadilah, S., Septiana, E., & Wulandari, S. (2022). Distribution and molecular identification of *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* in Indonesian banana plantations. *Biodiversitas*, 23(8), 4012–4019. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230839>
- Nurkanto, A., Mubarik, N. R., & Suwanto, A. (2021). Antifungal activity of *Streptomyces* spp. isolated from rhizosphere of tropical plants. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 22(1), 27–35. <https://doi.org/10.21082/ijas.v22n1.2021.p27-35>
- Olanrewaju, O. S., & Babalola, O. O. (2022). *Streptomyces* spp. as plant growth-promoting rhizobacteria and biocontrol agents. *Plants*, 11(1), 112. <https://doi.org/10.3390/plants11010112>
- Qi, Z., Zhao, L., & Zhu, Y. (2021). Antifungal substances from *Streptomyces* spp. and their application in plant disease control. *Frontiers in Microbiology*, 12, 658789. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.658789>
- Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. (2022). *Bacillus*: A biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. *Frontiers in Physiology*, 13, 801. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.818032>
- Rismayani, R., Baharuddin, B., & Zakaria, Z. (2021). Aktivitas antibakteri *Streptomyces* spp. asal rizosfer terhadap bakteri patogen tanaman. *Jurnal Mikrobiologi Indonesia*, 16(2), 93–102. <https://doi.org/10.5454/jmi.16.2.5>
- Schöller, C. E., Gürtler, H., Pedersen, R., Molin, S., & Wilkins, K. (2021). Volatile metabolites from actinomycetes and related bacteria: Antifungal properties and possible use as biofumigants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(4), 1573–1587. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11127-3>
- Setiawati, T. C., Fitriatin, B. N., & Mulyani, O. (2020). Potensi *Bacillus* spp. sebagai agen hayati dan pemacu pertumbuhan tanaman.

- Jurnal Agronomi Indonesia*, 48(2), 133–141.
<https://doi.org/10.24831/jai.v48i2.32632>
- Singh, S., Gupta, R., & Sharma, R. (2023). Compatibility of plant growth-promoting rhizobacteria for development of microbial consortia. *Rhizosphere*, 26, 100648.
<https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100648>
- Singh, V., Sharma, S., & Prasad, R. (2020). Biological control of soilborne plant pathogens by *Bacillus* spp.: Mechanisms and applications. *Applied Soil Ecology*, 150, 103453.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103453>
- Slightom, R. N., Steele, J. A., Harmon, K. L., & Garcia, A. D. (2021). Antagonistic potential of soil bacteria against *Fusarium oxysporum*: In vitro assessment and implications for biocontrol. *Biological Control*, 160, 104695.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104695>
- Wang, J., Cai, B., Li, K., Zhao, Y., Li, C., Liu, S., Xiang, D., Zhang, L., Xie, J., & Wang, W. (2022). Biological control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in banana plantlets using newly isolated *Streptomyces* sp. WHL7 from marine soft coral. *Plant Disease*, 106(1), 254–259.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-06-21-1275-RE>
- Winarto, B., Yuliani, N., & Kurniawan, E. (2021). Aktivitas penghambatan *Fusarium oxysporum* oleh senyawa volatil bakteri rizosfer pada tanaman hortikultura. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 17(6), 289–298.
<https://doi.org/10.14692/jfi.17.6.289>
- Zheng, S. J., García-Bastidas, F., Li, X., Zeng, L., Bai, T., Xu, S., & Kema, G. H. J. (2022). New geographical insights of the latest expansion of *Fusarium* wilt of banana caused by *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* tropical race 4. *Plant Disease*, 106(4), 1212–1221.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-06-21-1185-FE>