HYβRIDA
ISSN : 3031-1314

Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan
Vol. 6 No. 1 Tahun 2026
PrefixDOI:10.3766/hibrida.v1i2.3753

PEMANFAATAN PROBIOTIK CAIR SEBAGAI ALTERNATIF *NON-ANTIBIOTIC GROWTH PROMOTERS* PADA PRODUKSI AYAM BROILER: STUDI KASUS DI PETERNAKAN ALI FARM KABUPATEN SUKABUMI

Julian Topaniarta Raditya[1], Iman Aji Wijoyo[1]
Politeknik Pembangunan Pertanian Malang[1,2]

Email: juliantopa30@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan studi kasus yang bertujuan mengevaluasi pemanfaatan probiotik cair berbasis Lactobacillus sp., Bacillus sp.1, dan Bacillus sp.2 sebagai alternatif non-Antibiotic Growth Promoters (AGP) pada produksi ayam broiler di Peternakan Ali Farm 1 dan Ali Farm 2, Kabupaten Sukabumi. Penelitian dilakukan menggunakan studi implementasi lapang dengan pendekatan observasional komparatif selama 32 hari, terdiri atas kelompok tanpa probiotik (P0) dan kelompok dengan suplementasi probiotik cair dosis 3 ml/L air minum (P1). Parameter yang diamati meliputi bobot badan akhir, konsumsi pakan, *Feed Conversion Ratio* (FCR), *uniformity*, dan mortalitas. Hasil menunjukkan bahwa pemberian probiotik meningkatkan bobot badan akhir, menurunkan FCR dan konsumsi pakan, meningkatkan *uniformity*, serta menurunkan mortalitas. Probiotik cair berpotensi digunakan sebagai alternatif non-AGP dalam produksi ayam broiler.

KATA KUNCI: ayam broiler, probiotik cair, Lactobacillus sp., Bacillus sp., non-AGP

Article History
Received: Januari 2026
Reviewed: Januari 2026
Published: Januari 2026
Plagirism Checker No 293
Prefix DOI : Prefix DOI : 10.8734/HIBRIDA.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Hibrida

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

PENDAHULUAN

Ayam broiler merupakan komoditas unggas yang memainkan peran penting dalam penyediaan protein hewani bagi masyarakat, terutama di Indonesia, karena permintaan daging ayam terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan tingkat konsumsi protein masyarakat yang lebih tinggi (Tua et al., 2025). Ayam broiler dikembangkan untuk menghasilkan daging dalam waktu singkat dengan efisiensi pertumbuhan yang tinggi, sehingga komoditas ini menjadi salah satu pilar utama sektor peternakan dalam menjaga ketahanan pangan protein hewani. Populasi ayam broiler di Indonesia secara konsisten meningkat dan berkontribusi signifikan terhadap pasar daging lokal karena harga jual yang relatif terjangkau dan proses pemeliharaan yang efisien dibandingkan dengan sumber protein lain seperti sapi atau kambing (Tua et al., 2025). Namun, praktik penggunaan *Antibiotic Growth Promoters* (AGP) dalam budidaya ayam broiler telah menimbulkan perhatian terhadap kesehatan hewan dan konsumen. AGP digunakan untuk meningkatkan laju pertumbuhan dan efisiensi pakan dalam waktu singkat, tetapi penggunaan kontinu telah dibatasi bahkan dilarang sejumlah negara karena berpotensi meningkatkan resistensi antimikroba dan residu antibiotik dalam produk unggas, yang memberikan risiko kesehatan bagi manusia (Sihite et al., 2024). Tren global ini memaksa para praktisi peternakan di Indonesia untuk mencari strategi nutrisi

HYβRIDA
ISSN : 3031-1314
Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan
Vol. 6 No. 1 Tahun 2026
PrefixDOI:10.3766/hibrida.v1i2.3753

alternatif yang aman dan efektif guna mendukung produksi broiler tanpa ketergantungan pada AGP (Fadilah et al., 2025).

Sebagai respons terhadap pembatasan AGP, probiotik telah diidentifikasi sebagai salah satu alternatif non-antibiotik yang menjanjikan dalam nutrisi unggas untuk meningkatkan performa produksi dan kesehatan saluran pencernaan ayam broiler (Idowu et al., 2025). Probiotik merupakan mikroorganisme hidup yang ketika diberikan dalam jumlah adekuat dapat meningkatkan keseimbangan mikroflora usus, meningkatkan aktivitas enzimatik pencernaan, serta membantu sistem imun ternak terhadap tantangan patogen (Widiarso & Mubarokah, 2021). Beberapa penelitian di Indonesia menunjukkan penggunaan probiotik seperti Lactobacillus sp. dalam air minum dapat mempengaruhi pertumbuhan harian dan respon imun unggas, sehingga potensi probiotik sebagai alternatif AGP semakin diperhatikan dalam produksi ayam broiler modern (Widiarso & Mubarokah, 2021). Probiotik cair berbasis kombinasi mikroba memiliki potensi untuk memperbaiki kesehatan usus dan performa pertumbuhan ayam broiler melalui mekanisme kompetisi terhadap patogen dan stimulasi aktivitas enzimatik pencernaan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dalam bentuk studi kasus pada peternakan ayam broiler Ali Farm 1 dan Ali Farm 2 di Kabupaten Sukabumi untuk mengevaluasi pemanfaatan probiotik cair sebagai alternatif non-AGP pada kondisi pemeliharaan lapang.

METODE PENELITIAN

Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kasus dengan pendekatan deskriptif komparatif yang dilakukan pada dua unit peternakan ayam broiler, yaitu Ali Farm 1 dan Ali Farm 2 di Kabupaten Sukabumi. Kedua peternakan menerapkan sistem pemeliharaan semi *closed house* dan digunakan sebagai objek perbandingan untuk mengevaluasi performa produksi ayam broiler pada kondisi pemeliharaan lapang.

Kelompok perlakuan P1 (dengan suplementasi probiotik cair) dipelihara di Ali Farm 1, sedangkan kelompok P0 (tanpa probiotik) dipelihara di Ali Farm 2. Manajemen pemeliharaan pada kedua kandang diseragamkan meliputi jenis ransum, program kesehatan, kepadatan ternak, sistem pemberian pakan dan air minum, serta lama periode pemeliharaan. Perbedaan antara kedua kandang terutama terkait dengan lokasi wilayah pemeliharaan dan diperlakukan sebagai bagian dari kondisi lapang dalam studi kasus ini. Perbandingan performa produksi dilakukan berdasarkan bobot badan akhir, konsumsi pakan, *Feed Conversion Ratio* (FCR), uniformity, mortalitas, dan Indeks Performance (IP).

Materi dan Perlakuan

Materi penelitian menggunakan ayam broiler pada fase pemeliharaan komersial dengan umur awal, bobot awal, dan strain yang relatif seragam. Penelitian terdiri atas dua perlakuan, yaitu P0 (tanpa probiotik) dan P1 (dengan probiotik cair), yang keduanya dipelihara pada kandang tipe semi closed house di lokasi wilayah yang berbeda. Perbedaan lokasi tersebut merupakan kondisi lapang, namun homogenisasi lingkungan dan manajemen tetap dilakukan melalui penerapan standar pemeliharaan yang sama, meliputi jenis ransum, program kesehatan, kepadatan ternak, serta lama periode pemeliharaan. Perlakuan probiotik

HYβRIDA
ISSN : 3031-1314
Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan
Vol. 6 No. 1 Tahun 2026
PrefixDOI:10.3766/hibrida.v1i2.3753

cair yang mengandung Lactobacillus sp., Bacillus sp.1, dan Bacillus sp.2 diberikan melalui air minum dengan dosis 3 ml per liter selama 7 jam per hari selama 32 hari, sedangkan P0 dipelihara tanpa penambahan probiotik.

Parameter yang Diamati

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi aspek performa produksi ayam broiler, yaitu bobot badan akhir, konsumsi pakan, Feed Conversion Ratio (FCR), uniformity, dan mortalitas. Bobot badan akhir diukur pada akhir periode pemeliharaan, sedangkan konsumsi pakan dicatat selama masa pemeliharaan. Nilai FCR dihitung berdasarkan perbandingan antara konsumsi pakan dan pertambahan bobot badan. Uniformity digunakan untuk menggambarkan keseragaman bobot badan ayam dalam satu kelompok, sementara mortalitas dicatat untuk mengevaluasi tingkat kelangsungan hidup ayam broiler selama penelitian berlangsung.

Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan analisis deskriptif kuantitatif untuk menggambarkan performa produksi ayam broiler pada masing-masing kelompok perlakuan. Hasil pengamatan dibandingkan antara kelompok ayam broiler yang diberi suplementasi probiotik cair dan kelompok tanpa suplementasi probiotik untuk melihat kecenderungan pengaruh pemberian probiotik terhadap parameter yang diamati.

HASIL

Tabel 1. Performa Produksi Ayam Broiler

Parameter	P0 (Tanpa Probiotik)	P1 (Probiotik)
Bobot badan akhir (kg/ekor)	1,50	1,90
Konsumsi pakan (kg/ekor)	3,30	3,00
Feed Conversion Ratio (FCR)	2.20	1,58
Uniformity (%)	79	87
Mortalitas (%)	3	5
Umur Panen (Hari)	32	32
Indeks Performance (IP)	202,4	364,7

PEMBAHASAN

Pemberian Lactobacillus sp. sebagai bagian dari probiotik cair menunjukkan peran penting dalam menjaga keseimbangan mikroflora usus ayam broiler, yang tercermin dari peningkatan performa produksi pada kelompok probiotik. Berdasarkan hasil penelitian (Tabel 1), ayam broiler yang mendapatkan suplementasi probiotik memiliki bobot badan akhir lebih tinggi, yaitu 1,90 kg/ekor, dibandingkan kelompok tanpa probiotik sebesar 1,50 kg/ekor. Peningkatan bobot badan ini berkaitan dengan kemampuan Lactobacillus sp. dalam menciptakan lingkungan saluran pencernaan yang lebih stabil melalui produksi asam organik, sehingga mendukung penyerapan nutrien secara optimal. Kondisi ini sejalan dengan laporan

HYβRIDA
ISSN : 3031-1314
Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan
Vol. 6 No. 1 Tahun 2026
PrefixDOI:10.3766/hibrida.v1i2.3753

bahwa Lactobacillus sp. berperan dalam menjaga keseimbangan mikroflora usus unggas dan meningkatkan performa pertumbuhan (Febrianta et al., 2025). Penelitian juga menunjukkan suplementasi Bacillus subtilis meningkatkan berat badan, efisiensi pakan, dan integritas penghalang usus pada ayam broiler (Khongthong et al., 2025).

Selain menjaga keseimbangan mikroflora, Lactobacillus sp. juga berperan dalam penekanan bakteri patogen melalui mekanisme kompetisi eksklusi dan produksi metabolit antimikroba. Dampak mekanisme ini tercermin dari nilai mortalitas yang lebih rendah pada kelompok probiotik (3%) dibandingkan kelompok tanpa probiotik (5%), serta kondisi pemeliharaan yang lebih stabil selama periode penelitian. Penurunan tekanan patogen di saluran cerna memungkinkan ayam broiler memanfaatkan energi dan nutrien secara lebih efisien untuk pertumbuhan, bukan untuk respon stres atau penyakit. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa probiotik dapat menekan kolonisasi bakteri patogen seperti Salmonella dan Escherichia coli di saluran pencernaan unggas (S. Zhang et al., 2025). Kombinasi probiotik multi-strain dapat memperbaiki mikrobiota usus dan profil metabolit usus yang positif pada ayam broiler (M. Zhang et al., 2025).

Peran Bacillus sp.1 dan Bacillus sp.2 dalam probiotik cair erat kaitannya dengan kemampuan mikroba ini untuk memproduksi enzim pencernaan seperti protease dan amilase, yang berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi pemanfaatan nutrien. Probiotik meningkatkan populasi bakteri baik, menekan patogen, serta membantu penyerapan nutrien yang berkontribusi pada peningkatan performa (Idowu et al., 2025). Hal ini tercermin dalam hasil penelitian (Tabel 1) melalui nilai Feed Conversion Ratio (FCR) yang lebih rendah pada kelompok probiotik (1,58) dibandingkan kelompok tanpa probiotik (2,20), menunjukkan bahwa ayam broiler yang menerima probiotik mampu memanfaatkan pakan secara lebih efisien untuk pertumbuhan. Hasil ini sejalan dengan temuan bahwa strain Bacillus dalam probiotik dapat menghasilkan berbagai enzim pencernaan, termasuk protease dan amilase, yang membantu degradasi protein dan karbohidrat kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana sehingga lebih mudah diserap oleh usus unggas, sehingga mendukung pertumbuhan dan efisiensi konversi pakan (Khalid et al., 2022).

Peningkatan efisiensi pemanfaatan pakan pada kelompok probiotik tercermin dari konsumsi pakan yang lebih rendah, yaitu 3,00 kg/ekor, dibandingkan kelompok tanpa probiotik sebesar 3,30 kg/ekor, sementara bobot badan akhir tetap lebih tinggi pada kelompok probiotik seperti terlihat pada Tabel 1. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kecernaan nutrien pada ayam broiler yang menerima probiotik cair. Dukungan bukti dari literatur nasional menunjukkan bahwa penambahan probiotik dalam ransum broiler terbukti meningkatkan nilai kecernaan protein dan serat kasar, yang merupakan komponen penting dalam proses pencernaan nutrien (Sitorus & Lumbangaol, 2025). Penelitian tersebut melaporkan bahwa penambahan probiotik berpengaruh nyata terhadap peningkatan tingkat kecernaan protein dan serat kasar pada ayam broiler, yang menunjukkan bahwa probiotik dapat membantu mendorong proses pencernaan nutrien sehingga konsumsi pakan yang lebih rendah tetap menghasilkan pertumbuhan yang lebih baik (Sitorus & Lumbangaol, 2025).

Peran Bacillus sp.1 dan Bacillus sp.2 dalam probiotik cair juga berkaitan dengan dukungan terhadap sistem imun ayam broiler, yang dapat dilihat dari nilai mortalitas yang lebih rendah pada kelompok probiotik (3 %) dibandingkan kelompok tanpa probiotik (5 %), serta uniformity yang lebih tinggi pada kelompok probiotik (87 %) daripada kontrol (79 %) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Probiotik terbukti membantu ayam broiler menghadapi stress panas dengan peningkatan berat badan serta pengurangan stress oksidatif

HYβRIDA
ISSN : 3031-1314
Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan
Vol. 6 No. 1 Tahun 2026
PrefixDOI:10.3766/hibrida.v1i2.3753

(Hashemitabar & Hosseinian, 2024). Temuan serupa dilaporkan dalam studi yang menunjukkan bahwa pemberian probiotik berbasis Bacillus, seperti Bacillus subtilis dan Bacillus coagulans, tidak hanya meningkatkan performa pertumbuhan tetapi juga berperan dalam perbaikan kondisi histomorfologi usus dan respon imun ayam broiler, termasuk kemampuan untuk mempertahankan populasi mikroba yang menguntungkan di saluran cerna yang berkaitan dengan ketahanan terhadap infeksi (Faiqoh et al., 2023). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa probiotik dari Bacillus sp. dapat memperbaiki struktur duodenum dan memodulasi respon imun usus, yang berimplikasi pada peningkatan kesehatan dan menurunnya mortalitas pada unggas.

Sinergi antara *Lactobacillus* sp., *Bacillus* sp.1, dan *Bacillus* sp.2 dalam probiotik cair menunjukkan potensi sebagai alternatif non-*Antibiotic Growth Promoters* (AGP) pada ayam broiler. Hal ini ditunjukkan oleh perbaikan hampir seluruh indikator performa produksi pada kelompok probiotik sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Kelompok probiotik memiliki bobot badan akhir yang lebih tinggi, nilai *Feed Conversion Ratio* (FCR) yang lebih rendah, konsumsi pakan yang lebih efisien, tingkat keseragaman yang lebih baik, serta mortalitas yang lebih rendah dibandingkan kelompok tanpa probiotik. Temuan ini sejalan dengan laporan jurnal Indonesia yang menyatakan bahwa pemberian probiotik berbasis Lactobacillus sp. dan Bacillus subtilis berhubungan dengan perbaikan profil darah dan parameter fisiologis unggas, yang mencerminkan dukungan terhadap fungsi imun dan keseimbangan metabolik ternak serta berdampak positif pada performa produksi secara keseluruhan (Yulinarsari et al., 2025). Dengan demikian, penggunaan probiotik kombinasi mikroba tersebut berpotensi menjadi substitusi AGP dalam sistem produksi ayam broiler modern (Yulinarsari et al., 2025).

Selain parameter tunggal seperti bobot badan, FCR, konsumsi pakan, keseragaman, dan mortalitas, penelitian ini juga menggunakan *Indeks Performance* (IP) untuk menilai performa produksi ayam broiler secara komprehensif. Indeks Performance merupakan ukuran integratif yang memperhitungkan bobot badan akhir, efisiensi pakan (*Feed Conversion Ratio*), tingkat kelangsungan hidup, dan umur panen dalam satu angka untuk mencerminkan keberhasilan produksi ternak broiler dalam satu periode pemeliharaan. Nilai IP yang lebih tinggi menunjukkan performa produksi yang lebih baik secara keseluruhan, karena mempertimbangkan efisiensi pakan, ketahanan hidup, serta pertumbuhan badan ayam secara bersamaan. Dalam penelitian serupa, suplementasi probiotik pada ayam broiler dilaporkan mampu meningkatkan nilai IP secara signifikan (Nindria et al., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa probiotik tidak hanya meningkatkan parameter individual tetapi juga performa produksi secara holistik ketika dibandingkan dengan kontrol tanpa probiotik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi kasus di Peternakan Ali Farm 1 dan Ali Farm 2 Kabupaten Sukabumi, pemberian probiotik cair berbasis Lactobacillus sp., Bacillus sp.1, dan Bacillus sp.2 berpotensi digunakan sebagai alternatif non-Antibiotic Growth Promoters (AGP) dalam produksi ayam broiler. Suplementasi probiotik cair mampu meningkatkan performa produksi yang ditunjukkan oleh bobot badan akhir yang lebih tinggi, efisiensi pemanfaatan pakan yang lebih baik yang tercermin dari nilai Feed Conversion Ratio (FCR) yang lebih rendah, konsumsi pakan yang lebih efisien, tingkat keseragaman yang lebih baik, serta mortalitas yang lebih rendah dibandingkan kelompok tanpa probiotik. Selain itu, nilai Indeks Performance (IP) yang lebih tinggi pada kelompok probiotik menunjukkan bahwa penggunaan probiotik cair mampu

HYβRIDA
ISSN : 3031-1314
Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan
Vol. 6 No. 1 Tahun 2026
PrefixDOI:10.3766/hibrida.v1i2.3753

meningkatkan performa produksi ayam broiler secara keseluruhan pada kondisi pemeliharaan lapang.

DAFTAR PUSTAKA

Fadilah, R., Darmawan, A., & Nadia, R. (2025). Challenges and constraints to the sustainability of poultry farming in Indonesia. *Animal Biosciene*, *38*(4), 802–817.

Faiqoh, B. E., Lamid, M., Damayanti, R., Chusniati, S., Anam, M., Arif, A., Warsito, S. H., Lestari, T. D., Raharjo, H. M., Rehman, S., & Hussain, M. A. (2023). Effect of Probiotic Administration of Bacillus subtilis and Bacillus coagulans Isolate on Growth Performance in Broiler Chicken. *Jurnal Medik Veteriner*, *6*(3), 99–106. https://doi.org/10.20473/jmv.vol6.iss3.2023.99

Febrianta, H., Mangindaan, D., & Meindrawan, B. (2025). Systematic review of the synbiotics as additives that affect the productivity , health status , and meat quality of poultry. *Agrivet*, *13*(1), 75–87.

Hashemitabar, S. H., & Hosseinian, S. A. (2024). The comparative effects of probiotics on growth , antioxidant indices and intestinal histomorphology of broilers under heat stress condition. *Scientific Reports*, *14*(1), 1–16. https://doi.org/10.1038/s41598-024-66301-9

Idowu, P. A., Mpofu, T. J., Magoro, A. M., Modiba, M. C., Nephawe, K. A., & Mtileni, B. (2025). Impact of probiotics on chicken gut microbiota , immunity , behavior , and productive performance a systematic review. *Frontiers in Animal Science*, *6*(March), 1–14. https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1562527

Khalid, A., Khalid, F., Mahreen, N., & Hussain, S. M. (2022). Effect of Spore-Forming Probiotics on the Poultry Production : A Review. *Food Science of Animal Resource*, *42*(6), 968–980.

Khongthong, S., Piewngam, P., Roekngam, N., & Maliwan, P. (2025). Effects of dietary Bacillus subtilis 14823 on growth performance , gut barrier integrity and inflammatory response of broilers raised in a stressful tropical environment. *Poultry Science*, *104*(1), 104518. https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104518

Nindria, M.W., Siswoyo, Wijoyo, I.A. (2025). Pemanfaatan Limbah Susu Sebagai Probiotik Pada Air Minum Terhadap Performance dan Income Over Feed Cost (IOFC) Ayam Broiler. *Jurnal Ilmiah Peternakan Terpadu*, 13(1):43-60.

Sihite, H. R., Mairizal, M., & Akmal, A. (2024). Effect of Synbiotics Administering Probiotics FM and MOS In the Ration on Broiler Carcass Weight. *Jurnal Sain Peternakan Indonesia*, *19*(3), 170–175.

Sitorus, H., & Lumbangaol, I. R. (2025). The Effect Of The Addition Of Starbio Probiotics In Rations On The Levels Of Digestibility Of Protein, Crude Fiber, And Water Content In Broiler Faces. *Jurnal Ilmiah Peternakan*, *6*(2), 31–39.

Tua, D. U., Cepriadi, & Herlon, M. (2025). Analisis Keberlanjutan Usaha Peternakan Ayam

HYβRIDA
ISSN : 3031-1314
Jurnal Pertanian, Peternakan, Perikanan
Vol. 6 No. 1 Tahun 2026
PrefixDOI:10.3766/hibrida.v1i2.3753

Broiler yang Bermitradengan PT Charoen Pokphand Jaya Farm di Kecamatan Tapung Kabupaten Kampar. *Mimbar Agribisnis: Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, *11*(2), 3938–3950.

Widiarso, B. P., & Mubarokah, W. W. (2021). Pengaruh Pemberian Probiotik Berbasis Lactobacillus Sp Terhadap Pertambahan Berat Badan Harian dan Titer Antibodi ND Ayam Broiler. *Prosiding Seminar Nasional Polbangtan Yogyakarta Magelang 2021 Jurusan Peternakan*, 346–351.

Yulinarsari, A. P., Ningsih, N., Muhamad, N., Syaikhullah, G., Dewi, A. C., & Poernomo, H. (2025). Gambaran Profil Darah Ayam Kampung dengan Suplementasi Probiotik Lactobacillus sp . dan Bacillus subtilis pada Pakan. *Jurnal Ilmu Nutrisi Dan Teknologi Pakan*, *23*(1), 10–16.

Zhang, M., Li, X., Xiao, Y., Cai, R., Pan, X., & Hu, Y. (2025). Effects of a new compound probiotic on growth performance , antioxidant capacity , intestinal health , gut microbiota and metabolites of broilers. *Poultry Science*, *104*(8), 105215. https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105215

Zhang, S., Yu, M., Zhao, T., Geng, Y., Liu, Z., & Zhang, X. (2025). Effects of probiotics on gut microbiota in poultry. *Microbiology*, *11*(3), 754–768. https://doi.org/10.3934/microbiol.2025032