



Peran *Agrobacterium Tumefaciens* dalam Peningkatan Ketahanan Pangan Tanaman Transjenik Tomat (*Solanum Lycopersidicum*)

Mardewi^{1*}, Rifqatul Wafiah¹, Rachmawati¹

¹ Pendidikan Biologi, FMIPA, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1773>

Article Info:

Received : 20 Januari 2026
Revised : 10 Februari 2026
Accepted : 17 Februari 2026
Published : 30 Maret 2026

Correspondence:

Mardewi

Phone: +6285396116519

Abstract: This study aims to examine the role of *Agrobacterium tumefaciens*-mediated genetic transformation in enhancing the productivity and quality of tomato (*Solanum lycopersicum*) to support sustainable food security. The review focuses on the optimization of the Ti plasmid system, improvement of T-DNA transfer efficiency, regulation of gene expression through constitutive and inducible promoters, and strategies for post-transformation bacterial control. This research employs a qualitative descriptive method using a Systematic Literature Review (SLR) approach based on PRISMA guidelines. Data were obtained from reputable scientific articles indexed in Scopus and published between 2022 and 2025, and were analyzed through thematic synthesis. The findings indicate that *Agrobacterium*-mediated transformation results in stable gene integration with consistent Mendelian inheritance patterns across generations. Applications in transgenic tomatoes demonstrate increased fruit number and weight, enhanced lycopene and vitamin content, delayed ripening processes, and improved resistance to both biotic and abiotic stresses. Post-transformation control methods, such as bacteriophage application and quorum sensing inhibition, have been shown to improve biosafety and efficiency. Overall, this study confirms that the optimization of *Agrobacterium tumefaciens*-based genetic transformation systems consistently produces stable gene integration, enhances tomato productivity and fruit quality, and strengthens resistance to environmental stresses, making it an effective and applicable approach for developing transgenic crops to support sustainable food security.

Keywords: *Agrobacterium tumefaciens*; genetic transformation; food security.

Citation: Mardewi, Wafiah, R., & Rachmawati. (2026). Peran *Agrobacterium Tumefaciens* dalam Peningkatan Ketahanan Pangan Tanaman Transjenik Tomat (*Solanum Lycopersidicum*). *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(2), 826–835. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1773>

Pendahuluan

Ketahanan pangan global menghadapi tantangan serius akibat pertumbuhan populasi, perubahan iklim, degradasi lahan, serta meningkatnya tekanan biotik dan abiotik terhadap tanaman pangan. Kondisi ini menuntut adanya inovasi teknologi yang mampu meningkatkan produktivitas dan kualitas tanaman secara berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah pemanfaatan bioteknologi melalui transformasi genetik tanaman.

Namun demikian, permasalahan utama dalam pengembangan teknologi ini adalah belum optimalnya efisiensi sistem transformasi genetik berbasis

Agrobacterium tumefaciens, baik dari aspek transfer T-DNA, stabilitas integrasi gen, pengaturan ekspresi gen, maupun pengendalian bakteri pascatransformasi. Selain itu, keterkaitan antara optimalisasi sistem transformasi tersebut dengan peningkatan produktivitas, kualitas hasil, serta ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan masih belum terintegrasi secara komprehensif dalam satu kajian sistematis.

Dalam konteks ini, *Agrobacterium tumefaciens* merupakan sistem transformasi genetik yang paling banyak digunakan dalam pengembangan tanaman transgenik modern karena kemampuannya mentransfer T-DNA ke dalam genom tanaman secara alami.

Email: dewidewimardewi@gmail.com

Pemanfaatan sistem ini telah diaplikasikan untuk meningkatkan hasil dan kualitas tanaman, termasuk pada tomat (*Solanum lycopersicum*). Transformasi gen *SIMX1* yang dimediasi oleh *Agrobacterium* terbukti mampu meningkatkan produktivitas, kualitas nutrisi, serta daya simpan buah (Ewas et al., 2022). Optimalisasi efisiensi transfer gen juga dilakukan melalui miniaturisasi plasmid Ti (Zdouc et al., 2025) pengembangan sistem promotor konstitutif dan inducible berbasis integron untuk kontrol ekspresi gen yang lebih presisi (Keat et al., 2023). serta peningkatan efektivitas agroinfiltrasi sebagai metode ekspresi gen sementara dalam percepatan seleksi sifat unggul (Primasiwi et al., 2024).

Keberhasilan transformasi tidak hanya ditentukan oleh proses transfer gen, tetapi juga oleh pengendalian bakteri pascatransformasi. Penggunaan bakteriofag untuk mengontrol populasi *Agrobacterium* setelah transformasi terbukti mengurangi kerusakan jaringan tanaman (Transformation et al., 2022; Dharmawan et al., 2025) Alternatif pengendalian melalui senyawa antibakteri alami juga dikembangkan untuk meningkatkan keamanan prosedur laboratorium (Cnq- et al., 2025). Pendekatan komputasional dalam menghambat quorum sensing bakteri menjadi strategi tambahan untuk mencegah pembentukan tumor selama proses transformasi (Barasarathi et al., 2025). Studi mengenai sinyal komunikasi bakteri patogen turut memperkuat pemahaman terhadap mekanisme interaksi bakteri-tanaman (Gan et al., 2024).

Pada tingkat molekuler, interaksi antara bakteri dan tanaman melibatkan sistem pengenalan reseptor serta regulasi hormon inang. Identifikasi reseptor tanaman terhadap pola bakteri memberikan dasar biologis dalam meningkatkan kompatibilitas transformasi (Fan et al., 2022), sementara regulasi auksin yang dipengaruhi faktor molekuler tanaman berperan penting dalam respons terhadap infeksi *Agrobacterium* (Hooykaas, 2023). Keamanan ekologis juga menjadi perhatian, termasuk kompetisi mikroba di lingkungan tanah (Santos et al., 2024) dan pengawasan produk GMO menggunakan marka genetik (Muthanna, 2024).

Kontribusi teknologi transformasi gen berbasis *Agrobacterium* terhadap ketahanan pangan tidak berdiri sendiri, tetapi terintegrasi dengan pendekatan peningkatan ketahanan biotik dan kualitas lingkungan. Transfer gen defensin untuk ketahanan penyakit (Sjahril et al., 2022) serta pengeditan genom untuk resistensi terhadap patogen (Luu et al., 2023) menunjukkan arah penguatan tanaman pangan masa depan. Dukungan ekosistem rhizosfer melalui bakteri pemacu pertumbuhan (Poonguzhali et al., 2025; Komicho & Tipayno, 2025) serta pemahaman degradasi residu organik oleh mikroorganisme tanah (Kuatsjah et al., 2024) semakin memperkuat sistem produksi

berkelanjutan. Efisiensi produksi juga dapat ditingkatkan melalui inovasi media kultur berbasis molase yang lebih ekonomis (Watthanasakphuban et al., 2023), serta teknik penghantaran biomolekul presisi menggunakan microneedles (Shen et al., 2025). Stabilitas integrasi gen tunggal turut menjamin keberlanjutan sifat unggul pada generasi berikutnya (Hilman et al., 2025), sementara teknik priming benih mendukung peningkatan viabilitas awal tanaman (Rozita et al., 2024).

Berdasarkan sintesis tersebut, penelitian berjudul “Peran *Agrobacterium tumefaciens* dalam Meningkatkan Ketahanan Pangan melalui Tanaman Transgenik” bertujuan untuk menganalisis secara sistematis bagaimana optimalisasi sistem transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens*, pengendalian biologis, regulasi molekuler, serta integrasi ekosistem produksi berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas, kualitas, dan keberlanjutan tanaman transgenik sebagai pilar ketahanan pangan.

Metode

Metode penelitian yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan mengacu pada pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) dan menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif. Studi kepustakaan dilakukan dengan menelaah, membandingkan, serta mensintesis berbagai hasil penelitian yang relevan dengan topik peran *Agrobacterium tumefaciens* dalam meningkatkan ketahanan pangan melalui tanaman transgenik. Fokus kajian diarahkan pada aspek transformasi gen berbasis plasmid Ti, optimalisasi sistem promotor, efisiensi transfer T-DNA, pengendalian pascatransformasi, serta implikasinya terhadap peningkatan produktivitas dan kualitas tanaman, khususnya tomat.

Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis scopus menggunakan kata kunci “*Agrobacterium tumefaciens*” dengan rentang publikasi tahun 2022–2025. Proses seleksi artikel mengikuti tahapan identification, screening, eligibility, dan inclusion sesuai alur PRISMA. Artikel yang disertakan adalah penelitian asli yang secara langsung membahas mekanisme transformasi gen menggunakan *Agrobacterium tumefaciens*, optimalisasi sistem molekuler, atau kontribusinya terhadap peningkatan hasil, kualitas nutrisi, ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik, serta keberlanjutan sistem produksi pertanian.

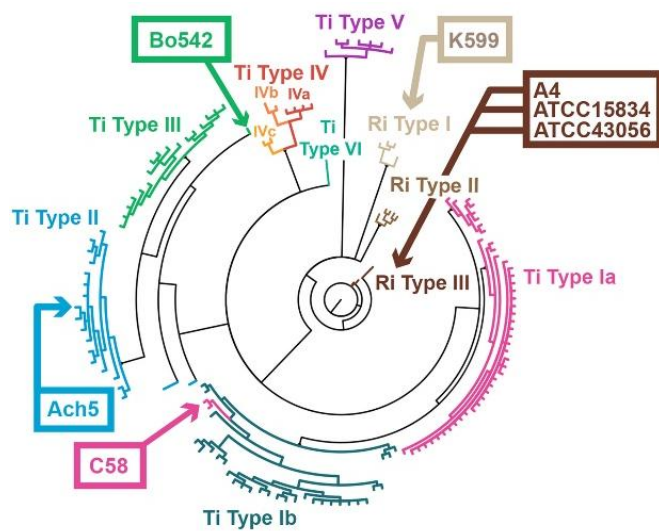
Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola temuan terkait efisiensi transformasi, stabilitas ekspresi gen, keamanan biologis, serta dampaknya terhadap peningkatan produktivitas dan kualitas hasil pertanian. Hasil sintesis digunakan untuk merumuskan gambaran integratif

mengenai kontribusi teknologi transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens* dalam mendukung pengembangan bioteknologi tanaman yang berkelanjutan sebagai bagian dari strategi penguatan ketahanan pangan.

Hasil dan Diskusi

Karakteristik dan Mekanisme Kerja *Agrobacterium tumefaciens* dalam Transformasi Genetik.

Pemanfaatan *Agrobacterium tumefaciens* sebagai vektor alami transformasi genetik tanaman didasarkan pada kemampuannya mentransfer segmen DNA yang dikenal sebagai T-DNA (Transfer DNA) dari plasmid tumor-inducing (Ti) ke dalam genom tanaman inang. Plasmid Ti merupakan elemen genetik besar yang membawa gen-gen virulensi (vir genes) serta daerah T-DNA yang dibatasi oleh sekuens border kiri dan kanan.



(b)

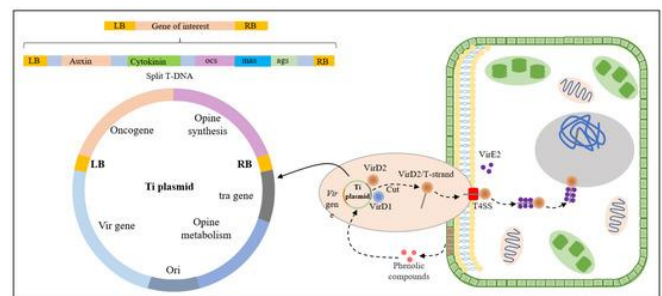
Laboratory strain examples	Chromosomal background	Ti/Ri plasmid
AGL1, EHA105	C58	pTiBo542 (disarmed)
GV3101::pMP90, ABI LBA4404	C58	pTiC58 (disarmed)
ArPORT1, 18r12	Ach5	pTiAch5 (disarmed)
R1000	K599	pRi2659 (disarmed)
AR1193, AR10	C58	pRiA4 (wild)
MSU440, ARqua1	ATCC43056	pRiATCC15834 (wild)
R1601	ATCC43056	pRiATCC43056 (wild)
		pRiA4 (wild)

Gambar 1. Filogeni plasmid strain *Agrobacterium* Ti dan Ri (Gorologia et al., 2025).

Pada kondisi alami, T-DNA mengandung gen penyebab pembentukan tumor (crown gall) dan sintesis opine. Namun, dalam sistem rekayasa genetika modern, gen patogenik tersebut dihilangkan dan diganti dengan gen target yang diinginkan, sehingga memungkinkan ekspresi sifat unggul tanpa menimbulkan gejala penyakit pada tanaman (Keat et al., 2023). Modifikasi ini menjadikan sistem plasmid Ti sebagai platform

molekuler yang stabil dan fleksibel untuk berbagai aplikasi bioteknologi tanaman.

Mekanisme transfer T-DNA dimulai ketika bakteri mengenali sinyal luka pada jaringan tanaman, seperti senyawa fenolik (misalnya asetosiringon), yang mengaktifkan ekspresi gen virulensi pada plasmid Ti. Aktivasi ini memicu pembentukan kompleks T-DNA yang dilapisi protein VirD2 dan VirE2, kemudian ditranslokasikan melalui sistem sekresi tipe IV menuju sel tanaman. Sistem sekresi tipe IV berfungsi sebagai saluran molekuler yang memungkinkan transfer makromolekul lintas membran bakteri dan dinding sel tanaman. Kompleks T-DNA selanjutnya ditranspor ke inti sel dan berintegrasi ke dalam kromosom tanaman melalui mekanisme rekombinasi non-homolog (Fan et al., 2022).



Gambar 2. Diagram skematis transfer dan integrasi T-DNA ke dalam genom tanaman (Su et al., 2023).

Integrasi ini bersifat relatif acak namun stabil, sehingga gen yang disisipkan dapat diwariskan secara mendel pada generasi berikutnya. Keberhasilan integrasi T-DNA tidak hanya ditentukan oleh sistem bakteri, tetapi juga oleh respons fisiologis dan molekuler tanaman inang. Regulasi hormon seperti auksin dan sitokinin berperan penting dalam mengatur pembelahan dan dediferensiasi sel selama proses infeksi dan regenerasi jaringan (Poonguzhali, 2025). Selain itu, komunikasi seluler bakteri melalui mekanisme quorum sensing turut memengaruhi ekspresi gen virulensi yang diperlukan untuk transfer DNA (Gan et al., 2024; Santos et al., 2024). Oleh karena itu, optimalisasi transformasi genetik memerlukan pemahaman komprehensif mengenai interaksi dua arah antara bakteri dan tanaman, termasuk kondisi kultur, komposisi media, serta tahap perkembangan eksplan.

Dibandingkan dengan metode transformasi fisik seperti biolistik (gene gun) atau elektroporasi, sistem berbasis *Agrobacterium tumefaciens* menawarkan beberapa keunggulan biologis. Transformasi menggunakan biolistik cenderung menghasilkan integrasi multi-copy yang acak dan berpotensi menyebabkan kerusakan genom atau silencing gen, sedangkan transformasi berbasis *Agrobacterium* umumnya menghasilkan integrasi satu atau beberapa

salinan gen dengan stabilitas ekspresi yang lebih baik (Shen et al., 2025). Selain itu, efisiensi regenerasi tanaman transforman lebih tinggi pada banyak spesies dikotil, termasuk tomat (*Solanum lycopersicum*). Stabilitas pewarisan gen tunggal juga telah dilaporkan konsisten pada generasi berikutnya tanpa segregasi kompleks (Hilman et al., 2025), menjadikan metode ini sangat relevan untuk program pemuliaan berbasis bioteknologi.

Keunggulan Sistem Transformasi Berbasis *Agrobacterium*

Pemanfaatan *Agrobacterium tumefaciens* sebagai sistem transformasi genetik tanaman memiliki keunggulan utama berupa integrasi gen yang relatif stabil dan terkontrol di dalam genom tanaman inang. Sistem plasmid Ti yang telah dimodifikasi melalui miniaturisasi dan pemisahan elemen virulensi memungkinkan transfer T-DNA yang lebih efisien tanpa membawa gen penyebab tumor (Keat et al., 2023). Pendekatan ini meningkatkan keamanan biologis sekaligus mempertahankan kemampuan integrasi DNA secara permanen. Stabilitas integrasi tersebut juga didukung oleh metode identifikasi lokus tunggal pada tanaman transforman sehingga pewarisan sifat menjadi lebih konsisten pada generasi berikutnya (Hilman et al., 2025). Dengan demikian, sistem ini mendukung pembentukan galur tanaman transgenik yang stabil secara genetik.

Dari sisi efisiensi, transformasi berbasis *Agrobacterium* menunjukkan performa tinggi terutama pada tanaman dikotil seperti tomat (*Solanum lycopersicum*). Keberhasilan transformasi gen *SIMX1* pada tomat yang menghasilkan peningkatan hasil dan kualitas buah menunjukkan efektivitas sistem ini dalam aplikasi nyata (Ewas et al., 2022). Optimalisasi teknik agroinfiltrasi juga meningkatkan efisiensi ekspresi gen sementara sebagai tahap skrining sebelum integrasi stabil dilakukan (Primasiwi et al., 2024). Selain itu, pengembangan sistem promotor konstitutif dan inducible berbasis integron memberikan kontrol ekspresi gen yang presisi, sehingga meningkatkan fleksibilitas rekayasa genetik (Keat et al., 2023). Efisiensi biologis ini menjadi salah satu alasan sistem *Agrobacterium* tetap menjadi metode dominan dalam rekayasa genetika tanaman.

Jika dibandingkan secara kritis dengan metode transformasi lain seperti biolistik dan elektroporasi, sistem berbasis *Agrobacterium* menunjukkan keunggulan yang lebih konsisten pada aspek stabilitas integrasi dan kualitas ekspresi gen. Metode biolistik cenderung menghasilkan integrasi DNA dalam jumlah salinan yang banyak dan tersebar secara acak, sehingga meningkatkan risiko terjadinya silencing gen dan ketidakstabilan ekspresi (Shen et al., 2025). Di sisi lain,

elektroporasi memiliki keterbatasan karena umumnya memerlukan sel protoplas yang sulit diregenerasi menjadi tanaman utuh, sehingga efisiensinya lebih rendah dalam aplikasi tanaman lengkap. Sebaliknya, *Agrobacterium* memanfaatkan mekanisme biologis alami melalui sistem sekresi tipe IV, sehingga memungkinkan transfer DNA yang lebih terarah dengan gangguan minimal terhadap struktur genom tanaman (Fan et al., 2022).

Keunggulan lain terletak pada biaya operasional yang relatif lebih rendah dibandingkan metode transformasi fisik seperti biolistik atau elektroporasi. Produksi kultur bakteri dapat dilakukan menggunakan media alternatif berbasis molase yang lebih ekonomis tanpa mengurangi kualitas pertumbuhan *Agrobacterium* (Watthanasakphuban et al., 2023). Hal ini berimplikasi pada penurunan biaya riset dan produksi bibit transgenik dalam skala besar. Sebaliknya, metode biolistik memerlukan peralatan khusus bertekanan tinggi dan partikel logam sebagai pembawa DNA, yang secara ekonomi lebih mahal dan kurang efisien untuk laboratorium dengan sumber daya terbatas.

Dari perspektif stabilitas pewarisan sifat, sistem berbasis *Agrobacterium* umumnya menghasilkan integrasi satu atau beberapa salinan gen yang mengikuti segregasi Mendel pada generasi berikutnya (Hilman et al., 2025). Hal ini berbeda secara konseptual dengan metode fisik seperti biolistik yang berpotensi menyebabkan integrasi multi-copy dan fragmentasi DNA, sehingga meningkatkan risiko silencing gen atau ketidakstabilan ekspresi. Dengan pendekatan biologis yang lebih alami, transfer gen melalui sistem sekresi tipe IV meminimalkan gangguan struktural pada genom tanaman.

Selain itu, pengendalian pascatransformasi dapat dilakukan secara biologis tanpa merusak jaringan tanaman. Penggunaan bakteriofag untuk mengontrol populasi *Agrobacterium* setelah proses transformasi terbukti efektif menjaga viabilitas jaringan tanaman (Transformation et al., 2022; Dharmawan et al., 2025). Strategi penghambatan quorum sensing juga dikaji sebagai pendekatan untuk menekan ekspresi gen virulensi bakteri selama proses transformasi (Gan et al., 2024; Barasarathi et al., 2025). Pendekatan ini menunjukkan bahwa sistem transformasi berbasis *Agrobacterium* dapat dikendalikan secara presisi tanpa menimbulkan dampak merugikan pada genom tanaman maupun lingkungan laboratorium.

Optimalisasi Sistem Plasmid dan Strategi Peningkatan Efisiensi Transformasi

Hasil sintesis menunjukkan bahwa rekayasa sistem plasmid merupakan faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens*. Miniaturisasi plasmid Ti

memungkinkan pemisahan komponen virulensi dari daerah T-DNA rekombinan, sehingga meningkatkan stabilitas konstruksi genetik dan fleksibilitas manipulasi molekuler (Keat et al., 2023). Selain itu, penggunaan sistem plasmid mini dan helper plasmid terbukti meningkatkan efisiensi transfer T-DNA sekaligus mengurangi beban genetik dan potensi ekspresi gen non-target.

Pengaturan ekspresi gen merupakan temuan penting lainnya dalam hasil sintesis. Penggunaan promotor konstitutif dan sistem inducible berbasis integron memungkinkan kontrol ekspresi gen yang lebih presisi sesuai kebutuhan (Keat et al., 2023). Sistem inducible berbasis IPTG memberikan fleksibilitas dalam menentukan waktu aktivasi gen setelah integrasi, sehingga efektif dalam meminimalkan efek pleiotropik pada tanaman.

Selain aspek plasmid, hasil sintesis menegaskan bahwa optimalisasi teknik transformasi berkontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi. Teknik agroinfiltrasi yang disempurnakan meningkatkan efektivitas ekspresi gen sementara sebagai tahap seleksi awal sebelum regenerasi tanaman stabil (Primasiwi et al., 2024). Parameter seperti konsentrasi bakteri, waktu inokulasi, dan komposisi media kultur menjadi faktor kunci dalam menentukan keberhasilan transformasi.

Keberhasilan transformasi juga dipengaruhi oleh faktor fisiologis tanaman inang. Identifikasi reseptor tanaman terhadap molekul bakteri menunjukkan bahwa respons imun awal tanaman berperan dalam menentukan keberhasilan transfer T-DNA (Fan et al., 2022). Selain itu, regulasi hormon seperti auksin berperan dalam mengatur pembelahan dan diferensiasi sel selama proses infeksi (Poonguzhali, 2025). Hal ini menegaskan bahwa interaksi bakteri-tanaman menjadi faktor penting dalam efisiensi transformasi.

Pada tahap pascatransformasi, hasil sintesis menunjukkan bahwa penggunaan bakteriofag litik efektif dalam mengeliminasi residu *Agrobacterium* tanpa merusak jaringan tanaman (Transformation et al., 2022; Dharmawan et al., 2025). Selain itu, penghambatan komunikasi quorum sensing bakteri menjadi strategi tambahan dalam mengendalikan virulensi selama proses transformasi (Gan et al., 2024; Barasarathi et al., 2025). Strategi ini memperkuat aspek keamanan dan efisiensi operasional di laboratorium kultur jaringan.

Dari sisi keberlanjutan produksi, penggunaan media berbasis molase sebagai sumber karbon alternatif terbukti mendukung pertumbuhan *Agrobacterium* secara ekonomis tanpa menurunkan kualitas kultur (Watthanasakphuban et al., 2023). Secara keseluruhan, hasil sintesis menegaskan bahwa peningkatan efisiensi transformasi genetik tanaman ditentukan oleh integrasi lima aspek utama, yaitu rekayasa plasmid, pengaturan ekspresi gen, optimasi teknik inokulasi, faktor fisiologis

tanaman, serta strategi eliminasi bakteri pascatransformasi.

Aplikasi Transformasi Gen pada Tanaman Tomat (*Solanum lycopersicum*)

Transformasi gen pada tanaman tomat (*Solanum lycopersicum*) merupakan salah satu pendekatan penting dalam bioteknologi pertanian modern untuk menghasilkan varietas unggul dengan sifat agronomis yang lebih baik. Pemanfaatan *Agrobacterium tumefaciens* sebagai vektor transfer gen telah terbukti efektif dalam memasukkan gen target ke dalam genom tanaman melalui mekanisme transfer T-DNA secara alami, sebagaimana ditunjukkan pada berbagai sistem transformasi berbasis Ti-plasmid (Keat et al., 2023; Ewas et al., 2022). Efektivitas tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan transformasi sangat bergantung pada kinerja sistem vektor, khususnya efisiensi transfer dan stabilitas bakteri selama proses transformasi, yang pada akhirnya menentukan tingkat integrasi gen pada tanaman. Keterkaitan ini diperkuat oleh temuan Primasiwi et al., (2024). yang menunjukkan bahwa optimalisasi teknik infiltrasi jaringan mampu meningkatkan efisiensi transfer gen dan ekspresi awal pada jaringan tanaman, sehingga menegaskan bahwa faktor teknis dan biologis saling berinteraksi dalam menentukan keberhasilan transformasi gen. Selain itu, pengendalian pertumbuhan bakteri pasca transformasi tidak hanya berfungsi mencegah kerusakan eksplan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan viabilitas regenerasi tanaman (Transformation et al., 2022; Dharmawan et al., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa tahap pasca transformasi memiliki keterkaitan langsung dengan efisiensi regenerasi tanaman, sehingga melengkapi peran efisiensi transfer gen dan stabilitas bakteri pada tahap awal dalam menentukan keberhasilan keseluruhan proses transformasi.

Dari aspek keberhasilan teknis, transformasi gen pada tomat menunjukkan tingkat integrasi gen yang cukup konsisten apabila didukung oleh sistem konstruksi gen yang stabil dan seleksi molekuler yang tepat. Konsistensi ini berkaitan langsung dengan terjadinya integrasi gen tunggal pada lokus tertentu, yang menjadi indikator penting dalam menjamin kestabilan ekspresi gen pada generasi berikutnya (Hilman et al., 2025). Dengan demikian, keberhasilan integrasi gen tidak hanya menentukan keberadaan gen dalam genom tanaman, tetapi juga mempengaruhi pola ekspresi gen tersebut.

Hal ini sejalan dengan penggunaan sistem promotor konstitutif maupun inducible berbasis integron yang memungkinkan pengaturan waktu dan tingkat ekspresi gen secara lebih presisi (Keat et al., 2023). Selain itu, optimalisasi efisiensi transformasi tidak hanya meningkatkan peluang keberhasilan integrasi gen, tetapi juga berkaitan dengan penurunan gangguan

fisiologis tanaman, yang terjadi akibat interaksi kompleks antara bakteri dan jaringan inang (Fan et al., 2022; Kim, 2025). sehingga menunjukkan bahwa efisiensi teknis berperan dalam menjaga keseimbangan antara keberhasilan transformasi dan kondisi fisiologis tanaman.

Stabilitas pewarisan gen merupakan aspek krusial dalam pengembangan varietas transgenik. Tanaman tomat hasil transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens* umumnya menunjukkan pola segregasi gen yang stabil apabila integrasi terjadi pada satu lokus (Hilman et al., 2025). Stabilitas ini tidak hanya ditentukan oleh posisi integrasi gen dalam genom tanaman, tetapi juga dipengaruhi oleh interaksi biologis yang terjadi selama proses transformasi. Dalam hal ini, pemahaman mengenai mekanisme komunikasi bakteri seperti quorum sensing menjadi penting karena mekanisme ini mengatur aktivitas dan virulensi bakteri, sehingga berpengaruh terhadap respons tanaman selama proses infeksi (Gan et al., 2024). Pengaruh tersebut selanjutnya berkaitan dengan keberhasilan integrasi dan stabilitas gen yang diwariskan. Selain itu, kajian mengenai efektor bakteri dan interaksinya dengan mikroba lain menunjukkan bahwa interaksi antar mikroorganisme dapat mempengaruhi kapasitas bakteri dalam berkompetisi maupun berkolonisasi, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap aspek keamanan biologis penggunaan *Agrobacterium* di lingkungan terbuka (Santos et al., 2024).

Transformasi gen juga berkontribusi terhadap perbaikan sifat agronomis tomat. Ekspresi gen tertentu telah dilaporkan mampu meningkatkan hasil dan kualitas buah, termasuk perbaikan kandungan nutrisi dan daya simpan (Ewas et al., 2022). Peningkatan ini berkaitan erat dengan kemampuan tanaman dalam menghadapi tekanan biotik, di mana pendekatan rekayasa ketahanan terhadap patogen melalui modifikasi genetik terbukti efektif pada berbagai spesies tanaman dan berpotensi diaplikasikan pada tomat (Luu et al., 2023; Sjahril et al., 2022). Dengan demikian, peningkatan produktivitas tidak hanya disebabkan oleh perbaikan metabolisme internal, tetapi juga oleh peningkatan sistem pertahanan tanaman. Selain itu, faktor lingkungan seperti kesehatan tanah dan ekosistem rhizosfer turut berinteraksi dengan perubahan genetik tersebut, khususnya melalui aktivitas bakteri pemacu pertumbuhan dan komunikasi mikroba akar (Komicho & Tipayno, 2025). Mmenjadi pendukung optimalisasi ekspresi sifat unggul pada tanaman transgenik. Dengan pendekatan terpadu ini, peningkatan produktivitas tidak hanya bergantung pada modifikasi genetik, tetapi juga pada pengelolaan lingkungan budidaya yang berkelanjutan.

Dari perspektif ekonomi dan regulasi, pengembangan tomat transgenik perlu disertai sistem

pengawasan yang akurat untuk memastikan keamanan konsumsi dan transparansi distribusi produk. Deteksi organisme hasil rekayasa genetika menggunakan marka DNA menjadi instrumen penting dalam pengendalian peredaran produk GMO di pasar (Muthanna, 2024). menunjukkan bahwa aspek regulasi sangat bergantung pada kemampuan identifikasi dan penelusuran produk secara akurat. Di sisi lain, penerapan sistem pengawasan ini berkaitan dengan kebutuhan produksi yang efisien dan terstandarisasi, sehingga inovasi dalam proses produksi menjadi faktor pendukung penting. Hal ini tercermin pada penggunaan media kultur bakteri berbasis bahan ekonomis seperti molase yang mampu meningkatkan efisiensi produksi dalam skala besar (Watthanasakphuban et al., 2023). Dengan demikian, terdapat keterkaitan antara aspek regulasi dan efisiensi produksi, di mana sistem monitoring yang baik harus didukung oleh proses produksi yang konsisten dan terkontrol. Dengan dukungan inovasi teknologi, pengendalian biologis yang tepat, serta sistem monitoring yang kuat, aplikasi transformasi gen pada *Solanum lycopersicum* memiliki relevansi strategis dalam mendukung peningkatan produktivitas pertanian, stabilitas pasokan pangan, dan keberlanjutan ekonomi nasional

Peningkatan Ketahanan Tomat terhadap Cekaman Lingkungan Ketahanan terhadap Stres Abiotik

Ketahanan terhadap stres abiotik seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem menjadi fokus penting dalam pengembangan tomat transgenik berbasis *Agrobacterium tumefaciens*. Modifikasi ekspresi gen tertentu dapat memperkuat sistem pertahanan fisiologis tanaman terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Peningkatan performa hasil dan kualitas buah melalui regulasi gen spesifik menunjukkan bahwa manipulasi molekuler dapat berdampak langsung pada stabilitas produksi di bawah tekanan lingkungan (Ewas et al., 2022). Regulasi ekspresi gen yang terkontrol melalui sistem promotor konstitutif maupun inducible juga memungkinkan aktivasi gen respons stres secara lebih terarah sesuai kebutuhan fisiologis tanaman (Keat et al., 2023).

Respons tanaman terhadap cekaman lingkungan berkaitan erat dengan keseimbangan hormon, terutama auksin, yang memengaruhi pertumbuhan akar dan adaptasi morfologi. Studi mengenai regulasi auksin melalui modifikasi molekuler memberikan pemahaman bahwa stabilitas jalur hormonal sangat menentukan kemampuan tanaman bertahan pada kondisi (Poonguzhali, 2025). Selain itu, optimalisasi metode transformasi seperti agroinfiltrasi mempercepat identifikasi gen kandidat yang berperan dalam toleransi

stres sebelum diaplikasikan secara permanen pada genom tanaman (Primasiwi et al., 2024).

Ketahanan terhadap stres abiotik juga tidak terlepas dari interaksi mikroba tanah yang mendukung pertumbuhan tanaman. Bakteri pemacu pertumbuhan yang mampu mendegradasi residu kimia berbahaya berkontribusi dalam memperbaiki kualitas tanah sehingga tanaman lebih adaptif terhadap tekanan lingkungan (Komicho & Tipayno, 2025). Komunikasi sinyal antar mikroorganisme di rhizosfer turut menjaga stabilitas ekosistem akar yang berperan penting dalam penyerapan air dan nutrisi (Poonguzhali et al., 2025). Dengan demikian, penguatan toleransi abiotik tidak hanya berbasis modifikasi genetik, tetapi juga integrasi dengan manajemen biologis lingkungan tumbuh.

Ketahanan terhadap Stres Biotik

Cekaman biotik yang disebabkan oleh bakteri, jamur, dan virus menjadi ancaman serius terhadap produktivitas tomat. Pendekatan rekayasa genetika memungkinkan penyisipan gen ketahanan yang meningkatkan kemampuan tanaman dalam mengenali dan merespons patogen secara lebih efektif. Studi transfer gen defensin menunjukkan peningkatan resistensi terhadap infeksi jamur pada tanaman, yang memberikan model penting bagi pengembangan tomat tahan penyakit (Sjahril et al., 2022). Pendekatan pengeditan genom pada tanaman pangan lain yang berhasil meningkatkan ketahanan terhadap patogen bakteri juga menunjukkan potensi penerapan strategi serupa pada tomat (Luu et al., 2023).

Keberhasilan peningkatan resistensi sangat dipengaruhi oleh pemahaman terhadap mekanisme pengenalan patogen oleh tanaman. Identifikasi reseptor tanaman terhadap pola molekuler bakteri memberikan dasar biologis untuk meningkatkan respons imun tanpa memicu stres berlebihan (Fan et al., 2022). Dalam konteks penggunaan *Agrobacterium tumefaciens*, pengendalian virulensi bakteri selama proses transformasi menjadi aspek penting agar tidak terjadi pembentukan tumor yang merugikan (Gan et al., 2024). Studi mengenai efektor nuklease yang digunakan bakteri dalam kompetisi mikroba juga memperkaya pemahaman mengenai interaksi ekologis yang mungkin terjadi pada budidaya skala luas (Santos et al., 2024).

Peningkatan ketahanan biotik melalui rekayasa genetika berimplikasi langsung terhadap pengurangan penggunaan pestisida sintetis. Pengawasan distribusi produk hasil rekayasa genetika melalui deteksi marka DNA memastikan keamanan konsumsi dan transparansi pasar (Muthanna, 2024). Dukungan teknologi kultur bakteri yang efisien dan ekonomis juga mempercepat proses produksi varietas unggul tanpa meningkatkan biaya riset secara signifikan (Watthanasakphuban et al., 2023). Dengan pendekatan

molekuler yang terintegrasi dengan pengelolaan lingkungan dan regulasi yang tepat, peningkatan ketahanan biotik tomat berkontribusi terhadap sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan mendukung ketahanan pangan.

Peningkatan Produktivitas dan Kualitas Hasil Panen Peningkatan Ukuran dan Jumlah Buah

Peningkatan produktivitas tomat melalui pendekatan transformasi gen berbasis *Agrobacterium tumefaciens* diarahkan pada optimalisasi ekspresi gen yang berperan dalam pertumbuhan vegetatif dan pembentukan buah. Ekspresi konstitutif gen SIMX1 dilaporkan mampu meningkatkan jumlah dan bobot buah secara signifikan dibandingkan tanaman kontrol, yang menunjukkan bahwa manipulasi molekuler dapat berdampak langsung pada parameter agronomis utama (Ewas et al., 2022). Keberhasilan peningkatan hasil tersebut tidak terlepas dari sistem vektor yang efisien, termasuk pengembangan miniaturized Ti-plasmid yang mendukung transfer gen lebih stabil dan mengurangi gangguan integrasi acak dalam genom tanaman (Keat et al., 2023).

Selain faktor konstruksi gen, efektivitas metode transformasi juga menentukan performa akhir tanaman. Optimalisasi teknik agroinfiltrasi memungkinkan seleksi gen kandidat yang berkontribusi terhadap peningkatan ukuran buah sebelum proses regenerasi penuh dilakukan (Primasiwi et al., 2024). Stabilitas integrasi gen pada lokus tunggal turut memastikan bahwa peningkatan jumlah buah dapat diwariskan secara konsisten pada generasi berikutnya tanpa variasi fenotip yang tidak diinginkan (Hilman et al., 2025). Dengan pendekatan ini, peningkatan produktivitas bukan hanya bersifat sementara, melainkan berkelanjutan antar generasi.

Peningkatan Kandungan Likopen dan Vitamin

Kualitas nutrisi tomat sangat ditentukan oleh kandungan likopen, vitamin, dan metabolit sekunder lainnya yang memiliki nilai fungsional bagi kesehatan manusia. Modifikasi ekspresi gen tertentu melalui sistem transformasi berbasis *Agrobacterium* telah menunjukkan peningkatan kualitas buah, termasuk parameter kandungan nutrisi dan daya simpan (Ewas et al., 2022). Regulasi ekspresi gen menggunakan sistem promotor yang dapat dikontrol memberikan peluang untuk mengatur biosintesis senyawa bioaktif secara lebih presisi sesuai fase perkembangan buah (Keat et al., 2023).

Aspek fisiologis seperti regulasi hormon tanaman juga berperan dalam akumulasi metabolit sekunder. Jalur auksin yang dimodifikasi melalui mekanisme molekuler tertentu berpengaruh terhadap perkembangan jaringan buah dan distribusi nutrisi

(Poonguzhali, 2025). Dengan kontrol ekspresi gen yang tepat dan pemahaman terhadap regulasi internal tanaman, peningkatan kandungan likopen dan vitamin dapat dicapai tanpa mengganggu stabilitas pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Perpanjangan Masa Simpan

Perpanjangan masa simpan buah menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas pascapanen dan mengurangi kehilangan hasil selama distribusi. Integrasi gen yang stabil dan ekspresi yang konsisten berkontribusi terhadap ketahanan jaringan buah terhadap kerusakan fisiologis (Hilman et al., 2025). Peningkatan kualitas dan daya simpan buah melalui ekspresi gen tertentu telah dilaporkan memberikan dampak positif terhadap ketahanan buah selama penyimpanan dan transportasi (Ewas et al., 2022).

Keberhasilan proses transformasi yang bersih dari kontaminasi bakteri juga berperan dalam menjaga kualitas bibit dan tanaman hingga fase produksi. Strategi pengendalian *Agrobacterium* pasca transformasi menggunakan bakteriofag membantu mencegah kerusakan jaringan tanaman yang dapat memengaruhi kualitas buah di tahap lanjut (Transformation et al., 2022; Dharmawan et al., 2025). Dengan manajemen proses transformasi yang tepat, kualitas pascapanen dapat ditingkatkan secara signifikan.

Dampak terhadap Nilai Ekonomi

Peningkatan produktivitas dan kualitas buah secara langsung berimplikasi pada peningkatan nilai ekonomi komoditas tomat. Hasil panen yang lebih tinggi dan mutu buah yang lebih baik memperkuat daya saing produk di pasar domestik maupun internasional (Ewas et al., 2022). Efisiensi produksi juga dapat ditingkatkan melalui inovasi media kultur bakteri berbasis molase yang menekan biaya perbanyakan *Agrobacterium* dalam skala riset maupun industri (Watthanasakphuban et al., 2023).

Selain aspek produksi, sistem pengawasan dan deteksi organisme hasil rekayasa genetika menjadi bagian penting dalam menjaga kepercayaan konsumen. Penggunaan marka DNA untuk identifikasi produk GMO mendukung transparansi distribusi dan kepatuhan terhadap regulasi pangan (Muthanna, 2024). Dengan dukungan teknologi transformasi yang efisien, sistem monitoring yang akurat, serta manajemen produksi yang ekonomis, pengembangan tomat transgenik berpotensi meningkatkan pendapatan petani sekaligus memperkuat ketahanan pangan nasional secara berkelanjutan.

Kontribusi terhadap Ketahanan Pangan Berkelanjutan

Transformasi genetik tomat menggunakan *Agrobacterium tumefaciens* tidak hanya meningkatkan

produktivitas dan kualitas buah, tetapi juga memiliki potensi untuk mendukung sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan. Penerapan strain *Agrobacterium* yang efisien dan miniaturisasi plasmid Ti memungkinkan pengurangan penggunaan input kimia berlebih serta mengoptimalkan perbanyakan tanaman dalam laboratorium dan lapangan (Keat et al., 2023; Watthanasakphuban et al., 2023). Integrasi ini sejalan dengan upaya pertanian berkelanjutan, di mana penggunaan agen biologis diminimalkan risiko ekologisnya melalui pemilihan vektor yang aman dan kontrol pertumbuhan bakteri pasca transformasi (Dharmawan et al., 2025). Pendekatan ini menegaskan bahwa teknologi bioteknologi tidak hanya fokus pada kuantitas hasil, tetapi juga pada dampak lingkungan yang minimal.

Pengembangan tomat transgenik yang stabil dan aman memerlukan pemahaman mendalam tentang keamanan hayati dan regulasi pangan. Pengawasan produk GMO melalui marka DNA telah terbukti efektif untuk memastikan transparansi distribusi tomat transgenik, sekaligus memenuhi persyaratan regulasi nasional dan internasional (Muthanna, 2024). Selain itu, pengendalian *Agrobacterium* setelah transformasi, misalnya dengan bakteriofag, berperan penting dalam menghindari kerusakan jaringan tanaman dan kontaminasi lingkungan (Transformation et al., 2022). Strategi-strategi ini menekankan bahwa keberlanjutan ketahanan pangan tidak hanya bergantung pada produktivitas, tetapi juga pada pengelolaan risiko ekologis dan kepatuhan terhadap standar keamanan hayati.

Meskipun potensi *Agrobacterium* untuk mendukung ketahanan pangan sangat besar, adopsi teknologi ini di negara berkembang menghadapi berbagai tantangan. Biaya peralatan dan media kultur, seperti perbanyakan *Agrobacterium* dalam skala besar, menjadi salah satu hambatan utama (Watthanasakphuban et al., 2023). Selain itu, kurangnya infrastruktur laboratorium yang memadai dan kebutuhan akan pelatihan intensif bagi peneliti lokal memperlambat implementasi teknologi ini secara luas (Keat et al., 2023). Tantangan ini menegaskan perlunya program kapasitas pembangunan dan transfer teknologi untuk menjembatani kesenjangan antara inovasi bioteknologi dan praktik pertanian di lapangan.

Penelitian selanjutnya harus fokus pada pengembangan vektor *Agrobacterium* yang lebih presisi dan aman, termasuk penggunaan microneedle atau sistem pengiriman biomolekul terkendali, yang dapat meningkatkan efisiensi transformasi sekaligus meminimalkan risiko lingkungan (Shen et al., 2025). Integrasi antara regulasi ekspresi gen dengan kontrol biologis terhadap bakteri dapat mendukung stabilitas sifat unggul pada generasi berikutnya (Keat et al., 2023;

Hilman et al., 2025). Penelitian juga diarahkan pada pemahaman lebih lanjut tentang interaksi *Agrobacterium* dengan mikrobiota tanah dan tanaman, agar manfaat ketahanan pangan dapat tercapai tanpa mengganggu ekosistem akar (Santos et al., 2024; Poonguzhali, 2025). Dengan demikian, masa depan penelitian bertumpu pada sinergi antara bioteknologi, keamanan hayati, dan keberlanjutan ekologi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR), dapat disimpulkan bahwa sistem transformasi gen berbasis *Agrobacterium tumefaciens* memiliki peran signifikan dalam meningkatkan produktivitas, kualitas, dan ketahanan tanaman tomat sebagai bagian dari strategi ketahanan pangan berkelanjutan. Optimalisasi plasmid Ti, efisiensi transfer T-DNA, pengembangan sistem promotor konstitutif dan inducible, serta penyempurnaan teknik agroinfiltrasi terbukti meningkatkan stabilitas integrasi gen dan konsistensi pewarisan sifat pada generasi berikutnya. Aplikasi transformasi gen menunjukkan peningkatan jumlah dan bobot buah, kandungan likopen dan vitamin, perpanjangan masa simpan, serta ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik. Strategi pengendalian pascatransformasi, seperti penggunaan bakteriofag dan pendekatan penghambatan quorum sensing, turut memperkuat aspek keamanan biologis dan efisiensi laboratorium.

Sebagai saran, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada pengembangan sistem vektor yang lebih presisi dan ramah lingkungan, integrasi teknologi penghantaran biomolekul modern, serta kajian interaksi jangka panjang antara tanaman transgenik dan ekosistem tanah guna memastikan keberlanjutan dan keamanan hayati secara menyeluruh.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Makassar, khususnya Program Studi Pendidikan Biologi FMIPA, atas dukungan akademik dalam penyusunan artikel ini. Apresiasi juga disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi, masukan, dan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Referensi

- Barasarathi, J., Perveen, K., & Khan, F. (2025). Targeting *Agrobacterium tumefaciens*: A computational study on quorum sensing inhibition. *Journal of Basic Microbiology*, 1–12. <https://doi.org/10.1002/jobm.70041>
- Cnq-, M. S., Lee, S., Fenical, W., & Nam, S. (2025). Pontophenazine, a new phenazine analog from. *Journal of Antibiotics*, 20(12), 1–8. <https://doi.org/10.1177/1934578X251405973>
- Dharmawan, A., Alhas, M., Alfiko, Y., Nur, N., Purwantomo, S., Suwanto, A., & Meryandini, A. (2025). Isolation and preliminary analysis of a lytic bacteriophage infecting *Agrobacterium tumefaciens* to control bacterial overgrowth during plant transformation. *The Microbe*, 8, 100505. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100505>
- Ewas, M., Harlina, P. W., Shahzad, R., Khames, E., Ali, F., Nishawy, E., Elsafty, N., Ibrahim, H. M., & Pedro, P. (2022). Constitutive expression of SIMX1 gene improves fruit yield and quality, health-promoting compounds, fungal resistance, and delays ripening in transgenic tomato plants. <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2066730>
- Fan, L., Fröhlich, K., Melzer, E., Pruitt, R. N., Albert, I., Zhang, L., Joe, A., Hua, C., Song, Y., Albert, M., Kim, S., Weigel, D., Zipfel, C., Chae, E., Gust, A. A., & Nürnberger, T. (2022). Genotyping-by-sequencing-based identification of Arabidopsis pattern recognition receptor RLP32 recognizing proteobacterial translation initiation factor IF1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28887-4>
- Gan, H. M., Dailey, L., Wengert, P., Halliday, N., Williams, P., Hudson, A. O., & Savka, M. A. (2024). Quorum sensing signals of the grapevine crown gall bacterium *Novosphingobium* sp. Rr2-17. <https://doi.org/10.7717/peerj.18657>
- Goralogia, G. S., Willig, C., & Strauss, S. H. (2025). Engineering *Agrobacterium* for improved plant transformation. *The Plant Journal*, 121(5), e70015. <https://doi.org/10.1111/tpj.70015>
- Hilman, M. S., Nawawi, O., Azhari, M. F., & Bai, T. (2025). A comprehensive method to generating and identifying transgenic tobacco lines with a single transgene integration locus for functional analysis. 48(1), 31–58.
- Hooykaas, P. J. J. (2023). The Ti plasmid, driver of *Agrobacterium* pathogenesis. *Phytopathology*, 113(4), 594–604. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-22-0432-IA>
- Keat, W., Yuh, T., Teo, L., Yen, X., Pek, T., Loh, C., & Ling, H. (2023). Development of constitutive and IPTG-inducible integron promoter-based expression systems for *Escherichia coli* and *Agrobacterium tumefaciens*. *3 Biotech*, 13(3), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03507-0>
- Komicho, J. D., & Tipayno, S. C. (2025). Organophosphate degradation and plant growth-promoting activity of soil bacteria isolated from vegetable farms in Bengkulu.

- Philippines. 19, 2184–2199. <https://doi.org/10.22207/JPAM.19.3.46>
- Kuatsjah, E., Schwartz, A., Zahn, M., Tornesakis, K., & Kellermeyer, Z. A. (2024). Biochemical and structural characterization of enzymes in the 4-hydroxybenzoate catabolic pathway. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.115002>
- Luu, V. S., Sciallano, C., Stiebner, M., Ji, C., Boulard, G., Diallo, A., Auguy, F., Char, S. N., Arra, Y., Schenstnyi, K., Buchholzer, M., Loo, E. P. I., Bilaro, A. L., Lihepanyama, D., Mkuya, M., Murori, R., Oliva, R., Cunnac, S., Yang, B., & Frommer, W. B. (2023). Genome editing of an African elite rice variety.
- Muthanna, A. (2024). Detection of genetically modified organisms by genetic markers in the local market of Al-Muthanna Province, Iraq. 8, 453–458.
- Poonguzhali. (2025). The plant growth-promoting *Burkholderia vietnamiensis* produces acyl-homoserine lactones. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1638793>
- Primasiwi, D. H., Purwestri, Y. A., & Semiarti, E. (2024). Improving transient gene expression in orchid *Phalaenopsis amabilis*. <https://doi.org/10.22146/ijbiotech.80555>
- Rozita, W., Hazlina, N., & Zamri, M. (2024). Effect of seed priming treatment on seed germination of *Allium cepa*. 8, 49–54.
- Santos, M. N. M., Pintor, K. L., Hsieh, P., Cheung, Y., & Sung, L. (2024). Agrobacteria deploy two classes of His-Me finger superfamily nuclease effectors. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1351590>
- Shen, D., Rajappa, S., Zhao, Y., Pang, Z., Li, Y., Thenarianto, C., Puangpathumanond, S., Sevencan, C., Thomas, T., & Lew, S. (2025). Amphibious microneedles for programmable delivery.
- Sjahril, R., Jamaluddin, I., Nadir, M., Haring, F., Riadi, M., Halimah, S., Mariani, T. S., Panga, N. J., Tambung, A., Chin, D. P., & Mii, M. (2022). Hayati Journal of Biosciences, 29(5), 621–631. <https://doi.org/10.4308/hjb.29.5.621-631>
- Su, W., Xu, M., Radani, Y., & Yang, L. (2023). Technological development and application of plant genetic transformation.
- Transformation, P., Lytic, U., Ramadhan, F., Alfiko, Y., Purwantomo, S., Mubarok, A. F., & Budinarta, W. (2022). A new approach for controlling *Agrobacterium tumefaciens*.
- Watthanasakphuban, N., Nguyen, L. V., Cheng, Y., & Show, P. (2023). Development of a molasses-based medium for *Agrobacterium tumefaciens* fermentation.
- Zdouc, M. M., Blin, K., Louwen, N. L. L., Nav, J., Loureiro, C., Bader, C. D., Bailey, C. B., Barra, L., Booth, T. J., Bozhüyük, K. A. J., Cediél-Becerra, J. D., Char, Z., Chevrette, M. G., Chooi, Y. H., Paul, M. D. A., Rond, T. de, Pup, E. del, Duncan, K. R., Gu, W., & Hor, T. (2025). MIBiG 4.0. 678–690.