



Tinjauan Rekayasa Genetika Tanaman Menggunakan Bakteri *Agrobacterium tumefaciens* Sebagai Pengembangan Bioteknologi Modern Dari Periode Lama Hingga Terkini

Review of Plant Genetic Engineering Using the Bacteria *Agrobacterium tumefaciens* as a Development of Modern Biotechnology from the Old to the Recent Period

Firman Rezaldi^{1*}, Arti Wahyu Utami¹, Ratna Fitry Yenny², M.Fariz Fadillah², Ucu Wandu Somantri⁴, Heny Sasmita⁴, Rina Nurmaulawati⁵

¹Program Studi D4 Teknologi Laboratorium Medis, STIKes Tujuh Belas Karanganyar Jawa Tengah, Indonesia

²Departemen Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Serang, Banten, Indonesia

³Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi dan Informatika, Universitas Mathla'ul Anwar, Banten, Indonesia

⁴Program Studi Kesehatan Masyarakat, Fakultas Sains Farmasi Kesehatan, Universitas Mathla'ul Anwar, Banten, Indonesia

⁵Program Studi Farmasi, Stikes Bhakti Husada Mulia, Madiun, Jawa Timur, Indonesia

Email: artiwahyu270216@gmail.com, ratnafitry@untirta.ac.id, farizfadillah91@gmail.com, ucucanayur@gmail.com,

hannychan.0205@gmail.com, 5rina.orin2011@gmail.com

* Email korespondensi : firmanrezaldi890@gmail.com

Dikirim 07 Sep 2024

Direvisi 17 Okt 2024

Diterima 30 Okt 2024

ABSTRACT

*Transgenic plants are plants produced using modern biotechnology methods, namely genetic engineering. Talking about modern biotechnology which tends towards genetic engineering of plants, so far it uses living things that have the potential or contribution as GMOs. The services of living creatures used to produce plants in the aspect of genetic engineering are the species *Agrobacterium agrobacterium* which has been widely inserted to increase resistance to disease, produce active ingredients for functional food, medicine and natural cosmetics (pharmaceuticals). So that cultivating plants using the services of *Agrobacterium agrobacterium* provides a good and potential outlook for the future based on studies of transgenic plants, early studies of *Agrobacterium*, taxonomic challenges, a surge in basic research driven by applied studies, fundamental process models, and future prospects for genetic engineering modeling systems through the use of *Agrobacterium*. The long-term application of *A. tumefaciens* has promising future prospects, although it requires various cellular approach methods to make it safe and controllable as a plasmid vector.*

Keywords: *Agrobacterium tumefaciens, Biotechnology, Genetic Engineering, Transgenic Plants*

ABSTRAK

Tanaman transgenik merupakan salah satu tanaman yang diproduksi melalui metode bioteknologi modern yaitu rekayasa genetika. Berbicara mengenai bioteknologi modern yang cenderung terhadap rekayasa genetika tanaman sejauh ini menggunakan salah satu makhluk hidup yang cukup berpotensi maupun berkontribusi sebagai GMO. Jasa makhluk hidup yang digunakan untuk memproduksi tanaman dalam aspek rekayasa genetika yaitu spesies *Agrobacterium agrobacterium* yang telah banyak disisipkan guna meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, memproduksi sediaan bahan aktif pangan fungsional, obat, dan kosmetik natural (farmaseutikal). Sehingga budidaya tanaman menggunakan jasa *Agrobacterium agrobacterium* cukup memberikan pandangan yang baik dan potensial bagi masa depan berdasarkan kajian tanaman transgenik, studi awal *Agrobacterium*, tantangan taksonomi, lonjakan penelitian dasar yang didorong oleh studi terapan, model proses fundamental, dan prospek masa depan sistem pemodelan rekayasa genetika melalui pemanfaatan *Agrobacterium*. Aplikasi *A. tumefaciens* untuk jangka panjang memiliki prospek masa depan yang menjanjikan walaupun perlu dilakukan berbagai metode pendekatan secara seluler agar aman dan terkendali sebagai vektor plasmid.

Kata kunci: *Agrobacterium tumefaciens*, Bioteknologi, Rekayasa Genetika, Tanaman Transgenik

1. Pendahuluan

Tanaman yang diproduksi dari hasil rekayasa genetika dikenal sebagai istilah GMO (*Genetically Modified Organism*) (Rezaldi *et al.*, 2024). GMO adalah makhluk hidup yang ada semenjak dahulu untuk ditransformasikan maupun dicampur dengan gen lain nya melalui metode bioteknologi modern atau yang dikenal sebagai istilah rekayasa genetika menurut Batrisyia & Haryanto (2023). Produk rekayasa genetika tanaman berupa GMO dalam perkembangannya semakin mengalami peningkatan yang disebabkan oleh adanya kebutuhan maupun permintaan pasar yang semakin mengalami peningkatan pula. GMO yang hadir melalui serangkaian metode bioteknologi modern memiliki peranan penting bagi kebutuhan pangan maupun farmasetik dinegara ini (Rezaldi *et al.*, 2024).

Pemanfaatan makhluk hidup dalam menyelesaikan problematika guna memproduksi produk yang bermanfaat bagi manusia maupun lingkungan nya dikenal sebagai istilah bioteknologi (Fadillah *et al.*, 2022; Rezaldi *et al.*, 2022). Istilah lain dari bioteknologi itu sendiri memiliki definisi yaitu upaya dalam dalam mentransformasikan gen gen yang tersusun melalui penyisipan terhadap gen baru pada struktur gen bagian dalam yang dimanfaatkan. Rekayasa genetika merupakan salah satu puncak dari aspek bioteknologi yang cenderung mengalami perkembangan yang selalu melekat maupun tidak terlepas dari keilmuan dasar biologi lainnya meliputi biokimia, mikrobiologi, biologi molekuler, dan fisiologi. Bioteknologi secara modern memiliki peluang tinggi dalam meningkatkan kehidupan maupun kesejahteraan bagi manusia maupun lingkungannya terutama melalui penyisipan organisme (bakteri, virus, jamur, hewan) ke dalam gen target tanaman. Salah satu bakteri yang berpotensi untuk dikembangkan adalah *Agobacterium tumefaciens*.

Substansi yang dikaji dalam artikel ilmiah ini meliputi tanaman transgenik, studi awal *Agrobacterium*, tantangan taksonomi, lonjakan penelitian dasar yang didorong oleh studi terapan, model proses fundamental, dan prospek masa depan sitem pemodelan rekayasa genetika melalui pemanfaatan *Agrobacterium*.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan sistem kajian literature yang membahas mengenai tanaman transgenik, studi awal *Agrobacterium*, tantangan taksonomi, lonjakan penelitian dasar yang didorong oleh studi terapan, model proses fundamental, dan prospek masa depan sistem pemodelan rekayasa genetika melalui pemanfaatan *Agrobacterium*. Bagian-bagian yang dikaji dalam artikel review ini menampilkan sumber sumber yang relevansi dan telah banyak terbukti maupun terpercaya selama ini baik dalam bentuk jurnal lama hingga terbaru.

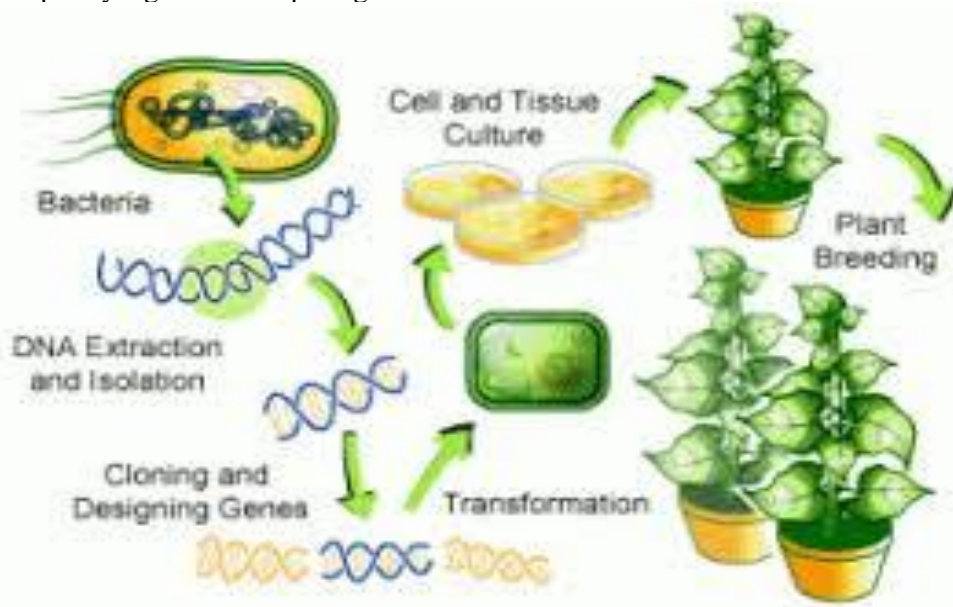
3. Hasil dan Pembahasan

Tanaman Transgenik

Tanaman transgenik yang dihasilkan secara idealnya melibatkan beberapa tahapan biologi molekuler (Susilo, 2019). Penyeleksian sifat yang diinginkan merupakan salah satu faktor utama dalam keberhasilan rekayasa genetika. Faktor keberhasilan lainnya dalam menghasilkan tanaman transgenik yaitu gen. Gen yang diseleksi perlu diidentifikasi terlebih dahulu supaya dapat mengendalikan. Gen yang diinginkan dalam pengendalian lingkungan jika tidak tersedia, maka perlu dilakukan upaya pemisahan atau isolasi yang berasal dari donor. Makhluk hidup yang dapat dimanfaatkan sebagai agen pendonor kontrol dalam rekayasa genetik meliputi virus, jamur, bakteri, serangga, maupun hewan. Hal tersebut bertujuan untuk memodifikasi gen pada tahapan molekuler yang memiliki domain regulasi dalam upaya mengekspresikan dengan baik dan benar terhadap tanaman yang akan disisipkan. Isolasi gen perlu dilakukan upaya rekayasa genetik terlebih dahulu sebagai vektor plasmid. Vektor plasmid idealnya menggunakan teknik transfer gen yang bertujuan untuk mentransformasikan tanaman yang tidak hanya mengandung gen pada sifat yang diinginkan, akan tetapi mengandung gen marka seleksi yang meliputi gen herbisida yang mengalami ketahanan atau antibiotik.

Keadaan gen yang bertujuan sebagai fasilitator untuk penyeleksian sel yang mengalami transformasi. Transformasi sel yang sukses merupakan salah satu interpretasi data mengenai serangkaian mekanisme gen yang disisipkan pada tanaman bagian dalam perlu diintegrasikan pada genom tanaman bagian dalam. Transformasi gen dalam genom tanaman merupakan salah satu penanda gen yang terkespresi dan terpelihara selama proses mekanisme mitosis berikutnya. Regenerasi tanaman merupakan salah satu upaya yang terakhir dimana sel dan jaringan tanaman yang telah mengalami transformasi perlu diregenerasi menjadi tanaman melalui mekanisme organogenesis ataupun

embriogenesis seperti yang tercantum pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Penyisipan Gen Target Tanaman (Susilo, 2019).

Gambar 1 telah menerangkan mengenai mekanisme penyisipan gen target terhadap tanaman transgenik melalui pemanfaatan *Agrobacterium*. Tanaman hasil rekayasa atau yang dikenal sebagai tanaman transgenik disisi lain dibutuhkan suatu karakterisasi pada level molekuler yang bertujuan untuk mengidentifikasi gen secara integritas yang akan dikenalkan untuk mengidentifikasi jumlah salinan terhadap genom tanaman bagian dalam. Tanaman hasil rekayasa genetika selain dibutuhkan karakterisasi secara biologi molekuler dibutuhkan pula karakterisasi secara biokimia yang bertujuan untuk menjalankan mekanisme fisiologi nya dengan baik, kemudian dibutuhkan pula karakterisasi dari hasil budidaya melalui rumah kaca yang bertujuan untuk mengidentifikasi kebenaran dalam memproduksi sifat yang sesuai harapan, sehingga dapat diwariskan maupun dilakukan persilangan secara genetik (Susilo, 2019). Hal tersebut disebabkan setiap tanaman yang dibudidayakan dari lokasi yang berbeda beda pastinya membawa karakter gen yang berbeda beda pula dalam menghasilkan senyawa bioaktif untuk kepentingan biofarmaseutikal. Hal tersebut sejalan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Fadhillah *et al.*, (2024) yaitu bunga telang yang difermentasikan oleh kombucha bunga telang dan dijadikan sebagai bahan aktif terhadap formulasi dan sediaan sabun mandi cair memiliki aktivitas antibakteri penyebab keracunan pangan yang berbeda-beda dari 3 lokasi budidaya tanaman yaitu Kampung Pekuncen Desa Ciwedus Kota Cilegon Banten, Kampung Cinangka Anyer, Kabupaten Serang Banten, Dan Desa Banjarwangi Kabupaten Pandeglang, Banten.

Hasil penelitian tersebut telah membuktikan bahwa formulasi dan sediaan sabun mandi dengan bahan aktif kombucha bunga telang dimana bunga telang yang diperoleh dari hasil budidaya daerah Kampung Pekuncen Kota Cilegon Banten memiliki daya hambat paling tinggi sebagai antibakteri penyebab keracunan bahan pangan jika dibandingkan dengan Kampung Cinangka Anyer Kabupaten Serang, dan Desa Banjarwangi Kabupaten Pandeglang, Banten. Artinya setiap daerah budidaya tanaman memiliki potensi yang berbeda beda dalam menghasilkan aktivitas farmakologinya terutama sebagai sumber antibakteri (Rezaldi *et al.*, 2021) penyebab keracunan bahan pangan (Rezaldi *et al.*, 2024) yang terkespresi terkait karakteristik setiap metabolit sekunder (Abdilah *et al.*, 2022) yang dihasilkan (Abdilah *et al.*, 2022). Walaupun dalam hasil penelitian Fadhillah *et al.*, (2024) belum ada perlakuan melalui rekayasa genetika tanaman bunga telang dengan bioteknologi *Agrobacterium* untuk memproduksi karakteristik gen yang ideal sebagai substansi atau bahan aktif pada formulasi maupun sediaan pangan fungsional, obat, dan kosmetik (Rezaldi *et al.*, 2023). Tantangan lain yang perlu diperhatikan adalah dengan memanfaatkan teknik kultur jaringan tanaman (Rezaldi *et al.*, 2022) dimana saat ini tanaman komoditas hortikultura merupakan salah satu komoditas yang potensial bagi kesehatan maupun bernilai ekonomi tinggi, sehingga teknik kultur jaringan tanaman merupakan metode bioteknologi (Fadillah *et al.*, 2022) yang aman dalam mempertahankan plasma nutfah yang berpotensi tinggi secara genetik.

Studi Awal *Agrobacterium*

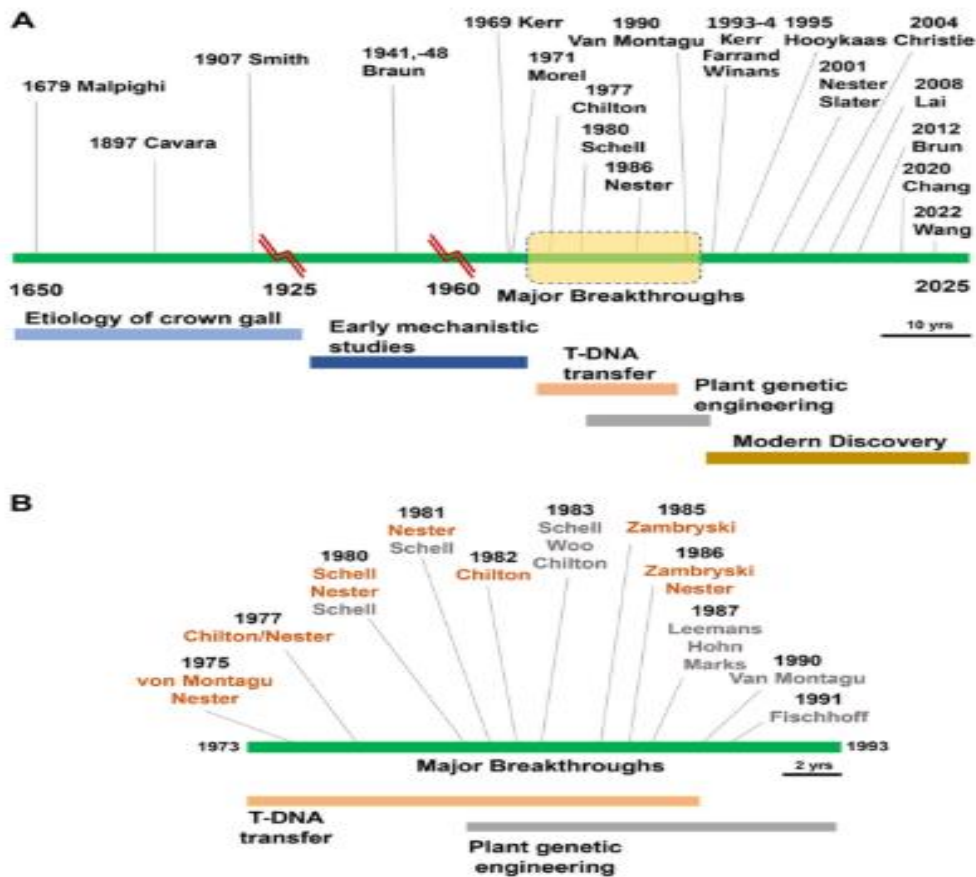
Catatan paling awal yang melaporkan penelitian tentang empedu mahkota tanaman dikreditkan ke ahli biologi Italia Marcello Malpighi (yang terkenal dengan tubulus Malpighi). Ilmuwan, Fridiano Cavara yang mengetahui bahwa penyakit kanker pada tanaman anggur dapat dikorelasikan dengan keberadaan isolat mikroba dan bahwa inokulasi “schizomycete” yang terisolasi ini dapat menginduksi tumor pada tanaman anggur muda, dan pengamatannya dipublikasikan di tahun 1897 (Cavara, 1897). Baru 10 tahun kemudian, pada tahun 1907, ahli patologi tanaman terkenal dari Amerika, Erwin F. Smith bersama dengan C. O. Townsend, menerapkan pendekatan bakteriologis untuk memenuhi kriteria Koch postulat untuk agen etiologi mahkota empedu (Smith & Townsend, 1907). Smith sering dianggap sebagai orang yang pertama kali mengasingkan diri dan mengkarakterisasi patogen. Kisaran observasi dasar yang dibuat dalam karakterisasi awal yang masih relevan hingga saat ini sangatlah mengejutkan. Ada beberapa sumber bagus yang mendokumentasikan sejarah penelitian *Agrobacterium* yang luar biasa (Zambrysk, 2013; Kado, 2014) dan keseluruhan volume yang mengumpulkan dan mengomentari banyak penemuan penting yang mengarah pada penemuan saat ini mengenai pengetahuan biologi *Agrobacterium* (Nester *et al.*, 2005). Sejarah penelitian *A. tumefaciens* ditandai dengan serangkaian penemuan yang mencolok selama abad ke-20 dan kini memasuki abad ke-21 (Gambar 2, Tabel 1), dan bakteri kompleks yang menyenangkan ini terus menghasilkan temuan baru yang tidak terduga dan mencerahkan.

Tantangan Taksonomi

Klasifikasi taksonomi *Agrobacterium* mempunyai sejarah panjang dan kontroversial yang sering membingungkan para ilmuwan yang tidak mempelajari bakteri ini, dan bahkan mereka yang tidak mempelajari bakteri ini (Flores *et al.*, 2020). Smith dan Townsend awalnya menyebutkan agen penyebab penyakit empedu mahkota Bakteri *tumefaciens* (Zambryski, 2013). Bakteri ini kemudian mengalami beberapa sebutan taksonomi yang berbeda hingga tahun 1942, ketika genus/spesies diberi nama *Agrobacterium tumefaciens*. diusulkan (Conn, 1942). Ada tiga masalah yang menjadi inti kebingungan atas nama tersebut patogen dan kerabat dekatnya. Pertama, skema klasifikasi awal berupaya menangkap perbedaan patogenisitas dan jangkauan inang. Misalnya *Agrobacterium tumefaciens* (biovar 1) dan *Agrobacterium rhizogenes* (biovar 2) secara klasik digunakan untuk menyimpulkan bahwa masing-masing menyebabkan penyakit mahkota empedu dan penyakit akar rambut. *Agrobacterium vitis* (biovar 3) dan nama spesies *Agrobacterium radiobacter* digunakan untuk mendeskripsikan penyebabnya penyakit mahkota empedu pada selentingan dan strain yang tidak patogen. Namun, patogenisitas bergantung pada plasmid yang dapat hilang namun juga dapat bergerak secara luas ke seluruh kelompok taksonomi, sehingga patogenisitas menjadi tidak stabil dan bersifat horizontal. sifat yang dapat diperoleh yang tidak secara akurat mencerminkan keterkaitan antar strain. Misalnya, anggota biovar 2, yang mencerminkan kelompok filogenetik tingkat spesies, dapat menyebabkan empedu mahkota, penyakit akar berbulu, menginfeksi selentingan, atau non-patogen. Masalah kedua adalah penggabungan beberapa garis keturunan *Agrobacterium* dan rhizobia yang mendorong fiksasi nitrogen di kacang-kacangan (juga merupakan sifat yang dapat dimobilisasi) menjadi suatu genus dan menamai semuanya *Rhizobium* (Farrand *et al.*, 2003 ; Young *et al.*, 2001). Penerapan nomenklatur penamaan ini masih terbatas penerimaannya di kalangan komunitas penelitian agrobakteri dan rhizobial. Masalah ketiga berkaitan dengan masalah kedua efektivitas dalam mengkomunikasikan hubungan antar strain dirusak oleh pengulangan revisi klasifikasi taksonomi. Akibatnya, berbagai skema tetap ada dan diadopsi atau ditinggalkan secara bervariasi oleh para peneliti yang berkontribusi terhadap sejarah panjang publikasi pada bakteri ini (Baltrus, 2016).

Lonjakan Penelitian Dasar yang Didorong oleh Studi Terapan

Pekerjaan awal dan sebagian besar sejarah penelitian *A. tumefaciens* memang benar berfokus pada interaksinya dengan tanaman inang dan pada akhirnya pengembangannya sebagai alat untuk melakukan hal tersebut memanipulasi tanaman dengan cara yang mendalam. Setelah isolasi *A. tumefaciens* dan menetapkan hubungan etiologinya dengan penyakit empedu mahkota, kemajuan pada mikroorganisme pada awalnya relatif jarang, dan hanya beberapa laboratorium utama yang berkontribusi. Laboratorium Armin Braun di Rockefeller Institute pada tahun 1940-an memberikan beberapa hal kritis.



Gambar 2. Garis waktu yang melaporkan mengenai publikasi penemuan *Agrobacterium* yang berdampak. (A) Garis waktu yang dipilih tentang penemuan-penemuan yang tersusun secara linier berdasarkan tahun 1650 sampai dengan 2025. Ilmuwan yang terkemuka telah terbukti dan sesuai berdasarkan dengan korespondensi penulis. Periode yang secara luas ditunjukkan pada garis yang berlabel warna merah. “Terobosan besar” mengacu pada periode yang sangat aktif yang diperluas di panel B. (B) Pandangan yang diperluas penemuan yang mendefinisikan transfer T-DNA dan memanfaatkannya untuk digunakan dalam transgenesis tanaman. Ilmu dasar penemuan ditunjukkan dengan nama penulis dalam teks oranye, dan pengembangan aplikasi ditunjukkan dalam teks perak. Semua kutipan dirujuk pada Tabel 1.

Wawasan mengenai pembentukan mahkota empedu (Braun, 1948; Braun, 1946) dan yang penting yaitu mengembangkan konsepnya dari "prinsip pemicu tumor" untuk menggambarkan faktor-faktor yang merangsang pembentukan empedu (Gambar 2A, Tabel 1). Tentu saja, Braun dan anggota laboratoriumnya pasti terpengaruh oleh studi penting tentang Avery, Macleod, dan McCarty (juga dilakukan di Rockefeller Institute) tentang “prinsip transformasi” pada *Streptococcus pneumoniae*, yang menghasilkan bukti pertama bahwa DNA adalah materi genetik (Avery *et al.*, 1944). Kelompok Braun membuat pernyataan kritis wawasan bahwa setelah terbentuk pertumbuhan neoplastik pada tanaman dapat terus berkembang biak tanpa adanya bakteri yang menginfeksi, sehingga menyebabkan perubahan secara genetik terhadap keturunannya. (Braun, 1948; White *et al.*, 1941). Sifat sebenarnya dari prinsip pemicu tumor memerlukan waktu bertahun-tahun lagi untuk diungkapkan. Meskipun demikian, sangat mengejutkan bagaimana kasus Avery dan Braun, dan rekan-rekan mereka, yang sedang mempelajari fenomena biologis yang sangat berbeda, juga demikian membangun kerangka konseptual untuk transmisi gen horizontal yang akan memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman tentang heritabilitas dan evolusi, sehingga memungkinkan awal terbentuknya biologi molekuler. Akhir tahun 1960an dan awal tahun 1970an membawa penemuan penting dari laboratorium di berbagai negara tentang interaksi mikroba inang yang mendasari awal mulanya penyakit empedu.

Tabel 1. Penemuan dan inovasi besar terpilih dalam penelitian *Agrobacterium* (Brown *et al.*, 2023)

Yr	Discovery	Lead scientist(s)	Reference(s)
1679	Observation of crown galls on plants	Malpighi	3
1897	Isolation/reinoculation of pathogen	Cavara	4
1907	Etiological identification of pathogen	Smith	5
1941	Bacteria-free tumors	Braun	16
1948	Tumor-inducing principle	Braun	14
1969	Genetic transfer of virulence	Kerr	17
1971	Opine characterization	Morel	18
1975	Plasmid as the basis of virulence	von Montagu, Nester	19, 20
1977	Agrobacterial DNA in transformed plants	Chilton/Nester	21
1980	Tumor-inducing (Ti) plasmid genetic map	Schell	137
	Organization of T-DNA genes in plant tumors	Nester	138
	Ti plasmid for gene introduction in plants	Schell	139
1981	Fine structure genetic map of T-DNA in plants	Nester	140
	Mendelian transmission of transferred genes	Schell	141
1982	T-DNA border sequences and transfer	Chilton	142
1983	Expression of engineered genes in plants	Schell, Woo	143, 144
	Engineered mini-Ti plasmids	Chilton	145
1985	Plant phenolics induce virulence	Zambryski	27
1986	T-strand formation in early T-DNA transfer	Zambryski	33
	VirA-VirG two-component systems	Nester	28
1987	Engineered insect resistance	Leemans	146
	Gene transfer to corn	Hohn	147
	Gene transfer to <i>Arabidopsis</i>	Marks	148
1990	Nuclear targeting of the T-DNA	Van Montagu	149
1991	Transgene codon optimization	Fischhoff	150
1993–1994	Ti plasmid quorum sensing system	Kerr, Farrand, Winans	57–59
1995	T-DNA transfer to <i>Saccharomyces</i>	Hooykaas	23
2001	<i>A. tumefaciens</i> C58 genome sequence	Nester, Slater	86, 87
2004	Type IV secretion of T-DNA	Christie	37
2008	Type VI secretion in <i>A. tumefaciens</i>	Lai	38
2012	Polar budding in <i>A. tumefaciens</i>	Brun	74
2020	Ti plasmid diversity and evolution	Chang	49
2022	Multipartite replicon coordination	Wang	92

Ahli patologi tumbuhan Australia Allen Kerr mengakui kemampuannya menyebabkan empedu mahkota tumor dikodekan pada elemen yang dapat ditularkan antar bakteri (Kerr, 1969). Selanjutnya, mahkota tumor empedu ditemukan menghasilkan metabolit unik yang disebut opini yang merupakan nutrisi semieksklusif untuk *A. tumefaciens* (Petit *et al.*, 1970). Terakhir, penelitian oleh beberapa kelompok diantaranya orang-orang dari Allan Kerr, Jeff Schell dan Marc van Montagu di Belgia, dan Eugene Nester di Amerika Serikat antara lain mendemonstrasikan hubungan antara crown gall penyakit dan elemen episomal, bernama plasmid penginduksi tumor (atau plasmid Ti), sebagai prasyarat genetik untuk penyakit mahkota empedu (Kerr, 1969 ; Van *et al.*, 1975 ; Watson *et al.*, 1975). Bersama-sama, penemuan-penemuan ini mengarah pada hipotesis radikal bahwa *A. tumefaciens* mentransfer genetiknya sendiri bahan bagi tanaman. Studi terobosan Mary-Dell Chilton di laboratorium Nester memberikan bukti pasti tentang transfer DNA agrobakteri ke jaringan tanaman. Temuan Chilton mengawali serangkaian penelitian baik di kalangan akademisi maupun industri untuk memahami DNA yang ditransfer (T-DNA) dan cara pembuatannya, serta untuk memanfaatkan kekuatan transmisi gen (Chilton *et al.*, 1977) horizontal antar kerajaan (Gbr. 2B). Rentetan pekerjaan brilian menyebabkan kemajuan besar dalam rekayasa T-DNA dan memanfaatkan alam ini proses transfer gen ke dalam tanaman. Dalam beberapa kasus, laboratorium menjelaskan dasar untuk Transfer T-DNA juga mendorong penerapan transgenesis tanaman, bekerja sama dengan ilmuwan terapan di sektor swasta. Semburan pengamatan mendasar menyebabkan gelombang penerapan baru (Gambar 2B, Tabel 1). Penelitian ini juga menghasilkan wawasan yang signifikan mengenai biologi sel tanaman dan pada akhirnya memberikan pendekatan transformasi tidak hanya pada tanaman, tetapi juga sistem jamur (Zhu *et al.*, 2003 ; Ballas & Citovsky, 1977). Ini adalah periode penemuan dan inovasi yang luar biasa dan merupakan contoh penelitian dasar yang sangat baik mendorong ilmu terapan.

Model Proses Fundamental

Terobosan besar dalam patogenesis dan transfer gen antar kerajaan mendorong periode penemuan modern yang berkelanjutan pada *A. tumefaciens* yang terus berlanjut. Untuk menambahkan pengetahuan mendasar yang penting untuk menginformasikan mikrobiologi molekuler (Gambar 2A). Penelitian penting pada *A. tumefaciens* telah berdampak pada pemahaman tentang mikroba inang dan interaksi mikroba-mikroba, khususnya di bidang mekanisme sekresi dan komunikasi sel-sel. Selanjutnya, *A. tumefaciens* muncul sebagai sistem model untuk biologi sel bakteri dengan wawasan

mekanistik terkini terkait pertumbuhan kutub, replika multipartit, dan biologi plasmid. *A. tumefaciens* telah dan tetap menjadi harta karun berupa temuan penting dan mendasar yang telah mempengaruhi seluruh bidang mikrobiologi.

Prospek Masa Depan Untuk Sistem Model Agrobacterium

Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk menyoroti beberapa kekayaan sejarah *A. tumefaciens* sebagai memodelkan sistem bakteri patogen, dan meskipun demikian, ada banyak biologi penting dan aplikasi yang tidak dapat kami liput. Sistem model memungkinkan peneliti untuk menyelidiki fenomena secara rinci dan memanipulasi proses dengan cara yang mengambil keuntungan atribut dan properti alami sistem, untuk mengungkap wawasan baru tentang properti umum yang tidak jelas. Transfer gen antar kerajaan dari *A. tumefaciens* ke tanaman tentu memerlukan tingkat perhatian yang tinggi, dan hal ini sulit dilakukan untuk berdebat dengan dampak ilmiah, sosial, dan ekonomi dari studi dan penerapannya dihasilkan. Bahkan dengan temuan penelitian yang luar biasa dan mendalam mengenai interaksi *Agrobacterium* plant, masih banyak yang harus dipelajari. Misalnya, bagaimana interaksi molekuler dengan sel tumbuhan menyebabkan impor inti T-DNA dan integrasi T-DNA ke dalam sel tumbuhan dan genom tanaman. Ini masih merupakan area investigasi aktif dan akan menghasilkan temuan baru yang mempunyai potensi untuk diterjemahkan menjadi inovasi dalam rekayasa genetika. Di luar kegunaannya sebagai alat rekayasa genetika, penelitian *Agrobacterium* bisa dibilang mempunyai dampak besar berdampak pada pemahaman kita tentang proses biologis mendasar pada bakteri, termasuk tetapi tidak terbatas pada komunikasi sel-sel, sekresi, pertumbuhan sel, dan dinamika kromosom. Seperti halnya semua sistem model yang baik, ada banyak fenomena dan wawasan yang membahasnya masih harus ditemukan dengan eksperimen, pendekatan, dan perspektif yang tepat. Penelitian *Agrobacterium* terus menginformasikan berbagai bidang biologi dan berkembang berbagai arah baru di garis depan mikrobiologi.

4. Kesimpulan

Aplikasi *A. tumefaciens* untuk jangka panjang memiliki prospek masa depan yang menjanjikan walaupun perlu dilakukan berbagai metode pendekatan secara seluler agar aman dan terkendali sebagai vektor plasmid.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ini disampaikan kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam menyalurkan ide tulisan ini dan kepada pengelola jurnal yang telah memberikan kesempatan untuk terbit dari hasil pemikiran kami bersama ini.

6. Daftar Pustaka

- Abdilah, N. A., Rezaldi, F., Pertiwi, F. D., & Fadillah, M. F. (2022). fitokimia dan skrining awal metode bioteknologi fermentasi kombucha bunga telang (*Clitoria Ternatea* L) sebagai bahan aktif sabun cuci tangan probiotik. *MEDFARM: Jurnal Farmasi dan Kesehatan*, 11(1), 44-61.
- Abdilah, N. A., Rezaldi, F., Ma'ruf, A., Safitri, E., & Fadillah, M. F. (2022). Analisis kebutuhan biokimia gizi balita dan pengenalan kombucha bunga telang (*Clitoria ternatea* l) terhadap orang tua balita dalam meningkatkan imunitas: analysis of nutritional biochemical requirements of toddlers and the introduction of kombucha flower (*Clitoria Ternatea* L) on parents of total childhood in increasing immunity. *Medimuh: Jurnal Kesehatan Muhammadiyah*, 3(2), 59-66.
- Ballas N, Citovsky V. 1997. Nuclear localization signal binding protein from Arabidopsis mediates nuclear import of *Agrobacterium* VirD2 protein. *Proc Natl Acad Sci U S A* 94:10723–10728.
- Baltrus DA. 2016. Divorcing strain classification from species names. *Trends Microbiol* 24:431–439.
- Batrisyia, B., & Haryanto, I. (2023). Analisis Regulasi Pada Tanaman Transgenik dalam Perlindungan Varietas Tanaman Bagi Pemulia Tanaman. *Jurnal USM Law Review*, 6(3), 931-942.
- Braun AC, Mandle RJ. 1948. Studies on the inactivation of the tumorinducing principle in crown gall. *Growth* 12:255–269.
- Braun AC, Elrod RP. 1946. Stages in the life history of *Phytopomonas tumefaciens*. *J Bacteriol* 52:695–702.
- Brown, P. J., Chang, J. H., & Fuqua, C. (2023). *Agrobacterium tumefaciens*: a transformative agent for fundamental insights into host-microbe interactions, genome biology, chemical signaling, and cell biology. *Journal of Bacteriology*, 205(4), e00005-23.
- Bundock P, den Dulk-Ras A, Beijersbergen A, Hooykaas PJJ. 1995. Transkingdom T-DNA transfer from *Agrobacterium tumefaciens* to *Saccharomyces cerevisiae*. *EMBO J* 14:3206–3214.

- Cavara F. 1897. Tuberculosis della vite. Intorno alla eziologia di alcune malattie di piante coltivate. Le Stazioni Sperimentale Agraric Iltiana 30: 483–487.
- Chilton M-D, Drummond MH, Merlo DJ, Sciaky D, Montoya AL, Gordon MP, Nester EW. 1977. Stable incorporation of plasmid DNA into higher plant cells: the molecular basis of crown gall tumorigenesis. *Cell* 11: 263–271.
- Conn HJ. 1942. Validity of the genus *Alcaligenes*. *J Bacteriol* 44:353–360.
- Fadhillah, M., Rezaldi, F., Yenny, R. F., Maritha, V., Ayuwardani, N., & Suminar, E. (2024). Antibacterial Food Poisoning in Kombucha Bath Soap Formulation of Butterfly Pea Flower as a Pharmaceutical Biotechnology Product from 3 Cultivation Locations. *Jurnal Ilmiah Biosaintropis (Bioscience-Tropic)*, 10(1), 44–56.
- Fadillah, M. F., Rezaldi, F., Safitri, E., Sasmita, H., & Somantri, U. W. (2022). Narrative review: Utilization of horticultural commodity plant tissue culture technology as a Halal biotechnology method for food and pharmaceutical purposes. *International Journal Mathla'ul Anwar of Halal Issues*, 2(1), 28-34.
- Farrand SK, van Berkum PB, Oger P. 2003. *Agrobacterium* is a definable genus of the family Rhizobiaceae. *Int J Syst Evol Microbiol* 53:1681–1687.
- Flores-Félix JD, Menéndez E, Peix A, García-Fraile P, Velázquez E. 2020. History and current taxonomic status of genus *Agrobacterium*. *System Appl Microbiol* 43:126046
- Kado CI. 2014. Historical account on gaining insights on the mechanism of crown gall tumorigenesis induced by *Agrobacterium tumefaciens*. *Front Microbiol* 5:340.
- Kerr A. 1969. Transfer of virulence between isolates of *Agrobacterium*. *Nature* 223:1175–1176.
- Malpighi M. 1679. On galls. *Anotomia Plantarum*.
- Nester EW, Gordon MP, Kerr A (ed). 2005. *Agrobacterium tumefaciens: from plant pathology to biotechnology*. American Phytopathological Society Press, St. Paul, MN.
- Petit A, Delhaye S, Tempe J, Morel G. 1970. Recherches sur les guanidines des tissus de crown gall: mise en evidence d'une relation biochimique spécifique entre les souches d'*Agrobacterium tumefaciens* es les tumeurs qu'elles induisent. *Physiol Veg* 8:205–213.
- Rezaldi, F., Ningtyas, R. Y., Anggraeni, S. D., Ma'ruf, A., Fatonah, N. S., Pertiwi, F. D., Fitriyani, F., A, L. D., US, S., Fadillah, M. F., & Subekhi, A. I. (2021). Pengaruh Metode Bioteknologi Fermentasi Kombucha Bunga Telang (*Clitoria ternatea* L) Sebagai Antibakteri Gram Positif Dan Negatif. *Jurnal Biotek*, 9(2), 169-185.
- Rezaldi, F., Asep, N., Mu'jijah, S. H., Suyatmo, S. U., & Oktavia, S. (2021). Multiplikasi Tunas dan Induksi Perakaran Tanaman Nilam (*Pogestemon cablin* Benth) secara In Vitro pada Medium Murashige and Skoog (MS). *Jurnal JIIP*, 1(1), 77-84.
- Rezaldi, F., Safitri, E., Abdilah, N. A., Mu'jijah, M., & Setiawan, U. (2022). Analisis Kemampuan Bioteknologi Farmasi DiTinjau Dari SELF REGULATED LEARNING: Studi Kasus Pada Mahasiswa S1 Farmasi Universitas Mathla'ul Anwar Banten. *Jurnal Biogenerasi*, 7(2), 243-250.
- Rezaldi, F., Firmansyah, F., Maharani, M., Hayani, R. A., Margarisa, D., Purchia, I. D., Muhardiyanti, M., Nabila, F., Suswari, P., Nur, M. H., & Ramadhan, R. A. (2023). Pemberian Edukasi Mengenai Bioteknologi Kombucha Bunga Telang Sebagai Minuman Probiotik Peningkat Sistem Imun, Bahan Aktif Obat dan Kosmetik, Bahan Baku Pupuk Cair Organik, dan Peningkat Ekonomi Kepada Siswa SMAN 05 Cilegon Yang Terlibat Dalam Karya Ilmiah. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 6(3), 749-760.
- Rezaldi, F., Maritha, V., Yenny, R., Fadillah, M., Sugiono, S., Saifullah, I., Rohmatulloh, R., Munir, M., Kurniawan, M., & Kolo, Y. (2024). Kajian Pustaka : Isu Isu Terkini Mengenai Produk Bioteknologi Yang Mengarah Pada Rekayasa Genetika (GMO/Genetically Modified Organism) Serta Tidak Terbukti Secara Ilmiah Merugikan Dari Sudut Pandang (Hukum, Peternakan, Pertanian, Dan Farmasi). *Jurnal Ilmiah Farmasi Attamru (JIFA)*, 5(2), 1-39.
- Rezaldi, F., Millah, Z., Susiyanti, S., Gumilar, R., & Yenny, R. F. (2024). Peran Biotek Gen Tanaman

- Pada Bidang Pangan dan Farmasi Sebagai Bahan Sediaan Pangan Fungsional, Bahan Aktif Obat dan Kosmetik Natural. *Jurnal Agroteknologi Merdeka Pasuruan*, 8(1), 01-09.
- Rezaldi, F., Yenny, R. F., Maritha, V., Andry, M., & Pamungkas, B. T. (2024). Telang Flower Kombucha Hand Wash Soap as a Pharmaceutical and Antibacterial Biotechnology Product isolated from Cilegon Coconut Market Vegetable Waste: Sabun Cuci Tangan Kombucha Bunga Telang Sebagai Produk Bioteknologi Farmasi dan Antibakteri yang Diisolasi dari Limbah Sayuran Pasar Kelapa Cilegon. *Journal of Applied Plant Technology*, 3(1), 11-20.
- Rezaldi, F., Sathi, S. F., Ragil, R. W., Farida, F. K., Iin, I. H. G., & Surya, M. S. (2024). Pengenalan Mengenai Manfaat Kombucha Bunga Telang Secara Nyata Sebagai Bahan Aktif Sediaan Kosmetik Dan Produk Bioteknologi Farmasi Ramah Lingkungan Kepada Siswa Siswi KIR Biologi SMAN 5 Cilegon. *Jurnal Pengabdian dan Pengembangan Masyarakat Indonesia*, 3(1), 8-20.
- Rezaldi, F., Utami, A. W. U. A. W., Sugiono, S. S. S., Saifullah, I. S. I., Kurniawan, M. K. M., Rohmatulloh, R. R. R., & Munir, M. M. M. (2024). Diskusi Mengenai Pemanfaatan Kombucha Bunga Telang Kepada Siswi SMAN 5 Cilegon Banten Sebagai Minuman Probiotik Pengendali Emosi Ketika Datang Bulan. *Jurnal Igakerta*, 1(2), 20-27.
- Smith EF, Townsend CO. 1907. A plant-tumor of bacterial origin. *Science* 25:671–673.
- Susilo, H. (2019). Analisis Potensi Budidaya Tanaman Transgenik di Indonesia. *Jurnal Lingkungan dan Sumberdaya Alam (JURNALIS)*, 2(1), 65-74.
- Van Larebeke N, Genetello C, Schell J, Schilperoort RA, Hermans AK, Hernalsteens JP, Van Montagu M. 1975. Acquisition of tumour-inducing ability by non-oncogenic agrobacteria as a result of plasmid transfer. *Nature* 255:742–743.
- Watson B, Currier TC, Gordon MP, Chilton MD, Nester EW. 1975. Plasmid required for virulence of *Agrobacterium tumefaciens*. *J Bacteriol* 123: 255–264.
- White PR, Braun AC. 1941. Crown gall production by bacteria-free tumor tissues. *Science* 94:239–241.
- Young JM, Kuykendall LD, Martínez-Romero E, Kerr A, Sawada H. 2001. A revision of *Rhizobium Frank 1889*, with an emended description of the genus, and the inclusion of all species of *Agrobacterium Conn 1942* and *Allorhizobium undicola de Lajudie et al. 1998* as new combinations: *Rhizobium radiobacter*, *R. rhizogenes*, *R. rubi*, *R. undicola* and *R. vitis*. *Int J Syst Bacteriol* 51:89–103.
- Zambryski P. 2013. Fundamental discoveries and simple recombination between circular plasmid DNAs led to widespread use of *Agrobacterium tumefaciens* as a generalized vector for plant genetic engineering. *Int J Dev Biol* 57:449–452.
- Zhu Y, Nam J, Humara JM, Mysore KS, Lee L-Y, Cao H, Valentine L, Li J, Kaiser AD, Kopecky AL, Hwang H-H, Bhattacharjee S, Rao PK, Tzfira T, Rajagopal J, Yi H, Yadav BS, Crane YM, Lin K, Larcher Y, Gelvin MJ, Knue M, Ramos C, Zhao X, Davis SJ, Kim S-I, Ranjith-Kumar CT, Choi Y-J, Hallan VK, Chattopadhyay S, Sui X, Ziemienowicz A, Matthyse AG, Citovsky V, Hohn B, Gelvin SB. 2003. Identification of *Arabidopsis* rat mutants. *Plant Physiol* 132:494–505.