

A Literature Review on Transgenic Crops in Indonesia and ASEAN Countries: Transgenic Research Development and Future Prospects for Food Sovereignty

Alivia Zulkarnain¹, Amanda Nurhafitri¹, Djong Hon Tjong¹, Muhammad Idris^{1*}

¹Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat, 25163, Indonesia;

Article History

Received : September 16th, 2025

Revised : December 11th, 2025

Accepted : December 22th, 2025

*Corresponding Author:

Muhammad Idris, Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Padang, Padang, 25163, Indonesia;
Email: midris@sci.unand.ac.id

Abstract: The growing global population, climate change, and limited agricultural land are key challenges threatening food security. One innovative solution is the development of transgenic crops, genetically engineered plants that possess superior traits such as resistance to pests, diseases, abiotic stress, and improved nutritional value. This literature review explores the historical development of transgenic research in Indonesia and other ASEAN countries, the technological approaches used—including *Agrobacterium*-mediated transformation, biolistic methods, and CRISPR/Cas9 - and the future prospects for achieving national food sovereignty. While countries like China and the Philippines have advanced in Genetically Modified Organism (GMO) commercialization, Indonesia remains in the research phase due to various obstacles, including limited expertise, low research funding, regulatory constraints, and public acceptance. Strengthening regulatory frameworks, human resource development, and international collaborations are essential for supporting sustainable agricultural biotechnology. This paper highlights the need for a strategic, science-based approach to integrating transgenic technology into Indonesia's agricultural system as part of its long-term food security and innovation agenda.

Keywords: Agricultural innovation, CRISPR/Cas9, transgenic crops, genetic engineering, plant transformation.

Pendahuluan

Pertumbuhan penduduk global, perubahan iklim, serta keterbatasan lahan pertanian telah meningkatkan kebutuhan akan inovasi dalam sistem produksi pangan. Tantangan tersebut menuntut hadirnya pendekatan ilmiah yang mampu menghadirkan tanaman dengan produktivitas tinggi, ketahanan lingkungan yang lebih baik, dan nilai gizi yang meningkat, yang mana salah satu pendekatan ilmiah yang diharapkan ini adalah tanaman transgenik. Secara konsep, tanaman transgenik merupakan tanaman yang telah dimodifikasi secara genetik dengan menyisipkan satu atau lebih gen dari spesies yang sama atau berbeda, guna memperoleh sifat unggul seperti ketahanan terhadap hama, penyakit, cekaman abiotik, serta

peningkatan hasil dan kualitas produk (Rani & Usha, 2013; Rezaldi et al., 2024). Berbeda dengan pemuliaan konvensional yang terbatas pada spesies yang kompatibel, rekayasa genetika memungkinkan transfer gen lintas spesies, membuka peluang luas dalam perbaikan sifat tanaman secara lebih cepat serta presisi yang lebih tinggi (Ahmad & Mukhtar, 2017; Gilbert, 2013).

Sejalan dengan perkembangan teknologi, berbagai metode transformasi seperti *Agrobacterium tumefaciens*, biolistic bombardment, dan penyuntikan genom CRISPR/Cas9 telah banyak digunakan karena efisiensi, stabilitas, dan kemampuan penyuntingannya yang presisi (Costa et al., 2017; Gan & Ling, 2022). Selain itu, teknologi ini juga diarahkan untuk peningkatan nutrisi pangan,

seperti *Golden Rice* dan padi biofortifikasi zat besi (Huang et al., 2021; Roy et al., 2000).

Meskipun perkembangan global menunjukkan kemajuan signifikan, aplikasi tanaman transgenik di kawasan Asia, terutama Asia Tenggara, mengalami dinamika yang berbeda. Tiongkok telah menjadi pelopor komersialisasi tanaman transgenik di Asia melalui penanaman kapas Bt pada area lebih dari 350.000 hektar sejak 1999 (Hashim et al., 2002). Di ASEAN, negara seperti Filipina, Thailand, dan Indonesia mulai melakukan penelitian dan uji lapangan terhadap GMO. Filipina menjadi negara pertama yang mengkomersialkan jagung Bt pada tahun 2002, disusul oleh Indonesia dengan pengembangan kentang, padi, dan tebu transgenik (Pasmawati et al., 2021; Shofiana, 2021).

Genetically Modified Organisms (GMO) telah menjadi bagian dari sistem pangan sejak tahun 1990-an, terutama melalui tanaman yang direkayasa untuk tahan herbisida dan serangga. Namun, pemahaman konsumen tentang GMO tidak berkembang secepat adopsinya. Banyak konsumen masih memiliki pengetahuan terbatas, miskonsepsi, atau bahkan tidak mengenal produk GMO sama sekali. Sumber informasi utama mereka adalah media, internet, dan berita, yang seringkali kurang akurat dibandingkan informasi dari ahli sains (Wunderlich & Gatto, 2015).

Indonesia menghadapi tantangan yang cukup besar dalam mengembangkan tanaman transgenik. Keterbatasan sumber daya manusia, pendanaan penelitian, serta regulasi *biosafety* yang belum optimal menjadi hambatan utama dalam percepatan adopsi teknologi ini. Di samping itu, isu sosial dan keberterimaan publik turut memengaruhi implementasi teknologi GMO di lapangan (Amirhusin, 2021; Mastur et al., 2020). Kondisi ini menunjukkan perlunya strategi nasional yang lebih komprehensif, mencakup penguatan kapasitas riset, peningkatan fasilitas, penyempurnaan regulasi, kolaborasi internasional, dan edukasi publik berbasis sains agar pengembangan bioteknologi pertanian dapat berjalan secara berkelanjutan (Susilo, 2019). Urgensi *review* ini terletak pada pentingnya membangun fondasi ilmiah dan kebijakan yang kuat untuk mendukung kedaulatan pangan nasional melalui pemanfaatan bioteknologi pertanian yang aman, efektif, dan berkelanjutan.

Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*literature review*) dengan pendekatan kualitatif deskriptif. Data dikumpulkan dari berbagai sumber tertulis, baik artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal nasional maupun internasional, serta artikel non-ilmiah yang relevan. Proses pengumpulan data dilakukan melalui pencarian sistematis di mesin pencari akademik seperti Google Scholar dan Google menggunakan kata kunci: tanaman transgenik, Indonesia, ASEAN, dan Asia.

Kriteria inklusi yang digunakan dalam seleksi literatur meliputi kesesuaian topik dengan fokus penelitian, keterbaruan (terbit minimal dalam 10 tahun terakhir), serta relevansi dalam menjelaskan konsep, teknologi, perkembangan, tantangan, dan prospek tanaman transgenik. Artikel yang diperoleh kemudian dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi tren, peluang, dan tantangan pengembangan tanaman transgenik di Indonesia dan kawasan ASEAN.

Hasil dan Pembahasan

Tanaman Transgenik

Tanaman transgenik adalah tanaman yang sudah dimodifikasi dengan teknik rekayasa genetika. Hal ini dilakukan untuk memperkenalkan sifat baru ke dalam tanaman yang sebelumnya tidak dimiliki oleh spesies tersebut. Sebuah tanaman transgenik mengandung satu atau beberapa gen yang telah disisipkan. Tanaman yang diproduksi dari hasil rekayasa genetika dikenal sebagai istilah GMO (*Genetically Modified Organism*) (Rezaldi et al., 2024). Urutan gen yang disisipkan disebut transgen yang berasal dari spesies itu sendiri atau spesies yang berbeda. Tujuan dari menyisipkan gen tersebut untuk memperoleh dengan sifat yang diharapkan. Sifat tersebut memberi keuntungan dengan meningkatkan masa simpan, hasil lebih tinggi dan kualitas lebih baik, tahan hama, dingin, panas, serta kekeringan (Rani & Usha, 2013)

Proses rekonstruksi tanaman transgenik terdiri dari 3 komponen utama yakni enzim restriksi, kloning vektor, dan genome library. (1) Enzim restriksi dapat mengenali dan memotong DNA untai ganda dilokasi target. Sebagian besar

enzim restriksi mengenali urutan empat hingga delapan pasangan basa dan menghidrolisis satu ikatan fosfodiester pada setiap untai (Docobook, 2023; Pangayaan.com, 2023). Enzim restriksi dapat membuat fragmen dengan ujung lengket, seperti halnya enzim *Bam*HI, atau ujung tumpul, seperti pada *Hae*III. Ligase DNA digunakan untuk menggabungkan fragmen DNA yang dihasilkan oleh enzim restriksi. Ketersediaan berbagai jenis enzim restriksi dan ligase memungkinkan pemindahan urutan DNA tertentu dari satu molekul ke molekul lainnya (Kompasiana, 2023). (2) Kloning vektor adalah komponen yang mampu menyalin dan memperbanyak informasi genetik dari fragmen DNA target melalui plasmid. DNA rekombinan yang terdiri dari vektor plasmid dan konstruksi sisipan dimasukkan ke dalam sel inang bakteri yang sesuai melalui proses yang disebut transformasi (Zulfarina & Mahadi, 2019). Kloning vektor lain yang digunakan berupa DNA bakteriofag, DNA virus eukariotik, dan kromosom buatan bakteri atau ragi (*Bacterial or Yeast Artificial Chromosomes*, BAC atau YAC) (Zerbini *et al.*, 2014). (3) Genome Library dibuat dengan mengkloning seluruh genom organisme ke dalam vektor berkapasitas besar seperti YAC atau BAC. Namun, karena fragmentasi acak dan keberadaan intron, hanya sebagian fragmen yang mengandung gen pengkode utuh. Sebagai alternatif, pustaka cDNA dibuat dari mRNA yang telah matang untuk merepresentasikan gen fungsional. mRNA diisolasi, lalu disintesis menjadi cDNA2 menggunakan reverse transcriptase, dan kemudian dikloning. Setelah gen target diperoleh, gen tersebut dimasukkan ke dalam kaset ekspresi (promotor, urutan pengkode, terminator) dan dimuat ke vektor untuk transformasi tanaman.

Metode dalam mengembangkan tanaman transgenik dapat menggunakan Transformasi genetik dengan *Agrobacterium tumefaciens*. *Agrobacterium* adalah satu satunya makhluk hidup selular yang secara alami bisa mentransfer materi genetik dari prokariot ke eukariot (Khasa & Kumar, 2023). Penelitian oleh Martins *et al.*, 2015 menggunakan metode floral-dip pada *Setaria viridis* yang dimediasi oleh *A. tumefaciens*. Metode lain dapat menggunakan CRISPR-Cas9 yang telah banyak diadopsi luas untuk menyunting genom tanaman seperti mutagenesis terarah pada *Solanum tuberosum*

dengan target gen ACETOLACTATE SYNTHASE1 (StALS1) dan melihat apakah mutasi yang dihasilkan dapat diwariskan melalui klon dan generasi bebas Cas9 (Butler *et al.*, 2015). Metode Biolistic gun juga dapat digunakan untuk transformasi DNA seperti ekspresi gen osmotin dari *Nicotiana tabacum* pada *Camellia sinensis* (Saini *et al.*, 2012).

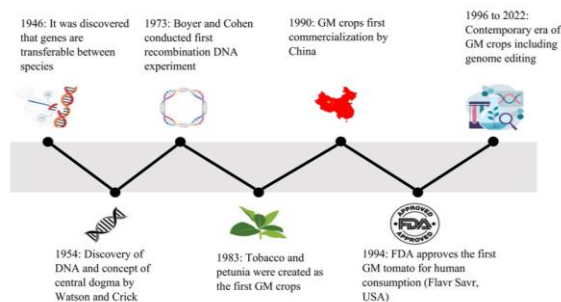
Beberapa riset terbaru dilakukan untuk meningkatkan kualitas dari suatu tanaman. Riset oleh Yang *et al.* (2025) berfokus pada peningkatan kekerasan buah tomat sebagai upaya memperpanjang umur simpan dan meningkatkan kualitas pascapanen. Tujuannya adalah untuk menghasilkan varietas tomat dengan buah yang lebih keras tanpa mengorbankan kualitas lainnya. Peneliti menggunakan teknologi pengeditan gen CRISPR/Cas9 untuk menonaktifkan dua gen pengatur kekerasan buah, yaitu FIS1 dan PL, pada dua varietas tomat, OT44 dan OT45. Metode ini dilakukan melalui transformasi genetik berbasis *Agrobacterium* dan seleksi tanaman bebas transgen. Hasilnya menunjukkan bahwa mutan dengan gen ganda yang dinonaktifkan memiliki peningkatan signifikan dalam kekerasan buah, serta tingkat kehilangan air dan kerusakan akibat penyimpanan yang lebih rendah dibandingkan tipe liar. Selain itu, mutasi ini tidak memengaruhi ukuran buah, waktu pematangan, maupun kandungan zat padat terlarut, sehingga mendukung pendekatan ini sebagai strategi pemuliaan molekuler tomat yang efektif dan cepat.

Selain itu, juga ada riset oleh Zhao *et al.* (2025), dimana penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan produksi dendrobine senyawa alkaloid penting dengan nilai medis tinggi dalam tanaman *Dendrobium* melalui aktivasi transkripsi gen endogen menggunakan sistem CRISPR/Act3.0. Dua pendekatan digunakan: (1) overekspresi tujuh gen biosintesis dendrobine dalam satu vektor (*multigene stacking*), dan (2) aktivasi simultan beberapa gen endogen kunci melalui CRISPR/Act3.0 di *Dendrobium nobile* dan *D. catenatum*. Metode ini mencakup transformasi genetik dan infiltrasi daun dengan vektor CRISPR, serta pengukuran kadar dendrobine menggunakan LC/MS. Hasil menunjukkan peningkatan produksi dendrobine sebesar 30,1% pada daun yang diinfiltrasi sementara dan 35,6% pada tanaman transgenik, terutama pada *D. catenatum* yang awalnya

memiliki kadar dendrobine rendah. Sistem CRISPR/Act3.0 terbukti lebih efisien dalam mengaktifkan banyak gen dibandingkan teknik overekspresi konvensional, dan memberikan landasan yang kuat untuk pengembangan pemuliaan molekuler pada anggrek *Dendrobium*.

Faktor Pemicu Pengembangan Tanaman Transgenik

Sejak pengembangan tanaman hasil rekayasa genetika pertama tiga puluh tahun yang lalu, teknologi transgenik memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perkembangan masyarakat kita dengan meningkatkan produksi tanaman secara luar biasa (Christou, 2013; Gilbert, 2013). Pengembangan tanaman transgenik didorong oleh keterbatasan metode pemuliaan tradisional yang hanya memungkinkan perbaikan sifat antar spesies yang masih bisa disilangkan, serta meningkatnya kebutuhan akan tanaman yang tahan terhadap hama, penyakit, dan cekaman lingkungan seperti kekeringan dan salinitas (Ahmad & Mukhtar, 2017).



Gambar 1. Timeline berbagai peristiwa sejak penemuan bahwa gen dapat dipindahkan pada tahun 1946 (Sumber: Aziz et al., 2022).

Teknologi rekayasa genetika memungkinkan penyisipan gen asing untuk membentuk sifat unggul seperti peningkatan fotosintesis, biofortifikasi, dan ketahanan terhadap herbisida. Transformasi genetik telah mempercepat proses pengembangan varietas tanaman yang sebelumnya memakan waktu lama secara konvensional (Gilbert, 2013). Seiring dengan perkembangan teknologi, tujuan pembentukan tanaman transgenik juga bergeser dari sekadar meningkatkan hasil panen menjadi peningkatan kualitas gizi dan nilai tambah produk, seperti pada pengembangan *Golden Rice* dan padi dengan kandungan zat besi lebih tinggi

(Huang et al., 2021; Roy et al., 2000). Adanya keberhasilan teknologi ini juga didukung oleh metode transformasi seperti *Agrobacterium tumefaciens*, yang terbukti efisien dan stabil dalam menyisipkan gen ke dalam genom tanaman (Roy et al., 2000). Perkembangan penemuan gen yang bisa disisipkan diilustrasikan pada Gambar 1.

Teknik Pengembangan Tanaman Transgenik

Teknik pengembangan tanaman transgenik merupakan pendekatan bioteknologi modern yang memungkinkan penyisipan gen asing ke dalam genom tanaman guna meningkatkan sifat-sifat unggul, seperti ketahanan terhadap hama, penyakit, dan kondisi lingkungan ekstrem. Beberapa teknik pengembangan tanaman transgenik menggunakan metode molekuler, seperti CRISPR-Cas9 yang menggunakan prinsip *genome editing* (Gan & Ling, 2022), DNA rekombinan yang menggunakan prinsip vektor dan inang (Glick et al., 1994), serta metode-metode lain seperti *biolistic bombardment*, *electroporation*, fusi protoplas, dan konstruksi gen (Andayani et al., 2023).

Salah satu pendekatan paling inovatif dalam pengembangan tanaman transgenik saat ini adalah pemanfaatan sistem CRISPR/Cas9. Teknologi ini memungkinkan penyuntingan gen dilakukan secara spesifik dan efisien, sehingga metode ini menjadi pilihan yang lebih unggul dibandingkan teknik sebelumnya seperti *Zinc Finger Nucleases* (ZFNs) dan *Transcription Activator-Like Effector Nucleases* (TALENs) (Gan & Ling, 2022). Sistem CRISPR/Cas9 bekerja dengan memanfaatkan mekanisme imun adaptif *Streptococcus pyogenes*, di mana kompleks antara *single guide RNA* (sgRNA) dan protein Cas9 mengenali urutan DNA target dan kemudian memotongnya secara presisi untuk memicu perubahan genetik (Costa et al., 2017). Teknologi ini telah diterapkan untuk meningkatkan ketahanan, hasil, dan kualitas tanaman pangan tropis seperti padi, kedelai, dan lobak minyak (Haque et al., 2018; Wang et al., 2018).

Meskipun menjanjikan, penerapan CRISPR/Cas9 masih menghadapi sejumlah kendala teknis, terutama terkait efisiensi metode pengantaran DNA ke dalam sel tanaman. Sebagian besar metode transformasi in planta belum menunjukkan konsistensi yang memadai

sehingga diperlukan pengembangan teknik pengiriman yang lebih efektif. Selain itu, regulasi yang ketat terkait tanaman hasil penyuntingan gen dan persepsi publik terhadap keamanan bioteknologi turut menjadi tantangan besar dalam proses komersialisasi teknologi ini (Gan & Ling, 2022).

Selain CRISPR/Cas9, terdapat metode lain yang digunakan untuk mentransformasikan gen ke dalam tanaman. Salah satunya adalah biolistic bombardment, yaitu penembakan partikel DNA yang dilapisi logam seperti tungsten ke dalam sel tanaman, dan metode ini banyak digunakan pada tanaman monokotil yang sulit ditransformasi dengan *Agrobacterium tumefaciens* (Andayani *et al.*, 2023). Metode lain adalah elektroporasi, di mana sel tanaman dibuat menjadi protoplas dan dikenai kejutan listrik untuk membuka pori membran agar DNA asing bisa masuk. Setelah itu, dinding sel diregenerasi dan sel diseleksi melalui media antibiotik (Ziya, 2023).

Fusi protoplas merupakan metode lain yang memungkinkan kombinasi sifat genetik dari dua spesies berbeda melalui penggabungan protoplas, lalu diregenerasi menjadi tanaman utuh. Metode ini sangat berguna untuk mengatasi hambatan ketidaksesuaian genetik antar spesies (Armita, 2020). Teknik konstruksi gen juga memainkan peran penting. Konstruksi gen terdiri dari promoter, terminator, dan selectable marker. Promoter seperti 35S dari Cauliflower Mosaic Virus atau nos dari *A. tumefaciens* berfungsi untuk mengarahkan ekspresi gen. *Selectable marker* digunakan untuk memastikan keberhasilan transformasi, seperti GFP, atau gen ketahanan terhadap antibiotik dan herbisida (Low *et al.*, 2018).

Sejarah Pengembangan Transgenik di Asia

China menjadi negara Asia pertama yang secara signifikan mengembangkan dan mengomersialkan tanaman hasil rekayasa genetika (GMO). Pada tahun 1999, enam tanaman transgenik mendapat lisensi komersial di negara ini, termasuk kapas Bt, tomat transgenik, petunia, dan paprika manis. Di antara semuanya, kapas Bt menjadi tanaman utama yang ditanam secara luas dengan luasan lebih dari 350.000 hektar selama tahun 1999–2000 (Hashim *et al.*, 2002).

Kawasan ASEAN turut mengalami peningkatan signifikan dalam pengembangan

bioteknologi tanaman. Lima negara (Singapura, Malaysia, Thailand, Filipina, dan Indonesia) telah melakukan penelitian bioteknologi tanaman pangan lokal secara intensif. Thailand dan Filipina telah melaksanakan uji lapangan terhadap beberapa tanaman transgenik seperti kapas Bt, jagung Bt, dan tomat *Flavr Savr*. Sementara itu, Indonesia dilaporkan pernah melakukan uji lapangan komersial kapas Bt di Sulawesi. Malaysia, meskipun belum menyetujui uji lapangan secara komersial pada saat itu, telah mempersiapkan uji lapangan pepaya tahan virus bercak cincin dan padi tahan tungro setelah memperoleh persetujuan dari Komite Penasihat Modifikasi Genetik (Hashim *et al.*, 2002).

Sejarah Pengembangan Transgenik di Indonesia & ASEAN

Indonesia pertama kali menanggapi perkembangan tanaman transgenik pada tahun 1986 dengan mendirikan pusat penelitian bioteknologi yakni Pusat Antar Universitas di IPB, UGM, dan ITB selain BB Lembang Bioteknologi dan LIPI. Saat ini, pengembangan tanaman transgenik di Indonesia masih berada pada tahap penelitian dan belum mencapai tahap komersialisasi. Salah satu bentuk kerja sama internasional yang telah dilakukan adalah pengembangan kentang tahan penyakit *Potato Tuber Moth* (PTM). Badan Penelitian dan Pengembangan Penelitian (Badan Litbang) telah menargetkan bahwa Indonesia memiliki padi transgenik pada tahun 2007 dan jagung transgenik pada tahun 2010. Pada tahun 2012, Komisi Keamanan Hayati memberikan rekomendasi bahwa varietas jagung transgenik RRNK603 dan Bt Mon89034 aman digunakan sebagai pakan ternak. Rekomendasi ini diberikan setelah dikabulkannya permohonan dari pemilik benih, yaitu perusahaan multinasional Monsanto.

Berbagai penelitian yang berhubungan dengan tanaman transgenik masih dilakukan di Indonesia. Tanaman tersebut meliputi padi, kedelai, papaya, kentang, ubi jalar, dan tomat. Berdasarkan pernyataan Susilo (2019), Indonesia mengembangkan tebu transgenik di Jawa Timur dan padi transgenik di Jawa Barat. Negara-negara di Asia Tenggara memiliki perhatian tinggi dalam bioteknologi dan perkembangannya dalam bidang pertanian. Pedagang, konsumen, dan kelompok usaha tani menyepakati agar

produk hasil GMO diberi label. Di Thailand, pembuat kebijakan dan konsumen membuat peraturan agar pemangku jabatan yang menanggung biaya label tersebut. Mayoritas pemangku jabatan di Thailand, Vietnam, Indonesia dan Malaysia menunjukkan perlunya penyempurnaan terhadap pelaksanaan peraturan produk transgenik di negaranya masing-masing (Faisal, 2005).

Negara Filipina merupakan negara pertama di Asia Tenggara yang menyetujui penggunaan jagung transgenik (jagung Bt) secara komersial pada tahun 2002 (Croplife Indonesia, 2013). Berdasarkan data dari ISAAA dan Kementerian Pertanian Filipina, Jagung Bt mampu meningkatkan hasil panen hingga 24% dibandingkan varietas konvensional. Biaya pestisida juga berkurang hingga 60% dan hal ini meningkatkan pendapatan petani di Filipina. Filipina menggunakan pola tanam 80% tanaman transgenik dan 20% non transgenik untuk meningkatkan produktivitas pertanian. Hal ini merupakan bentuk usaha dalam menyelesaikan permasalahan pangan (Shofiana, 2021).

Salah satu kemajuan penting dalam pengembangan tanaman transgenik di Indonesia ditunjukkan oleh penelitian kentang transgenik yang dikembangkan oleh IPB (Pasmawati *et al.*, 2021). Tanaman kentang kultivar IPB CP3 direkayasa dengan menyisipkan gen LYZ-C untuk ketahanan terhadap penyakit layu bakteri (*Ralstonia solanacearum*). Hasilnya menunjukkan dua klon transgenik, CP3lyz1 dan CP3lyz6, memiliki tingkat ketahanan tinggi dengan tingkat infeksi hanya 16,7–20%, dibandingkan tanaman non-transgenik yang sepenuhnya terinfeksi. Penelitian ini menandai langkah penting dalam pengembangan varietas kentang unggul berbasis ketahanan genetik di Indonesia.

Tantangan Pengembangan Tanaman Transgenik

Tanaman transgenik berpotensi dalam banyak hal, salah satunya sebagai solusi mengatasi krisis pangan. Akan tetapi, implementasinya di Indonesia masih jauh dari rata-rata global. Sebagai perbandingan, area pertanian yang digunakan untuk menanam GMO di Indonesia hanya berkisar 0,02 juta Ha dibandingkan dengan India sebagai negara

dengan area GMO terbesar di Asia Pasifik (12,1 juta Ha) atau USA sebagai negara dengan implementasi tanaman transgenik terbesar dunia dengan luas area tanam tanaman transgenik sebesar 74,4 juta Ha. (AgbioInvestor-GM, 2024).

Tantangan utama dalam pengembangan bioteknologi di Indonesia adalah terbatasnya tenaga ahli, khususnya di bidang biosafety, penilaian risiko, dan manajemen risiko. Untuk itu, pembangunan kapasitas SDM secara komprehensif melalui pendekatan multidisipliner sangat diperlukan, disertai peningkatan pendanaan penelitian yang saat ini masih rendah dibanding negara ASEAN lain—hanya 0,21% dari PDB. Selain dukungan fasilitas dan pendanaan, komitmen kuat pemerintah juga penting untuk menjamin keberlanjutan pengembangan bioteknologi yang aman dan berdampak bagi ekonomi nasional. Agar tanaman transgenik dan produknya diterima publik, diperlukan regulasi yang sesuai standar internasional serta menjamin keamanan pangan, pakan, dan lingkungan. Indonesia telah mengembangkan sejumlah regulasi sejak 1996, termasuk PP No. 28 Tahun 2004 dan PP No. 21 Tahun 2005, namun perangkat hukum tersebut perlu terus disempurnakan agar implementasinya lebih efektif, ekonomis, dan konsisten (Amirhusin., 2021).

Indonesia sebagai negara yang memiliki keanekaragaman tinggi juga menghadapi tantangan dalam sudut pandang lain yakni ketersediaan Plant Genetic Resources (PGR). Habitat PGR dapat terancam mengalami deforestasi, industrialisasi, urbanisasi oleh manusia yang mengarah pada berkurangnya ketersediaan lahan untuk penanaman PGR (Mastur *et al.*, 2020). Kendala dan tantangan yang dihadapi dalam pengembangan tanaman transgenik di Indonesia dapat diatasi melalui dukungan lembaga fasilitator internasional seperti *Agricultural Biotechnology Support Project* (ABSP) dan *International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications* (ISAAA) (Susilo., 2019).

Kesimpulan

Pengembangan tanaman transgenik merupakan solusi potensial untuk mengatasi tantangan ketahanan pangan di tengah

pertumbuhan penduduk, perubahan iklim, dan keterbatasan lahan. Meskipun negara-negara ASEAN seperti Filipina telah berhasil mengkomersialkan tanaman GMO, Indonesia masih berada pada tahap penelitian dengan berbagai tantangan seperti kurangnya SDM ahli, keterbatasan pendanaan, regulasi yang belum optimal, dan isu sosial terkait penerimaan publik. Untuk mewujudkan kemandirian pangan melalui bioteknologi pertanian, Indonesia perlu memperkuat kapasitas riset nasional, memperbaiki regulasi yang sesuai dengan standar internasional, serta mendorong kolaborasi global dan edukasi publik. Dengan strategi yang tepat, Indonesia memiliki peluang besar untuk memanfaatkan teknologi transgenik secara berkelanjutan dan bertanggung jawab.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Biologi, melalui program Pascasarjana S2 Biologi, FMIPA Universitas Andalas yang telah memberikan fasilitas dalam penulisan artikel ini.

Referensi

- AgbioInvestor-GM. (2025). GM Production. Diakses 9 Juli 2025, dari <https://gm.agbioinvestor.com/gm-production>
- Ahmad, Niaz, & Mukhtar, Zahid. (2017). Genetic Manipulations in Crops: Challenges and Opportunities. *Genomics*, 109(5–6), 494–505. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2017.07.007>
- Andayani, R. D., Rahmatika, W., & Fitriyah, N. (2023). Transfomasi Genetik : Peluang dan Tantangan. *Jurnal Ilmiah Agrineca*, 23(1), 80–91. <https://doi.org/10.36728/afp.v23i1.2350>
- Armita, Devi. (2020). Plant Breeding Through Protoplast Fusion. *Jurnal Biologi UNAND*, 8(2), 42. <https://doi.org/10.25077/jbioua.8.2.42-47.2020>
- Aziz, M. A., Brini, F., Rouached, H., & Masmoudi, K. (2022). Genetically Engineered Crops for Sustainably Enhanced Food Production Systems. *Frontiers in Plant Science*, 13:1027828. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1027828>
- Butler, N. M., Atkins, P. A., Voytas, D. F., & Douches, D. S. (2015). Generation and Inheritance of Targeted Mutations in Potato (*Solanum tuberosum* L.) using the CRISPR/Cas System. *PLoS ONE*, 10(12), e0144591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144591>
- Christou, Paul. (2013). Plant Genetic Engineering and Agricultural biotechnology 1983–2013. *Trends in Biotechnology*, 31(3), 125–127. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.01.006>
- Ciplux. (2023). *Proses pembuatan DNA rekombinan*. <https://pengayaan.com/proses-pembuatan-dna-rekombinan.html>
- Costa, J. R., Bejcek, B. E., Mcgee, J. E., Fogel, A. I., Brimacombe, K. R., & Ketteler, R. (2017). *Genome Editing Using Engineered Nucleases and Their Use in Genomic Screening* (S. Markossian, A. Grossman, & H. Baskir, Eds.). Eli Lilly & Company and the National Center for Advancing Translational Sciences. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/>
- Faisal. (2015). Tanaman transgenik dan kebijakan pengembangannya di Indonesia. *Jurnal Ilmu Kefarmasian Indonesia*, 3(1).
- CropLife Indonesia. (2013). Filipina: Negara pertama di ASEAN yang menyetujui tanaman bioteknologi (PRG). <https://croplifeindonesia.or.id/filipina-negara-pertama-di-asean-yang-menyetujui-tanaman-bioteknologi-prg/>
- Docobook. (2023). *Aplikasi rekayasa genetika tanaman*. <https://docobook.com/aplikasi-rekayasa-genetika-tanaman8ad64473991dacc81b03f1b8c17377dd11285.html>
- Gan, Wen Cong, & Ling, Anna P. K. (2022). CRISPR/Cas9 in Plant Biotechnology: Applications and Challenges. *Biotechnology*, 103(1), 81–93. <https://doi.org/10.5114/bta.2022.113919>
- Gilbert, Natasha. (2013). Case studies: A hard look at GM crops. *Nature*, 497(7447), 24–26. <https://doi.org/10.1038/497024a>

- Glick, B. R., Pasternak, J. J., & Patten, C. L. (1994). *Molecular Biotechnology: Principles and Applications of Recombinant DNA* (4th ed.). ASM Press.
- Haque, E., Taniguchi, H., Hassan, M. M., Bhowmik, P., Karim, M. R., Smiech, M., Zhao, K., Rahman, M., & Islam, T. (2018). Application of CRISPR/Cas9 Genome Editing Technology for the Improvement of Crops Cultivated in Tropical Climates: Recent Progress, Prospects, and Challenges. *Frontiers in Plant Science* Vol. 9. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00617>
- Hashim, M., Osman, M., Abdullah, R., Pillai, V., Bakar, U. K. A., Hashim, H., & Daud, H. M. (2002). Research and Development of Transgenic Plants in Malaysia: An Example from An Asian Developing Country. *Food and Nutrition Bulletin*, 23(4), 367–375. <https://doi.org/10.1177/156482650202300410>
- Huang, X., Su, F., Huang, S., Mei, F., Niu, X., Ma, C., Zhang, H., Zhu, X., Zhu, J., & Zhang, J. (2021). Novel *Wx* Alleles Generated by Base Editing for Improvement of Rice Grain Quality. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(9), 1632–1638. <https://doi.org/10.1111/jipb.13098>
- Khasa, R., & Kumar, S. (2023). Methods of Development of Transgenic Plants. *The Pharma Innovation Journal*, 12(1), 1974–1976. <https://doi.org/10.22271/tpi>
- Low, L.-Y., Yang, S.-K., Kok, D.-X. A., Ong-Abdullah, J., Tan, N.-P., & Lai, K.-S. (2018). Transgenic Plants: Gene Constructs, Vector and Transformation Method. In *New Visions in Plant Science*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79369>
- Mastur, Lestari, P., & Sabran, M. (2020). Needs, opportunities and challenges for crop improvement in Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 482(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/482/1/012001>
- Martins, P. K., Nakayama, T. J., Ribeiro, A. P., Brito da Cunha, B. A. D., Nepomuceno, A. L., Harmon, F. G., Kobayashi, A. K., & Molinari, H. B. C. (2015). *Setaria viridis* Floral-dip: A Simple and Rapid Agrobacterium-mediated Transformation Method. *Biotechnology Reports*, 6, 61–63. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2015.03.005>
- Pasmawati, Tjahjoleksono, A., & Suharsono. (2021). Obtaining of Transgenic Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivar IPB CP3 Containing LYZ-C Gene Resistant to Bacterial Wilt Disease. *Indonesian Journal of Biotechnology*, 26(1), 48–53.
- Rani, S. J., & Usha, R. (2013). Transgenic Plants: Types, Benefits, Public Concerns and Future. *Journal of Pharmacy Research*, 6(8), 879–883. <https://doi.org/10.1016/j.jopr.2013.08.008>
- 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. *Journal of Applied Plant Technology*, 3(1), 11–20. <https://doi.org/10.30742/2ww4vj55>
- Roy, M., Jain, R. K., Rohila, J. S., & Wu, R. (2000). Production of Agronomically Superior Transgenic Rice Plants using Agrobacterium Transformation <eth>ods: Present Status and Future Perspectives. *Current Science*, 79(7), 954–960. <https://www.researchgate.net/publication/216530203>
- Saini, U., Kaur, D., Bhattacharya, A., Kumar, S., Singh, R. D., & Ahuja, P. S. (2012). Optimising Parameters for Biolistic Gun-Mediated Genetic Transformation of Tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 87(6), 11512919. <http://dx.doi.org/10.1080/14620316.2012.11512919>
- Shofiana, F. (2021). Tanaman Transgenik untuk Pertanian Masa Depan Indonesia. Mungkinkah?. *Jurnal Sudut Pandang*, 11(8), 21–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.55314/jsp.v2i8.162>
- Wang, H., Park, H., Liu, J., & Sternberg, P. W. (2018). An Efficient Genome Editing Strategy to Generate Putative Null Mutants in *Caenorhabditis elegans* Using

- CRISPR/Cas9. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 8(11), 3607–3616. <https://doi.org/10.1534/g3.118.200662>
- Wunderlich, S., & Gatto, K. A. (2015). Consumer Perception of Genetically Modified Organisms and Sources of Information. *Advances in Nutrition*, 6(6), 842–851. <https://doi.org/10.3945/an.115.008870>
- Yang, Q., Cai, L., Wang, M., Gan, G., Li, W., Li, W., Jiang, Y., Yuan, Q., Qin, C., Yu, C., & Wang, Y. (2025). CRISPR/cas9 Allows for the Quick Improvement of Tomato Firmness Breeding. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(1). <https://doi.org/10.3390/cimb47010009>
- Zendrato, Ribka Oktaviani. (2023). *Rekayasa genetika*. <https://www.kompasiana.com/ribkaoktavianizendrato4151/6854dbd8ed641578ac132563/rekayasa-genetika>
- Zerbini, F. M., Silva, F. N. da, Urquiza, G. P. C., & Basso, M. F. (2014). Transgenic Plants. In *Biotechnology and Plant Breeding: Applications and Approaches for Developing Improved Cultivars* (pp. 179–199). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418672-9.00008-8>
- Zhao, M., Yang, Z., Li, J., Ming, F., Kong, D., Xu, H., Wang, Y., Chen, P., Duan, X., Wang, M., & Wang, Z. (2025). Enhancement of Dendrobine Production by CRISPR/Act3.0-Mediated Transcriptional Activation of Multiple Endogenous Genes in Dendrobium Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(4). <https://doi.org/10.3390/ijms26041487>
- Ziya, D. (2023). The Electroporation Technique: Principles, Applications, and Advancements. *Journal of Biomolecular Research & Therapeutics*, 12(336), 1. <https://doi.org/10.35248/2167-7956.23.12.336>
- Zulfarina, & Mahadi, I. (2019). *Buku ajar bioteknologi*. UR Press Pekanbaru.