

TRANSFORMASI GENETIK SEREALIA BERBASIS AGROBACTERIUM TUMEFACIENS: KEMAJUAN, TANTANGAN, DAN IMPLIKASINYA BAGI PRODUKTIVITAS

Fenny Hasanuddin¹, Yusminah Hala².

¹Student Program Pascasarjana Universitas Negeri Makassar

²Pendidikan Biologi Universitas Negeri Makassar

Jl. Bonto Langkasa Gunungsari Baru, Makassar 9022, Indonesia

*Corresponding author: [fenny.hasanuddin@student.unm.ac.id/](mailto:fenny.hasanuddin@student.unm.ac.id)
Fennyhasanuddin96@gmail.com

ABSTRAK

Tanaman serealia memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan pangan global; namun, produktivitasnya terus terancam oleh perubahan iklim, serangan hama dan penyakit, serta cekaman abiotik. Artikel ini bertujuan meninjau kemajuan transformasi genetik tanaman serealia berbasis *Agrobacterium tumefaciens* serta implikasinya terhadap peningkatan produktivitas pertanian. Metode yang digunakan adalah tinjauan pustaka terhadap artikel ilmiah yang diperoleh dari Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, dengan fokus pada publikasi tahun 2014–2025. Literatur diseleksi berdasarkan relevansi topik, jenis tanaman serealia, pendekatan transformasi, efisiensi regenerasi, serta kontribusinya terhadap sifat agronomis. Data dianalisis secara naratif dan tematik untuk mengidentifikasi perkembangan teknologi, faktor penentu keberhasilan transformasi, dan tantangan penerapannya. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan gen morfogenik seperti Baby boom (BBM), Wuschel (WUS), dan GRF-GIF mampu meningkatkan efisiensi transformasi serta memperluas aplikasinya pada padi, jagung, dan gandum. Integrasi dengan teknologi CRISPR/Cas9 juga memperkuat pemanfaatan transformasi genetik untuk meningkatkan ketahanan terhadap cekaman biotik, serta abiotik, efisiensi penggunaan nutrisi, dan kualitas hasil panen. Meskipun demikian, penerapannya masih menghadapi kendala, antara lain ketergantungan genotipe, rendahnya kapasitas regenerasi pada beberapa kultivar elit, serta isu regulasi dan penerimaan publik. Oleh karena itu, transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens* berpotensi menjadi strategi penting dalam pengembangan serealia unggul yang produktif, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Agrobacterium Tumefaciens*, Transformasi Genetik, Serealia, Gen Morfogenik, Produktivitas Pertanian.

ABSTRACT

*Cereal crops play a strategic role in supporting global food security; however, their productivity continues to be threatened by climate change, pest and disease attacks, and abiotic stresses. This article aims to review the progress of genetic transformation of cereal crops using *Agrobacterium tumefaciens* and its implications for improving*



agricultural productivity. The method employed is a literature review of scientific articles retrieved from Scopus, Web of Science, and Google Scholar, focusing on publications from 2014 to 2025. The literature was selected based on topic relevance, cereal crop type, transformation approaches, regeneration efficiency, and contribution to agronomic traits. Data were analyzed narratively and thematically to identify technological advancements, key factors for successful transformation, and challenges in its application. The review found that the use of morphogenic genes such as Baby boom (BBM), Wuschel (WUS), and GRF-GIF can enhance transformation efficiency and expand its application in rice, maize, and wheat. Integration with CRISPR/Cas9 technology further strengthens the use of genetic transformation to improve resistance to biotic and abiotic stresses, nutrient use efficiency, and harvest quality. Nevertheless, its application still faces challenges, including genotype dependency, low regeneration capacity in some elite cultivars, and regulatory and public acceptance issues. Therefore, Agrobacterium tumefaciens-based transformation has the potential to be a key strategy in developing high-yielding, adaptive, and sustainable cereal crops.

Keywords: *Agrobacterium tumefaciens, genetic transformation, cereals, morphogenic genes, agricultural productivity.*

PENDAHULUAN

Tanaman serealia, terutama padi (*Oryza sativa*), jagung (*Zea mays*), dan gandum (*Triticum aestivum*), merupakan komoditas utama penopang ketahanan pangan global utama (Shiferaw et al., 2011). Ketiga tanaman ini berkontribusi besar terhadap pemenuhan kebutuhan kalori manusia, tetapi produktivitasnya semakin tertekan oleh perubahan iklim, keterbatasan air dan nutrisi, degradasi lahan, serta meningkatnya serangan hama dan penyakit. Kondisi tersebut menuntut pengembangan varietas serealia yang lebih adaptif, produktif, dan tahan terhadap berbagai cekaman lingkungan (Sinha et al., 2020).

Pemuliaan konvensional telah memberikan kontribusi penting dalam peningkatan produktivitas tanaman (Sinha et al., 2020). Namun, pendekatan tersebut sering membutuhkan waktu panjang dan memiliki keterbatasan dalam memasukkan sifat tertentu secara presis. Transformasi genetik menjadi salah satu strategi yang dapat mempercepat perbaikan tanaman karena memungkinkan introduksi atau modifikasi gen spesifik yang berhubungan dengan ketahanan hama dan penyakit, toleransi cekaman abiotik, efisiensi penggunaan nutrisi, serta peningkatan kualitas hasil (Sinha et al., 2020). Di antara berbagai metode transformasi, sistem yang dimediasi oleh *Agrobacterium tumefaciens* banyak digunakan karena mampu menghasilkan integrasi T-DNA yang relatif stabil, jumlah salinan transgen yang lebih rendah, dan ekspresi gen yang lebih terkontrol (Kopertekh & Schiemann, 2019; Lacroix & Citovsky, 2020).

Pada awal perkembangannya, transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens* lebih banyak berhasil pada tanaman dikotil, sedangkan serealia sebagai tanaman monokotil dianggap sulit ditransformasi (Sinha et al., 2020). Hambatan utama meliputi rendahnya efisiensi infeksi, ketergantungan pada genotipe, kapasitas regenerasi yang terbatas, serta respons pertahanan tanaman terhadap infeksi bakteri (Sinha et al., 2020). Kemajuan penting kemudian dicapai melalui optimasi strain *Agrobacterium*, vektor biner, jenis eksplan, kondisi ko-kultivasi, media seleksi, dan sistem regenerasi (Debernardi et al., 2020). Penggunaan gen morfogenik seperti Baby boom (BBM), Wuschel (WUS/WOX), dan GRF-GIF juga memperluas kemungkinan transformasi pada genotipe serealia yang sebelumnya sulit diregenerasikan (Debernardi et al., 2020; Hoerster et al., 2020; Yarra & Krysan, 2023).

Beberapa review sebelumnya telah membahas transformasi tanaman serealia, baik dari sisi mekanisme *Agrobacterium*, optimasi kultur jaringan, maupun aplikasi rekayasa genetika pada tanaman. Namun, sebagian besar kajian masih berfokus pada aspek teknis transformasi atau pada spesies tertentu, sehingga belum secara terpadu membandingkan kemajuan teknologi transformasi berbasis *Agrobacterium* pada padi, jagung, dan gandum dalam kaitannya dengan efisiensi transformasi, penggunaan gen morfogenik, integrasi CRISPR/Cas9, serta dampaknya terhadap produktivitas pertanian (Yarra & Krysan, 2023). Selain itu, pembahasan mengenai keterbatasan teknologi, seperti ketergantungan genotipe, risiko biologis, regulasi, dan penerimaan publik, masih sering disajikan secara terpisah.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini bertujuan untuk meninjau kemajuan transformasi genetik tanaman serealia berbasis *Agrobacterium tumefaciens* dengan menekankan hubungan antara mekanisme transformasi, faktor penentu efisiensi, penerapan pada padi, jagung, dan gandum, serta implikasinya terhadap produktivitas pertanian. Kajian ini juga menyoroti tantangan teknis dan nonteknis yang perlu diperhatikan agar teknologi transformasi genetik dapat dikembangkan secara lebih efektif, aman, dan berkelanjutan

BAHAN DAN METODE

Desain Penelitian

Artikel ini disusun menggunakan pendekatan studi literatur untuk menelaah perkembangan transformasi genetik tanaman sereal berbasis *Agrobacterium tumefaciens*. Kajian difokuskan pada mekanisme transformasi, faktor yang memengaruhi efisiensi, pemanfaatan gen morfogenik, integrasi dengan teknologi CRISPR/Cas9, serta implikasinya terhadap produktivitas pertanian.

Pendekatan ini digunakan karena memungkinkan penulis membandingkan hasil-hasil penelitian terdahulu secara naratif dan tematik, sehingga diperoleh gambaran menyeluruh mengenai kemajuan, keterbatasan, dan arah pengembangan teknologi transformasi pada tanaman sereal (Kraus et al., 2020).

Sumber Data dan Strategi Pencarian

Literatur diperoleh melalui penelusuran pada tiga basis data ilmiah, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar (Martín-Martín et al., 2021). Pencarian dibatasi pada publikasi tahun 2014–2025. Kami memilih rentang waktu tersebut karena sejak 2014 perkembangan transformasi sereal berbasis *Agrobacterium tumefaciens* semakin banyak dilaporkan, terutama setelah meningkatnya optimasi protokol transformasi, penggunaan gen morfogenik, dan penerapan teknologi penyuntingan genom (Debernardi et al., 2020; Hoerster et al., 2020; Hwang & Nam, 2021). Kami menggunakan tahun 2025 sebagai batas akhir agar kajian tetap mencakup temuan terbaru yang relevan dengan perkembangan transformasi genetik pada tanaman sereal.

Kata kunci yang digunakan meliputi “*Agrobacterium tumefaciens*”, “*Agrobacterium*-mediated transformation”, “cereal transformation”, “rice transformation”, “maize transformation”, “wheat transformation”, “morphogenic genes”, “plant regeneration”, “CRISPR cereal crops”, “transgenic cereal”, dan “agricultural productivity” (Imani & Kogel, 2020; Sinha et al., 2020; Zhu et al., 2020). Kombinasi kata kunci dilakukan dengan operator Boolean AND dan OR untuk memperoleh artikel yang sesuai dengan fokus kajian (Kraus et al., 2020; Page et al., 2021).

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

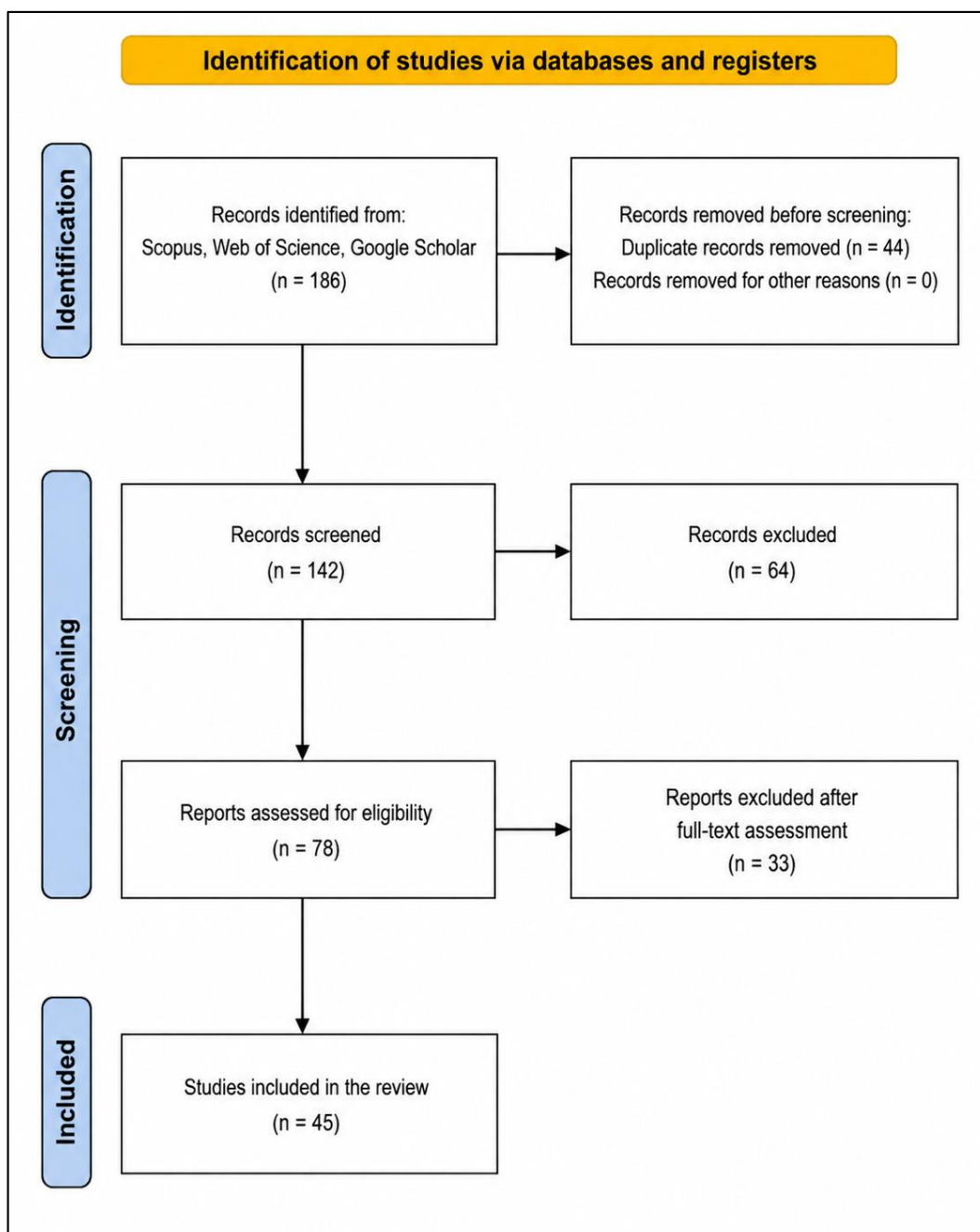
Artikel dimasukkan dalam kajian apabila memenuhi kriteria berikut: diterbitkan pada periode 2014–2025, membahas transformasi genetik berbasis *Agrobacterium tumefaciens* atau kombinasi dengan teknologi penyuntingan genom, berfokus pada

tanaman serealia seperti padi, jagung, gandum, sorgum, atau barley, serta memuat informasi mengenai efisiensi transformasi, regenerasi tanaman, penggunaan gen morfogenik, CRISPR/Cas9, atau dampak agronomis (Sinha et al., 2020).

Artikel dikeluarkan apabila tidak berhubungan langsung dengan tanaman serealia, hanya membahas tanaman non-serealia, tidak menyediakan data atau uraian metodologis yang memadai, berupa duplikasi, tidak dapat diakses secara lengkap, atau tidak relevan dengan tujuan kajian (Kraus et al., 2020; Page et al., 2021).

Proses Seleksi Literatur

Seleksi artikel dilakukan secara bertahap dengan mengacu pada alur PRISMA (Page et al., 2021). Pada tahap identifikasi, diperoleh 186 artikel dari Scopus, Web of Science, dan Google Scholar (Martín-Martín et al., 2021). Setelah artikel duplikat dihapus, tersisa 142 artikel untuk proses penyaringan (Page et al., 2021). Penyaringan berdasarkan judul dan abstrak menghasilkan 78 artikel yang dinilai relevan untuk ditelaah secara penuh. Setelah pembacaan teks lengkap dan penerapan kriteria inklusi serta eksklusi, sebanyak 45 artikel dipilih sebagai sumber utama dalam sintesis kajian (Page et al., 2021; Sinha et al., 2020). Alur seleksi literatur disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Seleksi Literatur Berbasis PRISMA

Evaluasi Kualitas Artikel

Kualitas artikel dievaluasi sebelum dimasukkan ke dalam sintesis akhir. Penilaian dilakukan berdasarkan beberapa aspek, yaitu kejelasan tujuan penelitian, kesesuaian metode, relevansi dengan transformasi genetik serealia, kelengkapan informasi mengenai protokol transformasi atau hasil agronomis, kejelasan pelaporan efisiensi transformasi, serta kontribusi artikel terhadap pengembangan teknologi transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens*. Artikel kemudian dikelompokkan ke dalam kategori kualitas

tinggi, sedang, dan rendah. Artikel dengan kualitas rendah tidak digunakan sebagai rujukan utama dalam pembahasan, kecuali hanya sebagai informasi pendukung apabila relevan (Page et al., 2021)

Ekstraksi dan Analisis Data

Data yang diekstraksi dari setiap artikel meliputi nama penulis, tahun publikasi, jenis tanaman sereal, jenis eksplan, strain *Agrobacterium*, gen target atau gen morfogenik, pendekatan transformasi, efisiensi transformasi, metode regenerasi, penggunaan CRISPR/Cas9, hasil agronomis, serta keterbatasan. Data tersebut kemudian disusun dalam matriks ringkasan untuk memudahkan perbandingan antarstudi.

Analisis dilakukan dengan sintesis naratif dan analisis tematik (Braun & Clarke, 2020). Sintesis naratif digunakan untuk menjelaskan perkembangan transformasi genetik berbasis *Agrobacterium tumefaciens* pada berbagai tanaman sereal (Sinha et al., 2020; Imani & Kogel, 2020; Batten & Brackett, 2021). Analisis tematik digunakan untuk mengelompokkan temuan ke dalam beberapa tema utama, yaitu mekanisme transformasi, faktor penentu efisiensi, penerapan pada padi, jagung, dan gandum, integrasi dengan CRISPR/Cas9, dampak terhadap produktivitas, serta tantangan teknis, regulatif, dan penerimaan public (Braun & Clarke, 2020; Debernardi et al., 2020).

HASIL

Hasil telaah terhadap 45 artikel menunjukkan bahwa transformasi genetik tanaman sereal berbasis *Agrobacterium tumefaciens* mengalami kemajuan signifikan, terutama melalui optimasi eksplan, strain bakteri, media kultur, penggunaan gen morfogenik, serta integrasi dengan teknologi penyuntingan genom (Sinha et al., 2020; Nasti & Voytas, 2021). Secara umum, keberhasilan transformasi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan transfer T-DNA, tetapi juga oleh kapasitas regenerasi jaringan tanaman setelah proses infeksi (Debernardi et al., 2020).

Temuan utama dari literatur menunjukkan bahwa padi merupakan sereal dengan sistem transformasi paling mapan, terutama pada kelompok *japonica* (Sinha et al., 2020). Jagung menunjukkan peningkatan efisiensi setelah penggunaan regulator morfogenesis seperti *Baby boom* (BBM) dan *Wuschel2* (WUS2) (Hoerster et al., 2020). Sementara itu, gandum masih tergolong lebih sulit ditransformasi karena kompleksitas genom,

ketergantungan genotipe, dan rendahnya kapasitas regenerasi pada beberapa kultivar elit (Debernardi et al., 2020).

Mekanisme Umum Transformasi Berbasis *Agrobacterium tumefaciens*

Transformasi berbasis *Agrobacterium tumefaciens* bekerja melalui pemindahan T-DNA dari plasmid Ti ke genom tanaman (Lacroix & Citovsky, 2020). Dalam sistem rekayasa genetika, bagian T-DNA yang sebelumnya membawa gen penyebab penyakit diganti dengan gen target atau kaset ekspresi tertentu. Proses ini diawali oleh respons *Agrobacterium* terhadap senyawa fenolik dari jaringan tanaman yang terluka, kemudian diikuti aktivasi gen virulensi, pembentukan kompleks T-DNA, transfer ke dalam sel tanaman, dan integrasi ke genom (Kopertekh & Schiemann, 2019).

Dari hasil telaah, tahapan yang paling menentukan keberhasilan transformasi pada serealia adalah pemilihan eksplan, kondisi ko-kultivasi, efektivitas seleksi, serta kemampuan regenerasi tanaman transgenic. Dengan demikian, hambatan utama bukan hanya pada proses masuknya T-DNA, tetapi juga pada keberhasilan jaringan yang telah tertransformasi untuk berkembang menjadi tanaman utuh.

Faktor Penentu Efisiensi Transformasi

Sintesis literatur menunjukkan bahwa efisiensi transformasi serealia dipengaruhi oleh dua kelompok faktor utama, yaitu faktor tanaman dan faktor teknis (Sinha et al., 2020). Faktor tanaman meliputi genotipe, umur dan kualitas eksplan, serta kapasitas regenerasi. Faktor teknis meliputi strain *Agrobacterium*, vektor biner, konsentrasi asetosiringon, durasi ko-kultivasi, komposisi media, jenis antibiotik atau herbisida seleksi, serta kondisi inkubasi.

Ketergantungan genotipe menjadi kendala yang paling konsisten dilaporkan. Beberapa kultivar model dapat ditransformasi dengan efisiensi tinggi, sedangkan banyak kultivar elit komersial masih menunjukkan respons rendah (Hoerster et al., 2020). Penggunaan gen morfogenik seperti BBM, WUS/WOX, dan GRF-GIF menjadi strategi penting untuk mengatasi hambatan regenerasi dan memperluas kisaran genotipe yang dapat ditransformasi (Debernardi et al., 2020). Perbandingan Transformasi pada Tanaman Serealia dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan komparatif transformasi genetik berbasis *Agrobacterium tumefaciens* pada tanaman serealia (Debernardi et al., 2020; Hoerster et al., 2020; Sinha et al., 2020)

Tanaman serealia	Status perkembangan transformasi	Eksplan/protokol yang umum digunakan	Kemajuan utama	Kendala utama
Padi (<i>Oryza sativa</i>)	Paling mapan dan relatif rutin, terutama pada kultivar japonica	Embrio imatur, kalus embriogenik, jaringan scutellum	Efisiensi transformasi tinggi; banyak digunakan untuk introduksi gen target dan CRISPR/Cas9	Kultivar indica umumnya lebih sulit ditransformasi dibanding japonica
Jagung (<i>Zea mays</i>)	Berkembang pesat setelah penggunaan gen morfogenik	Embrio imatur dan sistem regenerasi berbasis kalus atau regenerasi langsung	BBM dan WUS2 meningkatkan efisiensi serta mempercepat regenerasi	Ketergantungan genotipe kuat; banyak galur komersial masih sulit diregenerasikan
Gandum (<i>Triticum aestivum</i>)	Masih lebih menantang dibanding padi dan jagung	Embrio imatur dan kalus embriogenik	GRF-GIF, BBM, dan WUS membantu meningkatkan regenerasi dan efisiensi transformasi	Genom kompleks, regenerasi rendah, dan respons sangat dipengaruhi genotipe
Serealia lain, seperti barley dan sorgum	Telah berhasil ditransformasi, tetapi belum seefisien padi	Embrio imatur, kalus embriogenik, dan pendekatan berbasis jaringan muda	Optimasi strain, media, dan regulator morfogenesis mulai meningkatkan keberhasilan	Efisiensi masih bervariasi dan protokol belum selalu stabil antargenotipe

Tabel tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan transformasi pada serealia tidak merata antarspesies. Padi memiliki protokol yang paling stabil, jagung menunjukkan kemajuan besar melalui gen morfogenik, sedangkan gandum masih membutuhkan optimasi lebih lanjut agar dapat diterapkan secara lebih luas pada kultivar elit (Debernardi et al., 2020; Sinha et al., 2020)

Tren Teknologi: Gen Morfogenik dan CRISPR/Cas9

Salah satu pola penting yang muncul dari literatur adalah pergeseran dari protokol transformasi konvensional menuju pendekatan yang memanfaatkan regulator perkembangan tanaman (Hoerster et al., 2020) Gen morfogenik seperti BBM,

WUS/WOX, dan GRF-GIF berperan dalam meningkatkan kompetensi regenerasi jaringan, mempercepat pembentukan tanaman transgenik, dan mengurangi ketergantungan pada pembentukan kalus yang panjang (Debernardi et al., 2020).

Integrasi transformasi *Agrobacterium* dengan CRISPR/Cas9 juga menjadi tren utama. Sistem ini memungkinkan modifikasi genom yang lebih presisi, seperti knockout gen rentan penyakit, perbaikan sifat toleransi cekaman, peningkatan efisiensi penggunaan nutrisi, serta perbaikan kualitas hasil (Zhang et al., 2020). Dengan demikian, transformasi berbasis *Agrobacterium* tidak hanya berfungsi sebagai metode introduksi gen, tetapi juga sebagai platform pengantaran komponen penyuntingan genom pada tanaman sereal.

PEMBAHASAN

Transformasi genetik tanaman sereal berbasis *Agrobacterium tumefaciens* berperan penting dalam peningkatan produktivitas, ketahanan terhadap cekaman, dan percepatan pemuliaan tanaman (Sinha et al., 2020). Namun, penerapannya perlu mempertimbangkan keamanan hayati, stabilitas sifat transgenik, risiko ekologis, regulasi, bioetika, dan penerimaan masyarakat agar teknologi ini digunakan secara bertanggung jawab (Bauer-Panskus et al., 2020).

Risiko Teknis dan Ekologis

Salah satu risiko utama integrasi transformasi *Agrobacterium* dengan CRISPR/Cas9 adalah potensi off-target editing. Meskipun presisi, CRISPR/Cas9 tetap dapat memodifikasi lokasi genom yang tidak ditargetkan, terutama pada sereal bergenom besar seperti gandum. Oleh karena itu, desain guide RNA spesifik, validasi molekuler, analisis sekuens, dan pengujian generasi lanjutan diperlukan sebelum pelepasan varietas ke lingkungan (Tyagi et al., 2020).

Risiko lain adalah resistensi hama pada tanaman transgenik penghasil protein Bt. Penggunaan varietas tahan hama secara terus-menerus dapat menekan populasi hama dan mempercepat seleksi individu resisten. Karena itu, tanaman Bt perlu dikombinasikan dengan insect resistance management, seperti refugia, rotasi strategi pengendalian, pemantauan hama, dan penggunaan gen resistensi bertumpuk (Huang, 2021).

Selain itu, gene flow ke kerabat liar atau varietas lokal juga perlu diperhatikan. Perpindahan gen melalui polen, persilangan alami, atau percampuran benih dapat menjadi masalah jika gen yang berpindah berkaitan dengan sifat adaptif seperti toleransi herbisida

atau ketahanan cekaman. Oleh sebab itu, kajian risiko harus mempertimbangkan kerabat liar, sistem reproduksi tanaman, jarak penyerbukan, dan kondisi agroekosistem setempat (Bauer-Panskus et al., 2020).

Pertimbangan Bioetika

Penerapan transformasi genetik pada tanaman pangan menimbulkan isu bioetik, seperti hak konsumen atas informasi, pelabelan, keadilan akses bagi petani kecil, ketergantungan pada perusahaan benih, perlindungan varietas lokal, dan kepemilikan paten teknologi penyuntingan genom (Hwang & Nam, 2021). Dalam konteks negara berkembang, teknologi ini seharusnya tidak hanya menguntungkan industri besar, tetapi juga dapat diakses oleh program pemuliaan publik, petani kecil, dan sistem pangan local (Brookes, 2022).

Dengan demikian, pengembangan serealia transgenik perlu disertai prinsip kehati-hatian, transparansi data, evaluasi risiko terbuka, dan pelibatan pemangku kepentingan. Keberhasilan teknologi tidak hanya ditentukan oleh efisiensi transformasi dan hasil panen, tetapi juga oleh penerimaannya sebagai inovasi yang aman, adil, dan bermanfaat bagi masyarakat (Hwang & Nam, 2020).

Perbedaan Regulasi Antarnegara

Regulasi tanaman transgenik dan tanaman hasil penyuntingan genom berbeda antarnegara. Secara umum, terdapat pendekatan berbasis proses dan berbasis produk. Perbedaan ini menyebabkan tanaman hasil CRISPR/Cas9 tanpa DNA asing dapat diperlakukan berbeda di berbagai negara (Eriksson et al., 2020).

Di Amerika Serikat, regulasi bioteknologi tanaman cenderung berbasis risiko produk melalui SECURE. Sebaliknya, Uni Eropa lebih lama menerapkan pendekatan ketat terhadap GMO, meskipun kerangka new genomic techniques atau NGT mulai diarahkan untuk mendukung inovasi, tanaman resilien, dan sistem pangan berkelanjutan dengan tetap menjaga aspek keselamatan (2026).

Perbedaan regulasi ini berdampak pada penelitian, komersialisasi, perdagangan, dan penerimaan pasar. Karena itu, pengembangan serealia hasil transformasi genetik perlu memperhatikan harmonisasi regulasi, standar keamanan pangan, analisis risiko lingkungan, dan transparansi pelabelan.

Persepsi Publik dan Penerimaan Konsumen

Penerimaan publik terhadap tanaman transgenik dan produk GMO sangat bervariasi. Konsumen cenderung lebih menerima teknologi jika manfaatnya jelas, seperti peningkatan gizi, pengurangan pestisida, atau ketahanan terhadap perubahan iklim. Sebaliknya, penolakan muncul ketika konsumen merasa menanggung risiko kesehatan, lingkungan, atau etika tanpa memperoleh manfaat langsung (Hwang & Nam, 2020).

Dalam konteks sereal sebagai pangan pokok, komunikasi risiko menjadi penting. Isu keamanan, kehalalan, pelabelan, dan dampak lingkungan perlu dijelaskan secara transparan. Komunikasi ilmiah sebaiknya tidak menyatakan teknologi ini sepenuhnya bebas risiko, tetapi menekankan bahwa risiko dapat dikelola melalui evaluasi keamanan, uji lingkungan, pemantauan pascapelepasan, dan regulasi yang transparan (Bauer-Panskus et al., 2020).

Tabel 2. Ringkasan Risiko dan Strategi Mitigasi

Isu kritis	Potensi dampak	Strategi mitigasi
<i>Off-target</i> CRISPR/Cas9	Perubahan genom tidak diinginkan	Desain <i>guide RNA</i> spesifik, validasi sekuens, uji generasi lanjutan
Resistensi hama	Penurunan efektivitas tanaman Bt	Refugia, rotasi pengendalian, pemantauan hama, gen bertumpuk
<i>Gene flow</i>	Perpindahan sifat adaptif ke kerabat liar atau varietas lokal	Isolasi jarak, kontrol polen, pemantauan lingkungan
Bioetika dan akses teknologi	Ketimpangan manfaat dan ketergantungan benih	Transparansi, pelibatan publik, perlindungan petani kecil
Regulasi berbeda	Hambatan komersialisasi dan perdagangan	Harmonisasi standar dan dokumentasi keamanan
Persepsi publik	Penolakan terhadap GMO atau <i>genome editing</i>	Edukasi, pelabelan jelas, komunikasi risiko berbasis bukti

Secara keseluruhan, transformasi genetik berbasis *Agrobacterium tumefaciens* memiliki potensi besar dalam pengembangan sereal unggul. Namun, pemanfaatannya harus ditempatkan dalam kerangka biosafety dan bioetika yang kuat agar tidak hanya meningkatkan efisiensi transformasi dan produktivitas, tetapi juga menjamin keamanan lingkungan, keberlanjutan pertanian, keadilan akses, dan penerimaan sosial (Sinha et al., 2020).

KESIMPULAN

Transformasi genetik tanaman serealia berbasis *Agrobacterium tumefaciens* berperan penting dalam pengembangan varietas padi, jagung, gandum, dan serealia lain yang lebih produktif, adaptif, serta tahan terhadap cekaman. Keberhasilannya dipengaruhi oleh genotipe, jenis eksplan, strain *Agrobacterium*, kondisi ko-kultivasi, media seleksi, dan kapasitas regenerasi jaringan.

Padi, terutama kelompok japonica, memiliki sistem transformasi paling mapan. Jagung menunjukkan kemajuan besar melalui penggunaan gen morfogenik seperti BBM dan WUS2, sedangkan gandum masih menghadapi kendala karena kompleksitas genom, ketergantungan genotipe, dan rendahnya regenerasi pada beberapa kultivar elit. Pemanfaatan gen morfogenik seperti BBM, WUS/WOX, dan GRF-GIF menjadi strategi penting untuk meningkatkan efisiensi transformasi.

Integrasi transformasi *Agrobacterium* dengan CRISPR/Cas9 memperluas perannya sebagai platform penyuntingan genom yang presisi untuk perbaikan ketahanan hama dan penyakit, toleransi cekaman, efisiensi nutrisi, serta kualitas hasil. Namun, penerapannya tetap memerlukan validasi molekuler, pengujian stabilitas, evaluasi keamanan hayati, serta pertimbangan regulasi, bioetika, dan penerimaan masyarakat.

Secara keseluruhan, teknologi ini memiliki prospek besar dalam mendukung produktivitas dan ketahanan pangan, asalkan dikembangkan secara aman, transparan, bertanggung jawab, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Braun, V., & Clarke, V. (2020). One size fits all? What counts as quality practice in reflexive thematic analysis? *Qualitative Research in Psychology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/14780887.2020.1769238>
- Brookes, G. (2022). Genetically modified crops: Global socio-economic and environmental impacts 1996–2020. *GM Crops & Food*, 13(1), 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/21645698.2022.2118497>
- Debernardi, J. M., Tricoli, D. M., Ercoli, M. F., Hayta, S., Ronald, P., Palatnik, J. F., & Dubcovsky, J. (2020). A GRF–GIF chimeric protein improves the regeneration efficiency of transgenic plants. *Nature Biotechnology*, 38, 1274–1279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41587-020-0703-0>
- Eriksson, D., Kershen, D., Nepomuceno, A., Pogson, B. J., Prieto, H., Purnhagen, K., Smyth, S., Wesseler, J., & Whelan, A. (2020). A comparison of the EU regulatory approach to directed mutagenesis with that of other jurisdictions, consequences for international trade and potential steps forward. *New Phytologist*, 225(5), 1811–1817. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.15627>

- Hoerster, G., Wang, N., Ryan, L., Wu, E., Anand, A., McBride, K., Lowe, K., Jones, T., & Gordon-Kamm, B. (2020). Use of non-integrating Zm-Wus2 vectors to enhance maize transformation. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, *56*, 265–279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11627-019-10042-2>
- Huang, F. (2021). Dominance and fitness costs of insect resistance to genetically modified *Bacillus thuringiensis* crops. *GM Crops & Food*, *12*(1), 192–211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/21645698.2020.1852065>
- Hwang, H., & Nam, S. J. (2021). The influence of consumers' knowledge on their responses to genetically modified foods. *GM Crops & Food*, *12*(1), 146–157. <https://doi.org/10.1080/21645698.2020.1840911>
- Kopertekh, L., & Schiemann, J. (2019). Agrobacterium-mediated transient expression of cre recombinase in vivo. *Transgenic Research*, *28*, 153–162. <https://doi.org/10.1007/s11248-019-00115-2>
- Kraus, S., Breier, M., & Dasí-Rodríguez, S. (2020). The art of crafting a systematic literature review in entrepreneurship research. *International Entrepreneurship and Management Journal*, *16*, 1023–1042. <https://doi.org/10.1007/s11365-020-00635-4>
- Lacroix, B., & Citovsky, V. (2020). The roles of bacterial and host plant factors in Agrobacterium-mediated genetic transformation. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(15), 4946. <https://doi.org/10.3390/ijms21154946>
- Martín-Martín, A., Thelwall, M., Orduna-Malea, E., & Delgado López-Cózar, E. (2021). Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, Dimensions, Web of Science, and OpenCitations' COCI: A multidisciplinary comparison of coverage via citations. *Scientometrics*, *126*, 871–906. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03690-4>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., & Bossuyt, P. M. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *International Journal of Surgery*, *88*, 105906. <https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2021.105906>
- Shiferaw, B., Prasanna, B. M., Hellin, J., & Bänziger, M. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, *3*, 307–327. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>
- Sinha, P., Singh, V. K., Suryanarayana, V., Krishnamurthy, L., Saxena, R. K., & Varshney, R. K. (2020). Genetic transformation of Triticeae cereals: Summary of almost three-decade's development. *Biotechnology Advances*, *40*, 107484. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107484>
- Tyagi, S., Kumar, R., Das, A., Won, S. Y., & Shukla, P. (2020). CRISPR-Cas9 system: A genome-editing tool with endless possibilities. *Journal of Biotechnology*, *319*, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.05.008>
- Yarra, R., & Krysan, P. J. (2023). Genetic transformation of cereals: Current status and future prospects. *Planta*, *257*, 55. <https://doi.org/10.1007/s00425-023-04096-1>