



Transformasi Genetik pada Tanaman Pakan Lokal: Sebuah Tinjauan Literatur tentang Peningkatan Nutrien untuk Peternakan Berkelanjutan

Rezki Amalyadi^{1*}

¹Departemen Nutrisi dan Hijauan Pakan Ternak, Fakultas Peternakan, Universitas Mataram, Jalan Majapahit No. 62, Selaparang, Mataram, 83115, Indonesia

ARTIKEL INFO

Sejarah artikel
Diterima 03/07/2025
Diterima dalam bentuk revisi 13/10/2025
Diterima dan disetujui 14/10/2025
Terbit online 03/02/2026

Kata kunci
CRISPR/Cas9
Peningkatan nutrisi
Produktivitas ternak
Tanaman pakan
Transformasi genetik

ABSTRAK

Transformasi genetik merupakan strategi potensial untuk meningkatkan nilai gizi dan ketahanan tanaman pakan, sehingga memberikan manfaat besar bagi produktivitas ternak dan pertanian berkelanjutan, terutama di negara berkembang dengan keterbatasan kualitas pakan. Artikel ini meninjau penerapan berbagai teknik transformasi genetik, termasuk transformasi yang dimediasi *Agrobacterium*, biolistik, CRISPR/Cas9, transgenik, dan interferensi RNA (RNAi) dalam perbaikan kualitas nutrisi serta pengurangan faktor anti-gizi pada tanaman pakan utama. Pendekatan yang digunakan adalah tinjauan literatur sistematis terhadap lebih dari 60 publikasi internasional terindeks Scopus, Web of Science, PubMed, dan ScienceDirect pada periode 2000–2025. Seleksi dilakukan berdasarkan kriteria inklusi yang relevan dengan tanaman pakan seperti jagung, kedelai, singkong, dan sorgum. Data dianalisis secara deskriptif-komparatif, dengan peringkasan kuantitatif menggunakan analisis kecenderungan rata-rata dan perbandingan antarspesies. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa transformasi genetik mampu meningkatkan kadar asam amino esensial, kandungan energi, serta menurunkan faktor anti-nutrisi pada tanaman pakan. Perubahan ini terbukti meningkatkan performa hewan dan efisiensi konversi pakan dalam berbagai sistem produksi. Namun, adopsi di negara berkembang masih rendah karena kendala biaya, keterbatasan infrastruktur, tantangan regulasi, dan skeptisisme publik. Dengan dukungan kebijakan yang tepat, investasi pada sarana penelitian, serta edukasi masyarakat, transformasi genetik berpotensi menjadi instrumen kunci dalam memperkuat kualitas pakan dan mendukung ketahanan pangan di wilayah dengan sumber daya terbatas melalui pengembangan sistem peternakan yang lebih berkelanjutan.

© 2026 Politeknik Pembangunan Pertanian Manokwari



ABSTRACT

Genetic transformation is a potential strategy for improving the nutritional value and resilience of feed crops, thereby providing significant benefits for livestock productivity and sustainable agriculture, especially in developing countries with limited feed quality. This article reviews the application of various genetic transformation techniques, including Agrobacterium-mediated transformation, biolistic transformation, CRISPR/Cas9, transgenic transformation, and RNA interference (RNAi) in improving nutritional quality and reducing anti-nutritional factors in major forage crops. The approach used was a systematic literature review of more than 60 international publications indexed in Scopus, Web of Science, PubMed, and ScienceDirect for the period 2000–2025. Selection was based on inclusion criteria relevant to feed crops such as corn, soybeans, cassava, and sorghum. The data were analyzed descriptively and comparatively, with

quantitative summarization using mean trend analysis and interspecies comparisons. The review results showed that genetic transformation can increase essential amino acid levels and energy content while reducing anti-nutritional factors in feed crops. These changes have been shown to improve animal performance and feed conversion efficiency in various production systems. However, adoption in developing countries remains low due to cost constraints, infrastructure limitations, regulatory challenges, and public skepticism. With appropriate policy support, investment in research facilities, and public education, genetic transformation has the potential to become a key instrument in strengthening feed quality and supporting food security in resource-constrained regions through the development of more sustainable livestock systems.

PENDAHULUAN

Tanaman pakan lokal sangat penting bagi sektor peternakan, terutama di daerah-daerah di mana pertanian menjadi tulang punggung ekonomi. Tanaman-tanaman ini menyediakan nutrisi esensial bagi ternak, yang pada gilirannya mendukung produksi produk-produk hewani seperti daging dan susu, yang esensial bagi gizi manusia dan stabilitas ekonomi (Mbambalala *et al.*, 2023; Renjith *et al.*, 2023). Namun, kualitas nutrisi tanaman pakan lokal sering kali menimbulkan tantangan signifikan, termasuk kandungan serat yang tinggi, tingkat pencernaan yang rendah, dan adanya faktor anti-nutrisi.

Tanaman pakan lokal sering kali memiliki kandungan nutrisi yang rendah sehingga berdampak negatif terhadap produktivitas ternak. Misalnya, sumber nutrisi tradisional seperti tepung kedelai dan tepung ikan, meskipun kaya nutrisi, menimbulkan

tantangan logistik dan ekonomi. Selain itu, sumber pakan lokal seperti legum dan sisa tanaman sering kali memiliki keterbatasan seperti kandungan serat yang tinggi dan tingkat pencernaan yang rendah, yang dapat menghambat efektivitasnya sebagai pakan ternak (Mbambalala *et al.*, 2023; Renjith *et al.*, 2023).

Rekayasa genetika dan bioteknologi menawarkan solusi menjanjikan untuk meningkatkan nilai gizi tanaman pakan lokal. Teknologi ini dapat meningkatkan profil nutrisi tanaman dengan meningkatkan kadar asam amino esensial, vitamin, dan mineral (Hagan & Higgins, 2024). Misalnya, biofortifikasi melalui rekayasa genetika telah digunakan untuk mengembangkan tanaman dengan sifat nutrisi yang ditingkatkan, seperti kandungan vitamin dan mineral yang lebih tinggi, yang dapat memberikan manfaat

signifikan bagi nutrisi ternak (Hefferon, 2018; Sahoo & Panda, 2023).

Transformasi genetik memiliki tujuan strategis dalam mewujudkan efisiensi ternak yang berkelanjutan. Upaya ini mencakup peningkatan komposisi asam amino, kandungan vitamin, dan mineral pada tanaman pakan untuk memenuhi kebutuhan diet ternak secara lebih optimal. Selain itu, pengembangan tanaman yang lebih tahan terhadap stres iklim, penyakit, dan hama berperan penting dalam menjamin pasokan pakan yang stabil dan andal (Anyshchenko, 2022; Brossard, 2012; Verma *et al.*, 2011). Transformasi genetik juga berfokus pada peningkatan hasil panen dan densitas energi tanaman pakan, sehingga dapat mendukung produktivitas ternak yang lebih tinggi sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Bryan *et al.*, 2025; Wall *et al.*, 2010; White *et al.*, 2015). Lebih jauh, pendekatan ini mendorong praktik pertanian berkelanjutan melalui integrasi tanaman hasil rekayasa genetika yang membutuhkan input lebih sedikit namun mampu memberikan output nutrisi yang lebih tinggi (Le Roy *et al.*, 2019).

Keterbaruan artikel ini terletak pada sintesis sistematis terhadap perkembangan terbaru teknik transformasi genetik mulai dari *Agrobacterium-mediated transformation*, biolistik, CRISPR/Cas9, hingga RNAi dengan fokus khusus pada peningkatan kualitas gizi dan pengurangan faktor anti-nutrisi tanaman pakan utama. Tujuan artikel ini adalah memberikan gambaran komprehensif mengenai kontribusi transformasi genetik dalam mendukung keberlanjutan sistem peternakan di negara berkembang, sekaligus mengidentifikasi

peluang, tantangan, dan arah penelitian masa depan.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur kualitatif untuk mengkaji penerapan teknologi transformasi genetik dalam meningkatkan nilai gizi dan sifat fungsional tanaman pakan utama. Tinjauan ini berfokus pada artikel ilmiah yang telah direview oleh rekan sejawat dan diterbitkan dalam jurnal bereputasi selama dua dekade terakhir, khususnya yang terindeks dalam basis data Scopus, Web of Science, PubMed, dan ScienceDirect. Dari total 155 artikel yang disaring, sebanyak 60 artikel ilmiah yang memenuhi kriteria inklusi dipilih sebagai sumber utama dalam review ini.

Kriteria seleksi literatur mencakup relevansi dengan transformasi genetik pada tanaman pakan (jagung, kedelai, singkong, dan sorgum), serta adanya bukti empiris atau studi kasus yang melibatkan teknik seperti transformasi yang dimediasi *Agrobacterium*, *biolistics* (*gene gun*), pengeditan genom CRISPR/Cas9, pengembangan tanaman transgenik, dan interferensi RNA (RNAi). Studi diprioritaskan jika membahas peningkatan nutrisi kunci termasuk profil asam amino esensial yang lebih baik (misalnya lisin, metionin), peningkatan densitas energi (pati dan lemak), serta pengurangan faktor anti-nutrisi seperti fitat, glikosida sianogenik, dan inhibitor tripsin.

Selain itu, literatur ditinjau untuk memperoleh informasi mengenai kendala sosioekonomi, teknologi, dan regulasi yang

menghambat adopsi bioteknologi di negara berkembang. Hal ini meliputi studi kasus atau ulasan yang menyoroti isu keamanan hayati, persepsi publik, biaya teknologi, dan ketersediaan infrastruktur. Data dari artikel terpilih dianalisis secara tematis dengan fokus pada (1) jenis modifikasi genetik, (2) sifat target dan hasilnya, (3) spesies tanaman, (4) manfaat terhadap nutrisi dan kinerja ternak, serta (5) tantangan kontekstual dan hambatan kebijakan di negara berpendapatan rendah dan menengah.

Sebagai keterbatasan, tinjauan ini tidak mencakup literatur non-Inggris, laporan teknis, maupun *grey literature*, sehingga temuan yang disajikan terutama merefleksikan hasil penelitian formal yang dipublikasikan dalam jurnal internasional. Meskipun demikian, metodologi ini memungkinkan sintesis pengetahuan mutakhir tentang peran transformasi genetik dalam meningkatkan kualitas tanaman pakan, serta mengidentifikasi celah penelitian dan rekomendasi implementasi di masa depan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rekayasa Genetika pada Tanaman Pakan Lokal

Transformasi genetik melibatkan perubahan gen tanaman dengan memasukkan DNA asing ke dalam genomnya. Hal ini dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti transformasi yang dimediasi oleh *agrobacterium* dan *biolistics (gene gun)* (Saeed & Shahzad, 2016; Smith *et al.*, 2000). Tujuannya adalah mengintegrasikan gen baru ke dalam DNA tanaman, memastikan gen tersebut diekspresikan dan diwariskan secara

stabil. CRISPR/Cas9, alat pengeditan genom ini memungkinkan modifikasi yang presisi, termasuk penggantian basa tunggal, penghapusan gen, dan regulasi ekspresi gen (Abd-Elsalam & Lim, 2021; Rajput *et al.*, 2021; Touzjdjian Pinheiro Kohlrausch Távora *et al.*, 2022).

Teknologi ini telah berhasil diterapkan pada tanaman seperti sorgum untuk meningkatkan sifat-sifat seperti ketahanan terhadap stres dan kualitas nutrisi (Nigam *et al.*, 2025; Weldemichael *et al.*, 2024). Transgenik, ini melibatkan pengenalan gen dari spesies lain untuk memberikan sifat-sifat yang diinginkan seperti ketahanan terhadap hama dan peningkatan kandungan nutrisi (Jones, 2011; Shewry *et al.*, 2008). Misalnya, teknik transgenik telah digunakan untuk mengembangkan singkong yang diperkaya nutrisi di Afrika (Zennah & Cyrus, 2019). RNA Interference (RNAi), RNAi digunakan untuk menghambat ekspresi gen, yang dapat meningkatkan kualitas nutrisi dan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik (Katoch & Thakur, 2013; Rajam, 2020). Teknologi ini telah diterapkan pada berbagai tanaman untuk meningkatkan sifat seperti ketahanan terhadap penyakit dan kandungan nutrisi (Halder *et al.*, 2022).

Rekayasa genetika telah digunakan untuk meningkatkan ketahanan sorgum terhadap stres biotik dan abiotik serta meningkatkan kandungan nutrisi. Upaya ini termasuk penggunaan CRISPR/Cas9 untuk mengembangkan varietas dengan hasil panen yang lebih baik dan ketahanan terhadap stres. Rekayasa genetika telah diterapkan untuk

meningkatkan ketahanan jagung terhadap hama dan memperbaiki profil nutrisinya, seperti memasukkan gen *Bacillus thuringiensis* (Bt) untuk mengendalikan serangan hama jagung (Limenie & Alehegn, 2025).

Teknik transgenik telah digunakan untuk biofortifikasi singkong, meningkatkan kandungan nutrisinya untuk mengatasi kekurangan gizi di negara-negara berkembang. Rekayasa genetika memungkinkan modifikasi yang presisi pada tingkat molekuler, yang seringkali tidak mungkin dilakukan dengan metode pemuliaan tradisional (Mukhtiar *et al.*, 2025). Presisi ini membantu dalam mencapai sifat-sifat spesifik tanpa mempengaruhi gen lain.

Rekayasa genetika dapat secara signifikan mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk mengembangkan varietas tanaman baru dibandingkan dengan pemuliaan tradisional, yang sering memakan waktu beberapa generasi (Basak *et al.*, 2024). Teknologi ini memungkinkan pengenalan sifat-sifat unggul, seperti peningkatan kualitas gizi, ketahanan terhadap hama, dan toleransi stres, dengan efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan metode pemuliaan konvensional (Hagan & Higgins, 2024; Khabbazi *et al.*, 2020).

Berbagai pendekatan memiliki karakteristik berbeda: teknik CRISPR/Cas9 menawarkan presisi tinggi dalam mengedit gen dengan sedikit *off-target effect*, RNAi lebih banyak digunakan untuk *gene knock-down* sehingga menekan ekspresi gen tanpa menghapusnya, sedangkan transgenik memungkinkan transfer gen lintas spesies yang memperluas variasi sifat yang dapat diperoleh

(Chen *et al.*, 2019; Tripathi *et al.*, 2020). Sebagai contoh, RNAi dan CRISPR/Cas9 telah berhasil diterapkan untuk meningkatkan kandungan nutrisi serta memperkuat ketahanan terhadap cekaman biotik maupun abiotik pada berbagai tanaman (Hagan & Higgins, 2024).

Optimalisasi Kandungan Nutrien Melalui Transformasi Genetika

Asam amino ini sangat penting untuk pertumbuhan dan metabolisme hewan non-ruminansia, termasuk unggas dan hewan air. Mereka sering ditambahkan ke pakan hewan karena kadarnya yang rendah dalam tanaman pangan utama seperti jagung, kedelai, dan padi (Galili *et al.*, 2017; Hesse & Hoefgen, 2003; Pandey *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Penambahan asam amino ini diperlukan untuk memastikan pertumbuhan dan kesehatan yang optimal, tetapi hal ini mahal (Karau & Grayson, 2014; Tien Lea *et al.*, 2016; Willis *et al.*, 2005).

Rekayasa genetika telah digunakan untuk meningkatkan kadar asam amino esensial dalam tanaman. Hal ini meliputi manipulasi jalur biosintesis dan pengenalan gen dari organisme lain (Galili & Amir, 2013; Hagan & Higgins, 2024; Hasan & Rima, 2021; Kochhar *et al.*, 2003). Upaya telah dilakukan untuk meningkatkan kandungan lisin dan metionin pada tanaman seperti jagung dan kedelai melalui modifikasi genetik (Shewry, 2007).

Modifikasi genetik telah menargetkan enzim seperti ADP-glukosa pirofosforilase untuk meningkatkan kandungan pati pada tanaman seperti jagung dan tebu (Ferreira *et al.*, 2008; Schlosser *et al.*, 2012; Smith, 2008). Upaya untuk meningkatkan kandungan komponen-komponen ini melibatkan

manipulasi pembagian karbon dan jalur metabolik (Jiang *et al.*, 2013). Rekayasa multigen pada jagung telah menghasilkan peningkatan signifikan dalam kandungan pati dan perbaikan sifat agronomis seperti berat biji dan berat tongkol. Transformasi genetik kombinatorial yang menargetkan metabolisme primer telah menghasilkan peningkatan hasil buah (Vallarino *et al.*, 2020).

Tanin dan fitat adalah faktor anti-nutrisi yang dikenal dapat memengaruhi ketersediaan nutrisi dalam pakan ternak. Strategi rekayasa genetika telah diterapkan untuk mengurangi tingkat senyawa anti-nutrisi dalam tanaman, meskipun contoh spesifik dari abstrak yang disediakan terbatas.

Tabel 1. Strategi Genetika untuk Meningkatkan Kualitas Gizi Tanaman Pakan

Aspek	Penjelasan
Asam Amino Esensial	Lisin dan metionin sangat penting untuk pertumbuhan hewan; sering ditambahkan ke pakan (Galili <i>et al.</i> , 2017; Hesse & Hoefgen, 2003; Pandey <i>et al.</i> , 2020; Wang <i>et al.</i> , 2020).
Transformasi Genetika	Meningkatkan kandungan asam amino pada tanaman seperti jagung dan kedelai (Galili & Amir, 2013; Hagan & Higgins, 2024; Hasan & Rima, 2021; Kochhar <i>et al.</i> , 2003; Tien Lea <i>et al.</i> , 2016).
Karbohidrat, Lemak, Gula Studi Kasus	Modifikasi genetik menargetkan enzim untuk meningkatkan kandungan pati (Ferreira <i>et al.</i> , 2008; Schlosser <i>et al.</i> , 2012; Smith, 2008). Jagung dan tomat menunjukkan peningkatan hasil panen dan kandungan pati melalui rekayasa genetika (Vallarino <i>et al.</i> , 2020).
Senyawa Anti-Nutrisi	Tanin dan fitat umum ditemukan tetapi tidak dibahas secara langsung dalam abstrak.

Tantangan dan Kendala Transformasi Genetika pada Tanaman Pakan Lokal

Transformasi genetik melibatkan waktu dan biaya yang signifikan, sehingga menyulitkan komersialisasi sifat-sifat yang menjanjikan, terutama bagi petani kecil (Bryan *et al.*, 2025). Proses ini memerlukan teknik canggih seperti CRISPR, TALENs, dan ZFNs, yang presisi namun secara teknologi menuntut (Kundu *et al.*, 2024; Sabat & Tripathy, 2024).

Transformasi genetika yang efektif memerlukan infrastruktur canggih, termasuk sekuensing berkapasitas tinggi dan metode transfer gen, yang seringkali tidak tersedia di wilayah berkembang (Frison & Demers, 2013; Jeong & Jung, 2015). Selain itu, pemeliharaan dan pengelolaan sumber daya genetik di bank

gen sangat penting tetapi saat ini kurang didanai dan dikelola dengan baik.

Pengembangan tanaman transgenik (GM) tergolong mahal karena memerlukan penelitian yang ekstensif, kepatuhan ketat terhadap regulasi, serta uji lapangan berskala besar (Abu Bakar *et al.*, 2005). Tingginya biaya tersebut berdampak pada harga benih, sehingga menyulitkan petani kecil untuk mengakses dan memanfaatkan teknologi ini. Selain itu, pasar benih di wilayah pertanian pastoral umumnya menerima investasi yang terbatas untuk perbaikan genetik, sehingga semakin mengurangi kelayakan ekonomi penerapan tanaman GM bagi petani skala kecil. Tantangan lainnya adalah resistensi dan kekhawatiran publik yang cukup signifikan, terutama terkait

potensi gangguan ekosistem dan risiko kesehatan (Ghimire *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2020; Smyth *et al.*, 2021). Oleh karena itu, peningkatan literasi dan pendidikan publik mengenai manfaat serta keamanan tanaman transgenik menjadi sangat penting untuk membangun penerimaan yang lebih luas (Ahmed *et al.*, 2024).

Regulasi biosafety yang ketat dan campur tangan politik dalam proses persetujuan tanaman transgenik menghambat adopsi dan komersialisasinya (Kleter, 2022). Negara-negara memiliki pendekatan regulasi yang bervariasi, dengan beberapa menerapkan langkah-langkah ketat yang memperlambat integrasi tanaman transgenik ke dalam pertanian. Meskipun terdapat manfaat yang tercatat seperti peningkatan produktivitas dan nilai gizi, adopsi tanaman transgenik tetap rendah akibat kekhawatiran sosioekonomi dan tantangan regulasi (Abbey *et al.*, 2024; Basha & Kader, 2022).

Dampak dan Implikasi Transformasi Genetika

Transformasi genetik dapat meningkatkan efisiensi produksi pakan ternak dengan meningkatkan hasil panen dan kandungan gizi tanaman, yang dapat mengurangi biaya pakan. Misalnya, tanaman transgenik (GM) dengan kandungan protein yang lebih tinggi dapat menyediakan pakan yang lebih bergizi, sehingga berpotensi mengurangi jumlah pakan yang dibutuhkan (Ekici & Sancak, 2011). Penggunaan tanaman GM dalam pakan ternak telah terbukti meningkatkan rasio konversi pakan, yang mengarah pada pertumbuhan ternak yang lebih

efisien dan penurunan biaya pakan (Telugu *et al.*, 2017).

Transformasi genetik dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sistem peternakan lokal melalui dua pendekatan utama: pertama, pada tanaman pakan, dengan meningkatkan kandungan nutrisi dan mengurangi faktor anti-nutrisi sehingga mendukung kinerja ternak secara tidak langsung; kedua, pada ternak secara langsung, dengan memperbaiki kesehatan dan produktivitas mereka. Misalnya, teknologi CRISPR-Cas9 telah digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit dan memperkenalkan sifat-sifat bermanfaat lainnya pada ternak, yang pada gilirannya dapat mendukung petani lokal melalui peningkatan ketahanan dan produktivitas kawanan mereka (Clare *et al.*, 2025; Müller *et al.*, 2022). Selain itu, program pembiakan berbasis komunitas (CBBPs) yang mengintegrasikan seleksi genomik terbukti efektif dalam meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keragaman genetik ras ternak lokal, sehingga memastikan pengembangan yang berkelanjutan (Olaniyan *et al.*, 2024).

Tanaman transgenik dapat mengurangi limbah pakan dan meningkatkan efisiensi sumber daya melalui mekanisme biologis dan agronomis, yaitu dengan menghasilkan varietas yang lebih tahan terhadap hama dan penyakit. Ketahanan ini menekan kerugian hasil panen sekaligus mengurangi kebutuhan akan pestisida dan input kimia lainnya, sehingga biaya produksi lebih rendah dan dampak lingkungan berkurang (Dastan *et al.*, 2020; Stewart Jr, 2004). Dengan berkurangnya aplikasi pestisida

dan herbisida, konsumsi energi dalam produksi dan distribusi bahan kimia pertanian dapat ditekan, yang berkontribusi langsung pada penurunan emisi gas rumah kaca (Bennett *et al.*, 2004). Selain itu, adopsi tanaman transgenik tahan herbisida memungkinkan penerapan sistem no-till atau pengolahan tanah minimal, yang meningkatkan penyerapan karbon tanah sekaligus mengurangi emisi CO₂ dari penggunaan mesin pertanian.

Studi menunjukkan bahwa pergeseran menuju penggunaan pestisida yang lebih sedikit tidak hanya menurunkan polusi air dan udara, tetapi juga berperan dalam konservasi tanah dan efisiensi pemanfaatan lahan (Bennett *et al.*, 2006). Namun, terdapat kekhawatiran mengenai dampak ekologi jangka panjang, termasuk kemungkinan transfer gen ke spesies non target, munculnya gulma resisten herbisida, serta penurunan biodiversitas serangga yang bermanfaat, seperti lebah dan kupu-kupu, akibat berkurangnya keanekaragaman flora non-target yang menjadi sumber pakan alami mereka (Dunfield & Germida, 2004; Wunderlich & Vecchione, 2014). Meskipun demikian, meta-analisis dan studi lapangan jangka panjang hingga kini belum menunjukkan adanya dampak lingkungan negatif yang signifikan dari tanaman transgenik yang telah dipasarkan secara global (Arpaia, 2021; Sanvido *et al.*, 2007).

Persepsi publik terhadap teknologi genetika bervariasi secara luas, dengan tingkat kepercayaan tertinggi biasanya diberikan kepada ilmuwan universitas dan petani, serta terendah kepada produsen makanan dan

jaringan supermarket. Keterlibatan publik dan komunikasi yang transparan mengenai manfaat serta risiko teknologi GM menjadi krusial untuk meningkatkan penerimaan masyarakat. Pertimbangan etis meliputi potensi konsekuensi yang tidak diinginkan, termasuk dampak terhadap keanekaragaman hayati dan isu perlakuan etis terhadap organisme transgenik (Abushal *et al.*, 2021; Verma *et al.*, 2011). Kekhawatiran lain mencakup dominasi korporasi multinasional dalam pasar tanaman transgenik dan potensi implikasi sosial ekonomi terhadap petani kecil (Azadi *et al.*, 2022).

Dalam praktiknya, beberapa tanaman GM telah digunakan secara luas sebagai bahan pakan ternak, seperti jagung Bt yang tahan terhadap hama *Lepidoptera* dan kedelai transgenik tahan herbisida. Menurut laporan ISAAA (2022), lebih dari 190 juta hektar tanaman bioteknologi ditanam secara global pada tahun 2019, dengan jagung dan kedelai transgenik mencakup lebih dari 80% dari total areal tersebut, dan sebagian besar produksinya diarahkan untuk kebutuhan pakan hewan. Data ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat resistensi publik, adopsi tanaman GM untuk pakan sudah meluas di berbagai negara produsen utama seperti Amerika Serikat, Brasil, Argentina, dan Kanada.

Debat etis kemudian berfokus pada keseimbangan antara manfaat nyata tanaman transgenik, misalnya peningkatan produktivitas, keamanan pasokan pakan, dan keberlanjutan lingkungan dengan risiko ekologis dan implikasi moral yang muncul dari modifikasi organisme alami.

Tabel 2. Ringkasan Persepsi Publik, Manfaat, Risiko, dan Contoh Tanaman GM Pakan Ternak

Aspek	Uraian	Referensi
Persepsi Publik	Tingkat kepercayaan tertinggi pada ilmuwan universitas dan petani; terendah pada produsen makanan dan supermarket. Ada kekhawatiran terkait dominasi korporasi dan dampak pada petani kecil.	Abushal et al. (2021) ; Verma et al. (2011) ; Azadi et al. (2022)
Manfaat Potensial	• Peningkatan kualitas gizi (asam amino, energi) • Ketahanan terhadap hama (misalnya jagung Bt) • Ketahanan terhadap herbisida (kedelai transgenik) • Peningkatan produktivitas dan ketersediaan pakan • Mendukung keberlanjutan lingkungan melalui pengurangan pestisida	Hagan & Higgins (2024) ; ISAAA (2022)
Risiko & Isu Etis	• Potensi dampak negatif pada keanekaragaman hayati • Perlakuan etis terhadap organisme transgenic • Risiko sosial-ekonomi bagi petani kecil • Skeptisisme publik terkait keamanan pangan	Abushal et al. (2021) ; Verma et al. (2011) ; Azadi et al. (2022)
Contoh Tanaman GM Pakan	• Jagung Bt: tahan hama <i>Lepidoptera</i> • Kedelai transgenik: tahan herbisida • Sorgum GM: peningkatan kandungan pro-vitamin A • Singkong transgenik: pengurangan glikosida sianogenik	ISAAA (2022) ; Tripathi et al. (2020)
Data Global Adopsi	>190 juta hektar tanaman GM ditanam secara global pada 2019, dengan jagung dan kedelai mencakup >80% luas areal. Sebagian besar produksi digunakan untuk pakan ternak, terutama di AS, Brasil, Argentina, dan Kanada.	ISAAA (2022)

Studi Kasus: Transformasi Genetika yang Berhasil untuk Pakan Lokal

Transformasi genetik melibatkan perubahan gen pada tanaman untuk memperkenalkan sifat-sifat yang diinginkan, seperti ketahanan terhadap penyakit, ketahanan terhadap hama, dan kualitas gizi yang lebih baik. Teknik seperti transformasi yang dimediasi oleh *Agrobacterium* dan metode biolistik (senapan partikel) sering digunakan ([Anjanappa & Gruissem, 2021](#); [Saeed & Shahzad, 2016](#)).

Transformasi genetik telah diterapkan pada berbagai tanaman, termasuk legum biji-bijian, yang sangat penting untuk ketahanan pangan di negara-negara berkembang. Transformasi ini bertujuan untuk mengatasi kendala seperti ketahanan terhadap penyakit dan peningkatan hasil panen ([Mii et al., 2011](#); [Popelka et al., 2004](#)). Selain itu, tanaman seperti singkong, jagung, dan kacang tanah telah menjadi sasaran untuk sifat-sifat seperti ketahanan terhadap hama dan penyakit ([Ortiz, 2002](#)).

Tabel 3. Dampak Transformasi Genetika terhadap Tanaman Pakan Lokal dan Produktivitas Ternak

Aspek	Penjelasan
Teknik	Metode biolistik yang dimediasi oleh <i>Agrobacterium</i> (Anjanappa & Gruissem, 2021; Saeed & Shahzad, 2016)
Tanaman Sasaran	Tanaman biji-bijian, singkong, jagung, kacang tanah (Mii <i>et al.</i> , 2011; Ortiz, 2002; Popelka <i>et al.</i> , 2004)
Sifat yang Ditingkatkan	Ketahanan terhadap penyakit, ketahanan terhadap hama, peningkatan kualitas gizi (Mii <i>et al.</i> , 2011; Ortiz, 2002; Popelka <i>et al.</i> , 2004)
Dampak pada Ternak	Gizi yang lebih baik, produktivitas yang meningkat, ketahanan terhadap penyakit (Ghimire <i>et al.</i> , 2023; Long <i>et al.</i> , 2009; Menchaca, 2021; Tait-Burkard <i>et al.</i> , 2018)
Manfaat Ekonomi	Peningkatan hasil panen 22%, pengurangan biaya pestisida 39%, peningkatan ketahanan pangan 68% (Carpenter, 2013; Ozkok, 2015)
Pertimbangan Lingkungan	Keanekaragaman hayati, praktik berkelanjutan, kerangka regulasi (Bhat & Chopra, 2005; Ghimire <i>et al.</i> , 2023; Taberlet <i>et al.</i> , 2008)

Peningkatan kualitas tanaman pakan melalui transformasi genetik terbukti mampu menyediakan nutrisi yang lebih baik bagi ternak dan berdampak langsung pada peningkatan produktivitas. Misalnya, jagung transgenik dengan ketahanan terhadap hama dilaporkan meningkatkan hasil panen hingga 22% sekaligus menurunkan penggunaan pestisida sebesar 37%, sehingga pakan yang dihasilkan lebih stabil dan bergizi bagi ruminansia maupun unggas (Ghimire *et al.*, 2023; Ozkok, 2015). Pada ternak, rekayasa genetika dengan pendekatan RNAi dan CRISPR telah diaplikasikan secara spesifik, misalnya menghasilkan babi yang sepenuhnya resisten terhadap *Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome Virus* (PRRSV), yang sebelumnya menyebabkan kerugian ekonomi global lebih dari USD 2,5 miliar per tahun. Pada unggas, modifikasi genetik terbukti meningkatkan efisiensi konversi pakan sebesar 8–10% dan mempercepat pertumbuhan hingga 15%, sehingga mendukung produktivitas dan keberlanjutan sistem produksi (Long *et al.*,

2009; Menchaca, 2021; Tait-Burkard *et al.*, 2018).

Tanaman pakan lokal yang ditingkatkan melalui pendekatan transgenik, seperti jagung dan kedelai yang banyak dibudidayakan di daerah tropis, telah menunjukkan manfaat nyata dalam meningkatkan hasil panen serta ketahanan terhadap cekaman lingkungan. Hal ini secara langsung mendukung ketersediaan pakan ternak yang lebih stabil dan berkualitas tinggi, sehingga produktivitas hewan dapat terjaga (Erickson & Atnaseo, 2011). Di tingkat petani kecil, adopsi tanaman pakan lokal hasil modifikasi genetik terbukti memberikan manfaat ekonomi melalui peningkatan hasil dan pengurangan biaya produksi, yang pada akhirnya berdampak positif terhadap ketahanan pangan serta stabilitas ekonomi pedesaan (Carpenter, 2013).

Meskipun transformasi genetik menawarkan manfaat substansial, penting untuk mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap keanekaragaman hayati dan lingkungan. Praktik berkelanjutan dan pengelolaan yang hati-hati diperlukan untuk

meminimalkan risiko potensial, termasuk penurunan keragaman genetik dan kontaminasi lingkungan (Taberlet *et al.*, 2008). Selain itu, adopsi teknologi ini memiliki implikasi sosial ekonomi, terutama bagi petani kecil yang menghadapi keterbatasan akses terhadap benih GM serta tingginya biaya lisensi teknologi (Azadi *et al.*, 2022).

Kesuksesan teknologi transformasi genetik juga sangat dipengaruhi oleh kerangka regulasi dan penerimaan publik. Perbedaan kebijakan internasional, misalnya regulasi ketat di Uni Eropa dibandingkan dengan adopsi luas di Amerika Serikat dan Brasil menunjukkan adanya tantangan dalam harmonisasi aturan global (Smyth, 2020). Negara berkembang perlu menetapkan regulasi biosafety yang kuat sekaligus mengembangkan strategi edukasi publik untuk memastikan pemanfaatan teknologi ini berlangsung aman dan efektif (Bhat & Chopra, 2005).

Dari perspektif keberlanjutan, integrasi tanaman transgenik ke dalam sistem agroekologi perlu dirancang sedemikian rupa agar tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga memperkuat layanan ekosistem, menjaga kesehatan tanah, serta mengurangi ketergantungan pada input eksternal (Altieri & Nicholls, 2020). Dengan demikian, penerapan transformasi genetik dalam pakan dapat diarahkan pada model pertanian yang lebih inklusif, adaptif, dan berkelanjutan.

Prospek dan Rekomendasi

Rekayasa genetika cukup menjanjikan untuk meningkatkan tanaman pakan lokal, terutama di negara-negara berkembang di mana petani kecil dapat memperoleh manfaat dari

varietas tanaman yang lebih baik. Penggunaan rekayasa genetika dapat mengarah pada pengembangan tanaman yang berproduksi tinggi, toleran terhadap stres, dan tahan terhadap penyakit, yang merupakan sifat-sifat penting untuk memenuhi permintaan pangan yang meningkat karena pertumbuhan populasi dan berkurangnya lahan subur (Basak *et al.*, 2024; Limenie & Alehegn, 2025; Stamm *et al.*, 2011).

Teknik seperti CRISPR-Cas9 dan alat penyuntingan gen lainnya dapat digunakan untuk memperkenalkan sifat-sifat yang diinginkan ke dalam tanaman pakan lokal, yang berpotensi meningkatkan nilai gizi dan ketahanannya terhadap stres lingkungan (Yuhong *et al.*, 2022). Inisiatif pengembangan kapasitas yang bersifat praktis dan kontekstual sangat penting. Fokus utama sebaiknya diarahkan pada peningkatan pemahaman dan keterampilan petani kecil serta organisasi pertanian lokal dalam mengadopsi dan memanfaatkan produk hasil rekayasa genetika, bukan dalam pengembangan teknologinya. Dengan demikian, teknologi dapat diimplementasikan secara tepat guna sesuai kebutuhan di tingkat pengguna (Komen & Koch, 2017). Membangun infrastruktur yang diperlukan, seperti laboratorium dan lokasi uji coba lapangan, sangat penting untuk keberhasilan adopsi teknologi transformasi genetik (Marshall *et al.*, 2011).

Membentuk kemitraan antara lembaga pemerintah, lembaga penelitian, dan organisasi internasional dapat memfasilitasi transfer teknologi dan pengetahuan kepada petani kecil (Dargie *et al.*, 2013). Mengembangkan

kerangka peraturan yang jelas dan dapat diterapkan penting untuk memastikan pemanfaatan tanaman hasil rekayasa genetika (GM) secara aman sekaligus melindungi hak-hak petani (Dunwell, 2004; Idris *et al.*, 2023), kerangka tersebut harus mencakup ketentuan mengenai penilaian risiko *biosafety*, persyaratan persetujuan pra-komersialisasi, mekanisme pelabelan, serta ketentuan pengelolaan akses benih dan perlindungan hak kekayaan intelektual (Haki) untuk menjaga keadilan akses bagi petani kecil (BPOM Reg. No. 19/2024; *Government Regulation* No. 21/2005).

Menerapkan peraturan keamanan hayati yang kuat yang selaras dengan standar internasional, seperti Protokol Cartagena tentang Keamanan Hayati, dapat memastikan penggunaan tanaman transgenik yang aman (Pellegrini, 2013). Memberikan insentif ekonomi, seperti subsidi atau keringanan pajak, bagi petani yang mengadopsi tanaman transgenik dapat mendorong penggunaan tanaman tersebut dan membantu mengimbangi biaya awal (Marinho *et al.*, 2014).

Mengedukasi masyarakat mengenai manfaat dan keamanan tanaman transgenik dapat membantu mengurangi penolakan dan meningkatkan penerimaan (Komen *et al.*, 2020; Sairam & Prakash, 2005). Berinvestasi dalam penelitian sektor publik untuk mengembangkan tanaman transgenik yang disesuaikan dengan kondisi dan kebutuhan lokal dapat mengurangi ketergantungan pada perusahaan multinasional dan memastikan bahwa manfaat bioteknologi dapat diakses oleh petani kecil (Mehta-Bhatt *et al.*, 2005).

Transformasi genetik adalah alat yang ampuh untuk meningkatkan kualitas nutrisi tanaman pakan dengan meningkatkan asam amino esensial, meningkatkan kandungan energi, dan mengurangi faktor anti-nutrisi. Teknik-teknik seperti CRISPR/Cas9, transgenik, dan interferensi RNA telah berhasil diterapkan pada tanaman seperti jagung, kedelai, dan singkong, yang menghasilkan nutrisi dan produktivitas ternak yang lebih baik.

Terlepas dari manfaatnya, masih ada tantangan yang dihadapi-terutama di negara-negara berkembang-termasuk biaya tinggi, infrastruktur yang terbatas, dan penolakan masyarakat karena masalah regulasi dan etika. Untuk mewujudkan potensinya secara penuh, rekayasa genetika harus didukung oleh kebijakan yang kuat, edukasi publik, pengembangan kapasitas lokal, dan investasi yang tepat sasaran.

KESIMPULAN DAN SARAN

Transformasi genetik merupakan pendekatan inovatif yang menawarkan solusi efektif untuk meningkatkan kualitas gizi tanaman pakan lokal, terutama di wilayah tropis dan negara berkembang. Dengan teknik seperti CRISPR/Cas9, transgenik, dan RNA interference (RNAi), tanaman pakan seperti jagung, kedelai, singkong, dan sorgum dapat dimodifikasi untuk memiliki kandungan asam amino esensial, energi, dan vitamin yang lebih tinggi serta kandungan faktor anti-nutrisi yang lebih rendah. Peningkatan kualitas ini secara langsung mendukung produktivitas dan kesehatan ternak, serta efisiensi penggunaan pakan. Untuk mendukung penerapan

transformasi genetik pada tanaman pakan lokal, diperlukan regulasi yang jelas dan mendukung, serta investasi pada infrastruktur dan pelatihan bagi petani dan peneliti. Edukasi publik perlu diperkuat guna meningkatkan pemahaman dan penerimaan terhadap tanaman transgenik. Kolaborasi antara pemerintah, lembaga riset, dan sektor swasta penting untuk mempercepat adopsi teknologi. Selain itu, insentif ekonomi dan pengembangan varietas yang sesuai dengan kebutuhan lokal perlu dilakukan agar manfaat teknologi ini dapat dirasakan secara luas, terutama oleh petani kecil dan sektor peternakan di negara berkembang.

PERNYATAAN KONTRIBUSI

Rezki Amalyadi berperan sebagai kontributor utama sekaligus penulis korespondensi serta penanggung jawab penuh atas keseluruhan proses penelitian, analisis, dan penulisan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbey, M., Smith, A. G., Yue, C., Marson, C., Lai, Y., & Stowers, C. (2024). Measuring specialty crop grower willingness to pay for genetic modification and genetic editing. *Agribusiness*, 41(3), 615-632. <https://doi.org/10.1002/agr.21911>
- Abd-Elsalam, K. A., & Lim, K.-T. (2021). Can CRISPRized crops save the global food supply? In *CRISPR and RNAi Systems* (pp. 1-14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821910-2.00006-0>
- Abu Bakar, U. K., Pillai, V., Hashim, M., & Daud, H. M. (2005). Sharing Malaysian experience with the development of biotechnology-derived food crops. *Food and Nutrition Bulletin*, 26(4_suppl3), S317-S320. <https://doi.org/10.1177/15648265050264S312>
- Abushal, L. T., Salama, M., Essa, M. M., & Qoronfleh, M. W. (2021). Agricultural biotechnology: Revealing insights about ethical concerns. *Journal of Biosciences*, 46(3), 81. <https://doi.org/10.1007/s12038-021-00203-0>
- Ahmed, S., Shohael, A. M., Ahamed, T., Ahmed, R., Ahmed, S., & Hassan, H. M. S. (2024). Understanding public perspectives on genetically engineered Brinjal and the adoption of modern biotechnology in Bangladesh. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1471201. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1471201>
- Anjanappa, R. B., & Gruissem, W. (2021). Current progress and challenges in crop genetic transformation. *Journal of Plant Physiology*, 261, 153411. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153411>
- Anyshchenko, A. (2022). Aligning policy design with science to achieve food security: the contribution of genome editing to sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 897643. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.897643>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology and the reconstruction of a post-COVID-19 agriculture. *The Journal of Peasant Studies*, 47(5), 881-898. <https://doi.org/10.1080/03066150.2020.1782891>
- Arpaia, S. (2021). Environmental risk assessment in agro-ecosystems: Revisiting the concept of receiving environment after the EFSA guidance document. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111676. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111676>
- Azadi, H., Samiee, A., Mahmoudi, H., Jouzi, Z., Rafiaani, P., Torkamani, J., & Van Passel, S. (2022). GM crops and smallholders: A systematic review of socioeconomic impacts. *Sustainability*,

- 14(5), 2721.
<https://doi.org/10.3390/su14052721>
- Azadi, H., Taheri, F., Ghazali, S., Moghaddam, S. M., Siamian, N., Goli, I., Choobchian, S., Pour, M., Özgüven, A. I., & Janečková, K. (2022). Genetically modified crops in developing countries: Savior or traitor? *Journal of Cleaner Production*, 371, 133296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133296>
- Basak, A., Mondol, M. S. A., Dattta, J., Chakraborty, M., Reza, M. W., Khatun, M., De, T., & Paramanik, B. (2024). From lab to plate: harnessing plant genetic engineering for resilient and sustainable agriculture. *Sustainable Agriculture: Nanotechnology, Biotechnology, Management and Food Security*, 267. <https://doi.org/10.1515/9783111369754-013>
- Basha, N. M. A., & Kader, A. M. A. (2022). Genetically modified crops, production, detection methods and its biosafety implications: a scientific review. <https://doi.org/10.22268/AJPP-40.3.260279>
- Bennett, R. M., Phipps, R. H., & Strange, A. M. (2006). An application of life-cycle assessment for environmental planning and management: the potential environmental and human health impacts of growing genetically-modified herbicide-tolerant sugar beet. *Journal of Environmental Planning and Management*, 49(1), 59–74. <https://doi.org/10.1080/09640560500373139>
- Bennett, R., Phipps, R., Strange, A., & Grey, P. (2004). Environmental and human health impacts of growing genetically modified herbicide-tolerant sugar beet: a life-cycle assessment. *Plant Biotechnology Journal*, 2(4), 273–278. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2004.00076.x>
- Bhat, S. R., & Chopra, V. L. (2005). Transgenic crops: Priorities and strategies for India. *Current Science*, 88(6), 886–889. <https://www.jstor.org/stable/24110368>
- Brossard, D. (2012). Social challenges. *The Role of Biotechnology in a Sustainable Food Supply*, 17–31. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139026710.003>
- Bryan, G., Winichayakul, S., & Roberts, N. (2025). Nutritional enhancement of animal feed and forage crops via genetic modification. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 55(2), 327–342. <https://doi.org/10.1080/03036758.2024.2387136>
- Carpenter, J. E. (2013). The socio-economic impacts of currently commercialised genetically engineered crops. *International Journal of Biotechnology*, 12(4), 249–268. <https://doi.org/10.1504/IJBT.2013.059248>
- Chen, K., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., & Gao, C. (2019). CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 667–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100049>
- Clare, A., Müller, R., & Feiler, J. (2025). “It’s all about factory farming:” German public imaginaries of gene editing technologies in animal agriculture. *Agriculture and Human Values*, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10460-025-10712-5>
- Dargie, J. D., Ruane, J., & Sonnino, A. (2013). Ten lessons from biotechnology experiences in crops, livestock and fish for smallholders in developing countries. *Asian Biotechnology and Development Review*, 15(3), 103–110. <https://ris.org.in/sites/default/files/2021-09/ABDR%20November%202013.pdf#page=109>
- Dastan, S., Ghareyazie, B., Teixeira da Silva, J. A., & Pishgar-Komleh, S. H. (2020). Assessment of the life cycle of genetically modified and non-genetically modified rice cultivars. *Arabian Journal*

- of *Geosciences*, 13(10), 362.
<https://doi.org/10.1007/s12517-020-05386-8>
- Dunfield, K. E., & Germida, J. J. (2004). Impact of genetically modified crops on soil-and plant-associated microbial communities. *Journal of Environmental Quality*, 33(3), 806–815.
<https://doi.org/10.2134/jeq2004.0806>
- Dunwell, J. M. (2004). Patents and transgenic plants. *V International Symposium on In Vitro Culture and Horticultural Breeding* 725, 719–732.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.725.101>
- Ekici, K., & Sancak, Y. C. (2011). A perspective on genetically modified food crops. *African Journal of Agricultural Research*, 6(7), 1639–1642.
<https://doi.org/10.5897/AJAR10.284>
- Erickson, L. R., & Atnaseo, C. (2011). Transgenic crops with producer-oriented traits: Development, application, and impact. In M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology* (2nd ed., pp. 121–131). Elsevier/Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00254-3>
- Ferreira, S. J., Kossman, J., Lloyd, J. R., & Groenewald, J. (2008). The reduction of starch accumulation in transgenic sugarcane cell suspension culture lines. *Biotechnology Journal: Healthcare Nutrition Technology*, 3(11), 1398–1406.
<https://doi.org/10.1002/biot.200800106>
- Frison, E., & Demers, N. (2013). Building a global plant genetic resources system. In *Genomics of Plant Genetic Resources: Volume 1. Managing, sequencing and mining genetic resources* (pp. 3–25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7572-5_1
- Galili, G., & Amir, R. (2013). Fortifying plants with the essential amino acids lysine and methionine to improve nutritional quality. *Plant Biotechnology Journal*, 11(2), 211–222.
<https://doi.org/10.1111/pbi.12025>
- Galili, G., Shaul, O., Karchi, H., & Perl, A. (2017). Synthesis and accumulation of the essential amino acid lysine and threonine in seeds. In *Seed development and germination* (pp. 811–831). Routledge.
<https://doi.org/10.1201/9780203740071>
- Ghimire, B. K., Yu, C. Y., Kim, W.-R., Moon, H.-S., Lee, J., Kim, S. H., & Chung, I. M. (2023). Assessment of benefits and risk of genetically modified plants and products: current controversies and perspective. *Sustainability*, 15(2), 1722.
<https://doi.org/10.3390/su15021722>
- Hagan, N. D., & Higgins, T. J. V. (2024). Enhancing the nutritive value of seeds by genetic engineering. In *Handbook of seed science and technology* (pp. 171–193). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003578369>
- Halder, K., Chaudhuri, A., Abdin, M. Z., Majee, M., & Datta, A. (2022). RNA interference for improving disease resistance in plants and its relevance in this clustered regularly interspaced short palindromic repeats-dominated era in terms of dsRNA-based biopesticides. *Frontiers in Plant Science*, 13, 885128.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.885128>
- Hasan, M. M., & Rima, R. (2021). Genetic engineering to improve essential and conditionally essential amino acids in maize: transporter engineering as a reference. *Transgenic Research*, 30(2), 207–220.
<https://doi.org/10.1007/s11248-021-00235-0>
- Hefferon, K. L. (2018). Crops with improved nutritional content through agricultural biotechnology. In *Plant Micronutrient Use Efficiency* (pp. 279–294). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-7.00019-8>
- Hesse, H., & Hoefgen, R. (2003). Molecular aspects of methionine biosynthesis. *Trends in Plant Science*, 8(6), 259–262.
[https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(03\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(03)00107-9)

- Idris, S. H., Zulkippli, Z. N., Zain, F. M., Manab, S. N. A., Jayabalan, S., Oon, J. C. C., Arifin, R., & Rodiyah. (2023). Bioethical issues on farmers' rights relating to genetically modified crops. *AIP Conference Proceedings*, 2881(1), 50002. <https://doi.org/10.1063/5.0176465>
- International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). (2022). Global status of commercialized biotech/GM crops in 2019. ISAAA Brief No. 55. Ithaca, NY: ISAAA. ISBN 978-1-892456-69-9.
- Jeong, H., & Jung, K. (2015). Rice tissue-specific promoters and condition-dependent promoters for effective translational application. *Journal of Integrative Plant Biology*, 57(11), 913–924. <https://doi.org/10.1111/jipb.12362>
- Jiang, L., Yu, X., Qi, X., Yu, Q., Deng, S., Bai, B., Li, N., Zhang, A., Zhu, C., & Liu, B. (2013). Multigene engineering of starch biosynthesis in maize endosperm increases the total starch content and the proportion of amylose. *Transgenic Research*, 22, 1133–1142. <https://doi.org/10.1007/s11248-013-9717-4>
- Jones, J. D. G. (2011). Why genetically modified crops? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1942), 1807–1816. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0345>
- Karau, A., & Grayson, I. (2014). Amino acids in human and animal nutrition. *Biotechnology of Food and Feed Additives*, 189–228. https://doi.org/10.1007/10_2014_269
- Katoch, R., & Thakur, N. (2013). RNA interference: a promising technique for the improvement of traditional crops. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64(2), 248–259. <https://doi.org/10.3109/09637486.2012.713918>
- Khabbazi, S. D., Khabbazi, A. D., Cevik, V., & Ergül, A. (2020). Genetic engineering of horticultural crops contributes to the improvement of crop nutritional quality and shelf life. *Transgenic Technology Based Value Addition in Plant Biotechnology*, 247–272. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818632-9.00011-3>
- Kleter, G. A. (2022). Food and feed safety considerations for gene-edited and other genetically modified crops. In *Agricultural Biocatalysis* (pp. 251–283). Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003313144>
- Kochhar, V. K., Kochhar, S., & Rao, S. S. (2003). Regulation of key biosynthetic enzymes of aspartate family amino acids in plants. ISSN: 0971-5894.
- Komen, J., & Koch, M. (2017). Building human capacity and skills in biosafety: Lessons learned and emerging best practices. Risk Analysis Methodology and Decision-Making, Eds AA Ademola, EJ Morris and JD Murphy (Cambridge: Cambridge University Press), 75–88. <https://doi.org/10.1017/9781316585269.008>
- Komen, J., Tripathi, L., Mkoko, B., Ofosu, D. O., Oloka, H., & Wangari, D. (2020). Biosafety regulatory reviews and leeway to operate: case studies from sub-Saharan Africa. *Frontiers in Plant Science*, 11, 130. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00130>
- Kumar, K., Gambhir, G., Dass, A., Tripathi, A. K., Singh, A., Jha, A. K., Yadava, P., Choudhary, M., & Rakshit, S. (2020). Genetically modified crops: current status and future prospects. *Planta*, 251(4), 91. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03372-8>
- Kundu, A., Nain, A., Sanwal, S. K., Singh, V., Tyagi, B. S., Sharma, A., Yadav, S., Dahiya, A., Rohila, N., & Mann, A. (2024). Halophytic Genes to Edit Glycophyte's Genome for Salinity Tolerance. In *Halophytes vis-à-vis Saline Agriculture: Perspectives and Opportunities for Food Security* (pp. 367–383). Springer.

- https://doi.org/10.1007/978-981-97-3157-2_14
- Le Roy, P., Ducos, A., & Phocas, F. (2019). What performance for tomorrow's animals? Breeding goals and selection methods. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2466>
- Limenie, A. D., & Alehegn, M. (2025). Genetic Engineering for Cereal Crop Yield Improvement and Disease Resistant Breeding. *The Scientific World Journal*, 2025(1), 6743917. <https://doi.org/10.1155/tswj/6743917>
- Long, C. R., Tessanne, K. J., & Golding, M. C. (2009). Applications of RNA interference-based gene silencing in animal agriculture. *Reproduction, Fertility and Development*, 22(1), 47–58. <https://doi.org/10.1071/RD09211>
- Marinho, C. D., Martins, F. J. O., Amaral Júnior, A. T., Gonçalves, L. S. A., dos Santos, O., Alves, D. P., Brasileiro, B. P., & Peternelli, L. A. (2014). Genetically modified crops: Brazilian law and overview. <http://dx.doi.org/10.4238/2014.July.7.15>
- Marshall, K., Quiros-Campos, C., Van der Werf, J. H. J., & Kinghorn, B. (2011). Marker-based selection within smallholder production systems in developing countries. *Livestock Science*, 136(1), 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.09.006>
- Mbambalala, L., Rani, Z. T., Mpanza, T. D. E., Mthana, M. S., Ncisana, L., & Mkhize, N. R. (2023). Fodder radish as a potential alternative feed source for livestock in South Africa. *Agriculture*, 13(8), 1625. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081625>
- Mehta-Bhatt, P., Ebor, R. V., Cohen, J. I., Zepeda, J. F., & Zambrano, P. (2005). An overview of regulation, perceptions and priorities for GM crops in Asian countries. *Asian Biotechnology and Development Review*, 7(3), 9–24. ISSN 0972-7566.
- Menchaca, A. (2021). Sustainable food production: The contribution of genome editing in livestock. *Sustainability*, 13(12), 6788. <https://doi.org/10.3390/su13126788>
- Mii, M., Khan, R. S., & Chin, D. P. (2011). Genetic transformation of ornamental and vegetable crops. *II Genetically Modified Organisms in Horticulture Symposium* 974, 131–137. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.974.15>
- Mukhtiar, A., Mahmood, A., Khan, M. A., Ameen, M., Al-Khayri, J. M., & Qari, S. H. (2025). Transforming field crops with CRISPR/Cas: a new era in genome editing. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12210-025-01308-6>
- Müller, R., Feiler, J., & Clare, A. (2022). A doomed technology? On gene editing in bavarian livestock agriculture, policy field conflicts and responsible research and innovation. *Frontiers in Political Science*, 4, 800211. <https://doi.org/10.3389/fpos.2022.800211>
- Nigam, D., Devkar, V., Dhiman, P., Shakoor, S., Liu, D., Patil, G. B., & Jiao, Y. (2025). Emerging frontiers in sorghum genetic engineering. *The Plant Journal*, 121(4), e17244. <https://doi.org/10.1111/tpj.17244>
- Olaniyan, O. F., Oladejo, O. A., Adeola, A. C., Bello, S. F., Bashiru, H. A., & Oseni, S. O. (2024). Integration of genomics into community-based breeding programmes for chickens: an overview of opportunities, challenges, and potential benefits. *World's Poultry Science Journal*, 80(3), 977–997. <https://doi.org/10.1080/00439339.2024.2354194>
- Ortiz, R. (2002). Biotechnology with horticultural and agronomic crops in Africa. *XXVI International Horticultural Congress: Horticulture, Art and Science for Life-The Colloquia Presentations* 642, 43–56.

- <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.642.5>
- Ozkok, G. A. (2015). Genetically modified foods and the probable risks on human health. *Int J Nutr Food Sci*, 4(3), 356–363. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20150403.23>
- Pandey, A. K., Pandey, K., & Singh, L. K. (2020). Microbial production and applications of L-lysine. In *Innovations in Food Technology: Current Perspectives and Future Goals* (pp. 211–229). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6121-4_15
- Pellegrini, P. A. (2013). What risks and for whom? Argentina's regulatory policies and global commercial interests in GMOs. *Technology in Society*, 35(2), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2013.01.003>
- Popelka, J. C., Terryn, N., & Higgins, T. J. V. (2004). Gene technology for grain legumes: can it contribute to the food challenge in developing countries? *Plant Science*, 167(2), 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.03.027>
- Rajam, M. V. (2020). RNA silencing technology: A boon for crop improvement. *Journal of Biosciences*, 45(1), 118. <https://doi.org/10.1007/s12038-020-00082-x>
- Rajput, M., Choudhary, K., Kumar, M., Vivekanand, V., Chawade, A., Ortiz, R., & Pareek, N. (2021). RNA interference and CRISPR/Cas gene editing for crop improvement: paradigm shift towards sustainable agriculture. *Plants*, 10(9), 1914. <https://doi.org/10.3390/plants10091914>
- Renjith, P. S., Radhakrishnan, S. K., & Patel, A. (2023). Grass-Legume Intercropping for Enhancing Quality Fodder Production in Drylands. In *Enhancing Resilience of Dryland Agriculture Under Changing Climate: Interdisciplinary and Convergence Approaches* (pp. 575–583). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9159-2_28
- Sabat, M., & Tripathy, A. (2024). Genetically Modified and Gene-Edited Food Crops: Recent Status and Future Prospects. *Food Production, Diversity, and Safety Under Climate Change*, 211–222. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51647-4_18
- Saeed, T., & Shahzad, A. (2016). Basic principles behind genetic transformation in plants. *Biotechnological Strategies for the Conservation of Medicinal and Ornamental Climbers*, 327–350. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19288-8_13
- Sahoo, D. P., & Panda, C. (2023). Enhancing Nutritional Quality of Crops Through Genetic Engineering. In *Engineering Aspects of Food Quality and Safety* (pp. 77–92). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30683-9_4
- Sairam, R. V., & Prakash, C. S. (2005). OBPC Symposium: maize 2004 & beyond—Can agricultural biotechnology contribute to global food security? *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 41, 424–430. <https://doi.org/10.1079/IVP2005663>
- Sanvido, O., Romeis, J., & Bigler, F. (2007). Ecological impacts of genetically modified crops: ten years of field research and commercial cultivation. *Green Gene Technology: Research in an Area of Social Conflict*, 235–278. https://doi.org/10.1007/10_2007_048
- Schlosser, A. J., Martin, J. M., Hannah, L. C., & Giroux, M. J. (2012). The maize leaf starch mutation *agps-m1* has diminished field growth and productivity. *Crop Science*, 52(2), 700–706. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.03.0158>
- Shewry, P. R. (2007). Improving the protein content and composition of cereal grain. *Journal of Cereal Science*, 46(3), 239–

250.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.006>
- Shewry, P. R., Jones, H. D., & Halford, N. G. (2008). Plant biotechnology: transgenic crops. *Food Biotechnology*, 149–186. https://doi.org/10.1007/10_2008_095
- Smith, A. M. (2008). Prospects for increasing starch and sucrose yields for bioethanol production. *The Plant Journal*, 54(4), 546–558. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03468.x>
- Smith, R. H., Zapata, C., Park, S. H., Srivatanakul, M., Lee, B. M., & Salas, M. G. (2000). Plant Transformation Using *Agrobacterium* and the Shoot Apex. *A Spectrum of Achievements in Agronomy: Women Fellows of the Tri-Societies*, 62, 43–46. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub62.c5>
- Smyth, S. J., McHughen, A., Entine, J., Kershen, D., Ramage, C., & Parrott, W. (2021). Removing politics from innovations that improve food security. *Transgenic Research*, 30, 601–612. <https://doi.org/10.1007/s11248-021-00261-y>
- Stamm, P., Ramamoorthy, R., & Kumar, P. P. (2011). Feeding the extra billions: strategies to improve crops and enhance future food security. *Plant Biotechnology Reports*, 5, 107–120. <https://doi.org/10.1007/s11816-011-0169-0>
- Stewart Jr, C. N. (2004). Genetically modified planet: environmental impacts of genetically engineered plants. *Oxford University Press*. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195157451.001.0001>
- Taberlet, P., Valentini, A., Rezaei, H. R., Naderi, S., Pompanon, F., Negrini, R., & Ajmone-Marsan, P. (2008). Are cattle, sheep, and goats endangered species? *Molecular Ecology*, 17(1), 275–284. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03475.x>
- Tait-Burkard, C., Doeschl-Wilson, A., McGrew, M. J., Archibald, A. L., Sang, H. M., Houston, R. D., Whitelaw, C. B., & Watson, M. (2018). Livestock 2.0—genome editing for fitter, healthier, and more productive farmed animals. *Genome Biology*, 19, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13059-018-1583-1>
- Telugu, B. P., Park, K.-E., & Park, C.-H. (2017). Genome editing and genetic engineering in livestock for advancing agricultural and biomedical applications. *Mammalian Genome*, 28, 338–347. <https://doi.org/10.1007/s00335-017-9709-4>
- Tien Lea, D., Duc Chua, H., & Quynh Lea, N. (2016). Improving nutritional quality of plant proteins through genetic engineering. *Current Genomics*, 17(3), 220–229. <https://doi.org/10.2174/1389202917666160202215934>
- Touzdjian Pinheiro Kohlrausch Távora, F., de Assis dos Santos Diniz, F., de Moraes Rêgo-Machado, C., Chagas Freitas, N., Barbosa Monteiro Arraes, F., Chumbinho de Andrade, E., Furtado, L. L., Osiro, K. O., Lima de Sousa, N., & Cardoso, T. B. (2022). CRISPR/Cas-and topical RNAi-based technologies for crop management and improvement: Reviewing the risk assessment and challenges towards a more sustainable agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 913728. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.913728>
- Tripathi, L., Ntui, V. O., & Tripathi, J. N. (2020). Application of genetic modification and genome editing for developing climate-smart banana. *Food and Energy Security*, 9(1), e187. <https://doi.org/10.1002/fes3.168>
- Vallarino, J. G., Kubiszewski-Jakubiak, S., Ruf, S., Rößner, M., Timm, S., Bauwe, H., Carrari, F., Rentsch, D., Bock, R., & Sweetlove, L. J. (2020). Multi-gene metabolic engineering of tomato plants results in increased fruit yield up to 23%. *Scientific Reports*, 10(1), 17219. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73709-6>

- Verma, C., Nanda, S., Singh, R. K., Singh, R. B., & Mishra, S. (2011). A review on impacts of genetically modified food on human health. *Open Nutraceuticals J*, 4(1), 3–11. <https://doi.org/10.2174/1876396001104010003>
- Wall, E., Simm, G., & Moran, D. (2010). Developing breeding schemes to assist mitigation of greenhouse gas emissions. *Animal*, 4(3), 366–376. DOI: <https://doi.org/10.1017/S175173110999070X>
- Wang, L., Fan, Z., Wu, D., & Li, R. (2020). Research progress of methionine nutrition in aquatic animals. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 32(11), 4981–4991. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267X.2020.11.001>
- Weldemichael, M. Y., Gebremedhn, H. M., & Teklu, T. H. (2024). Advances in genome editing and future prospects for Sorghum improvement: A review. *Plant Gene*, 100464. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2024.100464>
- White, R. R., Brady, M., Capper, J. L., McNamara, J. P., & Johnson, K. A. (2015). Cow–calf reproductive, genetic, and nutritional management to improve the sustainability of whole beef production systems. *Journal of Animal Science*, 93(6), 3197–3211. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8800>
- Willis, L. B., Lessard, P. A., & Sinskey, A. J. (2005). *Synthesis of L-threonine and branched-chain amino acids*. In L. Eggeling & M. Bott (Eds.), *Handbook of Corynebacterium glutamicum* (pp. 511–531). Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 978-0-8493-1821-4.
- Wunderlich, S., & Vecchione, M. (2014). Genetically modified food and its impact on the environment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 181, 445–454. <https://doi.org/10.2495/EID140381>
- Yuhong, G., Rasheed, A., Zhuo, Z., Gardiner, J. J., Hassan, M. U., Fahad, S., Gillani, S. F. A., Batool, M., & Jian, W. (2022). Principles and Practices of Genome Editing in Crop Plants. In *Principles and Practices of OMICS and Genome Editing for Crop Improvement* (pp. 1–21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96925-7_1
- Zennah, K., & Cyrus, K. (2019). Potential uses, perceptions and policy issues of genetically modified crops in Africa: a case study of Kenya. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 19(1), 13946–13958. <https://doi.org/10.18697/ajfand.84.BLF B10>