

Rekayasa genetika dan fermentasi mikroba: solusi bioteknologi untuk pakan ternak ramah lingkungan

Genetic engineering and microbial fermentation: biotechnology solutions for environmentally friendly animal feed

Rezki Amalyadi^{1*}, I Gede Nano Septian¹, Aminurrahman¹, dan Ine Karni¹

¹Program Studi Peternakan, Fakultas Peternakan, Universitas Mataram. Jl. Majapahit No.62, Gomong, Kec. Selaparang, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat 83115

*Email Koresponden: rezkiamalyadi@staff.unram.ac.id

Abstrak. Permintaan global yang terus meningkat terhadap pangan asal hewan telah memperkuat urgensi pengembangan praktik peternakan yang berkelanjutan, terutama dalam aspek produksi pakan. Diet hewan yang berkelanjutan memainkan peran krusial dalam meningkatkan kesehatan dan produktivitas ternak sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Bioteknologi menyediakan berbagai pendekatan inovatif yang menjanjikan dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi pakan, antara lain melalui rekayasa genetika, fermentasi mikroba, serta pemanfaatan sumber pakan alternatif. Artikel ini merupakan studi literatur yang bertujuan untuk mengeksplorasi dan menganalisis integrasi berbagai inovasi bioteknologi ke dalam sistem pakan berkelanjutan. Kajian ini membahas potensi bioteknologi dalam mengoptimalkan pemanfaatan limbah pertanian, menurunkan emisi gas rumah kaca, serta mengurangi ketergantungan pada input sintetis dalam produksi pakan. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat memberikan wawasan ilmiah mengenai kontribusi teknologi bioteknologi dalam mentransformasi sistem produksi ternak agar sejalan dengan tujuan keberlanjutan lingkungan dan ekonomi.

Kata kunci: Bioteknologi, Fermentasi Mikroba, Pakan Berkelanjutan, Rekayasa Genetika, Sistem Peternakan.

Abstract. The continuously increasing global demand for animal-based food has reinforced the urgency of developing sustainable livestock farming practices, particularly in terms of feed production. Sustainable animal diets play a crucial role in improving livestock health and productivity while reducing negative environmental impacts. Biotechnology offers various innovative approaches that hold promise for improving feed quality and efficiency, including through genetic engineering, microbial fermentation, and the utilisation of alternative feed sources. This article is a literature review aimed at exploring and analysing the integration of various biotechnological innovations into sustainable feed systems. This study discusses the potential of biotechnology in optimising the utilisation of agricultural waste, reducing greenhouse gas emissions, and decreasing reliance on synthetic inputs in feed production. Thus, this article is expected to provide scientific insights into the contribution of biotechnology in transforming livestock production systems to align with environmental and economic sustainability goals.

Keywords: Biotechnology, Microbial Fermentation, Sustainable Feed, Genetic Engineering, Farming Systems.

PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan global terhadap makanan bersumber hewan, yang didorong oleh pertumbuhan populasi dan peningkatan kesejahteraan ekonomi, telah memberikan tekanan signifikan pada sistem produksi ternak. Permintaan ini mengharuskan penerapan praktik berkelanjutan untuk mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan produksi ternak, seperti emisi gas rumah kaca, konsumsi air, dan degradasi lahan (Mamphogoro *et al.*, 2024; Salter, 2017). Pakan ternak berkelanjutan sangat penting karena secara langsung memengaruhi produktivitas, kesehatan, dan kesejahteraan hewan, serta hasil lingkungan seperti penggunaan lahan dan polusi (Makkar & Ankers, 2014). Konsep diet ternak berkelanjutan (*stand*) mengintegrasikan perlindungan lingkungan, penggunaan sumber daya yang efisien, manfaat sosial-budaya, dan pertimbangan etis, menyoroti kebutuhan akan pendekatan holistik dalam produksi pakan (Bindari & Makkar, 2016).

Bioteknologi memainkan peran penting dalam meningkatkan kualitas pakan ternak dan mengurangi jejak lingkungan produksi ternak. Intervensi bioteknologi utama meliputi rekayasa genetika, meningkatkan varietas tanaman untuk meningkatkan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik, sehingga meningkatkan produktivitas dan kualitas nutrisi (H. Kumar *et al.*, 2024; Nyende, 2008; M. Sharma *et al.*, 2023); proses mikrobiologis, memanfaatkan mikroorganisme untuk memproduksi nutrisi esensial, meningkatkan kemudahan pencernaan pakan, dan meningkatkan kualitas silase (Verma *et al.*, 2017); tanaman dan hewan transgenik, mengembangkan organisme transgenik yang dapat memanfaatkan nutrisi dengan lebih baik dan tahan terhadap stres lingkungan, mengurangi kebutuhan akan masukan kimia, dan meningkatkan keberlanjutan secara keseluruhan (Adymkhanov *et al.*, 2024; Qayoom *et al.*, 2025); sumber pakan baru, menjelajahi sumber protein alternatif seperti serangga dan protein mikroba, yang dapat menggantikan protein hewani tradisional yang kurang berkelanjutan (Chisti, 2023); dan pemberian pakan presisi, menerapkan teknik formulasi pakan canggih dan alat bantu keputusan untuk mengoptimalkan efisiensi pakan dan mengurangi limbah (Akintan *et al.*, 2024). Pendekatan bioteknologi ini berkontribusi dalam mengurangi dampak lingkungan produksi ternak dengan menurunkan emisi gas rumah kaca, meminimalkan penggunaan air dan lahan, serta meningkatkan keberlanjutan sistem pangan secara keseluruhan (Adymkhanov *et al.*, 2024; Hansson & Joelsson, 2013).

Tujuan utama tinjauan ini adalah untuk menilai urgensi, menyoroti kebutuhan kritis akan pakan ternak berkelanjutan dalam konteks sistem ternak modern dan tantangan lingkungan yang terkait; mengevaluasi peran bioteknologi, mengkaji berbagai metode bioteknologi yang meningkatkan kualitas pakan dan mengurangi dampak lingkungan, dengan fokus pada rekayasa genetika, proses mikrobiologis, dan sumber pakan baru; serta mengusulkan praktik berkelanjutan, mengidentifikasi dan merekomendasikan praktik dan strategi berkelanjutan untuk produksi pakan yang selaras dengan prinsip konsep *stand* dan berkontribusi pada keberlanjutan sistem peternakan secara keseluruhan.

MATERI DAN METODE

Penulisan artikel ini menggunakan pendekatan literature review sistematis yang bertujuan untuk mengevaluasi dan mensintesis berbagai hasil penelitian terkait penerapan rekayasa genetika dan fermentasi mikroba dalam pengembangan pakan ternak ramah lingkungan. Sumber data diperoleh dari basis data ilmiah Scopus, dengan pencarian dilakukan menggunakan kata kunci seperti "*genetic engineering in animal feed*", "*microbial fermentation for livestock feed*", "*sustainable feed biotechnology*", dan "*environmentally friendly animal nutrition*".

Kriteria inklusi dalam studi ini mencakup artikel yang dipublikasikan pada rentang tahun 2003 hingga 2025, ditulis dalam bahasa Inggris, dan membahas aplikasi praktis maupun eksperimental dari teknologi bioteknologi dalam konteks pakan ternak. Literatur yang digunakan meliputi hasil penelitian laboratorium, uji coba lapangan, dan meta-analisis yang relevan dengan topik kajian. Penggunaan literatur yang mencakup lebih dari 10 tahun terakhir bertujuan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan teknologi bioteknologi dalam pakan ternak dari waktu ke waktu. Hal ini penting untuk menelusuri evolusi pendekatan dan inovasi, serta

menilai tren jangka panjang dalam penerapan teknologi yang berkelanjutan di sektor peternakan. Studi historis awal juga berperan sebagai dasar ilmiah dalam memahami kemajuan saat ini dan potensi penerapan di masa mendatang. Artikel yang bersifat opini, review tanpa dukungan data primer, atau yang tidak relevan dengan tujuan kajian ini dikeluarkan dari analisis untuk menjaga objektivitas dan kualitas sintesis data.

Tahapan analisis dilakukan melalui metode deskriptif-kualitatif, dengan menyusun informasi berdasarkan tema utama, yaitu (1) peran rekayasa genetika dalam peningkatan kualitas pakan, (2) pemanfaatan mikroorganisme fermentatif untuk pengolahan dan peningkatan nilai nutrisi pakan, serta (3) dampak lingkungan dari penerapan teknologi tersebut. Data dianalisis untuk mengidentifikasi tren, manfaat, tantangan, dan peluang pengembangan lebih lanjut sebagai solusi pakan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Referensi yang digunakan telah dikaji validitasnya melalui *citation index* dan *impact factor* jurnal terkait.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rekayasa Genetika dalam Peningkatan Tanaman Pakan

CRISPR/Cas9, teknik ini memungkinkan modifikasi yang tepat pada lokus genomik spesifik, memungkinkan penyisipan, penghapusan, atau perubahan fragmen DNA secara terarah. Teknik ini secara luas digunakan untuk meningkatkan hasil panen, ketahanan terhadap penyakit, dan ketahanan terhadap stres pada tanaman (Ahmadikhah *et al.*, 2025; Chaudhary *et al.*, 2022; Kafle, 2023; Rasheed *et al.*, 2021). Transgenik, melibatkan pengenalan gen asing ke dalam genom tanaman untuk memberikan sifat-sifat yang diinginkan seperti ketahanan terhadap hama, toleransi terhadap herbisida, dan kandungan nutrisi yang lebih baik (Basu *et al.*, 2010; Deshmukh, 2021; KOUNDAL, 2023; Mishra *et al.*, 2010; Talakayala *et al.*, 2020; Tohidfar & Khosravi, 2015). Cisgenik, mirip dengan transgenik tetapi menggunakan gen dari spesies yang sama atau spesies yang terkait erat, menghindari pengenalan DNA asing. Metode ini kurang kontroversial dan dapat menghindari beberapa hambatan regulasi (Sabat & Tripathy, 2024; Zegeye *et al.*, 2022). Informasi lebih jelas dapat dilihat pada table 1.

Tabel 1. Teknik Bioteknologi dalam Rekayasa Genetika untuk Peningkatan Pakan Ternak

Teknik	Aplikasi	Contoh	Tantangan
CRISPR/Cas9	Pengeditan genom yang presisi	Ketahanan terhadap kekeringan, ketahanan terhadap hama, peningkatan nutrisi	Hambatan regulasi, efek samping yang tidak diinginkan
Transgenik	Pengantar gen asing	Ketahanan terhadap herbisida, ketahanan terhadap serangga, peningkatan gizi	Aliran gen, dampak ekosistem
Cisgenik	Pengantar gen sesama spesies	Ketahanan terhadap penyakit, peningkatan hasil panen	Penerimaan regulasi, persepsi publik

Rekayasa genetika telah digunakan untuk meningkatkan kandungan protein penyimpanan biji dan meningkatkan kualitas gizi tanaman seperti padi dan kentang (Hameed *et al.*, 2018). Teknik seperti CRISPR/Cas9 telah diterapkan untuk memodifikasi kandungan serat dan meningkatkan kemudahan pencernaan pada berbagai tanaman (Ahmad *et al.*, 2020; Kouhen *et al.*, 2023). Biofortifikasi melalui modifikasi genetik telah meningkatkan kandungan mikronutrien pada tanaman, seperti meningkatkan kandungan besi dan vitamin A pada padi (Ashraf *et al.*, 2023; Basak *et al.*, 2024). Modifikasi genetik telah menghasilkan pengembangan tanaman tahan kekeringan, meskipun hanya ada satu varietas komersial yang tersedia (Nerkar *et al.*, 2022; M. J. Paul *et al.*, 2018). Tanaman transgenik yang mengekspresikan protein insektisida dan menggunakan interferensi RNA telah menunjukkan resistensi signifikan terhadap berbagai hama serangga, mengurangi penggunaan pestisida dan meningkatkan hasil panen (Sabat & Tripathy, 2024; Talakayala *et al.*, 2020). CRISPR/Cas9 dan alat pengeditan genom lainnya telah digunakan

untuk mengembangkan tanaman dengan ketahanan yang ditingkatkan terhadap penyakit bakteri, jamur, dan virus (Ahmad *et al.*, 2020; Nerkar *et al.*, 2022).

Kekhawatiran meliputi gangguan ekosistem potensial, aliran gen ke kerabat liar, dan pembentukan gulma super (Abushal *et al.*, 2021; Ceccarelli, 2014). Badan internasional dan nasional telah menetapkan pedoman untuk evaluasi keamanan tanaman transgenik, dengan fokus pada alergenitas, toksisitas, dan dampak lingkungan (Ekici & Sancak, 2011). Persepsi dan penerimaan masyarakat terhadap makanan transgenik dipengaruhi oleh kebijakan regulasi dan komunikasi yang transparan tentang manfaat dan risikonya (Pradhan & Parida, 2023).

Fermentasi Mikroba untuk Pengolahan Pakan

Fermentasi mikroba, suatu proses bioteknologi di mana mikroorganisme mengubah bahan baku menjadi produk bernilai tambah, meningkatkan nilai gizi, rasa, dan umur simpan (Shiferaw Terefe & Augustin, 2020; Thapa & Tamang, 2015). Fermentasi Padat (SSF), menggunakan bahan padat tanpa air yang mengalir bebas, sering digunakan untuk produk sampingan pertanian (I. Paul & Sarkar, 2024; Sabater *et al.*, 2020). Fermentasi Terendam (SmF), melibatkan media cair, umumnya digunakan untuk produksi skala besar enzim dan senyawa bioaktif (Afzaal *et al.*, 2024). Fermentasi Anaerobik, terjadi tanpa oksigen, menghasilkan biogas dan bioenergi dari bahan limbah (Yadav *et al.*, 2023). Penggunaan mikroorganisme *Lactobacillus*, meningkatkan keamanan pangan, umur simpan, dan kualitas nutrisi dengan memproduksi asam laktat, yang menurunkan pH dan menghambat organisme pembusuk (Rakicka *et al.*, 2015; Smug *et al.*, 2014). *Bacillus*, dikenal memproduksi enzim yang memecah nutrisi kompleks, meningkatkan kemudahan pencernaan pakan dan mengurangi faktor antinutrisi (Li *et al.*, 2020). *Aspergillus*, digunakan dalam SSF untuk memproduksi enzim dan senyawa bioaktif, meningkatkan profil nutrisi pakan (Sabater *et al.*, 2020).

Kecernaan, fermentasi memecah karbohidrat dan protein kompleks, membuat nutrisi lebih mudah diakses dan dicerna oleh hewan (Moretti *et al.*, 2023). Fermentasi menghasilkan senyawa antimikroba yang menghambat organisme pembusuk, memperpanjang umur simpan pakan (Thapa & Tamang, 2015). Faktor antinutrisi, aktivitas mikroba memecah senyawa antinutrisi seperti fitat dan tanin, meningkatkan ketersediaan nutrisi (Valerozo *et al.*, 2025). Pendekatan berkelanjutan, fermentasi mikrobial mengubah limbah pertanian menjadi produk bernilai, berkontribusi pada konsep "Waste to Wealth" Singh *et al.*, 2023). Contoh limbah pertanian, seperti kulit sayuran, ampas tebu, dan jerami gandum, dapat diubah menjadi biopigmen, enzim, dan bioenergi (Yadav *et al.*, 2023); pupuk bio, perlakuan mikrobial mengubah sisa tanaman menjadi pupuk bio, meningkatkan kesehatan tanah dan pertumbuhan tanaman (Mihajlovski *et al.*, 2021; Robas Mora *et al.*, 2022); dan pakan ternak, fermentasi bahan baku bernutrisi rendah seperti tepung biji rami meningkatkan nilai pakan mereka, mengurangi ketergantungan pada sumber pakan tradisional (Moretti *et al.*, 2023). Informasi lebih jelas dapat dilihat pada table 2.

Tabel 2. Ringkasan Pendekatan Fermentasi dan Manfaatnya dalam Pemanfaatan Pakan

Aspek	Rincian
Jenis Fermentasi	Solid-State, Terendam, Anaerobik
Mikroba Bermanfaat	<i>Lactobacillus</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Aspergillus</i>
Peningkatan Pakan	Peningkatan kemudahan pencernaan, perpanjangan masa simpan, pengurangan faktor antinutrisi
Pemanfaatan	Konversi limbah pertanian menjadi produk bernilai seperti pupuk organik, pigmen organik, dan pakan ternak

Fermentasi mikroba menawarkan metode yang berkelanjutan dan efisien untuk mengolah pakan, meningkatkan kualitas gizi pakan, dan memanfaatkan limbah pertanian, sehingga mendukung baik keberlanjutan lingkungan maupun kelayakan ekonomi (Li *et al.*, 2020; I. Paul & Sarkar, 2024; Zhang *et al.*, 2022).

Pendekatan Bioteknologi Terpadu

Integrasi antara rekayasa genetika dan fermentasi mikroba merupakan pendekatan yang menjanjikan dalam bioteknologi. Rekayasa genetika dapat meningkatkan ketahanan dan produktivitas strain mikroba, yang sangat penting untuk proses fermentasi skala industri. Misalnya, strain ragi yang dimodifikasi secara genetik telah terbukti mampu mempertahankan tingkat produktivitas tinggi selama beberapa generasi, yang esensial untuk aplikasi industri yang efektif (De Mol *et al.*, 2023). Selain itu, konsorsium mikroba mutualistik, di mana mikroba yang berbeda dibudidayakan bersama, dapat meningkatkan stabilitas dan efisiensi proses fermentasi. Contohnya adalah ko-budidaya *Eubacterium limosum* dan *Escherichia coli* yang dimodifikasi secara genetik, yang menstabilkan konsumsi CO dan meningkatkan produksi bahan kimia bernilai tambah (Cha *et al.*, 2021).

Kemajuan bioteknologi telah mengarah pada pengembangan pakan yang diperkaya nutrisi dan kaya prebiotik, terutama dalam akuakultur dan produk susu. Dalam akuakultur, pakan cerdas yang mengandung probiotik dan prebiotik digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan dan kesehatan ikan (Saleh & Abdel-Latif, 2025). Demikian pula, yogurt biofortifikasi dengan tambahan probiotik dan prebiotik telah dikembangkan untuk meningkatkan profil nutrisi dan memperpanjang masa simpan. Yogurt ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan nutrisi spesifik dan menunjukkan sifat organoleptik yang baik serta konsentrasi tinggi bakteri probiotik yang hidup (Fisberg & Machado, 2015; Moulas & Vaiou, 2018). Selain itu, penggunaan bakteri asam laktat yang menghasilkan riboflavin berlebih dalam fermentasi minuman berbasis tanaman telah menghasilkan minuman biofortifikasi dengan nilai gizi yang ditingkatkan dan sifat prebiotik (Diez-Ozaeta *et al.*, 2025).

Beberapa contoh menggambarkan penerapan sukses pendekatan ganda yang menggabungkan modifikasi genetik dan fermentasi mikroba: fortifikasi susu kedelai, susu kedelai fermentasi menggunakan strain *Lactobacillus* yang memproduksi riboflavin telah dikembangkan untuk mengatasi defisiensi riboflavin. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan nilai gizi susu kedelai tetapi juga memanfaatkan potensi prebiotik riboflavin untuk memodulasi mikrobiota usus (Thakur *et al.*, 2020). Yogurt biofortifikasi, pengembangan yogurt biofortifikasi melibatkan penggunaan strain probiotik yang dipilih secara genetik yang menunjukkan hubungan sinergis dengan kultur starter yogurt. Pendekatan ganda ini memastikan viabilitas tinggi probiotik dan manfaat kesehatan yang ditingkatkan (Fisberg & Machado, 2015; Moulas & Vaiou, 2018). Kokultur buatan untuk produksi biofuel, penggunaan kokultur buatan, seperti *Propionibacterium freudenreichii* dan *Clostridium beijerinckii*, telah terbukti meningkatkan produksi biofuel seperti 1-propanol dan 2-propanol. Metode ini memanfaatkan sinergi metabolik antara spesies mikroba yang berbeda untuk meningkatkan konsentrasi pelarut secara signifikan (Hocq & Sauer, 2022). Informasi lebih jelas dapat dilihat pada table 3.

Tabel 3. Aplikasi Rekayasa Genetika dan Fermentasi Mikroba untuk Hasil Fungsional

Aplikasi	Rekayasa Genetika	Fermentasi Mikroba	Hasil
Peningkatan Kandungan Gizi Susu Kedelai	Strain <i>Lactobacillus</i> yang memproduksi riboflavin	Fermentasi susu kedelai	Nilai gizi yang ditingkatkan, potensi prebiotik (Thakur <i>et al.</i> , 2020).
Yogurt yang Diperkaya Gizi	Strain probiotik yang dipilih secara genetik	Fermentasi dengan starter yogurt	Kehidupan probiotik yang tinggi, manfaat kesehatan yang ditingkatkan (Fisberg & Machado, 2015; Moulas & Vaiou, 2018).
Produksi Biofuel	Mikroba yang dimodifikasi secara genetik	Kokultur buatan	Produksi biofuel yang meningkat (Hocq & Sauer, 2022).

Manfaat Lingkungan dan Ekonomi

Penerapan pakan rendah protein dan penggunaan aditif pakan seperti inhibitor urease dapat secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dan limbah nitrogen (N). Misalnya, sistem pertanian-ternak unggas yang dioptimalkan telah menunjukkan pengurangan emisi GRK sebesar 35% dan penurunan kehilangan nitrogen sebesar 55% per unit produk (He et al., 2023). Praktik pengelolaan nitrogen yang ditingkatkan, termasuk penggunaan inhibitor nitrifikasi dan pengurangan dosis pupuk, dapat menyebabkan pengurangan yang signifikan dalam emisi oksida nitrous (N_2O) dan volatilisasi amonia (NH_3), sehingga mengurangi pemanasan global (Gao & Cabrera Serrenho, 2023; Wang et al., 2023). Pergeseran menuju aditif pakan organik seperti probiotik, prebiotik, dan ekstrak tumbuhan dapat mengurangi ketergantungan pada aditif sintetis. Alternatif ini tidak hanya meningkatkan kesehatan dan produktivitas hewan tetapi juga sejalan dengan preferensi konsumen terhadap produk alami (Alagawany et al., 2024; Wenk, 2003). Penggunaan limbah pertanian dan produk sampingan sebagai bahan pakan dapat mengurangi kebutuhan akan bahan pakan impor.

Pendekatan ini mendukung ekonomi lokal dan mengurangi jejak lingkungan yang terkait dengan transportasi dan produksi pakan sintetis (Bhat et al., 2023; Makkar, 2016). Mengadopsi model ekonomi sirkular (CE) dalam pertanian mempromosikan penggunaan sumber daya yang efisien dan meminimalkan limbah. Misalnya, fermentasi anaerobik (AD) limbah pertanian menghasilkan biogas dan menstabilkan lumpur limbah untuk aplikasi tanah, sehingga menutup siklus antara konsumsi energi, produksi pangan, dan pembuangan limbah (Minarti et al., 2024; Venegas et al., 2021). Limbah di pertanian dapat didaur ulang menjadi produk bernilai seperti pupuk organik dan pakan tambahan. Hal ini tidak hanya mengurangi limbah tetapi juga meningkatkan kesehatan tanah dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia (Burggraaf et al., 2021; P. Sharma et al., 2023). Mengintegrasikan sistem pengelolaan limbah di dalam pertanian, seperti menggunakan limbah makanan yang telah diolah sebagai pupuk organik, dapat menciptakan siklus produksi dan konsumsi yang berkelanjutan, berkontribusi pada sistem pertanian yang lebih tangguh (Rizwan et al., 2025). Informasi lebih jelas dapat dilihat pada table 4.

Tabel 4. Manfaat Lingkungan dan Keberlanjutan dari Strategi Pakan Ternak yang Ditingkatkan

Manfaat	Deskripsi	Bukti Pendukung
Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca dan Limbah Nitrogen	Pengelolaan pakan dan nitrogen yang dioptimalkan mengurangi emisi dan limbah.	(Gao & Cabrera Serrenho, 2023; He et al., 2023; Wang et al., 2023)
Pengurangan Ketergantungan pada Bahan Tambahan Sintetis	Penggunaan bahan tambahan pakan organik dan bersumber lokal.	(Alagawany et al., 2024; Wenk, 2003)
Ekonomi Sirkular dan Pengurangan Limbah	Penggunaan sumber daya yang efisien dan daur ulang limbah melalui prinsip-prinsip Ekonomi Sirkular (CE).	(Burggraaf et al., 2021; Minarti et al., 2024; Rizwan et al., 2025; P. Sharma et al., 2023; Venegas et al., 2021)

Tantangan dan Prospek Masa Depan

Penerapan tanaman transgenik (GM) dan pakan ternak fermentasi menghadapi tantangan regulasi yang signifikan. Berbagai negara memiliki kerangka regulasi yang berbeda-beda, yang dapat menghambat pengembangan dan komersialisasi produk GM (Chapotin & Wolt, 2007; Ramessar et al., 2009). Persyaratan ketat terkait keamanan hayati, penandaan, dan pelacakan dapat menjadi beban yang berat. Penerimaan publik terhadap makanan GM dipengaruhi oleh persepsi risiko, kepercayaan terhadap badan regulasi, dan manfaat yang dirasakan dari produk tersebut. Di Eropa, terdapat resistensi publik yang signifikan akibat kekhawatiran tentang dampak kesehatan dan lingkungan (Naveen & Sontakke, 2024). Di sisi lain, Amerika Utara menunjukkan penerimaan yang lebih stabil, meskipun pengetahuan tentang makanan GM masih rendah (Byrne, 2006). Strategi komunikasi yang efektif yang mencakup kekhawatiran publik sangat penting untuk meningkatkan penerimaan (Frewer et al., 2004; Najafian et al., 2020).

Pengembangan tanaman transgenik mahal, dengan biaya mencapai jutaan dolar selama beberapa tahun. Ini merupakan hambatan signifikan bagi lembaga nirlaba di negara berkembang (Schiek et al., 2016). Biaya tinggi untuk mematuhi regulasi biosafety semakin memperburuk masalah ini. Negara berkembang seringkali kekurangan infrastruktur dan kapasitas untuk penelitian dan pengembangan dasar serta adaptif. Hal ini membatasi kemampuan mereka untuk meningkatkan produksi tanaman transgenik (Zepeda, 2006). Selain itu, reaksi negatif potensial di pasar yang sensitif terhadap perdagangan dapat menghambat adopsi teknologi transgenik. Lingkungan regulasi di negara berkembang seringkali bersifat restriktif, dengan biaya tinggi dan prosedur kompleks untuk mendapatkan persetujuan (Sairam & Prakash, 2005). Peningkatan kerangka regulasi dan pengurangan biaya sangat penting untuk memfasilitasi adopsi tanaman transgenik di wilayah ini (Kent, 2004).

Kemajuan dalam biologi sintetik mendorong komersialisasi berbagai produk, termasuk biofuel, farmasi, dan bahan pangan. Bidang ini diperkirakan akan terus berkembang, dengan potensi besar untuk menciptakan komponen biomolekuler dan jalur baru (Carter & Warner, 2018; A. Kumar, 2020). Fermentasi presisi sedang merevolusi produksi bahan pangan seperti protein, enzim, dan vitamin. Teknologi ini menggunakan mikroba yang dimodifikasi secara genetik untuk memproduksi senyawa bernilai tinggi, menawarkan alternatif berkelanjutan bagi metode tradisional (Augustin et al., 2024; Bogueva & Danova, 2024). Integrasi strategi rekayasa genetik dan metabolisme merupakan kunci keberhasilannya (de Almeida et al., 2024). Pengembangan enzim kustom melalui biologi sintetik dan rekayasa enzim meningkatkan efisiensi bioproses. Kemajuan ini krusial untuk produksi produk industri dan optimasi biokatalis (Kerr, 2003; Pandey et al., 2016; Wiltschi et al., 2020).

KESIMPULAN

Peningkatan permintaan global terhadap makanan bersumber hewan menuntut strategi pakan berkelanjutan untuk meminimalkan dampak lingkungan sambil mempertahankan produktivitas dan kesejahteraan ternak. Diet hewan berkelanjutan menggabungkan pertimbangan lingkungan, ekonomi, dan etika. Bioteknologi melalui rekayasa genetika, proses mikrobiologi, dan sumber pakan alternatif menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi pakan. Ulasan ini menyoroti urgensi pengembangan pakan berkelanjutan dan peran vital pendekatan bioteknologi dalam mendorong sistem ternak yang bertanggung jawab secara lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- Adymkhanov, L., Makarov, S., & Belousov, I. (2024). Adaptive resource-saving technologies in agriculture: The role of biotechnologies and their impact on environmental safety. *BIO Web of Conferences*, 140, 4006.
- Afzaal, M., Iqbal, S. S., Abbasi, N. A., Sharif, F., Fatima, M., Nisar, H., Imran, A., Bashir, N., Mannan, H. A., & Khan, A. A. A. (2024). Fermentation and Production of Microorganisms for Industrial Products: An Introduction. In *Recent Advances in Industrial Biochemistry* (pp. 1–15). Springer.
- Ahmad, S., Wei, X., Sheng, Z., Hu, P., & Tang, S. (2020). CRISPR/Cas9 for development of disease resistance in plants: recent progress, limitations and future prospects. *Briefings in Functional Genomics*, 19(1), 26–39.
- Ahmadikhah, A., Zarabizadeh, H., Nayeri, S., & Abbasi, M. S. (2025). Advancements in genome editing tools for genetic studies and crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1370675.
- Akintan, O., Gebremedhin, K. G., & Uyeh, D. D. (2024). Animal feed formulation—Connecting technologies to build a resilient and sustainable system. *Animals*, 14(10), 1497.
- Alagawany, M., Sallam, S., & Abd El-Hack, M. E. (2024). *Organic Feed Additives for Livestock*. Elsevier Science & Technology.

- Ashraf, U., Kiran, M., Shahid, M. N., Anjum, S. A., & Khan, I. (2023). Biofortification through seed priming in food crops: potential benefits and future scope. In *Mineral Biofortification in Crop Plants for Ensuring Food Security* (pp. 261–296). Springer.
- Augustin, M. A., Hartley, C. J., Maloney, G., & Tyndall, S. (2024). Innovation in precision fermentation for food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(18), 6218–6238.
- Basak, A., Mondol, M. S. A., Datta, 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.
- Basu, S. K., Dutta, M., Goyal, A., Bhowmik, P. K., Kumar, J., Nandy, S., Scagliusi, S. M., & Prasad, R. (2010). Is genetically modified crop the answer for the next green revolution? *GM Crops*, 1(2), 68–79.
- Bhat, R., Sharma, M., Rätsep, R., Malenica, D., & Jögi, K. (2023). Challenges and prospects of tackling food loss and wastes in the circular economy context. *Sustainable Food Value Chain Development: Perspectives from Developing and Emerging Economies*, 15–36.
- Bindari, Y. R., & Makkar, H. P. S. (2016). Towards implementation of sustainable animal diets: evidence generation, perspective building and way forward. *CABI Reviews*, 2016, 1–27.
- Bogueva, D., & Danova, S. (2024). Comparing Precision Fermentation and Traditional Fermentations: Consumer Views. In *Consumer Perceptions and Food* (pp. 563–588). Springer.
- Burggraaf, V., Lucci, G., Ledgard, S., Antille, D., Snow, V., & de Klein, C. (2021). *Application of circular economy principles to New Zealand pastoral farming systems*.
- Byrne, P. F. (2006). Safety and public acceptance of transgenic products. *Crop Science*, 46(1), 113–117.
- Carter, S. R., & Warner, C. M. (2018). Trends in synthetic biology applications, tools, industry, and oversight and their security implications. *Health Security*, 16(5), 320–333.
- Ceccarelli, S. (2014). GM crops, organic agriculture and breeding for sustainability. *Sustainability*, 6(7), 4273–4286.
- Cha, S., Lim, H. G., Kwon, S., Kim, D., Kang, C. W., & Jung, G. Y. (2021). Design of mutualistic microbial consortia for stable conversion of carbon monoxide to value-added chemicals. *Metabolic Engineering*, 64, 146–153.
- Chandrasekaran, M. (2012). *Valorization of food processing by-products*. CRC press.
- Chapotin, S. M., & Wolt, J. D. (2007). Genetically modified crops for the bioeconomy: meeting public and regulatory expectations. *Transgenic Research*, 16, 675–688.
- Chaudhary, M., Mukherjee, T. K., Singh, R., Gupta, M., Goyal, S., Singhal, P., Kumar, R., Bhusal, N., & Sharma, P. (2022). CRISPR/Cas technology for improving nutritional values in the agricultural sector: an update. *Molecular Biology Reports*, 49(7), 7101–7110.
- Chisti, Y. (2023). *Biotechnology for sustainable production of food*.
- de Almeida, E. L. M., Ventorim, R. Z., Dias, R. G., de Moura Ferreira, M. A., Bôas, S. G. V., & da Silveira, W. B. (2024). Novel Insights About Precision Fermentation. *Trending Topics on Fermented Foods*, 161–200.
- De Mol, M. L., Marcoen, V., Maryns, I., Snoeck, N., Beauprez, J. J., De Maeseneire, S. L., & Soetaert, W. K. (2023). Evaluation of long-term fermentation performance with engineered *Saccharomyces cerevisiae* strains. *Fermentation*, 9(8), 721.
- Deshmukh, R. (2021). Impact of GM Crops on Agriculture Production: A Positive Reflection through Success Stories. In *Policy Issues in Genetically Modified Crops* (pp. 161–187). Elsevier.
- Diez-Ozaeta, I., Berasarte, I., Zeid, A. F., Fernández, M., Russo, P., López, P., Dueñas, M. T., & Mohedano, M. L. (2025). Functional characterization of the riboflavin-overproducing and dextran-producing *Weissella cibaria* BAL3C-5 C120T strain for the development of biofortified plant-based beverages. *International Journal of Food Microbiology*, 426, 110908.
- Ekici, K., & Sancak, Y. C. (2011). A perspective on genetically modified food crops. *African Journal of Agricultural Research*, 6(7), 1639–1642.
- Fisberg, M., & Machado, R. (2015). History of yogurt and current patterns of consumption. *Nutrition Reviews*, 73(suppl_1), 4–7.

- Frewer, L., Lassen, J., Kettlitz, B., Scholderer, J., Beekman, V., & Berdal, K. G. (2004). Societal aspects of genetically modified foods. *Food and Chemical Toxicology*, 42(7), 1181–1193.
- Gao, Y., & Cabrera Serrenho, A. (2023). Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions. *Nature Food*, 4(2), 170–178.
- Hameed, A., Zaidi, S. S.-A., Shakir, S., & Mansoor, S. (2018). Applications of new breeding technologies for potato improvement. *Frontiers in Plant Science*, 9, 925.
- Hansson, S. O., & Joelsson, K. (2013). Crop biotechnology for the environment? *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 26, 759–770.
- He, Z., Zhang, Y., Liu, X., de Vries, W., Ros, G. H., Oenema, O., Xu, W., Hou, Y., Wang, H., & Zhang, F. (2023). Mitigation of nitrogen losses and greenhouse gas emissions in a more circular cropping-poultry production system. *Resources, Conservation and Recycling*, 189, 106739.
- Hocq, R., & Sauer, M. (2022). An artificial coculture fermentation system for industrial propanol production. *FEMS Microbes*, 3, xtac013.
- Kafle, S. (2023). CRISPR/CAS9: A new paradigm for crop improvement revolutionizing agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100484.
- Kent, L. (2004). What's the holdup? Addressing constraints to the use of plant biotechnology in developing countries. *AgBioForum*, 7(1–2), 63–69.
- Kerr, E. (2003). Industrial enzymes spearhead white biotech-Technology stands to revamp other industries and invigorate biotech marketplace. *Genetic Engineering News*, 23(16), 64+.
- Kouhen, M., García-Caparrós, P., Twyman, R. M., Abdelly, C., Mahmoudi, H., Schillberg, S., & Debez, A. (2023). Improving environmental stress resilience in crops by genome editing: insights from extremophile plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(4), 559–574.
- KOUNDAL, K. R. (2023). Implementation of Biosafety Regulations and Guidelines of Genetically Modified Crops in India and Future Perspective. *Indian J Agric Biochem*, 36(2), 195–198.
- Kumar, A. (2020). Synthetic biology and future production of biofuels and high-value products. In *Climate Change, Photosynthesis and Advanced Biofuels: The Role of Biotechnology in the Production of Value-added Plant Bio-products* (pp. 271–302). Springer.
- Kumar, H., Lata, R., Khan, U., & Gond, S. K. (2024). Biotechnological approaches for crop movement and production. *Sustainable Agriculture: Nanotechnology and Biotechnology for Crop Production and Protection*, 335.
- Li, W., Ding, K., Cao, P., & Zhao, L. (2020). *Research and application progress of bacteria and enzymes synergy in feed*.
- Makkar, H. P. S. (2016). Smart livestock feeding strategies for harvesting triple gain—the desired outcomes in planet, people and profit dimensions: a developing country perspective. *Animal Production Science*, 56(3), 519–534.
- Makkar, H. P. S., & Ankers, P. (2014). Towards sustainable animal diets: a survey-based study. *Animal Feed Science and Technology*, 198, 309–322.
- Mamphogoro, T. P., Mpanza, T. D. E., & Mani, S. (2024). Animal feed production and its contribution to sustainability of livestock systems: African perspective. *The Marginal Soils of Africa: Rethinking Uses, Management and Reclamation*, 37–54.
- Mihajlovski, K., Buntić, A., Milić, M., Rajilić-Stojanović, M., & Dimitrijević-Branković, S. (2021). From agricultural waste to biofuel: enzymatic potential of a bacterial isolate *Streptomyces fulvissimus* CKS7 for bioethanol production. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 165–174.
- Minarti, A., Rinanti, A., Fachrul, M. F., Tazkiaturrizki, & Fadhila, R. (2024). Circular Economy for Biodiesel Production by Managing Wastewater Using Microalgae. In *Algae as a Natural Solution for Challenges in Water-Food-Energy Nexus: Toward Carbon Neutrality* (pp. 463–521). Springer.
- Mishra, A., Sharma, P., Goel, C., Singh, B. P., & Arora, N. (2010). Allergenicity assessment of genetically modified foods. *Int J Integr Biol*, 10, 1–8.
- Moretti, A. F., Brizuela, N. S., Bravo-Ferrada, B. M., Tymczyszyn, E. E., & Golowczyc, M. A. (2023). Current applications and future trends of dehydrated lactic acid bacteria for incorporation in animal feed products. *Fermentation*, 9(8), 742.

- Moulas, A. N., & Vaiou, M. (2018). Vitamin D fortification of foods and prospective health outcomes. *Journal of Biotechnology*, 285, 91–101.
- Najafian, L., Zamanmirabadi, A., & Khaleghi, F. (2020). An Overview of Challenges in Producing and Consuming Transgenic Products. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 30(185), 154–172.
- Naveen, A. K., & Sontakke, M. (2024). A review on regulatory aspects, challenges and public perception in acceptance of genetically modified foods. *Food Science and Biotechnology*, 33(4), 791–804.
- Nerkar, G., Devarumath, S., Purankar, M., Kumar, A., Valarmathi, R., Devarumath, R., & Appunu, C. (2022). Advances in crop breeding through precision genome editing. *Frontiers in Genetics*, 13, 880195.
- Nyende, A. B. (2008). Biotechnology in plant nutrient management for agricultural production in the tropics: The research link. *African Journal of Biotechnology*, 7(6).
- Pandey, A., Negi, S., & Soccol, C. R. (2016). *Current developments in biotechnology and bioengineering: production, isolation and purification of industrial products*. Elsevier.
- Paul, I., & Sarkar, P. (2024). Application of Microbial Technique for Synthesis of Food-Grade Agents from Different Agrobiomasses: An Overview. *Agricultural Biomass for the Synthesis of Value-Added Materials*, 300–322.
- Paul, M. J., Nuccio, M. L., & Basu, S. S. (2018). Are GM crops for yield and resilience possible? *Trends in Plant Science*, 23(1), 10–16.
- Pradhan, S., & Parida, A. (2023). Perception of Food Crops Developed by Mutagenesis Among Various Stakeholders. In *TILLING and Eco-TILLING for Crop Improvement* (pp. 217–236). Springer.
- Qayoom, K., Baqual, M. F., Mushtaq, N., & Farooq, S. (2025). Biotechnology as a Catalyst for Sustainable Development: Leveraging Innovation for Global Goals. In *Role of Science and Technology for Sustainable Future: Volume 2-Applied Sciences and Technologies* (pp. 207–214). Springer.
- Rakicka, M., Marko, A., Sturdik, E., Danihelova, M., Mosovska, S., & Jurikova, L. (2015). The Influence of Bacteria of Lactic Acid Fermentation on Chemical Composition of Food. *CHEMICKE LISTY*, 109(5), 371–376.
- Ramessar, K., Capell, T., Twyman, R. M., Quemada, H., & Christou, P. (2009). Calling the tunes on transgenic crops: the case for regulatory harmony. *Molecular Breeding*, 23, 99–112.
- Rasheed, A., Gill, R. A., Hassan, M. U., Mahmood, A., Qari, S., Zaman, Q. U., Ilyas, M., Aamer, M., Batool, M., & Li, H. (2021). A critical review: recent advancements in the use of CRISPR/Cas9 technology to enhance crops and alleviate global food crises. *Current Issues in Molecular Biology*, 43(3), 1950–1976.
- Rizwan, D., Kirmani, S. B. R., & Masoodi, F. A. (2025). Circular Economy in the Food Systems: A Review. *Environmental Quality Management*, 34(4), e70096.
- Robas Mora, M., Fernández Pastrana, V. M., Probanza Lobo, A., & Jiménez Gómez, P. A. (2022). Valorization as a biofertilizer of an agricultural residue leachate: Metagenomic characterization and growth promotion test by PGPB in the forage plant *Medicago sativa* (alfalfa). *Frontiers in Microbiology*, 13, 1048154.
- 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.
- Sabater, C., Ruiz, L., Delgado, S., Ruas-Madiedo, P., & Margolles, A. (2020). Valorization of vegetable food waste and by-products through fermentation processes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 581997.
- Sairam, R. V., & Prakash, C. S. (2005). OBPC Symposium: maize 2004 & beyond—Can agricultural biotechnology contribute to global food security? In *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 41, 424–430.
- Saleh, N. E., & Abdel-Latif, H. M. R. (2025). Shedding light on developments in finfish nutrition. In *Organic Feed Additives for Livestock* (pp. 235–259). Elsevier.
- Salter, A. M. (2017). Improving the sustainability of global meat and milk production. *Proceedings of the Nutrition Society*, 76(1), 22–27.

- Schiek, B., Hareau, G., Baguma, Y., Medakker, A., Douches, D., Shotkoski, F., & Ghislain, M. (2016). Demystification of GM crop costs: releasing late blight resistant potato varieties as public goods in developing countries. *International Journal of Biotechnology*, 14(2), 112–131.
- Sharma, M., Sidhu, A. K., & Sati, D. (2023). Prospects of biotechnology for productive and sustainable agro-environmental growth. In *Advanced Microbial Techniques in Agriculture, Environment, and Health Management* (pp. 83–96). Elsevier.
- Sharma, P., Bano, A., Verma, K., Yadav, M., Varjani, S., Singh, S. P., & Tong, Y. W. (2023). Food waste digestate as biofertilizer and their direct applications in agriculture. *Bioresource Technology Reports*, 23, 101515.
- Shiferaw Terefe, N., & Augustin, M. A. (2020). Fermentation for tailoring the technological and health related functionality of food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(17), 2887–2913.
- Singh, A., Dikshit, R., & Singh, N. (2023). Valorization of Agro-Industrial Wastes for Biorefinery Products. In *Green Technologies for Industrial Waste Remediation* (pp. 101–123). Springer.
- Smug, L. N., Salminen, S., Sanders, M. E., & Ebner, S. (2014). Yoghurt and probiotic bacteria in dietary guidelines of the member states of the European Union. *Beneficial Microbes*, 5(1), 61–66.
- Talakayala, A., Katta, S., & Garladinne, M. (2020). Genetic engineering of crops for insect resistance: An overview. *Journal of Biosciences*, 45(1), 114.
- Thakur, K., Wei, Z.-J., & Tomar, S. K. (2020). Riboflavin-enriched fermented soy milk for redox-mediated gut modulation: in the search of novel prebiotics. In *Molecular nutrition* (pp. 91–103). Elsevier.
- Thapa, N., & Tamang, J. P. (2015). Functionality and therapeutic values of fermented foods. *Health Benefits of Fermented Foods*, 111, 168.
- Tohidfar, M., & Khosravi, S. (2015). Transgenic crops with an improved resistance to biotic stresses. A review. *Base*.
- Valerozo, J. A., Rice, D., Bucaro, D. S., Ramil, R., Agrupis, S. C., & Anal, A. K. (2025). Integrative Approaches in Microbial Fermentation of Underutilized Crops for Enhanced Nutritional and Bioactive Functionalities. *Food Bioscience*, 106941.
- Venegas, M., Leiva, A. M., Reyes-Contreras, C., Neumann, P., Piña, B., & Vidal, G. (2021). Presence and fate of micropollutants during anaerobic digestion of sewage and their implications for the circular economy: A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104931.
- Verma, R. K., Devi, R., Shukla, S., Shukla, S. K., Kumar, S., & Prajapati, A. (2017). Biotechnology application in animal nutrition and production. *Biochemical & Cellular Archives*, 17(1).
- Wang, J., Sha, Z., Zhang, J., Qin, W., Xu, W., Goulding, K., & Liu, X. (2023). Improving nitrogen fertilizer use efficiency and minimizing losses and global warming potential by optimizing applications and using nitrogen synergists in a maize-wheat rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 353, 108538.
- Wenk, C. (2003). Herbs and botanicals as feed additives in monogastric animals. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 16(2), 282–289.
- Wiltschi, B., Cernava, T., Dennig, A., Casas, M. G., Geier, M., Gruber, S., Haberbauer, M., Heidinger, P., Acero, E. H., & Kratzer, R. (2020). Enzymes revolutionize the bioproduction of value-added compounds: From enzyme discovery to special applications. *Biotechnology Advances*, 40, 107520.
- Yadav, J., Ray, S., Soni, M., & Kashyap, B. K. (2023). Microbial fermentation system for the production of biopolymers and bioenergy from various organic wastes and by-products. In *Current research trends and applications in waste management* (pp. 307–339). Springer.
- Zegeye, W. A., Tsegaw, M., Zhang, Y., & Cao, L. (2022). CRISPR-based genome editing: advancements and opportunities for rice improvement. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(8), 4454.
- Zepeda, J. F. (2006). Coexistence, genetically modified biotechnologies and biosafety: implications for developing countries. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(5), 1200–1208.

Zhang, A., Xu, W., Zhao, F., & Jiang, N. (2022). *Research progress of microbial fermented feed in animal production.*