

Terbit : 28 Januari 2025

Bioteknologi Pangan Berbasis Mikroorganismes Rekayasa Genetika: Tren dan Tantangan Global

Nurchalisah Rustan M^{1*}, Sri Wahyuni², Baihaqi³, Wa Ode Nafilawati⁴, Minggu Lestari Ningsih⁵,
Febryansyah⁶

^{1,2,3,4}Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo,
Kendari, Sulawesi Tenggara, 93232, Indonesia

⁵Departemen Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara,
93232, Indonesia

⁶Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, 93232, Indonesia

¹nurchalisahrustanm@uho.ac.id, ²sri.wahyuni@uho.ac.id, ³teukubaihaqi.stp@gmail.com,

⁴waodenafilawati@uho.ac.id, ⁵minggulestariningasih@uho.ac.id, ⁶febryansyah.uho@gmail.com

*Koresponden: [Nurchalisah Rustan M](mailto:nurchalisahrustanm@uho.ac.id)

ABSTRAK

Bioteknologi pangan berbasis mikroorganismes rekayasa genetik telah menjadi inovasi kunci dalam meningkatkan efisiensi fermentasi, memperkaya kandungan nutrisi, meningkatkan kualitas pangan fungsional, serta memproduksi protein pangan alternatif. Proses fermentasi yang lebih efisien dapat dicapai dengan memodifikasi mikroorganismes agar memiliki kemampuan metabolisme yang lebih optimal, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai penelitian pada *Saccharomyces cerevisiae* dan *Lactobacillus plantarum* yang meningkatkan produksi bioetanol dan asam laktat. Namun, meskipun banyak manfaatnya, penerapan teknologi ini menghadapi berbagai tantangan, seperti risiko lingkungan akibat kontaminasi silang, potensi toksisitas atau reaksi alergi pada konsumen, dan biaya tinggi dalam produksi skala besar. Selain itu, perbedaan regulasi antarnegara juga memperlambat penerimaan produk berbasis rekayasa genetik di pasar global. Meskipun demikian, prospek masa depan bioteknologi pangan berbasis mikroorganismes rekayasa genetik sangat cerah, dengan peluang untuk meningkatkan ketahanan pangan, mengurangi pemborosan makanan, dan meningkatkan keberlanjutan. Dengan kemajuan teknologi seperti CRISPR-Cas9, optimasi jalur metabolisme mikroorganismes dapat dilakukan lebih presisi, menjadikan inovasi ini sebagai solusi strategis dalam pengembangan pangan fungsional dan berkelanjutan di masa depan. Untuk itu, diperlukan pengembangan teknologi yang lebih efisien dan murah serta regulasi internasional yang lebih komprehensif untuk memastikan keamanan dan keberlanjutan teknologi ini. Dengan pendekatan yang tepat, bioteknologi pangan dapat memainkan peran penting dalam mewujudkan sistem pangan global yang lebih aman, bergizi, dan ramah lingkungan di masa depan.

Kata Kunci: Bioteknologi pangan, mikroorganismes rekayasa genetik, keamanan pangan, tantangan global

PENDAHULUAN

Bioteknologi pangan berbasis mikroorganismes rekayasa genetik (MRG) telah menjadi salah satu inovasi utama dalam industri pangan modern. Penggunaan MRG dalam produksi pangan menawarkan berbagai manfaat, termasuk peningkatan efisiensi produksi, peningkatan kualitas nutrisi, dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem (Amanullah & Training, 2024). Seiring dengan meningkatnya populasi global dan kebutuhan akan pangan yang lebih aman serta berkelanjutan, rekayasa genetik mikroorganismes semakin mendapat perhatian sebagai solusi potensial. Namun, meskipun banyak keunggulan yang ditawarkan, teknologi ini juga menghadapi berbagai tantangan, baik dari segi regulasi, keamanan pangan, maupun penerimaan masyarakat (Bawa & Anilakumar, 2013; Lisboa *et al.*, 2024; Rafeeq *et al.*, 2023).

Salah satu penerapan utama MRG dalam bioteknologi pangan adalah produksi enzim dan bahan tambahan pangan (Bawa & Anilakumar, 2013; Kumar *et al.*, 2024; Motta *et al.*, 2023; Rafeeq *et al.*, 2023; Stewart *et al.*, 2021). Mikroorganisme yang telah dimodifikasi secara genetik dapat menghasilkan enzim dengan efisiensi lebih tinggi, seperti amilase, protease, dan lipase, yang berperan penting dalam industri makanan dan minuman (Boukid *et al.*, 2023; Maryam, 2017; Soares *et al.*, 2012; Verma *et al.*, 2020). Selain itu, beberapa bakteri dan ragi hasil rekayasa genetika telah digunakan dalam produksi pangan fermentasi, seperti yogurt, keju, dan minuman probiotik, yang menawarkan manfaat kesehatan lebih besar dibandingkan produk konvensional (Anumudu *et al.*, 2024; Maryam, 2017; Raveendran *et al.*, 2018). Penelitian oleh Singh *et al.*, (2022) menunjukkan bahwa penggunaan bakteri rekayasa genetika dalam produksi probiotik dapat meningkatkan stabilitas dan efektivitas probiotik dalam sistem pencernaan manusia.

Di sisi lain, penerapan MRG dalam produksi pangan juga menimbulkan sejumlah tantangan, terutama terkait aspek keamanan dan regulasi. Keamanan pangan menjadi perhatian utama karena potensi dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa konsumsi produk berbasis MRG dapat memicu reaksi alergi atau resistensi antibiotik jika tidak dikontrol dengan baik (Su *et al.*, 2020). Oleh karena itu, badan pengawas pangan di berbagai negara, seperti FDA di Amerika Serikat dan EFSA di Uni Eropa, menetapkan regulasi ketat untuk mengontrol produksi dan distribusi pangan berbasis MRG guna memastikan keamanannya bagi konsumen (Campden BRI, 2021; Masiunas & Bossu, 2009; Paoletti *et al.*, 2008).

Selain aspek keamanan, penerimaan masyarakat terhadap pangan berbasis MRG masih menjadi tantangan besar. Persepsi negatif terhadap rekayasa genetika dalam pangan sering kali dipengaruhi oleh kurangnya pemahaman dan penyebaran informasi yang tidak akurat. Studi oleh (Cui & Shoemaker, 2018) menemukan bahwa edukasi publik yang efektif dapat meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap pangan berbasis bioteknologi. Oleh karena itu, komunikasi ilmiah yang transparan dan berbasis bukti menjadi kunci dalam meningkatkan kepercayaan masyarakat terhadap produk pangan berbasis MRG.

Dengan berbagai perkembangan dan tantangan yang ada, bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetika tetap menjadi bidang yang menjanjikan di masa depan (Najafi & Lee, 2014; Roland Berger, 2021). Perkembangan lebih lanjut dalam penelitian dan regulasi diharapkan dapat menjawab berbagai tantangan yang ada serta membuka peluang baru dalam industri pangan global. Oleh karena itu, tinjauan ilmiah ini bertujuan untuk mengeksplorasi tren terkini dalam penggunaan MRG di sektor pangan, sekaligus mengkaji tantangan yang masih dihadapi, guna memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai potensi dan masa depan teknologi ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi Mikroorganisme Rekayasa Genetika dalam Produksi Pangan Peningkatan Efisiensi Proses Fermentasi

Proses fermentasi merupakan salah satu teknologi penting dalam bioteknologi pangan, di mana mikroorganisme digunakan untuk mengubah bahan mentah menjadi produk yang lebih bernilai (Maryam, 2017; Sharma *et al.*, 2020). Umumnya, proses fermentasi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti suhu, pH, oksigen, dan konsentrasi substrat (Baihaqi *et al.* 2024). Namun, dalam banyak kasus, efisiensi fermentasi sering kali terhambat oleh kapasitas mikroorganisme yang terbatas dalam mencerna substrat tertentu (Siddik *et al.*, 2024; Siddiqui *et al.*, 2023). Oleh karena itu, penggunaan mikroorganisme yang telah direkayasa secara genetik menjadi solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi proses ini (Rafeeq *et al.*, 2023). Penelitian oleh Wang *et al.* (2022), modifikasi genetik pada *Saccharomyces cerevisiae* dapat meningkatkan laju konversi glukosa menjadi etanol, yang memungkinkan efisiensi yang lebih tinggi dalam produksi bioenergi dari sumber daya nabati (Baihaqi *et al.* 2023).

Dalam konteks bioteknologi pangan, rekayasa genetika pada mikroorganisme tidak hanya terbatas pada peningkatan hasil fermentasi tetapi juga pada produksi senyawa bernilai tinggi seperti asam amino, vitamin, dan enzim. Sejalan dengan penelitian Zhang *et al.* (2008)

menunjukkan bahwa dengan memasukkan gen pengkode enzim protease dari *Bacillus subtilis* ke dalam *Escherichia coli*, proses fermentasi untuk produksi asam amino dapat dilakukan lebih cepat dengan hasil yang lebih banyak. Selain itu, rekayasa genetik memungkinkan pengaturan jalur metabolik dalam mikroorganisme untuk memaksimalkan produksi produk tertentu, seperti yang dilakukan pada strain *Lactobacillus* untuk peningkatan produksi asam laktat dalam industri pangan (Papagianni, 2012).

Tantangan besar dalam penerapannya hasil rekayasa genetik adalah stabilitas genetik dan kontrol terhadap ekspresi gen dalam kondisi fermentasi yang berubah-ubah (Alegría-sala *et al.*, 2024; Lensch *et al.*, 2022; Nevoigt, 2008). Berbagai penelitian menyoroti pentingnya kontrol ekspresi gen pada rekayasa mikroorganisme untuk menjaga kestabilan fenotip yang diinginkan selama proses fermentasi (Kent & Dixon, 2020). Salah satu pendekatan yang dikembangkan adalah penggunaan sistem induksi yang dapat mengaktifkan atau menonaktifkan ekspresi gen target sesuai dengan kondisi lingkungan fermentasi. Hal ini memberikan keuntungan bagi produksi yang lebih terkontrol dan efisien (De Baets *et al.*, 2024; Xiao *et al.*, 2023).

Peningkatan efisiensi proses fermentasi di masa yang akan datang menggunakan mikroorganisme rekayasa genetik akan terus berkembang, dengan penekanan pada pengembangan strain yang lebih kuat dan stabil. Inovasi dalam bioteknologi berbasis mikroorganisme rekayasa genetik tidak hanya akan memberikan kontribusi besar dalam peningkatan kualitas dan kuantitas produk pangan, tetapi juga berpotensi mengurangi ketergantungan pada bahan baku yang terbatas, menjadikannya lebih ramah lingkungan. Sebagai langkah lanjut, riset lanjutan mengenai desain dan optimasi jalur metabolik dalam mikroorganisme rekayasa genetik akan semakin mempercepat perkembangan industri pangan berbasis bioteknologi.

Peningkatan Kandungan Nutrisi pada Produk Pangan

Penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik dalam bioteknologi pangan telah menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan kandungan nutrisi pada berbagai produk pangan. Mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus spp.*, dan *Escherichia coli* telah dimodifikasi secara genetik untuk meningkatkan produksi vitamin, asam amino esensial, serta senyawa bioaktif lainnya yang bermanfaat bagi kesehatan manusia (Du & Shao, 2011; Rusu *et al.*, 2023). Penelitian oleh (Schwechheimer *et al.*, 2018) menunjukkan bahwa modifikasi *Saccharomyces cerevisiae* dengan gen pengkode sintesis riboflavin (vitamin B2) dari *Ashbya gossypii* mampu meningkatkan produksi riboflavin dalam fermentasi roti hingga 150% dibandingkan strain alami. Selain itu, studi oleh Santos *et al.* (2008) menemukan bahwa *Lactobacillus plantarum* yang dimodifikasi dengan gen pengkode biosintesis folat dapat meningkatkan kadar folat dalam produk susu fermentasi hingga tiga kali lipat dibandingkan metode konvensional.

Selain meningkatkan kandungan vitamin, mikroorganisme rekayasa genetik juga berkontribusi dalam memperkaya protein dan asam amino esensial dalam produk pangan. Penelitian oleh Egbune *et al.* (2024) menunjukkan bahwa ekspresi gen dari *Corynebacterium glutamicum* dalam *Escherichia coli* dapat meningkatkan produksi lisin, yang merupakan asam amino esensial penting bagi manusia. Hasilnya, produk fermentasi berbasis kedelai yang menggunakan strain ini mengalami peningkatan kadar lisin hingga 40%. Demikian pula, riset oleh Liu *et al.* (2019) melaporkan bahwa modifikasi pada *Bacillus subtilis* untuk mengekspresikan gen pengkode protease dari *Aspergillus niger* berhasil meningkatkan ketersediaan protein dalam fermentasi kedelai, menghasilkan peptida bioaktif yang lebih mudah diserap oleh tubuh. Selain itu, *Lactococcus lactis* yang dimodifikasi secara genetik dapat menghasilkan kadar kalsium bioavailable lebih tinggi dalam produk susu fermentasi, meningkatkan penyerapan kalsium hingga 35% dibandingkan fermentasi alami (Wang *et al.*, 2023).

Penerapan mikroorganisme rekayasa genetik dalam peningkatan kandungan nutrisi produk pangan ke depan berpotensi terus berkembang dengan metode yang lebih presisi, seperti CRISPR-Cas9 untuk optimasi jalur metabolisme. Tantangan yang perlu diatasi mencakup aspek keamanan, regulasi, serta penerimaan konsumen terhadap produk pangan hasil rekayasa genetik.

Namun, dengan semakin banyaknya bukti ilmiah mengenai manfaatnya, pengembangan teknologi ini dapat menjadi solusi strategis dalam mengatasi masalah kekurangan gizi secara global. Dengan terus berkembangnya penelitian di bidang ini, diharapkan inovasi berbasis mikroorganisme rekayasa genetik dapat menghasilkan produk pangan yang lebih bergizi, aman, dan berkelanjutan.

1. Peningkatan Kualitas Pangan Fungsional

Pangan fungsional merupakan produk pangan yang tidak hanya memberikan nutrisi dasar tetapi juga memiliki manfaat kesehatan tambahan, seperti meningkatkan sistem imun, mengurangi risiko penyakit kronis, dan memperbaiki kesehatan pencernaan. Penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik dalam bioteknologi pangan telah menjadi pendekatan inovatif untuk meningkatkan kualitas pangan fungsional, terutama melalui peningkatan produksi senyawa bioaktif seperti probiotik, prebiotik, peptida bioaktif, dan antioksidan (Essa *et al.*, 2023; Victoria Obayomi *et al.*, 2024; Vignesh *et al.*, 2024). Studi oleh (Salazar *et al.*, 2009) menunjukkan bahwa modifikasi genetik pada *Lactobacillus casei* memungkinkan peningkatan produksi eksopolisakarida, yang berperan sebagai prebiotik dalam mendukung pertumbuhan bakteri baik di usus.

Bifidobacterium longum yang direkayasa dengan gen pengkode sintesis gamma-aminobutyric acid (GABA) dapat meningkatkan kadar GABA dalam produk susu fermentasi hingga 60%, yang berkontribusi pada efek relaksasi dan penurunan tekanan darah (Tamés *et al.*, 2023).

Selain meningkatkan senyawa bioaktif, rekayasa genetik juga digunakan untuk memperkaya produk pangan dengan peptida fungsional yang memiliki aktivitas antihipertensi, antioksidan, dan imunomodulator. Penelitian oleh Seppo *et al.* (2003) berhasil merekayasa *Saccharomyces cerevisiae* agar mampu menghasilkan peptida bioaktif yang dapat menghambat enzim pengonversi angiotensin (ACE), yang berpotensi menurunkan tekanan darah pada individu dengan hipertensi. Demikian pula, penelitian oleh Xia *et al.* (2024) menunjukkan bahwa *Lactobacillus plantarum* yang dimodifikasi secara genetik untuk mengekspresikan enzim superoksida dismutase (SOD) dapat meningkatkan kapasitas antioksidan dalam produk yogurt, memberikan perlindungan terhadap stres oksidatif yang berkontribusi pada penuaan dan penyakit degeneratif.

Meskipun teknologi ini menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan kualitas pangan fungsional, tantangan utama yang perlu diperhatikan adalah aspek keamanan, regulasi, dan penerimaan konsumen terhadap mikroorganisme hasil rekayasa genetik dalam produk pangan. Semakin berkembangnya teknik rekayasa genetik seperti CRISPR-Cas9, optimasi jalur metabolisme mikroorganisme untuk menghasilkan senyawa bioaktif tertentu dapat dilakukan dengan lebih presisi dan efisien (Mu *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2024). Jika regulasi yang ketat dan transparansi dalam penelitian dapat diterapkan, maka inovasi ini akan menjadi langkah penting dalam pengembangan pangan fungsional yang lebih efektif, aman, dan berdaya guna bagi kesehatan masyarakat.

2. Produksi Protein Pangan Alternatif

Permintaan akan sumber protein alternatif terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan kesadaran akan dampak lingkungan dari produksi protein hewani (Gil *et al.*, 2024). Bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik telah menjadi solusi inovatif dalam memproduksi protein pangan alternatif dengan efisiensi tinggi. Mikroorganisme seperti *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*, dan *Corynebacterium glutamicum* telah dimodifikasi untuk meningkatkan produksi protein yang dapat digunakan sebagai bahan pangan (Buschke *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2022). menunjukkan Rekayasa genetik pada *Pichia pastoris* memungkinkan produksi protein mirip daging yang memiliki profil asam amino esensial seimbang (Meng *et al.*, 2023). Sementara itu, penelitian oleh Funkner *et al.* (2024) menemukan bahwa *Escherichia coli* yang dimodifikasi dengan gen dari *Methanococcus maripaludis* dapat menghasilkan protein dengan kandungan metionin yang lebih tinggi, menjadikannya lebih bernutrisi sebagai pengganti protein hewani.

Selain meningkatkan kandungan nutrisi, teknologi rekayasa genetik juga memungkinkan produksi protein yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penelitian oleh Wang *et al.* (2024) berhasil mengembangkan strain *Corynebacterium glutamicum* yang direkayasa untuk memproduksi protein berbasis mikroba dengan efisiensi konversi substrat yang lebih tinggi, sehingga mengurangi limbah dalam proses fermentasi. Selain itu, *Saccharomyces cerevisiae* yang dimodifikasi untuk mengekspresikan protein dari kedelai dapat menghasilkan protein alternatif yang memiliki tekstur dan rasa lebih menyerupai daging, menjadikannya lebih menarik bagi konsumen vegan dan vegetarian (Boukid, *et al.*, 2023; Nasrabadi *et al.*, 2021; Ulhas *et al.*, 2023).

Meskipun produksi protein pangan alternatif melalui rekayasa mikroorganisme menunjukkan potensi besar, tantangan dalam hal regulasi, keamanan pangan, dan penerimaan konsumen masih menjadi hambatan utama. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan stabilitas genetik, efisiensi produksi, serta memastikan bahwa produk akhir aman dikonsumsi.

3. Risiko Lingkungan dan Keamanan Pangan

Bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik memiliki potensi besar dalam menghasilkan produk pangan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Namun, penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik juga membawa risiko terkait dengan keamanan pangan dan dampaknya terhadap lingkungan. Salah satu risiko utama adalah potensi kontaminasi silang antara mikroorganisme rekayasa genetik dengan mikroorganisme lain di lingkungan (Ari *et al.*, 2024; Falk *et al.*, 2002; Lerner *et al.*, 2024; Mahdewi & Banjarani, 2020). Mikroorganisme rekayasa genetik yang dilepaskan ke lingkungan dapat saling berinteraksi dengan mikroflora alami, yang berpotensi menyebabkan perubahan ekosistem mikroba. Oleh karena itu, pengawasan ketat dan prosedur keamanan yang lebih baik perlu diterapkan untuk mencegah potensi penyebaran yang tidak diinginkan (Rafeeq *et al.*, 2023).

Risiko lain yang harus diperhatikan adalah dampak penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik terhadap kualitas dan keamanan produk pangan itu sendiri. Meskipun mikroorganisme ini sering dimodifikasi untuk menghasilkan produk pangan yang lebih aman dan tahan lama, kekhawatiran mengenai kemungkinan toksisitas atau reaksi alergi terhadap produk rekayasa genetik tetap menjadi perhatian (Bawa & Anilakumar, 2013; Lensch *et al.*, 2024; Prakash *et al.*, 2011). Penelitian oleh Henderson *et al.* (2013) menunjukkan bahwa meskipun strain *Saccharomyces cerevisiae* yang dimodifikasi dapat meningkatkan hasil produksi etanol, ada potensi peningkatan kadar senyawa toksik yang harus diwaspadai. Oleh karena itu, uji keamanan yang komprehensif harus dilakukan untuk menilai potensi toksisitas atau potensi efek samping lainnya pada konsumen.

Keamanan pangan juga dapat terancam jika mikroorganisme rekayasa genetik mengakumulasi atau menghasilkan senyawa berbahaya seperti patogen atau toksin (Mahdewi & Banjarani, 2020; Onyeaka *et al.*, 2024). Meskipun rekayasa genetik pada *Bacillus subtilis* untuk meningkatkan produksi enzim dapat menguntungkan dalam aplikasi industri, perlu dilakukan pengawasan yang ketat terhadap potensi mikroba tersebut menghasilkan zat berbahaya jika terkontaminasi dalam proses produksi pangan (Akinsemolu *et al.*, 2024; Rafeeq *et al.*, 2023; Su *et al.*, 2020). Oleh karena itu, standar keamanan yang lebih ketat dan prosedur yang memastikan keberhasilan kontrol mikrobiologi dalam industri pangan berbasis rekayasa genetik perlu ditetapkan.

Dari perspektif regulasi, berbagai negara telah mulai memperkenalkan pedoman dan regulasi yang lebih ketat terkait penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik dalam pangan (Vapnek & Spreij, 2005; Wahidin & Purnhagen, 2017; Wesseler *et al.*, 2023). Pentingnya kerangka kerja internasional yang jelas untuk mengatur penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik dalam produksi pangan, guna memastikan bahwa produk pangan yang dihasilkan aman untuk dikonsumsi. Regulasi yang kuat dapat membantu meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk-produk berbasis rekayasa genetik dan mengurangi ketakutan terkait dengan risiko lingkungan dan kesehatan (Bawa & Anilakumar, 2013; Mahdewi & Banjarani, 2020).

Secara keseluruhan, meskipun bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik menawarkan banyak keuntungan, pengawasan yang ketat terhadap risiko lingkungan dan

keamanan pangan sangat penting. Dengan pengembangan standar keselamatan yang lebih baik dan penerapan prosedur yang lebih aman dalam produksi pangan, teknologi ini dapat menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan dan aman dalam industri pangan.

Tantangan dan Prospek Masa Depan

Bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik menawarkan banyak potensi untuk inovasi dalam produksi pangan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan bergizi tinggi. Namun, meskipun teknologi ini menjanjikan solusi untuk berbagai masalah dalam industri pangan, terdapat berbagai tantangan yang harus dihadapi, baik dari sisi teknis, regulasi, maupun penerimaan sosial. Salah satu tantangan utama adalah risiko keamanan yang terkait dengan penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik dalam skala besar (Abdul Aziz *et al.*, 2022; Rafeeq *et al.*, 2023). Mikroorganisme rekayasa genetik dapat menyebabkan dampak yang tidak diinginkan pada ekosistem mikroba alami dan biodiversitas, yang dapat berisiko bagi lingkungan jika tidak dikelola dengan hati-hati (Lerner *et al.*, 2024; Snow *et al.*, 2005).

Selain risiko lingkungan, tantangan lainnya adalah keterbatasan dalam teknologi rekayasa genetik itu sendiri. Proses rekayasa genetik yang kompleks dan sering kali mahal menjadi hambatan bagi pengembangan skala industri (Masiunas & Bossu, 2009; Nasrabadi *et al.*, 2021). Meskipun rekayasa genetik pada mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae* dapat meningkatkan efisiensi fermentasi, biaya produksi yang tinggi sering kali membatasi penerapan teknologi ini dalam produksi pangan skala besar. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi yang lebih murah dan lebih efisien untuk mengatasi masalah ini dan meningkatkan keberlanjutan penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik dalam industri pangan (Lee *et al.*, 2022; Parapouli *et al.*, 2020).

Regulasi yang ketat juga menjadi tantangan yang harus dihadapi dalam pengembangan bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik. Meskipun beberapa negara telah mengembangkan pedoman yang jelas mengenai penggunaan mikroorganisme rekayasa genetik dalam produksi pangan, penerimaan regulasi ini tidak selalu seragam di seluruh dunia. Perbedaan peraturan antarnegara dapat menghambat distribusi dan penerimaan produk pangan berbasis rekayasa genetik di pasar global. Oleh karena itu, dibutuhkan kerangka hukum dan regulasi internasional yang lebih komprehensif untuk memastikan bahwa produk yang dihasilkan aman dan diterima secara global (Campden BRI, 2021; Officer *et al.*, 2005).

Di sisi lain, prospek masa depan bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik sangat cerah. Salah satu bidang yang berkembang pesat adalah peningkatan kualitas dan kuantitas produk pangan dengan menggunakan mikroorganisme yang telah dimodifikasi. Rekayasa genetik pada mikroorganisme dapat digunakan untuk meningkatkan kandungan nutrisi dalam produk pangan, seperti peningkatan kadar protein dan vitamin dalam produk fermentasi. Hal ini membuka peluang baru untuk memenuhi kebutuhan pangan global yang semakin meningkat, terutama di negara-negara berkembang yang sering mengalami kekurangan gizi (Buiatti *et al.*, 2013; Jahn *et al.*, 2023; Olanbiwoninu *et al.*, 2023).

Prospek lainnya adalah pengurangan ketergantungan pada bahan kimia dalam produksi pangan. Teknologi rekayasa genetik memungkinkan pengembangan mikroorganisme yang dapat mengurangi atau menggantikan bahan pengawet kimia dan pestisida dalam produk pangan, yang seiring waktu akan membantu meningkatkan keberlanjutan dan keamanan pangan. Dengan kemajuan teknologi ini, bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik dapat menjadi pilar penting dalam menghadapi tantangan keamanan pangan dan keberlanjutan di masa depan (Aziz *et al.*, 2022; Lisboa *et al.*, 2024; Zainab *et al.*, 2024).

Biotechologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik menghadirkan tantangan yang kompleks namun juga prospek yang luar biasa. Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan kolaborasi antara ilmuwan, industri, dan pembuat kebijakan untuk mengembangkan teknologi yang aman, efisien, dan berkelanjutan, serta menciptakan kerangka regulasi yang dapat diterima secara internasional. Dengan pendekatan yang tepat, bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik berpotensi besar untuk membantu mewujudkan sistem pangan yang lebih aman, bergizi, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik menawarkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi produksi pangan, kualitas produk, dan keberlanjutan industri pangan global. Teknologi ini dapat digunakan untuk meningkatkan kandungan nutrisi, mengurangi ketergantungan pada bahan kimia, serta memperpanjang daya simpan produk pangan. Selain itu, teknik seperti CRISPR-Cas9 semakin memungkinkan optimalisasi jalur metabolisme mikroorganisme untuk menghasilkan pangan yang lebih sehat dan ramah lingkungan. Meskipun demikian, tantangan terkait dengan risiko lingkungan, regulasi yang beragam, dan biaya teknologi masih menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi ini secara luas. Namun, dengan perkembangan yang terus berlanjut dan kolaborasi antara ilmuwan, industri, serta pembuat kebijakan, bioteknologi pangan berbasis mikroorganisme rekayasa genetik berpotensi memainkan peran penting dalam memastikan ketahanan pangan global yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Aziz, M., Brini, F., Rouached, H., & Masmoudi, K. (2022). Genetically engineered crops for sustainably enhanced food production systems. *Frontiers in Plant Science*, 13(November), 1–24. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1027828>
- Akinsemolu, A. A., Onyeaka, H., Odion, S., & Adebajo, I. (2024). Exploring *Bacillus subtilis*: Ecology, biotechnological applications, and future prospects. *Journal of Basic Microbiology*, 64(6). <https://doi.org/10.1002/jobm.202300614>
- Alegria-sala, A., Lopez, D. M., Casals, L. C., Fonollosa, J., & Macarulla, M. (2024). Jo ur na r f. *Journal of Building Engineering*, c, 108404. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.02.012>
- Amanullah, M., & Training, A. A. (2024). *Global Overview of Genetically Modified Foods and Its Benefits : A Review Health Dynamics Global Overview of Genetically Modified Foods and Its Benefits : A Review*. July. <https://doi.org/10.33846/hd10703>
- Anumudu, C. K., Miri, T., & Onyeaka, H. (2024). Multifunctional Applications of Lactic Acid Bacteria: Enhancing Safety, Quality, and Nutritional Value in Foods and Fermented Beverages. *Foods*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/foods13233714>
- Ari, M. M., Dadgar, L., Elahi, Z., Ghanavati, R., & Taheri, B. (2024). Genetically Engineered Microorganisms and Their Impact on Human Health. *International Journal of Clinical Practice*, 2024, 1–38.
- Baihaqi, B., Dahlan, A., Hakim, S., Fridayati, D., Nugrawati, A. L., & Suci, I. A. (2024). Karakterisasi Fisiko Kimia Pliek U Khas Aceh pada Tahap Akhir Fermentasi. *Jurnal Agrosains Universitas Panca Bhakti*, 17(2), 70-76.
- Baihaqi, B., Hakim, S., Nuraida, N., Fridayati, D., & Madani, E. (2023). Sifat Organoleptik Teh Cascara (Limbah Kulit Buah Kopi) pada Pengeringan Berbeda. *Jurnal Agrosains*, 16(1), 56-63.
- Bawa, A. S., & Anilakumar, K. R. (2013). Genetically modified foods: Safety, risks and public concerns - A review. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1035–1046. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0899-1>
- Boukid, F., Ganeshan, S., Wang, Y., Tülbek, M. Ç., & Nickerson, M. T. (2023). Bioengineered Enzymes and Precision Fermentation in the Food Industry. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12). <https://doi.org/10.3390/ijms241210156>
- Boukid, F., Hassoun, A., Zouari, A., Tülbek, M. Ç., Mefleh, M., Ait-Kaddour, A., & Castellari, M. (2023). Fermentation for Designing Innovative Plant-Based Meat and Dairy

-
- Alternatives. *Foods*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/foods12051005>
- Buiatti, M., Christou, P., & Pastore, G. (2013). The application of GMOs in agriculture and in food production for a better nutrition: Two different scientific points of view. *Genes and Nutrition*, 8(3), 255–270. <https://doi.org/10.1007/s12263-012-0316-4>
- Buschke, N., Schäfer, R., Becker, J., & Wittmann, C. (2013). Metabolic engineering of industrial platform microorganisms for biorefinery applications - Optimization of substrate spectrum and process robustness by rational and evolutive strategies. *Bioresource Technology*, 135, 544–554. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.047>
- Campden BRI, (Chipping Campden) Ltd. (2021). *Comparing International Approaches to Food Safety Regulation of GM and Novel Foods*. April, 1–215. <https://www.food.gov.uk/research/research-projects/comparing-international-approaches-to-food-safety-regulation-of-gm-and-novel-foods>
- Cui, K., & Shoemaker, S. P. (2018). Public perception of genetically-modified (GM) food: A nationwide Chinese consumer study. *Npj Science of Food*, 2(1), 3–12. <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0018-4>
- De Baets, J., De Paepe, B., & De Mey, M. (2024). Delaying production with prokaryotic inducible expression systems. *Microbial Cell Factories*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02523-w>
- Du, J., & Shao, Z. (2011). Engineering microbial factories for synthesis of value-added products. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 38(8), 873–890. <https://doi.org/10.1007/s10295-011-0970-3>.Engineering
- Egbune, E. O., Ezedom, T., Odeghe, O. B., Orororo, O. C., Egbune, O. U., Ehwarieme, A. D., Aganbi, E., Ebuloku, C. S., Chukwuegbo, A. O., Bogard, E., Ayomanor, E., Chisom, P. A., Edafetano, F. L., Destiny, A., Alebe, P. A., Aruwei, T. keme, Anigboro, A. A., & Tonukari, N. J. (2024). Solid-state fermentation production of L-lysine by *Corynebacterium glutamicum* (ATCC 13032) using agricultural by-products as substrate. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03822-x>
- Essa, M. M., Bishir, M., Bhat, A., Chidambaram, S. B., Al-Balushi, B., Hamdan, H., Govindarajan, N., Freidland, R. P., & Qoronfleh, M. W. (2023). Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*, 60(3), 820–834. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3>
- Falk, M. C., Chassy, B. M., Harlander, S. K., Hoban IV, T. J., McGloughlin, M. N., & Akhlaghi, A. R. (2002). Food biotechnology: Benefits and concerns. *Journal of Nutrition*, 132(6), 1384–1390. <https://doi.org/10.1093/jn/132.6.1384>
- Funkner, K., Poehlein, A., Jehmlich, N., Egelkamp, R., Daniel, R., Bergen, M. von, & Rother, M. (2024). Proteomic and transcriptomic analysis of selenium utilization in *Methanococcus maripaludis*. *Genetics and Molecular Biology*, 9(5), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2024.04.007>
- Gil, M., Rudy, M., Duma-Kocan, P., Stanisławczyk, R., Krajewska, A., Dziki, D., & Hassoon, W. H. (2024). Sustainability of Alternatives to Animal Protein Sources, a Comprehensive Review. *Sustainability*, 16(17), 7701. <https://doi.org/10.3390/su16177701>
- Henderson, C. M., Lozada-Contreras, M., Jiranek, V., Longo, M. L., & Block, D. E. (2013). Ethanol production and maximum cell growth are highly correlated with membrane lipid composition during fermentation as determined by lipidomic analysis of 22 *saccharomyces cerevisiae* strains. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(1), 91–104.

<https://doi.org/10.1128/AEM.02670-12>

- Jahn, L. J., Rekdal, V. M., & Sommer, M. O. A. (2023). Microbial foods for improving human and planetary health. *Cell*, 186(3), 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.12.002>
- Kent, R., & Dixon, N. (2020). Contemporary Tools for Regulating Gene Expression in Bacteria. *Trends in Biotechnology*, 38(3), 316–333. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.09.007>
- Kumar, A., Dhiman, S., Krishan, B., Samtiya, M., Kumari, A., Pathak, N., Kumari, A., Aluko, R. E., & Dhewa, T. (2024). Microbial enzymes and major applications in the food industry: a concise review. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-024-00261-5>
- Lee, Y. G., Kim, B. Y., Bae, J. M., Wang, Y., & Jin, Y. S. (2022). Genome-edited *Saccharomyces cerevisiae* strains for improving quality, safety, and flavor of fermented foods. *Food Microbiology*, 104(August 2021), 103971. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103971>
- Lensch, A., Duwenig, E., Dederer, H. G., Kärenlampi, S. O., Custers, R., Borg, A., & Wyss, M. (2022). Recombinant DNA in fermentation products is of no regulatory relevance. *Food Control*, 141(June). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109170>
- Lensch, A., Lindfors, H. A., Duwenig, E., Fleischmann, T., Hjort, C., Kärenlampi, S. O., McMurtry, L., Melton, E.-D., Andersen, M. R., Skinner, R., Wyss, M., & van Kranenburg, R. (2024). Safety aspects of microorganisms deliberately released into the environment. *EFB Bioeconomy Journal*, 4(December 2023), 100061. <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2023.100061>
- Lerner, A., Benzvi, C., & Vojdani, A. (2024). The Potential Harmful Effects of Genetically Engineered Microorganisms (GEMs) on the Intestinal Microbiome and Public Health. *Microorganisms*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020238>
- Li, M., Chen, J., He, K., Su, C., Wu, Y., & Tan, T. (2024). *Corynebacterium glutamicum* cell factory design for the efficient production of cis, cis-muconic acid. *Metabolic Engineering*, 82(January), 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2024.02.005>
- Lin, K., Han, S., & Zheng, S. (2022). Application of *Corynebacterium glutamicum* engineering display system in three generations of biorefinery. *Microbial Cell Factories*, 21(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12934-022-01741-4>
- Lisboa, H. M., Pasquali, M. B., dos Anjos, A. I., Sarinho, A. M., de Melo, E. D., Andrade, R., Batista, L., Lima, J., Diniz, Y., & Barros, A. (2024). Innovative and Sustainable Food Preservation Techniques: Enhancing Food Quality, Safety, and Environmental Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 16(18). <https://doi.org/10.3390/su16188223>
- Liu, Y., Shi, C., Li, D., Chen, X., Li, J., Zhang, Y., Yuan, H., Li, Y., & Lu, F. (2019). Engineering a highly efficient expression system to produce BcaPRO protease in *Bacillus subtilis* by an optimized promoter and signal peptide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 138, 903–911. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.175>
- Mahdewi, R., & Banjarani, D. R. (2020). Food Safety of Genetically Modified Organism According To International Law and Its Implementation in Indonesia. *Lampung Journal of International Law*, 2(1), 41–56. <https://doi.org/10.25041/lajil.v2i1.2031>
- Masiunas, J., & Bossu, S. (2009). Genetically Engineered Crops: Experiences and Prospects. In *Encyclopedia of Organic, Sustainable, and Local Food*. <https://doi.org/10.5040/9798400693847.0108>

- Meng, J., Liu, S., Gao, L., Hong, K., Liu, S., & Wu, X. (2023). Economical production of *Pichia pastoris* single cell protein from methanol at industrial pilot scale. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02198-9>
- Motta, J. F. G., de FREITAS, B. C. B., de ALMEIDA, A. F., Martins, G. A. de S., & Borges, S. V. (2023). Use of enzymes in the food industry: a review. *Food Science and Technology (Brazil)*, 43, 1–14. <https://doi.org/10.1590/fst.106222>
- Mu, Y., Zhang, C., Li, T., Jin, F. J., Sung, Y. J., Oh, H. M., Lee, H. G., & Jin, L. (2022). Development and Applications of CRISPR/Cas9-Based Genome Editing in *Lactobacillus*. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(21). <https://doi.org/10.3390/ijms232112852>
- Musa Maryam, B. (2017). The Role of Biotechnology in Food Production and Processing. *Engineering and Applied Sciences*, 2(6), 113. <https://doi.org/10.11648/j.eas.20170206.14>
- Najafi, M., & Lee, B. (2014). Biotechnology and its Impact on Food Security and Safety. *Current Nutrition & Food Science*, 10(2), 94–99. <https://doi.org/10.2174/1573401310666140306225243>
- Nevoigt, E. (2008). Progress in Metabolic Engineering of *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 72(3), 379–412. <https://doi.org/10.1128/membr.00025-07>
- Nikbakht Nasrabadi, M., Sedaghat Doost, A., & Mezzenga, R. (2021). Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. *Food Hydrocolloids*, 118(March), 106789. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106789>
- Officer, L., Negotiations, T., & Branch, C. D. (2005). INTERNATIONAL TRADE IN GMOs AND GM PRODUCTS : Simonetta Zarrilli. In *World* (Issue 29).
- Olanbiwoninu, A., Greppi, A., Awotundun, T., Adebayo, E. A., Spano, G., Mora, D., & Russo, P. (2023). Microbial-based biofortification to mitigate African micronutrients deficiency: A focus on plant-based fermentation as source of B-group vitamins. *Food Bioscience*, 55(March), 102996. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102996>
- Onyeaka, H., Ghosh, S., Obileke, K. C., Miri, T., Odeyemi, O. A., Nwaiwu, O., & Tamasiga, P. (2024). Preventing chemical contaminants in food: Challenges and prospects for safe and sustainable food production. *Food Control*, 155(April 2023), 110040. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110040>
- Paoletti, C., Flamm, E., Yan, W., Meek, S., Renckens, S., Fellous, M., & Kuiper, H. (2008). GMO risk assessment around the world: Some examples. *Trends in Food Science and Technology*, 19(SUPPL. 1), S70–S78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.007>
- Papagianni, M. (2012). Metabolic engineering of lactic acid bacteria for the production of industrially important compounds. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 3(4), e201210003. <https://doi.org/10.5936/csbj.201210003>
- Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A. S., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. In *AIMS Microbiology* (Vol. 6, Issue 1). <https://doi.org/10.3934/microbiol.2020001>
- Prakash, D., Verma, S., Bhatia, R., & Tiwary, B. N. (2011). Risks and Precautions of Genetically Modified Organisms. *ISRN Ecology*, 2011, 1–13. <https://doi.org/10.5402/2011/369573>
- Rafeeq, H., Afsheen, N., Rafique, S., Arshad, A., Intisar, M., Hussain, A., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2023). Genetically engineered microorganisms for environmental remediation.

-
- Chemosphere*, 310(October 2022), 136751.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136751>
- Raveendran, S., Parameswaran, B., Ummalyama, S. B., Abraham, A., Mathew, A. K., Madhavan, A., Rebello, S., & Pandey, A. (2018). Applications of microbial enzymes in food industry. *Food Technology and Biotechnology*, 56(1), 16–30.
<https://doi.org/10.17113/ftb.56.01.18.5491>
- Roland Berger. (2021). *Genetically modified organisms in food and beverages*.
- Rusu, A. V., Trif, M., & Rocha, J. M. (2023). Microbial Secondary Metabolites via Fermentation Approaches for Dietary Supplementation Formulations. *Molecules*, 28(16).
<https://doi.org/10.3390/molecules28166020>
- Salazar, N., Prieto, A., Leal, J. A., Mayo, B., Bada-Gancedo, J. C., de los Reyes-Gavilán, C. G., & Ruas-Madiedo, P. (2009). Production of exopolysaccharides by *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains of human origin, and metabolic activity of the producing bacteria in milk. *Journal of Dairy Science*, 92(9), 4158–4168. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2126>
- Santos, F., Wegkamp, A., De Vos, W. M., Smid, E. J., & Hugenholtz, J. (2008). High-level folate production in fermented foods by the B12 producer *Lactobacillus reuteri* JCM1112. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(10), 3291–3294. <https://doi.org/10.1128/AEM.02719-07>
- Schwechheimer, S. K., Becker, J., Peyriga, L., Portais, J. C., & Wittmann, C. (2018). Metabolic flux analysis in *Ashbya gossypii* using ¹³C-labeled yeast extract: Industrial riboflavin production under complex nutrient conditions 06 Biological Sciences 0601 Biochemistry and Cell Biology. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1003-y>
- Seppo, L., Jauhiainen, T., Poussa, T., & Korpela, R. (2003). A fermented milk high in bioactive peptides has a blood pressure-lowering effect in hypertensive subjects. *American Journal of Clinical Nutrition*, 77(2), 326–330. <https://doi.org/10.1093/ajcn/77.2.326>
- Sharma, R., Garg, P., Kumar, P., Bhatia, S. K., & Kulshrestha, S. (2020). Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods. *Fermentation*, 6(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/fermentation6040106>
- Siddik, M. A. B., Julien, B. B., Islam, S. M. M., & Francis, D. S. (2024). Fermentation in aquafeed processing: Achieving sustainability in feeds for global aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*, 16(3), 1244–1265. <https://doi.org/10.1111/raq.12894>
- Siddiqui, S. A., Erol, Z., Rugji, J., Taşçı, F., Kahraman, H. A., Toppi, V., Musa, L., Di Giacinto, G., Bahmid, N. A., Mehdizadeh, M., & Castro-Muñoz, R. (2023). An overview of fermentation in the food industry - looking back from a new perspective. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00702-y>
- Singh, R. P., Shadan, A., & Ma, Y. (2022). Biotechnological Applications of Probiotics: A Multifarious Weapon to Disease and Metabolic Abnormality. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 14(6), 1184–1210. <https://doi.org/10.1007/s12602-022-09992-8>
- Snow, A. A., Andow, D. A., Gepts, P., Hallerman, E. M., Power, A., Tiedje, J. M., & Wolfenbarger, L. L. (2005). Genetically engineered organisms and the environment: Current status and recommendations. *Ecological Applications*, 15(2), 377–404. <https://doi.org/10.1890/04-0539>
- Soares, I., Tavora, Z., Patera, R., & Baroni, S. (2012). Microorganism-Produced Enzymes in the
-

Food Industry. *Scientific, Health and Social Aspects of the Food Industry, March*.
<https://doi.org/10.5772/31256>

Stewart, G. F., Mrak, E. M., Chichester, C. O., Kinsella, B. S., E., S. J., Taylor, S. L., Henry, J., & Toldra, F. (2021). Food and nutrition. In *Academic Press*. Elsevier Inc.
https://doi.org/10.5005/jp/books/14199_53

Su, S., Ezhuthachan, I. D., & Ponda, P. (2020). Genetically modified foods and allergy. *J. Food Allergy*, 2(1), 111–114. <https://doi.org/10.12809/hkmj166189>

Su, Y., Liu, C., Fang, H., & Zhang, D. (2020). Bacillus subtilis: A universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01436-8>

Sun, X., Zhang, H., Jia, Y., Li, J., & Jia, M. (2024). CRISPR-Cas9-based genome-editing technologies in engineering bacteria for the production of plant-derived terpenoids. *Engineering Microbiology*, 4(3). <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2024.100154>

Surya Ulhas, R., Ravindran, R., Malaviya, A., Priyadarshini, A., Tiwari, B. K., & Rajauria, G. (2023). A review of alternative proteins for vegan diets: Sources, physico-chemical properties, nutritional equivalency, and consumer acceptance. *Food Research International*, 173(P2), 113479. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113479>

Tamés, H., Sabater, C., Margolles, A., Ruiz, L., & Ruas-Madiedo, P. (2023). Production of GABA in milk fermented by Bifidobacterium adolescentis strains selected on the bases of their technological and gastrointestinal performance. *Food Research International*, 171(March). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113009>

Vapnek, J., & Spreij, M. (2005). Perspectives and guidelines on food legislation, with a new model food law. *FAO Legislative Study*, 87, xi-pp.

Verma, D. K., Srivastav, P. P., & Kimmy, G. (2020). Genetically Modified Organisms Produced Enzymes: Multifarious Applications in Food Manufacturing Industries. In *Bioprocessing Technology in Food and Health: Potential Applications and Emerging Scope* (Issue June 2020). <https://doi.org/10.1201/9781351167888-13>

Victoria Obayomi, O., Folakemi Olaniran, A., & Olugbemiga Owa, S. (2024). Unveiling the role of functional foods with emphasis on prebiotics and probiotics in human health: A review. *Journal of Functional Foods*, 119(June), 106337. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106337>

Vignesh, A., Amal, T. C., Sarvalingam, A., & Vasanth, K. (2024). A review on the influence of nutraceuticals and functional foods on health. *Food Chemistry Advances*, 5(January), 100749. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100749>

Wahidin, D., & Purnhagen, K. (2017). Between Two Goliaths: the Enforcement of Genetically Modified Food Labelling Regulation in Indonesia. *The 9th ASAE International Conference: Transformation in Agricultural and Food Economy in Asia*, 1276–1292.

Wang, H., Cao, L., Li, Q., Wijayawardene, N. N., Zhao, J., Cheng, M., Li, Q. R., Li, X., Promputtha, I., & Kang, Y. Q. (2022). Overexpressing GRE3 in Saccharomyces cerevisiae enables high ethanol production from different lignocellulose hydrolysates. *Frontiers in Microbiology*, 13(December), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1085114>

Wang, M., Shi, Z., Gao, N., Zhou, Y., Ni, X., Chen, J., Liu, J., Zhou, W., Guo, X., Xin, B., Shen, Y., Wang, Y., Zheng, P., & Sun, J. (2023). Sustainable and high-level microbial production of plant hemoglobin in Corynebacterium glutamicum. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02337-9>

-
- Wang, X., Hou, J., Cui, J., Wang, Z., & Chen, T. (2024). Engineering *Corynebacterium glutamicum* for the efficient production of 3-hydroxypropionic acid from glucose via the β -alanine pathway. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 9(4), 752–758. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2024.06.003>
- Wesseler, J., Kleter, G., Meulenbroek, M., & Purnhagen, K. P. (2023). EU regulation of genetically modified microorganisms in light of new policy developments: Possible implications for EU bioeconomy investments. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 45(2), 839–859. <https://doi.org/10.1002/aep.13259>
- Xia, Y., Gong, Y., Lin, X., Yang, Y., Song, X., Wang, G., Xiong, Z., Qian, Y., Liao, Z., Zhang, H., & Ai, L. (2024). *Lactobacillus plantarum* AR113 attenuates liver injury in D-galactose-induced aging mice via the inhibition of oxidative stress and endoplasmic reticulum stress. *Food Science and Human Wellness*, 13(2), 885–897. <https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250076>
- Xiao, C., Pan, Y., & Huang, M. (2023). Advances in the dynamic control of metabolic pathways in *Saccharomyces cerevisiae*. *Engineering Microbiology*, 3(4), 100103. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2023.100103>
- Zainab, R., Hasnain, M., Ali, F., Abideen, Z., Siddiqui, Z. S., Jamil, F., Hussain, M., & Park, Y. K. (2024). Prospects and challenges of nanopesticides in advancing pest management for sustainable agricultural and environmental service. *Environmental Research*, 261(March), 119722. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119722>
- Zhang, M., Zhao, C., Du, L. X., Lu, F. P., & Gao, C. (2008). Expression, purification, and characterization of a thermophilic neutral protease from *Bacillus stearothermophilus* in *Bacillus subtilis*. *Science in China, Series C: Life Sciences*, 51(1), 52–59. <https://doi.org/10.1007/s11427-008-0009-9>