

PEMANFAATAN BIOTEKNOLOGI DALAM PENINGKATAN PRODUKTIVITAS, KUALITAS, DAN KETAHANAN TANAMAN PANGAN UNTUK MENDUKUNG PERTANIAN BERKELANJUTAN

Nofeberius Lase¹, Albertus Lahagu², Lindawati Harefa³, Cindri Lase⁴,
Agneris Zalukhu⁵, Novelina Andriani Zega⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Universitas Nias, Jl. Yos Sudarso No. 118/E-S, Gunungsitoli, Sumatera Utara, Indonesia
Email: nofeberiuslase@gmail.com

Article History

Received: 09-01-2026

Revision: 20-01-2026

Accepted: 22-01-2026

Published: 25-01-2026

Abstract. This study aims to examine the role of agricultural biotechnology in improving the productivity, quality, and resilience of food crops as an effort to support sustainable agriculture. The method used is a systematic literature review of relevant national and international journal articles published between 2014 and 2025. The literature was analysed descriptively by grouping the findings based on aspects of increased productivity, crop quality, and crop resistance to biotic and abiotic stresses. The results of the analysis show that the application of biotechnology, such as genetic engineering through CRISPR-Cas9 and Agrobacterium transformation, tissue culture, and the use of functional microorganisms such as PGPR and mycorrhiza, has been proven to increase crop yields, improve nutritional content through biofortification, and increase crop resistance to pests, diseases, and environmental stress. These findings confirm that biotechnology has a significant contribution in producing superior plant varieties that are more adaptive and environmentally friendly. Thus, the integration of biotechnology into agricultural systems has the potential to become an important strategy in supporting food security and sustainable agricultural development.

Keywords: Agricultural Biotechnology, Crop Productivity, Biofortification, CRISPR-Cas9, Sustainable Agriculture

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji peran bioteknologi pertanian dalam meningkatkan produktivitas, kualitas, dan ketahanan tanaman pangan sebagai upaya mendukung pertanian berkelanjutan. Metode yang digunakan adalah kajian literatur sistematis terhadap artikel jurnal nasional dan internasional yang relevan dan diterbitkan pada periode 2014–2025. Literatur dianalisis secara deskriptif dengan mengelompokkan temuan berdasarkan aspek peningkatan produktivitas, kualitas hasil, dan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan bioteknologi, seperti rekayasa genetika melalui CRISPR-Cas9 dan transformasi Agrobacterium, kultur jaringan, serta pemanfaatan mikroorganisme fungsional seperti PGPR dan mikoriza, terbukti mampu meningkatkan hasil panen, memperbaiki kandungan nutrisi melalui biofortifikasi, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap hama, penyakit, dan stres lingkungan. Temuan ini menegaskan bahwa bioteknologi memiliki kontribusi signifikan dalam menghasilkan varietas tanaman unggul yang lebih adaptif dan ramah lingkungan. Dengan demikian, integrasi bioteknologi dalam sistem pertanian berpotensi menjadi strategi penting dalam mendukung ketahanan pangan dan pembangunan pertanian berkelanjutan.

Kata Kunci: Bioteknologi Pertanian, Produktivitas Tanaman, Biofortifikasi, CRISPR-Cas9, Pertanian Berkelanjutan

How to Cite: Lase, N., Lahagu, A., Harefa, L., Lase, C., Zalukhu, A., & Zega, N. A. (2026). Pemanfaatan Bioteknologi dalam Peningkatan Produktivitas, Kualitas, dan Ketahanan Tanaman Pangan untuk Mendukung Pertanian Berkelanjutan. *Indo-MathEdu Intellectuals Journal*, 7 (1), 910-920.
<http://doi.org/10.54373/imeij.v7i1.5026>

PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi dunia yang diproyeksikan mencapai 9,8 miliar jiwa pada tahun 2050 menimbulkan tekanan serius terhadap sistem produksi pangan global (United Nations, 2017). Indonesia, dengan jumlah penduduk lebih dari 270 juta jiwa, menghadapi tantangan serupa dalam menjaga ketahanan pangan nasional. Data Badan Pusat Statistik (2024) menunjukkan penurunan luas panen padi dari 10,22 juta hektare pada 2023 menjadi 10,05 juta hektare pada 2024, yang diikuti penurunan produksi gabah kering giling sebesar 2,45%. Kondisi ini diperburuk oleh alih fungsi lahan pertanian, degradasi kesuburan tanah akibat penggunaan bahan kimia berlebihan, serta meningkatnya frekuensi cuaca ekstrem.

Keterbatasan lahan produktif menjadi persoalan struktural yang semakin mendesak. Dengan laju konversi lahan mencapai 90.000 hektare per tahun dan pertumbuhan penduduk yang terus meningkat, Indonesia diproyeksikan mengalami defisit pangan sebesar 3,97 juta ton gabah kering giling pada tahun 2045 (Mulyani et al., 2022). Di sisi lain, pendekatan konvensional dalam pemuliaan tanaman memerlukan waktu yang relatif lama dan memiliki keterbatasan dalam menghasilkan varietas yang adaptif terhadap cekaman biotik dan abiotik. Ketergantungan pada pupuk dan pestisida kimia juga menimbulkan dampak lingkungan, seperti pencemaran tanah dan air serta penurunan keanekaragaman hayati.

Bioteknologi pertanian menawarkan alternatif solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Rekayasa genetika, kultur jaringan, serta pemanfaatan mikroorganisme fungsional memungkinkan peningkatan produktivitas dan ketahanan tanaman secara lebih presisi. Penggunaan teknologi seperti CRISPR-Cas9 telah terbukti meningkatkan hasil tanaman pada kondisi stres lingkungan (Tripathi et al., 2021), sementara biofortifikasi, seperti pada Golden Rice, berkontribusi dalam peningkatan kualitas gizi pangan (Paine et al., 2005). Secara global, bioteknologi pertanian dilaporkan mampu meningkatkan produktivitas dan mengurangi tekanan terhadap lahan dan lingkungan (BRIN, 2024).

Berdasarkan kondisi tersebut, kajian literatur yang komprehensif diperlukan untuk memahami kontribusi bioteknologi pertanian dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran bioteknologi dalam meningkatkan produktivitas, kualitas, dan ketahanan tanaman pangan melalui pendekatan rekayasa genetika, kultur jaringan, dan pemanfaatan mikroorganisme fungsional sebagai upaya mendukung pertanian berkelanjutan dan ketahanan pangan nasional. Berbeda dengan kajian sebelumnya yang umumnya membahas bioteknologi pertanian secara parsial atau terfokus pada satu teknologi tertentu, penelitian ini menawarkan kebaruan melalui sintesis komprehensif berbagai pendekatan bioteknologi mutakhir dalam satu kerangka analisis

terpadu. Kajian ini tidak hanya menelaah rekayasa genetika dan kultur jaringan, tetapi juga mengintegrasikan perkembangan terbaru teknologi penyuntingan gen presisi seperti CRISPR-Cas9 serta pemanfaatan mikroorganisme fungsional dalam konteks pertanian berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini menempatkan hasil-hasil bioteknologi dalam konteks tantangan spesifik pertanian Indonesia, termasuk keterbatasan lahan, perubahan iklim, dan ketahanan pangan nasional.

METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam kajian ini adalah studi literatur dengan pendekatan kualitatif deskriptif. Penelitian ini bertujuan mengumpulkan, menelaah, dan menganalisis berbagai sumber ilmiah yang relevan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai topik yang dikaji. Sumber data utama berasal dari artikel jurnal ilmiah nasional dan internasional yang dipublikasikan melalui basis data daring, khususnya Google Scholar, yang dipilih karena memiliki cakupan luas terhadap publikasi ilmiah bereputasi. Literatur yang dikaji dibatasi pada publikasi yang terbit dalam rentang waktu 10 tahun terakhir, yaitu dari tahun 2014 hingga 2025, guna memastikan keterbaruan dan relevansi temuan yang dianalisis.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui dokumentasi, yakni dengan menelusuri, mengidentifikasi, dan mengumpulkan dokumen ilmiah yang memuat informasi terkait topik penelitian. Proses pencarian literatur dilakukan menggunakan kata kunci yang relevan dengan fokus kajian, antara lain potensi mikroba asal hutan, pemanfaatan mikroorganisme dalam pertanian, serta pengolahan dan aplikasi data bioteknologi. Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kesesuaian topik, tahun publikasi, dan kontribusinya terhadap tujuan penelitian. Tahap awal penelitian diawali dengan penelaahan hasil penelitian terdahulu untuk memetakan perkembangan kajian, mengidentifikasi kecenderungan temuan, serta menemukan celah penelitian yang masih terbuka.

Analisis data dilakukan secara bertahap melalui tiga tahapan utama, yaitu reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Pada tahap reduksi data, informasi penting dari setiap sumber literatur dipilah dan disederhanakan sesuai dengan fokus penelitian. Tahap penyajian data dilakukan dengan menyusun hasil kajian secara sistematis dan tematik agar mudah dipahami serta dibandingkan antar sumber. Tahap akhir berupa penarikan kesimpulan dilakukan dengan menyintesis seluruh temuan untuk menjawab tujuan penelitian dan memberikan gambaran utuh mengenai potensi mikroba asal hutan berdasarkan hasil kajian literatur terkini.

HASIL

Bioteknologi dalam Peningkatan Produktivitas Tanaman Pangan

Peningkatan produktivitas tanaman merupakan prioritas utama dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan global. Bioteknologi pertanian menawarkan berbagai pendekatan untuk meningkatkan hasil panen melalui rekayasa genetika, kultur jaringan, dan pemuliaan berbasis molekuler. Rekayasa genetika memungkinkan introduksi gen spesifik yang mengontrol sifat produktivitas tanaman. Teknologi CRISPR-Cas9 menjadi terobosan dalam penyuntingan gen dengan presisi tinggi. Penelitian pada padi hitam Indonesia menunjukkan bahwa introduksi gen Hd3a di bawah promotor RPP16 menghasilkan tanaman dengan waktu pembungaan lebih awal, yang meningkatkan efisiensi siklus tanam dan produktivitas (Susanto et al., 2020). Penyuntingan gen OsSPL14 pada padi menghasilkan peningkatan arsitektur tanaman yang mendukung hasil panen lebih tinggi (Bortesi & Fischer, 2015). Modifikasi gen yang mengatur ukuran buah dan efisiensi fotosintesis memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan biomassa dan hasil panen.

Transformasi genetik menggunakan *Agrobacterium tumefaciens* menjadi metode populer dalam menghasilkan tanaman transgenik produktif. Penelitian pada singkong varietas Adira 4 menunjukkan bahwa transformasi genetik menghasilkan tanaman dengan pertumbuhan stabil dan peningkatan kadar amilosa selama empat generasi (Enny & Hani, 2021). Tanaman transgenik menunjukkan konsistensi sifat unggul yang dapat diwariskan, memastikan keberlanjutan peningkatan produktivitas. Teknologi transformasi juga diterapkan pada talas Satoimo dengan gen *oshox4* untuk meningkatkan adaptasi terhadap kondisi kekeringan, yang secara tidak langsung mendukung stabilitas produktivitas (Ariyanti et al., 2022). Kultur jaringan berperan penting dalam perbanyakan massal varietas unggul dengan mempertahankan sifat genetik induknya. Teknik ini memungkinkan produksi bibit dalam jumlah besar dalam waktu singkat tanpa tergantung musim. Kultur jaringan pada ketela pohon transgenik memfasilitasi perbanyakan varietas dengan kandungan protein tinggi hasil rekayasa genetika (Wigati et al., 2022). Kombinasi kultur jaringan dengan teknologi CRISPR-Cas9 pada padi Mentik Wangi menunjukkan efisiensi tinggi dalam menghasilkan varietas tahan penyakit (Faridah et al., 2023). Regenerasi tanaman melalui kultur jaringan memastikan keseragaman genetik dan fenotipik yang penting untuk produksi komersial.

Pemuliaan berbasis molekuler mempercepat proses seleksi varietas unggul dengan menggunakan marker DNA. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi dini tanaman dengan sifat produktivitas tinggi sebelum mencapai fase reproduktif. Penelitian pada tebu menunjukkan bahwa transformasi gen DHN1 menghasilkan konstruksi genetik yang bertahan

lebih dari satu tahun, menunjukkan stabilitas genetik yang penting untuk produktivitas jangka panjang (Minarsih et al., 2023). Seleksi menggunakan marker molekuler mengurangi waktu pemuliaan dari 10-15 tahun menjadi 5-7 tahun, mempercepat pelepasan varietas unggul baru. Peningkatan efisiensi fotosintesis menjadi target penting dalam rekayasa genetika untuk produktivitas. Penelitian pada padi transgenik menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas enzim sukrosa fosfat sintase meningkatkan kandungan sukrosa dan mendorong pertumbuhan serta produktivitas lebih baik (Mulyatama et al., 2022). Manipulasi jalur metabolisme karbon mengoptimalkan konversi energi cahaya menjadi biomassa. Tanaman dengan efisiensi fotosintesis tinggi menunjukkan peningkatan berat biji, jumlah bulir per malai, dan total hasil panen.

Pemanfaatan mikroorganisme fungsional mendukung peningkatan produktivitas tanpa input kimia berlebihan. Aplikasi fungi mikoriza dengan pengurangan 25% pupuk NPK menghasilkan produktivitas maksimal pada berbagai tanaman (Hazra et al., 2024). Bakteri *Azospirillum* meningkatkan pertumbuhan akar dan penyerapan hara pada tanaman sereal (Bhattacharyya & Jha, 2012). Kombinasi fungi mikoriza arbuskula dan mycorrhizal helper bacteria meningkatkan tinggi tanaman 19,6% dan bobot segar 60% dibanding kontrol. Mikroorganisme ini menghasilkan hormon tumbuh auksin, giberelin, dan sitokinin yang merangsang pertumbuhan vegetatif. Integrasi berbagai teknologi bioteknologi menghasilkan efek sinergis dalam peningkatan produktivitas. Kombinasi rekayasa genetika dengan optimalisasi agronomi menunjukkan hasil superior dibanding penerapan tunggal. Tanaman transgenik dengan ketahanan hama yang dikombinasikan dengan pupuk hayati mengurangi kerugian hasil panen sambil menjaga kesuburan tanah. Pendekatan terpadu ini mendukung intensifikasi pertanian berkelanjutan pada lahan terbatas.

Bioteknologi dalam Peningkatan Kualitas Tanaman Pangan

Kualitas tanaman pangan tidak hanya ditentukan oleh hasil panen, tetapi juga oleh kandungan nutrisi, rasa, tekstur, daya simpan, dan keamanan konsumsi. Bioteknologi berperan penting dalam meningkatkan kualitas tersebut melalui biofortifikasi dan rekayasa metabolik. Biofortifikasi bertujuan meningkatkan kandungan mikronutrien untuk mengatasi malnutrisi. Golden Rice merupakan contoh nyata, dengan kandungan beta karoten 23 kali lebih tinggi dibanding varietas sebelumnya sehingga berpotensi mengurangi defisiensi vitamin A pada anak-anak (Paine et al., 2005). Selain itu, rekayasa jalur biosintesis asam askorbat menghasilkan beras dengan kandungan vitamin C yang lebih tinggi dan bermanfaat sebagai antioksidan (Broad et al., 2020).

Peningkatan nilai gizi juga dilakukan pada komoditas nonberas. Rekayasa genetika ketela pohon melalui modifikasi gen AC3 menggunakan CRISPR-Cas9 terbukti meningkatkan kandungan protein, sehingga ketela berpotensi menjadi sumber pangan alternatif dengan nilai gizi kompetitif (Mehta et al., 2019). Di sisi lain, peningkatan senyawa bioaktif memberikan nilai tambah fungsional. Tomat hasil rekayasa genetika menunjukkan kandungan GABA 4–5 kali lebih tinggi, yang berperan dalam regulasi tekanan darah dan fungsi saraf (Nonaka et al., 2017). Bioteknologi juga berkontribusi pada perbaikan kualitas pascapanen. Rekayasa gen yang terlibat dalam biosintesis etilen mampu memperlambat pematangan buah. Penerapan CRISPR-Cas9 pada tomat meningkatkan daya simpan tanpa menurunkan kualitas rasa (Gao et al., 2019), sementara manipulasi faktor transkripsi pada pisang terbukti memperpanjang shelf life secara signifikan (Ma et al., 2025). Hal ini penting mengingat kerugian pascapanen di Indonesia masih sangat tinggi.

Selain itu, kualitas organoleptik tanaman pangan ditingkatkan melalui rekayasa metabolisme karbohidrat dan lipid. Modifikasi biosintesis pati menghasilkan singkong berkadar amilosa tinggi yang sesuai untuk industri pangan (Enny & Hani, 2021), sedangkan rekayasa asam lemak tidak jenuh pada kedelai meningkatkan kualitas minyak bagi kesehatan. Biofortifikasi mineral seperti zat besi dan zinc, serta pengurangan senyawa antinutrisi seperti asam fitat dan inhibitor protease, turut meningkatkan bioavailabilitas nutrisi dan penerimaan konsumen terhadap produk pangan hasil bioteknologi.

Bioteknologi dalam Peningkatan Ketahanan Tanaman Pangan

Ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik berperan penting dalam menjaga stabilitas produksi pangan. Bioteknologi memungkinkan pengembangan varietas tahan hama, penyakit, kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem. Kerugian hasil akibat hama dapat mencapai 10–30%, sehingga ketahanan hama menjadi prioritas. Rekayasa genetika padi Rojolele menunjukkan resistensi tinggi terhadap penggerek batang kuning *Scirpophaga incertulas* dengan penurunan kerusakan hingga 70% (Nurhasanah et al., 2020). Pada jagung, introduksi gen Bt terbukti meningkatkan ketahanan terhadap penggerek batang sekaligus mengurangi penggunaan insektisida kimia (Islam, 2018).

Ketahanan terhadap penyakit dicapai melalui rekayasa gen resistensi dan pemanfaatan mikroorganisme. Penyuntingan gen SWEET pada padi meningkatkan ketahanan terhadap hawar daun bakteri (*Xanthomonas oryzae*) (Zhang et al., 2014), sementara tomat transgenik menunjukkan resistensi ganda terhadap TYLCV dan CMV (Kusumanegara et al., 2024). Aplikasi bakteri diazotrof mampu menginduksi ketahanan sistemik pada padi terhadap

Rhizoctonia solani melalui peningkatan senyawa pertahanan (Isnaeni et al., 2022). Mikroorganisme biokontrol seperti *Trichoderma* spp. dan *Bacillus subtilis* juga efektif menekan patogen melalui mekanisme antibiosis dan kompetisi (Sood et al., 2020).

Ketahanan terhadap cekaman abiotik, terutama kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem, semakin penting dalam konteks perubahan iklim. Rekayasa genetika kentang dan padi meningkatkan toleransi terhadap kekeringan dan salinitas melalui pengaturan gen respons stres dan keseimbangan ion (Huang et al., 2019; Tang et al., 2019; Tjahjoleksono, 2022). Varietas padi hasil penyuntingan genetik menunjukkan peningkatan hasil 11–68% pada lahan salin. Selain itu, modifikasi gen respons panas dan dingin memungkinkan tanaman beradaptasi pada suhu ekstrem (Chang et al., 2017; Lisei-de-sá et al., 2017; Mubarok et al., 2023). Pemanfaatan fungi mikoriza turut meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman abiotik melalui peningkatan penyerapan air dan hara, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman pada kondisi lingkungan terbatas (Ramilin et al., 2022).

DISKUSI

Pembahasan menyeluruh mengenai peran bioteknologi dalam peningkatan produktivitas, kualitas, dan ketahanan tanaman pangan menunjukkan kontribusi signifikan teknologi ini dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Analisis komparatif terhadap berbagai pendekatan bioteknologi mengungkapkan bahwa integrasi multi-teknologi memberikan hasil superior dibanding aplikasi tunggal. Rekayasa genetika modern seperti CRISPR-Cas9 menunjukkan keunggulan dalam presisi dan efisiensi dibanding metode konvensional. Teknologi ini memungkinkan penyuntingan gen target tanpa meninggalkan jejak DNA asing pada generasi lanjut melalui segregasi (Sophia et al., 2023). Keuntungan ini mengatasi kekhawatiran terkait keamanan hayati tanaman transgenik konvensional. Namun, tantangan terkait efek off-target yang menghasilkan mutasi tidak diinginkan memerlukan evaluasi *biosafety* ketat (Movahedi et al., 2023). Pengembangan varian CRISPR dengan spesifisitas lebih tinggi seperti base editing dan prime editing menjanjikan peningkatan keamanan aplikasi.

Perbandingan efektivitas berbagai teknologi menunjukkan bahwa kultur jaringan memberikan keuntungan perbanyakan massal cepat namun terbatas pada duplikasi genetik eksisting. Rekayasa genetika memungkinkan introduksi sifat baru yang tidak tersedia dalam pool genetik tanaman. Pemuliaan molekuler mempercepat seleksi namun tetap terbatas pada variasi genetik alami. Kombinasi ketiga pendekatan menghasilkan efisiensi optimal dalam pengembangan varietas unggul. Integrasi kultur jaringan dengan rekayasa genetika

memfasilitasi regenerasi dan perbanyak tanaman transgenik untuk uji lapangan dan komersialisasi.

Biofortifikasi melalui bioteknologi menunjukkan dampak positif terhadap kesehatan masyarakat. Golden Rice yang dikonsumsi populasi defisiensi vitamin A menunjukkan perbaikan status vitamin A tanpa memerlukan suplementasi tambahan. Biofortifikasi beras dengan zat besi mengurangi prevalensi anemia pada kelompok rentan. Namun, penerimaan konsumen terhadap tanaman biofortifikasi masih menjadi tantangan. Edukasi mengenai manfaat kesehatan dan keamanan tanaman biofortifikasi diperlukan untuk meningkatkan adopsi. Studi menunjukkan bahwa tanaman biofortifikasi yang tidak mengubah karakteristik organoleptik menunjukkan penerimaan lebih baik.

Peningkatan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan memberikan stabilitas produksi menghadapi perubahan iklim. Varietas toleran kekeringan mempertahankan produktivitas pada kondisi curah hujan rendah yang semakin sering terjadi. Tanaman toleran salinitas memungkinkan pemanfaatan 20 juta hektare lahan salin di Indonesia untuk produksi pangan. Ketahanan terhadap hama dan penyakit mengurangi kerugian hasil panen dan ketergantungan pestisida. Integrasi ketahanan multipel dalam satu varietas menghasilkan tanaman dengan adaptasi luas terhadap kondisi suboptimal. Pemanfaatan mikroorganisme fungsional menawarkan pendekatan berkelanjutan dalam meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman. Bakteri penambat nitrogen mengurangi kebutuhan pupuk nitrogen hingga 50% tanpa menurunkan hasil panen. Fungi mikoriza meningkatkan efisiensi penyerapan fosfor dan mengurangi aplikasi pupuk fosfat. PGPR menghasilkan hormon tumbuh dan senyawa antimikroba yang mendukung pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Kombinasi mikroorganisme fungsional dengan varietas unggul hasil rekayasa genetika menghasilkan sistem produksi efisien dan ramah lingkungan.

Penerapan bioteknologi pertanian secara ekonomi dinilai layak dalam jangka panjang. Meskipun biaya awal pengembangan varietas transgenik relatif tinggi, biaya tersebut dapat terkompensasi melalui pengurangan penggunaan pestisida dan pupuk kimia serta peningkatan produktivitas tanaman. Dampaknya terlihat pada kenaikan pendapatan petani dan berkurangnya risiko gagal panen akibat cekaman lingkungan. Sejumlah kajian menunjukkan bahwa adopsi varietas hasil bioteknologi memberikan keuntungan ekonomi dan pengembalian investasi positif dalam beberapa tahun pemanfaatan.

Regulasi bioteknologi di Indonesia telah tersedia namun masih perlu penyempurnaan. Aturan keamanan hayati dan pedoman kehalalan produk rekayasa genetika telah memberikan dasar hukum, tetapi proses perizinan yang panjang dapat menghambat pemanfaatan teknologi

secara luas. Harmonisasi regulasi dengan standar internasional serta perlindungan hak kekayaan intelektual menjadi faktor penting untuk mendorong investasi dan transfer teknologi. Dukungan kebijakan yang seimbang antara aspek keamanan dan inovasi sangat dibutuhkan agar bioteknologi dapat berkembang secara optimal.

Implikasi praktis penerapan bioteknologi mencakup perlunya pendampingan bagi petani melalui penyuluhan, pelatihan teknis, serta kemudahan akses terhadap benih dan pupuk hayati. Bagi peneliti, diperlukan pengembangan varietas yang sesuai dengan kondisi agroekologi dan kebutuhan lokal, serta penguatan kolaborasi dengan industri. Sementara itu, pembuat kebijakan diharapkan dapat meningkatkan dukungan pendanaan dan memperluas kerja sama internasional. Ke depan, penelitian lanjutan masih diperlukan, terutama terkait dampak lingkungan jangka panjang, aspek sosial ekonomi petani kecil, dan penerimaan konsumen terhadap produk bioteknologi.

KESIMPULAN

Bioteknologi pertanian berperan penting dalam meningkatkan produktivitas, kualitas, ketahanan tanaman, dan keberlanjutan sistem pangan. Rekayasa genetika, kultur jaringan, dan pemuliaan molekuler menghasilkan varietas unggul berdaya hasil tinggi, cepat panen, serta adaptif terhadap cekaman biotik dan abiotik. Biofortifikasi dan rekayasa metabolit meningkatkan nilai gizi dan kesehatan pangan sekaligus mengurangi kehilangan pascapanen. Integrasi varietas unggul dengan mikroorganisme fungsional menciptakan pertanian efisien dan ramah lingkungan. Di Indonesia, penguatan riset, regulasi, penyuluhan, serta pemberdayaan petani dan pemuda desa menjadikan bioteknologi strategis dalam mendukung ketahanan pangan nasional berkelanjutan.

REFERENSI

- Ariyanti, I. F., Aris, T., & Sri, H. N. (2022). Optimization of *Agrobacterium*-mediated genetic transformation of *oshox4* gene in satoimo taro (*Colocasia esculenta* var. *antiquorum*). *Journal of Biotechnology Research*, 9, 110–118.
- Basoka, S. W., Johan, E. A., Nugroho, R. M., & Baihaqi, B. (2025). Review artikel: Mikroba, tanaman, dan teknologi sebagai integrasi bioteknologi mikrobial dalam pertanian modern. *Jurnal Bioteknologi Pertanian*, 14, 1520–1526.
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Bonnu, C. H. (2025). Bioteknologi pertanian bagi ketahanan pangan Indonesia: Sebuah tinjauan literatur. *Jurnal Ketahanan Pangan*, 2045(105), 1–12.

- Bortesi, L., & Fischer, R. (2015). The CRISPR/Cas9 system for plant genome editing and beyond. *Biotechnology Advances*, 33(1), 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.12.006>
- Broad, R. C., Bonneau, J. P., Beasley, J. T., Roden, S., Sadowski, P., Jewell, N., Brien, C., Berger, B., Tako, E., Glahn, R. P., Hellens, R. P., & Johnson, A. A. T. (2020). Effect of rice GDP-L-galactose phosphorylase constitutive overexpression on ascorbate concentration, stress tolerance, and iron bioavailability in rice. *Frontiers in Plant Science*, 11, 595439. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.595439>
- Chang, Y., Nguyen, B. H., Xie, Y., Xiao, B., Tang, N., Zhu, W., Mou, T., & Xiong, L. (2017). Co-overexpression of the constitutively active form of OsZIP46 and ABA-activated protein kinase SAPK6 improves drought and temperature stress resistance in rice. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1102. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01102>
- Enny, S., & Hani, F. (2021). *Ilmu pertanian (Agricultural science)*. Penerbit Pertanian Indonesia.
- Faridah, N., Apriana, A., Sisharmini, A., Santoso, T., Trijatmiko, K., Slamet-Loedin, I., & Yunus, A. (2023). Construction of the CRISPR/Cas9 module and genetic transformation of aromatic rice cv. Mentik Wangi for developing bacterial leaf blight resistance. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 24(6). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240620>
- Gao, Y., Zhu, N., Zhu, X., Wu, M., Jiang, C.-Z., Grierson, D., Luo, Y., Shen, W., Zhong, S., Fu, D.-Q., & Qu, G. (2019). Diversity and redundancy of the ripening regulatory networks revealed by the fruitENCODE and the new CRISPR/Cas9 CNR and NOR mutants. *Horticulture Research*, 6(1), 39. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0122-x>
- Hazra, F., Istiqomah, F. N., & Azzahra, B. A. (2024). Peran mikoriza powder dan granul dalam meningkatkan pertumbuhan dan produksi bawang merah (*Allium cepa* var. *aggregatum*). *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 15(3), 172–179.
- Huang, Y., Jiao, Y., Xie, N., Guo, Y., Zhang, F., Xiang, Z., Wang, R., Wang, F., Gao, Q., Tian, L., Li, D., Chen, L., & Liang, M. (2019). OsNCED5, a 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase gene, regulates salt and water stress tolerance and leaf senescence in rice. *Plant Science*, 287, 110188. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110188>
- Islam, T. (2018). Application of CRISPR/Cas9 genome editing technology for the improvement of crops cultivated in tropical climates: Recent progress, prospects, and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 9, 617. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00617>
- Isnaeni, F., Mugiastuti, E., Leana, A., Oktaviani, E., & Purwanto, P. (2022). Induksi ketahanan tanaman padi terhadap serangan patogen busuk pelepah (*Rhizoctonia solani*) menggunakan bakteri diazotrof halotoleran. *Jurnal Agro*, 8, 12–25. <https://doi.org/10.15575/18516>
- Kusumanegara, K., Wiguna, G., Hadiarto, T., Riyanti, E. I., Ambarwati, A. D., & Santoso, T. J. (2024). Molecular analysis and evaluation on fruit performance of genetically engineered tomato lines with double-virus resistance. *AIP Conference Proceedings*, 2957(1), 080035. <https://doi.org/10.1063/5.0184073>
- Lisei-de-Sá, M. E., Arraes, F. B. M., Brito, G. G., Beneventi, M. A., Lourenço-Tessutti, I. T., Basso, A. M. M., Amorim, R. M. S., Silva, M. C. M., Faheem, M., Oliveira, N. G., Mizoi, J., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2017). AtDREB2A-CA influences root architecture and increases drought tolerance in transgenic cotton. *Agricultural Sciences*, 8(10), 1195–1225. <https://doi.org/10.4236/as.2017.810087>
- Mehta, D., Stürchler, A., Anjanappa, R. B., Zaidi, S. S.-E.-A., Hirsch-Hoffmann, M., Gruissem, W., & Vanderschuren, H. (2019). Linking CRISPR-Cas9 interference in cassava to the evolution of editing-resistant geminiviruses. *Genome Biology*, 20(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s13059-019-1678-3>

- Nonaka, S., Arai, C., Takayama, M., Matsukura, C., & Ezura, H. (2017). Efficient increase of γ -aminobutyric acid (GABA) content in tomato fruits by targeted mutagenesis. *Scientific Reports*, 7(1), 7057. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06400-y>
- Nurhasanah, A. N., Zahra, F., Estiati, A., Pantouw, C. F., Maulana, B. S., Hidayat, M. T., & Nugroho, S. (2020). Evaluasi produktivitas padi transgenik Rojolele tahan penggerek batang padi kuning (*Scirpophaga incertulas*). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 25(4), 533–539. <https://doi.org/10.18343/jipi.25.4.533>
- Paine, J. A., Shipton, C. A., Chaggar, S., Howells, R. M., Kennedy, M. J., Vernon, G., Wright, S. Y., Hinchliffe, E., Adams, J. L., Silverstone, A. L., & Drake, R. (2005). Improving the nutritional value of Golden Rice through increased provitamin A content. *Nature Biotechnology*, 23(4), 482–487. <https://doi.org/10.1038/nbt1082>
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiwy, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., Araniti, F., & Sharma, A. (2020). Trichoderma: The “secrets” of a multitasking biocontrol agent. *Plants*, 9(6), 762. <https://doi.org/10.3390/plants9060762>
- Tang, Y., Bao, X., Zhi, Y., Wu, Q., Guo, Y., Yin, X., Zeng, L., Li, J., Zhang, J., He, W., Liu, W., Wang, Q., Jia, C., Li, Z., & Liu, K. (2019). Overexpression of a MYB family gene, OsMYB6, increases drought and salinity stress tolerance in transgenic rice. *Frontiers in Plant Science*, 10, 168. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00168>
- Tripathi, L., Tripathi, J., & Goodman, R. (2021). Controlling banana Xanthomonas wilt disease in East Africa. *Open Access Government*. <https://www.openaccessgovernment.org/controlling-banana-xanthomonas-wilt-disease-in-east-africa/117771/>
- Zhang, H., Zhang, J., Wei, P., Zhang, B., Gou, F., Feng, Z., Mao, Y., Yang, L., Zhang, H., Xu, N., & Zhu, J.-K. (2014). The CRISPR/Cas9 system produces specific and homozygous targeted gene editing in rice in one generation. *Plant Biotechnology Journal*, 12(6), 797–807. <https://doi.org/10.1111/pbi.12200>