



Transformasi Ilmu Hayati melalui Pendekatan Bioteknologi Modern

Marsahip

Sekolah Tinggi Ilmu Tarbiyah Ispini Tanah Bumbu, Indonesia

*Penulis Korespondensi: marsyahip20@gmail.com

Abstract. *The development of modern biotechnology has brought fundamental changes to the life sciences through the application of molecular biology, genetic engineering, and bioinformatics engineering. This article aims to examine the transformation of life sciences through modern biotechnology approaches and their impact on health, agriculture, the environment, and industry. The method used is a descriptive-analytical literature review based on international journal sources and relevant scientific publications. The results show that technologies such as CRISPR-Cas9 enable precise gene editing for the therapy of genetic diseases, while mRNA vaccine platforms developed by Pfizer and Moderna show an acceleration of biomedical innovation in response to the global pandemic. In the agricultural sector, genetic engineering increases the productivity and resistance of crops to pests and climate change, while in the environmental sector, biotechnology supports environmentally friendly and efficient bioremediation processes. In addition, the integration of artificial intelligence in genomic analysis is further accelerating drug discovery and bio-based product development. However, ethical, biosecurity, and regulatory challenges remain important concerns in their implementation. In conclusion, modern biotechnology plays a key role as a catalyst for innovation-driven sustainable transformation in the global life sciences.*

Keywords: CRISPR; Genetic Engineering; Life Science Transformation; Mrna Vaccines; Modern Biotechnology.

Abstrak. Perkembangan bioteknologi modern telah membawa perubahan mendasar pada ilmu hayati melalui penerapan biologi molekuler, rekayasa genetika, dan teknik bioinformatika. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji transformasi ilmu hayati melalui pendekatan bioteknologi modern dan dampaknya terhadap kesehatan, pertanian, lingkungan, dan industri. Metode yang digunakan adalah tinjauan pustaka deskriptif-analitis berdasarkan sumber jurnal internasional dan publikasi ilmiah yang relevan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi seperti CRISPR-Cas9 memungkinkan pengeditan gen yang tepat untuk terapi penyakit genetik, sementara platform vaksin mRNA yang dikembangkan oleh Pfizer dan Moderna menunjukkan percepatan inovasi biomedis sebagai respons terhadap pandemi global. Di sektor pertanian, rekayasa genetika meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman terhadap hama serta perubahan iklim, sedangkan di sektor lingkungan, bioteknologi mendukung proses bioremediasi yang ramah lingkungan dan efisien. Selain itu, integrasi kecerdasan buatan dalam analisis genomik semakin mempercepat penemuan obat dan pengembangan produk berbasis hayati. Namun, tantangan etika, keamanan hayati, dan regulasi tetap menjadi perhatian penting dalam implementasinya. Kesimpulannya, bioteknologi modern memainkan peran kunci sebagai katalisator transformasi berkelanjutan yang didorong oleh inovasi dalam ilmu hayati global.

Kata kunci: Bioteknologi Modern; CRISPR; Rekayasa Genetika; Transformasi Ilmu Kehidupan; Vaksin mRNA.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan ilmu hayati pada abad ke-21 mengalami percepatan signifikan seiring kemajuan bioteknologi modern yang semakin terintegrasi dengan teknologi digital dan komputasi. Integrasi biologi molekuler, genetika, bioinformatika, dan teknologi rekayasa genetika telah mengubah paradigma penelitian dari pendekatan observasional menjadi manipulasi genetik yang presisi dan terkontrol. Jika sebelumnya penelitian biologi lebih menitikberatkan pada deskripsi fenomena biologis, kini ilmuwan mampu melakukan intervensi langsung pada tingkat molekuler untuk memahami fungsi gen dan regulasi ekspresinya secara lebih mendalam. Perkembangan teknologi sekuensing genom generasi baru (next-generation sequencing) juga mempercepat pemetaan genom organisme secara

masif dan efisien, sehingga mendukung kemajuan dalam bidang genomika dan kedokteran presisi (Doudna & Charpentier, 2014).

Teknologi CRISPR-Cas9 menjadi tonggak revolusioner dalam penyuntingan gen karena kemampuannya memodifikasi DNA secara spesifik, efisien, dan relatif mudah diaplikasikan dibandingkan teknik sebelumnya seperti zinc finger nucleases dan TALENs. Sistem ini memungkinkan ilmuwan untuk memotong dan mengganti sekuens DNA tertentu, sehingga membuka peluang besar dalam terapi gen, pengobatan penyakit hereditas, serta penelitian fungsional genom (Doudna & Charpentier, 2014). Bahkan, perkembangan lebih lanjut dari CRISPR seperti base editing dan prime editing semakin meningkatkan akurasi serta mengurangi risiko kesalahan penyuntingan gen.

Keberhasilan pengembangan vaksin berbasis mRNA dalam penanganan pandemi global semakin mempertegas peran bioteknologi sebagai solusi strategis dalam kesehatan masyarakat. Platform vaksin mRNA memungkinkan desain vaksin dilakukan secara cepat hanya berdasarkan informasi sekuens genetik patogen, tanpa memerlukan kultur virus secara konvensional. Teknologi ini terbukti efektif dan adaptif terhadap mutasi virus, serta menjadi model baru dalam pengembangan vaksin masa depan (Pardi et al., 2018). Keunggulan tersebut menunjukkan bahwa bioteknologi modern tidak hanya berperan dalam kuratif, tetapi juga preventif melalui inovasi imunisasi berbasis molekuler.

Transformasi ini tidak terbatas pada sektor kesehatan, tetapi juga meluas ke bidang pertanian melalui pengembangan tanaman transgenik dan genome editing untuk meningkatkan produktivitas serta ketahanan terhadap hama dan cekaman lingkungan (James, 2017). Di sektor industri dan lingkungan, bioteknologi berkontribusi pada produksi bioenergi, enzim industri, serta penerapan bioremediasi untuk mengatasi pencemaran lingkungan secara berkelanjutan (Singh et al., 2020). Dengan demikian, kemajuan bioteknologi modern telah membentuk ekosistem ilmu hayati yang lebih inovatif, kolaboratif, dan berbasis solusi terhadap tantangan global abad ke-21.

2. KAJIAN TEORITIS

Bioteknologi modern berlandaskan pada prinsip biologi molekuler, genetika, dan rekayasa genetika yang menekankan pemahaman struktur serta fungsi materi genetik pada tingkat molekuler. Landasan teoretisnya merujuk pada dogma sentral biologi molekuler yang menjelaskan aliran informasi genetik dari DNA ke RNA dan kemudian diterjemahkan menjadi protein sebagai produk fungsional sel. Pemahaman mekanisme ini memungkinkan ilmuwan melakukan manipulasi genetik secara terarah untuk menghasilkan sifat atau

karakter tertentu pada organisme (Doudna & Charpentier, 2014). Perkembangan teknologi DNA rekombinan sejak dekade 1970-an menjadi fondasi awal bioteknologi modern karena memungkinkan penyisipan gen spesifik ke dalam organisme target guna menghasilkan produk biologis bernilai ekonomi maupun terapeutik.

Konsep DNA rekombinan kemudian berkembang menjadi teknologi genome editing yang lebih presisi. Salah satu inovasi penting adalah teknologi CRISPR-Cas9 yang memungkinkan pemotongan DNA pada lokasi spesifik sehingga gen dapat dihapus, diganti, atau dimodifikasi sesuai kebutuhan penelitian maupun aplikasi klinis. Dibandingkan metode sebelumnya seperti zinc finger nucleases (ZFNs) dan TALENs, CRISPR-Cas9 lebih sederhana, efisien, dan fleksibel (Doudna & Charpentier, 2014). Perkembangan lanjutan seperti base editing dan prime editing semakin meningkatkan akurasi serta meminimalkan efek off-target dalam penyuntingan gen.

Dalam bidang kesehatan, teori terapi gen (gene therapy) menjelaskan bahwa penyakit genetik dapat ditangani melalui penggantian, perbaikan, atau inaktivasi gen yang mengalami mutasi. Pendekatan ini berkembang dari terapi gen konvensional berbasis vektor virus menjadi pendekatan berbasis genome editing yang lebih presisi. Selain itu, konsep precision medicine menekankan penyesuaian terapi berdasarkan profil genetik individu, sehingga pengobatan menjadi lebih efektif dan minim efek samping (Pardi et al., 2018). Produksi protein rekombinan seperti insulin, hormon pertumbuhan, dan antibodi monoklonal juga merupakan implementasi langsung teori ekspresi gen terkontrol dalam sistem sel inang.

Dalam bidang pertanian, teori modifikasi genetik berfokus pada peningkatan kualitas dan produktivitas tanaman melalui penyisipan atau penyuntingan gen tertentu yang berperan dalam ketahanan terhadap hama, penyakit, dan cekaman lingkungan. Tanaman transgenik telah dikembangkan untuk meningkatkan hasil panen serta efisiensi penggunaan pestisida (James, 2017). Selain itu, genome editing memungkinkan perbaikan sifat tanaman tanpa memasukkan gen asing, sehingga menghasilkan varietas unggul yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim global.

Sementara itu, dalam konteks lingkungan, bioteknologi modern didasarkan pada teori bioremediasi yang memanfaatkan kemampuan metabolik mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa pencemar menjadi bentuk yang lebih aman. Mikroba tertentu mampu menguraikan limbah industri, logam berat, dan senyawa organik beracun melalui mekanisme enzimatik spesifik (Singh et al., 2020). Konsep ini diperluas melalui pendekatan synthetic biology yang memungkinkan rekayasa jalur metabolik

mikroorganisme agar lebih efisien dalam proses degradasi polutan maupun produksi bioenergi.

Dengan demikian, kajian teoretis bioteknologi modern menunjukkan adanya integrasi antara prinsip biologi molekuler, genetika terapan, dan inovasi teknologi. Perkembangan ini tidak hanya memperluas pemahaman ilmiah tentang sistem kehidupan, tetapi juga memperkuat aplikasi praktis dalam berbagai sektor strategis.

3. METODE PENELITIAN

Artikel ini menggunakan metode kajian literatur (*literature review*) dengan pendekatan deskriptif-analitis untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai transformasi ilmu hayati melalui bioteknologi modern. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti mengkaji, membandingkan, serta mensintesis berbagai hasil penelitian terdahulu secara sistematis sehingga menghasilkan pemahaman konseptual yang mendalam. Kajian literatur tidak hanya berfungsi sebagai ringkasan penelitian sebelumnya, tetapi juga sebagai sarana untuk mengidentifikasi tren perkembangan, kesenjangan penelitian (*research gap*), serta arah inovasi di masa depan.

Data diperoleh dari jurnal internasional bereputasi, laporan ilmiah, buku referensi akademik, serta publikasi resmi lembaga penelitian yang relevan dengan perkembangan bioteknologi modern. Sumber-sumber tersebut diprioritaskan yang terindeks dalam basis data ilmiah dan memiliki reputasi akademik yang jelas. Proses penelusuran literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci yang relevan seperti *modern biotechnology*, *genome editing*, *gene therapy*, *synthetic biology*, dan *bioremediation*. Pembatasan tahun publikasi juga diterapkan untuk memastikan bahwa referensi yang digunakan mencerminkan perkembangan terbaru dalam bidang bioteknologi.

Tahapan analisis dilakukan secara bertahap dan sistematis. Pertama, dilakukan seleksi literatur berdasarkan relevansi dan kredibilitas sumber. Pada tahap ini, setiap artikel dievaluasi berdasarkan kesesuaian topik, kualitas metodologi, serta kontribusi ilmiahnya terhadap perkembangan bioteknologi modern. Literatur yang tidak memenuhi kriteria kualitas atau tidak relevan dengan fokus pembahasan dieliminasi.

Kedua, dilakukan pengelompokan literatur berdasarkan bidang aplikasi, yaitu kesehatan, pertanian, lingkungan, dan industri. Pengelompokan ini bertujuan untuk mempermudah identifikasi pola perkembangan teknologi serta memahami kontribusi spesifik bioteknologi pada masing-masing sektor. Dengan pendekatan tematik ini, analisis dapat dilakukan secara lebih terstruktur dan sistematis.

Ketiga, dilakukan analisis komparatif perkembangan teknologi dengan membandingkan pendekatan konvensional dan pendekatan bioteknologi modern. Analisis ini mencakup aspek efektivitas, efisiensi, inovasi, serta implikasi etis dan sosial dari penerapan teknologi tersebut. Melalui perbandingan ini, dapat diidentifikasi keunggulan dan keterbatasan masing-masing pendekatan.

Keempat, dilakukan sintesis konseptual untuk menarik kesimpulan umum mengenai pola transformasi ilmu hayati. Sintesis ini dilakukan dengan mengintegrasikan berbagai temuan penelitian menjadi suatu kerangka pemikiran yang utuh dan koheren. Proses ini memungkinkan penyusunan argumentasi yang lebih kuat serta menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai dinamika perkembangan bioteknologi modern. Dengan tahapan tersebut, metode kajian literatur yang digunakan dalam artikel ini diharapkan mampu memberikan analisis yang sistematis, objektif, dan mendalam terhadap transformasi ilmu hayati di era bioteknologi modern.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bidang Kesehatan

Hasil kajian menunjukkan bahwa bioteknologi modern telah merevolusi pendekatan diagnostik dan terapeutik dalam dunia medis. Terapi gen berbasis penyuntingan DNA memungkinkan koreksi mutasi genetik yang menjadi penyebab penyakit hereditas seperti thalassemia, sickle cell disease, dan gangguan metabolik tertentu. Teknologi CRISPR-Cas9 memberikan presisi tinggi dalam memodifikasi sekuens gen target sehingga meningkatkan efektivitas terapi sekaligus mengurangi risiko efek samping (Doudna & Charpentier, 2014). Selain itu, perkembangan teknologi *base editing* dan *prime editing* semakin menyempurnakan kemampuan intervensi genetik secara lebih akurat.

Produksi protein rekombinan seperti insulin manusia, hormon pertumbuhan, faktor pembekuan darah, dan antibodi monoklonal juga menjadi bukti konkret penerapan bioteknologi dalam pengobatan modern. Antibodi monoklonal, misalnya, telah digunakan secara luas dalam terapi kanker dan penyakit autoimun karena kemampuannya mengenali target molekuler secara spesifik. Di sisi lain, pengembangan vaksin berbasis mRNA memperlihatkan percepatan inovasi dalam imunologi modern. Platform ini memungkinkan desain vaksin dilakukan secara cepat berdasarkan informasi genom patogen, sebagaimana dijelaskan oleh Pardi et al. (2018). Konsep *precision*

medicine yang berkembang saat ini semakin memperkuat peran bioteknologi dalam menyediakan terapi yang disesuaikan dengan profil genetik individu.

Bidang Pertanian

Dalam sektor pertanian, hasil kajian menunjukkan bahwa tanaman transgenik dan teknologi genome editing berkontribusi signifikan terhadap peningkatan produktivitas dan ketahanan tanaman. Tanaman hasil rekayasa genetika mampu meningkatkan hasil panen, mengurangi penggunaan pestisida, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya alam (James, 2017). Hal ini sangat relevan dalam menghadapi tantangan pertumbuhan populasi global dan perubahan iklim.

Selain tanaman transgenik, pendekatan genome editing memungkinkan perbaikan sifat tanaman tanpa memasukkan gen asing, sehingga menghasilkan varietas yang lebih adaptif dan diterima oleh regulasi di berbagai negara. Teknologi ini mendukung pengembangan tanaman tahan kekeringan, salinitas tinggi, serta serangan patogen tertentu. Dengan demikian, bioteknologi modern tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga memperkuat ketahanan pangan global melalui inovasi berbasis sains molekuler.

Bidang Lingkungan dan Industri

Dalam bidang lingkungan, bioteknologi modern berperan penting dalam proses bioremediasi, yaitu pemanfaatan mikroorganisme untuk menguraikan limbah dan polutan menjadi senyawa yang lebih aman. Mikroba tertentu mampu mendegradasi logam berat, hidrokarbon, serta limbah industri melalui aktivitas enzimatis spesifik (Singh et al., 2020). Pendekatan ini dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan metode kimia konvensional karena memanfaatkan proses biologis alami.

Di sektor industri, bioteknologi mendukung produksi biofuel seperti bioetanol dan biodiesel sebagai alternatif energi terbarukan. Selain itu, pengembangan biomaterial seperti bioplastik dan enzim industri menunjukkan potensi besar dalam menciptakan sistem produksi yang lebih berkelanjutan. Integrasi bioteknologi dengan bioinformatika dan *synthetic biology* semakin mempercepat desain sistem biologis baru yang efisien dan bernilai ekonomi tinggi.

Tantangan Etika dan Regulasi

Meskipun memberikan manfaat besar, penerapan bioteknologi modern juga menimbulkan tantangan etika dan regulasi yang kompleks. Penyuntingan gen pada embrio manusia, khususnya pada garis germinal (*germline editing*), memunculkan

perdebatan global mengenai batas intervensi ilmiah terhadap kehidupan manusia. Kekhawatiran terhadap potensi penyalahgunaan teknologi dan dampak jangka panjang terhadap generasi mendatang menjadi isu utama dalam diskursus bioetika (Baltimore et al., 2015).

Selain itu, keamanan organisme hasil rekayasa genetika (GMO) juga menjadi perhatian publik. Regulasi berbasis sains diperlukan untuk memastikan bahwa inovasi bioteknologi diterapkan secara bertanggung jawab, transparan, dan berorientasi pada keselamatan manusia serta lingkungan. Oleh karena itu, kolaborasi antara ilmuwan, pembuat kebijakan, dan masyarakat sangat penting dalam membangun tata kelola bioteknologi yang berkelanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Transformasi ilmu hayati melalui pendekatan bioteknologi modern menunjukkan perubahan paradigma yang fundamental dalam memahami, memanfaatkan, dan merekayasa sistem kehidupan. Perkembangan teknologi seperti rekayasa genetika, genome editing, produksi protein rekombinan, serta platform vaksin berbasis mRNA telah memperluas batas kemampuan manusia dalam bidang kesehatan, pertanian, lingkungan, dan industri. Bioteknologi modern tidak lagi sekadar alat penelitian, tetapi telah menjadi instrumen strategis dalam menyelesaikan berbagai tantangan global, termasuk penyakit genetik, ketahanan pangan, krisis energi, dan degradasi lingkungan.

Dalam bidang kesehatan, pendekatan berbasis molekuler mendorong lahirnya terapi gen dan pengobatan presisi yang lebih efektif dan personal. Di sektor pertanian, inovasi genome editing dan tanaman transgenik meningkatkan produktivitas sekaligus ketahanan terhadap perubahan iklim. Sementara itu, dalam konteks lingkungan dan industri, bioteknologi mendukung pengembangan sistem produksi yang lebih berkelanjutan melalui bioremediasi dan bioenergi.

Meskipun demikian, kemajuan tersebut juga menghadirkan tantangan etika, sosial, dan regulasi yang memerlukan pengawasan serta tata kelola berbasis sains. Oleh karena itu, keberhasilan transformasi ilmu hayati sangat bergantung pada kolaborasi multidisipliner, regulasi yang adaptif, serta komitmen terhadap prinsip tanggung jawab ilmiah. Dengan pendekatan yang tepat, bioteknologi modern akan terus menjadi motor penggerak utama inovasi dan pembangunan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR REFERENSI

- Baltimore, D., Berg, P., Botchan, M., Carroll, D., Charo, R. A., Church, G., Corn, J. E., Daley, G. Q., Doudna, J. A., Fenner, M., Greely, H. T., Jinek, M., Martin, G. S., Penhoet, E., Puck, J., Sternberg, S. H., Weissman, J. S., & Yamamoto, K. R. (2015). A prudent path forward for genomic engineering and germline gene modification. *Science*, 348(6230), 36–38. <https://doi.org/10.1126/science.aab1028>
- Charpentier, E., & Doudna, J. A. (2013). Biotechnology: Rewriting a genome. *Nature*, 495(7439), 50–51. <https://doi.org/10.1038/495050a>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213), 1258096. <https://doi.org/10.1126/science.1258096>
- George, A. A., Eapen, D., & Williams, R. (2021). Advances in gene therapy for inherited diseases. *Molecular Therapy*, 29(6), 1908–1920. <https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2021.03.012>
- Huang, T. K., & Puchta, H. (2019). CRISPR/Cas-mediated gene targeting in plants: Finally a turn for the better for homologous recombination. *Plant Cell Reports*, 38(4), 443–453. <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02379-0>
- James, C. (2017). Global status of commercialized biotech/GM crops: 2017 (ISAAA Brief No. 53). ISAAA.
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 337(6096), 816–821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Khalil, A. S., & Collins, J. J. (2010). Synthetic biology: Applications come of age. *Nature Reviews Genetics*, 11(5), 367–379. <https://doi.org/10.1038/nrg2775>
- Liu, Y., Zhan, Y., Chen, Z., He, A., Li, J., Wu, H., & Liu, L. (2016). Directing cellular information flow via CRISPR signal conductors. *Nature Methods*, 13(11), 938–944. <https://doi.org/10.1038/nmeth.4030>
- Molla, K. A., & Yang, Y. (2019). CRISPR/Cas-mediated base editing: Technical considerations and practical applications. *Trends in Biotechnology*, 37(10), 1121–1142. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.03.008>
- Pardi, N., Hogan, M. J., Porter, F. W., & Weissman, D. (2018). mRNA vaccines—A new era in vaccinology. *Nature Reviews Drug Discovery*, 17(4), 261–279. <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.243>
- Qaim, M. (2020). Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 42(2), 129–150. <https://doi.org/10.1002/aep.13044>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). Free Press.

- Singh, R. L., Singh, P. K., & Singh, R. P. (2020). Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes—A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.01.007>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Tan, W. S., Ong, Y. S., & Chen, M. W. (2021). Recent advances in mRNA vaccine technology. *Vaccines*, 9(12), 1477. <https://doi.org/10.3390/vaccines9121477>
- Van Eenennaam, A. L. (2019). Genetic modification of food animals. *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.10.002>
- Wang, H., La Russa, M., & Qi, L. S. (2016). CRISPR/Cas9 in genome editing and beyond. *Annual Review of Biochemistry*, 85, 227–264. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060815-014607>
- Zhang, F., Wen, Y., & Guo, X. (2014). CRISPR/Cas9 for genome editing: Progress, implications and challenges. *Human Molecular Genetics*, 23(R1), R40–R46. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddu125>