

TRANSFORMASI SISTEM AKUAKULTUR MELALUI INTEGRASI TEKNIK GENETIKA DAN BIOTEKNOLOGI

Muhammad Fuad

Institut Teknologi dan Kesehatan Permata Ilmu Maros
muhammadfuad@itkpi.ac.id

Risqah Amaliah Kasman

Institut Teknologi dan Kesehatan Permata Ilmu Maros
risqahamaliahkasman@itkpi.ac.id

Abstrak

Transformasi sistem akuakultur menjadi kebutuhan strategis untuk menjawab tantangan peningkatan permintaan protein hewani, keterbatasan sumber daya, dan ancaman penyakit pada organisme budidaya. Penelitian ini bertujuan menganalisis peran integrasi teknik genetika dan bioteknologi dalam mendorong perubahan paradigma budidaya menuju sistem yang lebih efisien, presisi, dan berkelanjutan. Metode penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif melalui studi literatur terhadap publikasi ilmiah dari database Scopus dan ScienceDirect periode 2012–2025. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan teknologi seperti genomic selection, marker-assisted selection, dan CRISPR/Cas9 gene editing mampu meningkatkan sifat unggul seperti pertumbuhan cepat, efisiensi konversi pakan, serta ketahanan terhadap penyakit. Integrasi bioteknologi molekuler melalui pendekatan 'omics' (genomik, transkriptomik, proteomik) juga mendukung pemantauan kesehatan organisme secara presisi dan pengambilan keputusan berbasis data. Meski demikian, tantangan utama meliputi isu etika, keterbatasan infrastruktur, literasi bioteknologi, dan regulasi biosafety yang ketat. Kesimpulannya, transformasi akuakultur melalui sinergi genetika dan bioteknologi berpotensi mempercepat perwujudan sistem budidaya berkelanjutan, namun memerlukan dukungan kebijakan, investasi riset, dan penguatan kapasitas kelembagaan untuk implementasi optimal.

Kata Kunci: akuakultur, teknik genetika, bioteknologi, genomic selection, CRISPR, keberlanjutan

Abstract

The transformation of aquaculture systems is a strategic need to answer the challenges of increasing demand for animal protein, limited resources, and the threat of diseases in cultivated organisms. This research aims to analyze the role of the integration of genetic engineering and biotechnology in encouraging a change in the cultivation paradigm towards a more efficient, precise, and sustainable system. The research method uses a descriptive qualitative approach through a literature review of scientific publications from the Scopus and ScienceDirect databases for the period 2012–2025. The results of the analysis show that the application of technologies such as genomic selection, marker-assisted selection, and CRISPR/Cas9 gene editing is able to improve superior traits such as rapid growth, feed conversion efficiency, and disease resistance. The integration of molecular biotechnology through 'omics' approaches (genomics, transcriptomics, proteomics) also supports precise monitoring of organism health and data-driven decision-making. However, the main

challenges include ethical issues, limited infrastructure, biotechnology literacy, and strict biosafety regulations. In conclusion, aquaculture transformation through genetic and biotechnology synergy has the potential to accelerate the realization of sustainable aquaculture systems, but requires policy support, research investment, and institutional capacity strengthening for optimal implementation.

Keywords: *aquaculture, genetic engineering, biotechnology, genomic selection, CRISPR, sustainability*

Pendahuluan

Akuakultur telah menjadi sektor kunci dalam pemenuhan kebutuhan pangan global, khususnya dalam konteks meningkatnya tekanan terhadap stok tangkapan alam. Produksi akuatik telah tumbuh pesat selama beberapa dekade terakhir, namun seiring pertumbuhan tersebut muncul tantangan berupa keterbatasan genetika, kerentanan terhadap penyakit, efisiensi pakan yang rendah, dan degradasi lingkungan (Su, 2023). Untuk menjaga keberlanjutan dan produktivitas, integrasi pendekatan bioteknologi dan teknik genetika menawarkan jalur transformasi sistem yang menjanjikan (Su, 2023).

Teknik genetika modern, seperti pengeditan gen (gene editing) dan modifikasi genom, memungkinkan peningkatan sifat ekonomis ikan atau organisme air lainnya misalnya ketahanan terhadap penyakit, pertumbuhan lebih cepat, atau efisiensi penggunaan pakan (Gratacap et al., 2019). Pendekatan ini memungkinkan seleksi target yang lebih presisi dibanding metode seleksi konvensional, bahkan pada generasi awal (Gratacap et al., 2019). Di samping itu, perkembangan dalam ilmu “omics” (genomik, transkriptomik, proteomik) telah memperkaya basis data genom spesies budidaya, mendorong penggunaan marker genetik atau prediksi fenotip berbasis genom dalam pembibitan (Andersen et al., 2025).

Namun demikian, penerapan bioteknologi dalam akuakultur tidak semata-mata teknis. Penerimaan sosial, regulasi biosafety, dan aspek etika menjadi komponen yang tidak bisa diabaikan. Misalnya, ikan transgenik dengan pertumbuhan cepat telah dianggap kontroversial meskipun secara teknis menjanjikan efisiensi pakan yang lebih tinggi (Wakchaure, Ganguly, & Qadri, 2015). Apalagi dalam ekosistem air yang bersifat terbuka, risiko aliran gen ke populasi liar dan dampak ekologisnya harus diantisipasi melalui riset dan regulasi yang kuat (Wakchaure et al., 2015).

Integrasi sistem juga menuntut kolaborasi multidisiplin: biologi molekular, pemuliaan tradisional, ekologi, dan ilmu lingkungan harus dipadukan dalam kerangka manajemen budidaya. Dengan demikian, transformasi yang dimaksud bukan hanya transformasi alat atau metode, melainkan transformasi paradigma produksi akuakultur — dari pendekatan massal ke pendekatan presisi berbasis genetika. Dalam hal ini, tantangan utama meliputi kapasitas institusional, investasi dalam fasilitas bioteknologi, serta pengembangan sumber daya manusia terampil di bidang genetika dan bioinformatika (Andersen et al., 2025).

Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi bagaimana integrasi teknik genetika dan bioteknologi dapat mentransformasi sistem akuakultur mulai dari tahap pembibitan

hingga tahap panen serta mengidentifikasi hambatan dan strategi mitigasinya. Dengan memahami sinergi antara metode genetika dan teknologi bioteknologi, diharapkan sektor akuakultur dapat melangkah ke era baru yang lebih efisien, berkelanjutan, dan aman secara biologis.

Literatur Review

Perkembangan teknologi genetika telah memberikan peluang besar dalam meningkatkan produktivitas dan ketahanan sektor akuakultur. Menurut Gjedrem et al. (2012), pemuliaan selektif merupakan pendekatan paling mendasar untuk meningkatkan karakteristik penting pada spesies budidaya seperti pertumbuhan, ketahanan terhadap penyakit, dan efisiensi konversi pakan. Namun, metode konvensional memiliki keterbatasan karena membutuhkan waktu panjang untuk menghasilkan generasi dengan sifat unggul. Oleh karena itu, penerapan teknik genetika molekuler seperti marker-assisted selection (MAS) dan genomic selection menjadi langkah penting untuk mempercepat perbaikan genetik.

Selanjutnya, munculnya teknologi CRISPR/Cas9 dan gene editing menjadi revolusi dalam bidang akuakultur modern. Gratacap et al. (2019) menjelaskan bahwa rekayasa genom memungkinkan modifikasi langsung terhadap gen target untuk memperkuat sifat tertentu seperti toleransi salinitas atau resistensi terhadap penyakit bakteri. Misalnya, penghapusan gen tertentu pada salmon telah terbukti meningkatkan ketahanan terhadap virus pancreas disease, menunjukkan potensi besar dalam mengurangi ketergantungan pada antibiotik (Li et al., 2022). Hal ini memperkuat gagasan bahwa transformasi sistem akuakultur tidak hanya bertumpu pada teknologi produksi, tetapi juga pada manajemen kesehatan hewan secara genetik.

Integrasi bioteknologi molekuler dalam sistem budidaya juga berperan dalam peningkatan efisiensi monitoring. Melalui penerapan teknik seperti transkriptomik dan proteomik, pembudidaya dapat memantau ekspresi gen pada organisme akuatik sebagai respons terhadap stres lingkungan atau perubahan nutrisi (Su, 2023). Pendekatan berbasis omics ini memperkaya data biologis yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan manajemen berbasis sains (evidence-based aquaculture).

Dalam konteks sosial dan regulasi, literatur menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan bioteknologi tidak hanya ditentukan oleh kemajuan teknis. Faktor penerimaan masyarakat dan kerangka regulasi biosafety memegang peranan penting. Menurut Wakchaure et al. (2015), meskipun ikan transgenik menawarkan keuntungan ekonomi, tantangan etika dan kekhawatiran terhadap dampak lingkungan menghambat adopsinya secara luas. Oleh sebab itu, integrasi sistem akuakultur modern memerlukan kebijakan yang mendukung inovasi sekaligus menjamin keamanan pangan dan lingkungan.

Selain itu, penelitian terbaru oleh Andersen et al. (2025) menyoroti pentingnya pengembangan kapasitas SDM dan infrastruktur laboratorium dalam mendukung transformasi sistem budidaya berbasis bioteknologi. Negara-negara dengan investasi tinggi di bidang penelitian genomik menunjukkan peningkatan produktivitas dan daya

saing global dalam industri akuakultur. Hal ini menunjukkan bahwa transformasi sistem tidak hanya bersifat biologis, tetapi juga struktural dan kelembagaan.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa integrasi teknik genetika dan bioteknologi dalam akuakultur menciptakan paradigma baru: sistem budidaya presisi berbasis data biologis dan genetika. Namun, implementasi optimal membutuhkan pendekatan holistik yang mencakup aspek ilmiah, sosial, ekonomi, dan kebijakan (Houston et al., 2020). Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengkaji strategi terbaik dalam mengintegrasikan teknologi ini di berbagai konteks geografis dan spesies budidaya.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur (literature review) untuk menganalisis peran dan dampak integrasi teknik genetika serta bioteknologi terhadap transformasi sistem akuakultur. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk memahami fenomena secara komprehensif melalui interpretasi terhadap hasil penelitian terdahulu yang relevan (Snyder, 2019). Fokus analisis diarahkan pada literatur ilmiah yang membahas penerapan genetic engineering, genomic selection, bioteknologi molekuler, serta implikasi sosial dan kebijakan dalam sektor akuakultur modern.

Sumber data diperoleh dari database ilmiah internasional seperti *Scopus*, *ScienceDirect*, dan *SpringerLink* dengan kriteria inklusi berupa artikel terbit dalam rentang waktu 2012–2025, memiliki DOI yang valid, dan relevan dengan tema genetika dan bioteknologi dalam akuakultur. Artikel yang dipilih kemudian dianalisis menggunakan pendekatan content analysis untuk mengidentifikasi tema-tema utama seperti: (1) inovasi teknologi genetika dalam akuakultur, (2) dampak bioteknologi terhadap produktivitas dan ketahanan organisme, (3) tantangan regulasi dan etika, serta (4) strategi transformasi sistem budidaya (Mayring, 2014).

Proses analisis dilakukan melalui tahapan sistematis meliputi identifikasi, seleksi, kategorisasi, dan sintesis temuan utama dari setiap artikel. Data yang terkumpul diinterpretasikan secara naratif untuk menjelaskan pola hubungan antara teknik genetika dan bioteknologi dalam meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan keamanan sistem akuakultur (Snyder, 2019). Hasil sintesis literatur kemudian digunakan untuk merumuskan implikasi teoritis dan praktis terhadap pengembangan akuakultur berkelanjutan berbasis bioteknologi di masa depan.

Hasil dan Pembahasan

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa integrasi teknik genetika dalam sistem akuakultur telah memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan produktivitas dan efisiensi budidaya. Melalui pemanfaatan seleksi genomik (genomic selection) dan rekayasa genetik (gene editing), sifat-sifat unggul seperti pertumbuhan cepat, efisiensi konversi pakan, serta resistensi terhadap penyakit dapat diidentifikasi dan diperbaiki secara presisi (Gratacap et al., 2019). Studi pada salmon Atlantik dan tilapia menunjukkan peningkatan

pertumbuhan hingga 25% dibandingkan metode seleksi konvensional, menandakan bahwa integrasi genetika memberikan nilai tambah nyata bagi produksi (Houston et al., 2020).

Selain aspek produktivitas, bioteknologi molekuler juga berperan penting dalam pemantauan kesehatan organisme budidaya. Penerapan teknologi ‘omics’ seperti genomik, transkriptomik, dan proteomik memungkinkan identifikasi dini terhadap respons stres, infeksi patogen, dan ketidakseimbangan nutrisi (Su, 2023). Hal ini memperkuat sistem manajemen berbasis data (data-driven aquaculture), di mana keputusan budidaya dapat dilakukan secara presisi dan adaptif. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan ketahanan biotik, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik serta meminimalkan dampak lingkungan.

Namun demikian, hasil literatur juga menyoroti adanya tantangan dalam implementasi teknologi genetika dan bioteknologi di sektor akuakultur. Tantangan tersebut mencakup keterbatasan infrastruktur laboratorium, kurangnya tenaga ahli, serta kompleksitas regulasi biosafety dan etika. Beberapa negara masih berhati-hati terhadap pelepasan organisme transgenik ke lingkungan karena potensi risiko aliran gen ke populasi liar (Wakchaure et al., 2015). Oleh karena itu, diperlukan tata kelola inovasi yang kuat agar kemajuan teknologi tidak bertentangan dengan prinsip keberlanjutan ekologis dan sosial.

Lebih lanjut, keberhasilan integrasi teknologi ini sangat bergantung pada kapasitas kelembagaan dan dukungan kebijakan. Studi oleh Andersen et al. (2025) menunjukkan bahwa negara dengan investasi riset tinggi, seperti Norwegia dan Jepang, telah berhasil memanfaatkan gene editing untuk memperkuat industri perikanan budidaya nasionalnya. Hal ini menunjukkan bahwa adopsi teknologi genetika membutuhkan strategi nasional yang melibatkan kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah. Pembangunan infrastruktur bioinformatika, pusat riset genetika akuatik, serta pelatihan SDM menjadi faktor krusial dalam mempercepat transformasi sistem budidaya.

Secara keseluruhan, hasil kajian ini mengonfirmasi bahwa transformasi sistem akuakultur melalui integrasi teknik genetika dan bioteknologi bukan hanya revolusi teknologi, tetapi juga perubahan paradigma dalam manajemen sumber daya perikanan. Dengan pendekatan ilmiah berbasis data biologis, sistem akuakultur masa depan dapat lebih efisien, berkelanjutan, dan tangguh terhadap perubahan lingkungan global. Implementasi optimal membutuhkan sinergi antara inovasi ilmiah, kebijakan inklusif, dan literasi bioteknologi di kalangan pelaku industri.

Kesimpulan

Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi teknik genetika dan bioteknologi telah menjadi pendorong utama transformasi sistem akuakultur modern. Melalui penerapan teknologi seperti genomic selection, marker-assisted selection, dan gene editing (CRISPR/Cas9), karakteristik penting pada organisme budidaya — seperti pertumbuhan cepat, ketahanan penyakit, dan efisiensi pakan — dapat ditingkatkan secara signifikan (Gratacap et al., 2019; Houston et al., 2020). Pendekatan ‘omics’ seperti genomik dan transkriptomik juga memperkuat sistem pemantauan kesehatan organisme dan

memungkinkan manajemen berbasis data yang presisi. Dengan demikian, akuakultur masa depan bergerak menuju paradigma budidaya presisi yang mengedepankan produktivitas, keberlanjutan, dan ketahanan ekosistem.

Meski demikian, transformasi ini tidak lepas dari tantangan. Isu etika, risiko ekologis, keterbatasan infrastruktur laboratorium, dan rendahnya literasi bioteknologi menjadi hambatan utama bagi implementasi di berbagai negara berkembang (Wakchaure et al., 2015; Su, 2023). Regulasi biosafety yang ketat serta penolakan sosial terhadap organisme transgenik juga menjadi faktor pembatas. Oleh karena itu, keberhasilan integrasi teknologi genetika tidak hanya bergantung pada inovasi ilmiah, tetapi juga pada tata kelola kebijakan, investasi riset, dan kolaborasi lintas sektor yang kuat (Andersen et al., 2025).

Saran

Diperlukan upaya terarah untuk memperkuat kapasitas nasional dalam bidang genetika dan bioteknologi akuakultur, antara lain melalui pembangunan pusat riset genomik, peningkatan kompetensi SDM, serta penguatan jejaring antara universitas, industri, dan pemerintah. Selain itu, pengembangan kerangka regulasi adaptif yang menjamin keamanan hayati namun tetap mendorong inovasi sangat diperlukan. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi efektivitas penerapan teknologi genetika pada berbagai spesies lokal dan kondisi lingkungan yang beragam, agar hasil inovasi benar-benar berkontribusi terhadap keberlanjutan pangan, konservasi sumber daya air, dan ketahanan ekonomi perikanan

Referensi

- Andersen, Ø., Wargelius, A., & Edvardsen, R. B. (2025). *Genome editing in aquaculture: Progress, potential and challenges*. *Aquaculture Reports*, 36, 101865. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.101865>
- Gratacap, R. L., Wargelius, A., Edvardsen, R. B., & Houston, R. D. (2019). Potential of genome editing to improve aquaculture breeding and production. *Trends in Genetics*, 35(9), 672–684. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2019.06.006>
- Su, B. (2023). Advances in aquaculture biotechnology: Genetic engineering and molecular breeding. *Reviews in Aquaculture*, 15(1), 12–28. <https://doi.org/10.1111/raq.12700>
- Wakchaure, R., Ganguly, S., & Qadri, K. (2015). Biotechnology in aquaculture: Recent trends and prospects. *Journal of Fisheries Sciences*, 9(3), 45–53.
- Houston, R. D., Bean, T. P., Macqueen, D. J., Gundappa, M. K., Jin, Y. H., Jenkins, T. L., ... & Robledo, D. (2020). Harnessing genomics to fast-track genetic improvement in aquaculture. *Nature Reviews Genetics*, 21(7), 389–409. <https://doi.org/10.1038/s41576-020-0227-y>
- Li, J., Liu, S., & Wang, Y. (2022). Applications of CRISPR/Cas systems in aquatic animals: Current status and future prospects. *Frontiers in Genetics*, 13, 881502. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.881502>
- Gjedrem, T., Robinson, N., & Rye, M. (2012). The importance of selective breeding in aquaculture to meet future demands for animal protein: A review. *Aquaculture*, 350–353, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.008>

Gjedrem, T., Robinson, N., & Rye, M. (2012). The importance of selective breeding in aquaculture to meet future demands for animal protein: A review. *Aquaculture*, 350–353, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.008>