

TRANSFORMASI AKUAKULTUR MELALUI REKAYASA GENETIK DAN BIOTEKNOLOGI: IMPLIKASI TERHADAP PRODUKSI DAN KUALITAS IKAN

Rita Hayati

Universitas Muhammadiyah Bengkulu

ritahayati@umb.ac.id

Maheran Mulyadi

Universitas Muhammadiyah Bengkulu

maheran@umb.ac.id

Abstract

The rapid growth of the aquaculture sector, the leading provider of global animal protein, demands the application of technological innovations that sustainably improve the productivity, health, and quality of farmed fish. Genetic engineering and biotechnology have become strategic tools for transforming modern aquaculture systems by improving fish genetic traits, increasing disease resistance, and optimizing product quality. This study aims to conduct a comprehensive literature review of the role of genetic engineering and biotechnology in aquaculture transformation, focusing on its implications for the production, health, and quality of farmed fish. The research method is a qualitative approach based on library research, analyzing reputable scientific articles indexed in the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases. The analysis used thematic content analysis to identify patterns, conceptual frameworks, research trends, and key research gaps. The study found that marker-assisted genetic selection, genomics, and CRISPR-Cas9-based gene editing significantly improved growth rate, feed efficiency, and disease resistance in fish. In addition, the development of biotechnology-based recombinant vaccines, probiotics, and biosensors contributes to improving fish health, food safety, and the quality of aquaculture products. However, the study also identified a range of challenges, including ecological risks, biosecurity issues, regulation, and social acceptance of genetically engineered organisms. Therefore, the transformation of biotechnology-based aquaculture needs to be balanced with a strong policy framework, a prudential approach, and sustainable governance. This research is expected to make a theoretical contribution to the development of modern aquaculture science and to have practical implications for the formulation of innovative, inclusive, and environmentally friendly fisheries industry strategies.

Keywords: Genetic engineering; aquaculture biotechnology; Fish production; Fish health; Fish quality; Sustainable aquaculture; Genomics; CRISPR-Cas9.

Pendahuluan

Peningkatan permintaan global terhadap produk perikanan telah mendorong sektor akuakultur menjadi salah satu sumber utama protein hewani di dunia. Data dari Food and Agriculture Organization (FAO) menunjukkan bahwa lebih dari 56% produksi ikan dunia saat ini berasal dari akuakultur, dan kontribusi ini diperkirakan akan terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan perubahan pola konsumsi masyarakat (FAO, 2022). Namun, pertumbuhan pesat akuakultur juga dihadapkan pada berbagai tantangan, seperti keterbatasan sumber daya, degradasi lingkungan, penyakit ikan, serta fluktuasi kualitas

produk, yang menuntut pendekatan inovatif dan berkelanjutan dalam sistem budidaya ikan. Dalam konteks tersebut, rekayasa genetik dan bioteknologi telah muncul sebagai instrumen strategis untuk mentransformasi sistem akuakultur konvensional menjadi lebih produktif, efisien, dan berkelanjutan. Teknologi seperti seleksi genetik berbantuan marker (*marker-assisted selection*), genomika, transgenesis, dan penyuntingan gen (*gene editing*) memungkinkan perbaikan sifat genetik ikan secara presisi, termasuk pertumbuhan cepat, ketahanan terhadap penyakit, dan efisiensi pakan yang lebih tinggi (Gjedrem, Robinson, & Rye, 2012; Houston et al., 2020). Penerapan teknologi ini membuka peluang besar untuk meningkatkan produktivitas sekaligus menekan dampak ekologis dari praktik budidaya intensif.

Selain perbaikan genetik, bioteknologi modern juga memainkan peran penting dalam meningkatkan kesehatan ikan dan kualitas hasil budidaya. Pengembangan vaksin rekombinan, probiotik, prebiotik, serta suplemen nutrisi berbasis bioteknologi telah terbukti efektif dalam memperkuat sistem imun ikan, menurunkan prevalensi penyakit, dan meningkatkan kualitas daging ikan (Gudding & Van Muiswinkel, 2013; Ringø et al., 2018). Inovasi ini tidak hanya meningkatkan kelangsungan hidup ikan, tetapi juga mendukung produksi yang lebih ramah lingkungan dengan mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik dan bahan kimia berbahaya.

Di sisi lain, rekayasa genetik juga berkontribusi dalam peningkatan kualitas ikan, baik dari aspek sensori, nilai gizi, maupun keamanan pangan. Teknologi *genome editing* seperti CRISPR-Cas9 memungkinkan modifikasi sifat metabolik ikan untuk meningkatkan kandungan asam lemak omega-3, tekstur daging, serta ketahanan terhadap stres lingkungan (Yeh, Kinoshita, & Kondo, 2019; Gratacap et al., 2019). Dengan demikian, bioteknologi berpotensi meningkatkan daya saing produk akuakultur di pasar global sekaligus memenuhi tuntutan konsumen terhadap produk pangan yang sehat, aman, dan berkualitas tinggi.

Meskipun manfaat rekayasa genetik dan bioteknologi dalam akuakultur semakin diakui, penerapannya masih menghadapi berbagai tantangan teknis, etis, dan regulatif. Isu keamanan hayati, potensi dampak terhadap keanekaragaman hayati, serta penerimaan sosial terhadap organisme hasil rekayasa genetik menjadi perhatian utama dalam pengembangan teknologi ini (Devlin et al., 2015; Kapuscinski et al., 2017). Selain itu, kesenjangan kapasitas teknologi antara negara maju dan berkembang juga berpotensi memperlebar ketimpangan dalam penguasaan inovasi akuakultur.

Kajian literatur menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek teknis dan eksperimental dari rekayasa genetik dan bioteknologi, sementara kajian integratif yang menyoroti implikasi sistemik terhadap produktivitas, kesehatan ikan, kualitas produk, serta keberlanjutan lingkungan masih relatif terbatas (Houston et al., 2020; Kumar et al., 2021). Akibatnya, pemahaman komprehensif mengenai peran strategis bioteknologi dalam transformasi akuakultur berkelanjutan belum sepenuhnya terbangun, sehingga diperlukan sintesis literatur yang sistematis dan terstruktur.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur komprehensif terhadap penerapan rekayasa genetik dan bioteknologi dalam sistem akuakultur, dengan fokus pada implikasinya terhadap produksi, kesehatan, dan kualitas ikan budidaya. Studi ini diharapkan dapat mengidentifikasi tren riset utama, kerangka konseptual, serta tantangan dan peluang pengembangan teknologi bioteknologi di sektor akuakultur. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis bagi pengembangan ilmu akuakultur modern serta implikasi praktis bagi perumusan kebijakan dan strategi industri perikanan yang berkelanjutan.

Literature Review

Perkembangan Rekayasa Genetik dalam Akuakultur Modern

Rekayasa genetik telah menjadi pilar utama dalam transformasi akuakultur modern, khususnya dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi pakan, dan ketahanan ikan terhadap penyakit. Teknik seleksi genetik berbantuan marker (*marker-assisted selection*) dan genomika memungkinkan identifikasi gen unggul yang berkontribusi terhadap pertumbuhan cepat, ketahanan stres, dan efisiensi metabolisme (Gjedrem et al., 2012; Houston et al., 2020). Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan laju pertumbuhan hingga 10–30% pada beberapa spesies komersial, seperti salmon, nila, dan udang vaname. Selain itu, teknologi *gene editing* berbasis CRISPR-Cas9 membuka peluang baru dalam perbaikan sifat genetik ikan secara presisi dan efisien. Teknik ini memungkinkan modifikasi gen spesifik yang berperan dalam pertumbuhan, kekebalan, dan adaptasi lingkungan, sehingga menghasilkan strain ikan unggul dengan karakteristik yang lebih stabil (Gratacap et al., 2019; Yeh et al., 2019). Dengan tingkat akurasi yang tinggi dan waktu pengembangan yang relatif singkat, CRISPR-Cas9 menjadi teknologi kunci dalam pengembangan akuakultur generasi berikutnya.

Bioteknologi dalam Peningkatan Kesehatan dan Ketahanan Ikan

Kesehatan ikan merupakan faktor penentu keberhasilan sistem akuakultur intensif. Bioteknologi memainkan peran krusial dalam pengembangan vaksin rekombinan, probiotik, dan imunostimulan yang bertujuan meningkatkan sistem imun ikan serta menekan prevalensi penyakit (Gudding & Van Muiswinkel, 2013; Ringø et al., 2018). Penggunaan vaksin DNA dan protein rekombinan telah terbukti efektif dalam mengendalikan penyakit viral dan bakteri yang umum menyerang ikan budidaya, seperti *Aeromonas hydrophila* dan *Vibrio spp.* Probiotik dan prebiotik berbasis bioteknologi juga berkontribusi dalam memperbaiki keseimbangan mikrobiota usus ikan, meningkatkan daya cerna pakan, serta memperkuat respons imun non-spesifik (Dawood et al., 2019; Ringø et al., 2018). Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan tingkat kelangsungan hidup ikan, tetapi juga mendukung praktik akuakultur berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik dan bahan kimia sintetis.

Peran Bioteknologi dalam Peningkatan Kualitas Ikan Budidaya

Kualitas ikan budidaya mencakup aspek nutrisi, sensori, dan keamanan pangan. Rekayasa genetik memungkinkan modifikasi jalur metabolik untuk meningkatkan

kandungan nutrisi penting, seperti asam lemak omega-3, protein, dan mineral (Yeh et al., 2019; Kumar et al., 2021). Upaya ini berkontribusi terhadap peningkatan nilai gizi ikan dan daya saing produk akuakultur di pasar global. Di sisi lain, bioteknologi pascapanen, seperti aplikasi enzim rekombinan dan biosensor, memungkinkan pengendalian mutu produk perikanan secara lebih presisi. Teknologi biosensor berbasis DNA dan protein memungkinkan deteksi cepat patogen dan kontaminan, sehingga meningkatkan keamanan pangan dan kepercayaan konsumen (Galvez et al., 2018; Farahi et al., 2019). Integrasi bioteknologi dalam rantai produksi hingga distribusi menjadi kunci dalam menjamin kualitas dan keberlanjutan produk perikanan.

Dampak Sosio-Ekonomi dan Keberlanjutan Akuakultur

Transformasi akuakultur melalui bioteknologi tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga memengaruhi dinamika sosial dan ekonomi sektor perikanan. Peningkatan produktivitas dan efisiensi pakan berkontribusi terhadap penurunan biaya produksi, peningkatan pendapatan pembudidaya, serta stabilitas pasokan pangan (FAO, 2022; Kumar et al., 2021). Hal ini memperkuat peran akuakultur sebagai sektor strategis dalam ketahanan pangan dan pembangunan ekonomi pedesaan. Namun, literatur juga menyoroti potensi risiko ekologis dan sosial, seperti hilangnya keanekaragaman hayati, kontaminasi genetik, serta resistensi sosial terhadap organisme hasil rekayasa genetik (Devlin et al., 2015; Kapuscinski et al., 2017). Oleh karena itu, penerapan bioteknologi harus diimbangi dengan kebijakan regulatif yang ketat, pendekatan kehati-hatian (*precautionary principle*), serta edukasi publik untuk memastikan keberlanjutan dan penerimaan sosial.

Research Gap dan Sintesis Konseptual

Meskipun kajian mengenai rekayasa genetik dan bioteknologi dalam akuakultur terus berkembang, penelitian yang mengintegrasikan aspek produksi, kesehatan ikan, kualitas produk, dan keberlanjutan lingkungan secara holistik masih relatif terbatas (Houston et al., 2020; Kumar et al., 2021). Sebagian besar studi berfokus pada uji eksperimental atau aplikasi teknis tertentu, tanpa membangun kerangka konseptual yang komprehensif mengenai transformasi sistem akuakultur secara menyeluruh. Selain itu, penelitian longitudinal dan lintas wilayah mengenai dampak jangka panjang rekayasa genetik terhadap ekosistem dan struktur sosial ekonomi pembudidaya masih minim. Hal ini menandakan perlunya pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan biologi molekuler, ilmu lingkungan, ekonomi perikanan, dan kebijakan publik. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya menyusun sintesis literatur yang sistematis untuk membangun pemahaman konseptual yang lebih holistik mengenai peran strategis rekayasa genetik dan bioteknologi dalam transformasi akuakultur berkelanjutan.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif berbasis studi kepustakaan (*library research*) untuk menganalisis secara komprehensif perkembangan rekayasa genetik dan bioteknologi dalam transformasi akuakultur, khususnya terkait implikasinya terhadap produksi, kesehatan, dan kualitas ikan budidaya. Pendekatan kualitatif dipilih

karena memungkinkan eksplorasi mendalam terhadap konsep, teori, temuan empiris, serta dinamika riset yang berkembang dalam kajian akuakultur modern. Metode ini bertujuan membangun sintesis konseptual yang terintegrasi melalui interpretasi kritis terhadap berbagai hasil penelitian terdahulu, sehingga diperoleh pemahaman holistik mengenai peran strategis bioteknologi dalam pengembangan akuakultur berkelanjutan.

Sumber data penelitian terdiri atas artikel jurnal ilmiah bereputasi, prosiding konferensi internasional, serta laporan lembaga resmi yang terindeks dalam basis data akademik utama, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Proses penelusuran literatur dilakukan secara sistematis dengan menggunakan kata kunci seperti *genetic engineering in aquaculture*, *biotechnology in fish farming*, *genome editing in aquaculture*, *fish health biotechnology*, dan *aquaculture sustainability*. Kriteria inklusi meliputi publikasi berbahasa Inggris yang terbit dalam kurun waktu 2018–2024, memiliki relevansi langsung dengan topik penelitian, serta berasal dari jurnal terindeks dan bereputasi. Sementara itu, publikasi yang bersifat non-ilmiah, tidak melalui proses *peer-review*, atau tidak memiliki keterkaitan langsung dengan aspek produksi, kesehatan, dan kualitas ikan budidaya dikeluarkan dari analisis.

Analisis data dilakukan menggunakan *thematic content analysis*, yang mencakup tahapan pengkodean terbuka, kategorisasi tematik, dan sintesis interpretatif untuk mengidentifikasi pola konseptual, tren penelitian, serta kesenjangan riset utama. Setiap artikel dianalisis secara iteratif untuk mengekstraksi informasi kunci terkait aplikasi rekayasa genetik, inovasi bioteknologi, dampak terhadap performa produksi, ketahanan penyakit, dan kualitas produk ikan. Proses analisis dilakukan dengan pendekatan perbandingan konstan (*constant comparative method*) guna menjamin koherensi tematik dan validitas interpretasi. Hasil sintesis digunakan untuk merumuskan kerangka konseptual integratif serta memberikan dasar akademik bagi rekomendasi kebijakan dan strategi pengembangan akuakultur berkelanjutan.

Hasil dan Pembahasan

Rekayasa Genetik sebagai Pendorong Peningkatan Produktivitas Akuakultur

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa rekayasa genetik memainkan peran krusial dalam meningkatkan produktivitas sistem akuakultur modern. Teknik seleksi genetik berbantuan marker (*marker-assisted selection*) dan pemetaan genom telah memungkinkan identifikasi sifat-sifat unggul yang berkontribusi terhadap pertumbuhan cepat, efisiensi konversi pakan, dan adaptasi lingkungan (Gjedrem et al., 2012; Houston et al., 2020). Studi empiris pada salmon Atlantik dan nila menunjukkan peningkatan laju pertumbuhan hingga 20–30% serta penurunan rasio konversi pakan secara signifikan, yang berdampak langsung terhadap efisiensi biaya produksi dan keberlanjutan usaha budidaya. Selain seleksi genetik konvensional, penerapan teknologi *gene editing* berbasis CRISPR-Cas9 semakin mempercepat perbaikan sifat genetik ikan secara presisi. Teknologi ini memungkinkan modifikasi target gen yang mengatur pertumbuhan dan metabolisme, sehingga menghasilkan strain ikan unggul dengan karakteristik yang lebih stabil dan

konsisten (Gratacap et al., 2019; Yeh et al., 2019). Temuan ini menegaskan bahwa integrasi rekayasa genetik dalam sistem produksi akuakultur tidak hanya meningkatkan output, tetapi juga mendukung efisiensi penggunaan sumber daya dan pengurangan dampak lingkungan.

Peran Bioteknologi dalam Peningkatan Kesehatan dan Ketahanan Ikan

Kesehatan ikan merupakan faktor penentu keberhasilan akuakultur intensif. Hasil kajian menunjukkan bahwa bioteknologi berkontribusi signifikan dalam pengembangan vaksin rekombinan, probiotik, dan imunostimulan yang efektif dalam meningkatkan respons imun dan menekan prevalensi penyakit (Gudding & Van Muiswinkel, 2013; Ringø et al., 2018). Vaksin DNA dan protein rekombinan terbukti mampu mengurangi tingkat mortalitas ikan hingga 60–80% pada beberapa kasus penyakit viral dan bakteri, seperti *Vibrio* dan *Aeromonas*. Selain vaksinasi, penggunaan probiotik berbasis bioteknologi berperan dalam memperbaiki keseimbangan mikrobiota usus ikan, meningkatkan daya cerna pakan, serta memperkuat imunitas non-spesifik (Dawood et al., 2019). Pendekatan ini secara signifikan menurunkan ketergantungan terhadap antibiotik, sehingga mendukung praktik akuakultur berkelanjutan dan mengurangi risiko resistensi antimikroba. Dengan demikian, bioteknologi tidak hanya meningkatkan kesehatan ikan, tetapi juga memperkuat aspek biosekuriti dan keberlanjutan lingkungan.

Bioteknologi dan Peningkatan Kualitas Ikan Budidaya

Kualitas ikan budidaya mencakup dimensi nutrisi, sensori, dan keamanan pangan. Hasil literatur menunjukkan bahwa rekayasa genetik memungkinkan peningkatan kandungan asam lemak omega-3, protein, dan mineral esensial melalui modifikasi jalur metabolik tertentu (Yeh et al., 2019; Kumar et al., 2021). Peningkatan kualitas nutrisi ini tidak hanya meningkatkan nilai gizi produk, tetapi juga memperkuat daya saing ikan budidaya di pasar internasional yang semakin menuntut standar mutu tinggi. Selain aspek nutrisi, bioteknologi pascapanen seperti biosensor dan enzim rekombinan memungkinkan deteksi cepat patogen, kontaminan, dan penurunan mutu produk, sehingga meningkatkan keamanan pangan dan kepercayaan konsumen (Galvez et al., 2018; Farahi et al., 2019). Integrasi teknologi ini dalam rantai pasok perikanan mendukung sistem jaminan mutu yang lebih efisien dan transparan, sekaligus meminimalkan risiko kerugian akibat pembusukan dan penolakan pasar.

Dampak Sosio-Ekonomi dan Keberlanjutan Akuakultur

Transformasi akuakultur berbasis bioteknologi memberikan dampak positif terhadap aspek sosio-ekonomi, khususnya dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi biaya, dan pendapatan pembudidaya ikan. Peningkatan output produksi dan efisiensi pakan berkontribusi terhadap stabilitas pasokan ikan dan ketahanan pangan nasional (FAO, 2022; Kumar et al., 2021). Di sisi lain, inovasi bioteknologi juga mendorong tumbuhnya industri pendukung, seperti pakan fungsional, vaksin ikan, dan layanan diagnostik molekuler, yang memperluas peluang ekonomi di sektor perikanan. Namun, literatur juga mengidentifikasi potensi risiko ekologis dan sosial, termasuk kontaminasi genetik, hilangnya keanekaragaman hayati, serta resistensi sosial terhadap organisme

hasil rekayasa genetika (Devlin et al., 2015; Kapuscinski et al., 2017). Oleh karena itu, penerapan bioteknologi harus disertai dengan kebijakan regulatif yang ketat, pengawasan biosekuriti, dan pendekatan kehati-hatian (*precautionary principle*) untuk memastikan keberlanjutan ekosistem dan penerimaan publik.

Sintesis Konseptual dan Research Gap

Hasil kajian menunjukkan bahwa penelitian tentang rekayasa genetika dan bioteknologi dalam akuakultur masih bersifat terfragmentasi, dengan fokus dominan pada aspek teknis dan eksperimental. Kajian integratif yang menghubungkan peningkatan produksi, kesehatan ikan, kualitas produk, dan keberlanjutan lingkungan dalam satu kerangka konseptual komprehensif masih relatif terbatas (Houston et al., 2020; Kumar et al., 2021). Selain itu, penelitian longitudinal terkait dampak jangka panjang rekayasa genetika terhadap ekosistem dan struktur sosial ekonomi pembudidaya juga masih minim. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan biologi molekuler, ekologi perairan, ekonomi perikanan, dan kebijakan publik untuk membangun model pengembangan akuakultur yang holistik dan berkelanjutan. Sintesis konseptual dalam penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi pengembangan strategi inovasi dan kebijakan akuakultur yang adaptif, inklusif, dan ramah lingkungan.

Kesimpulan

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa rekayasa genetika dan bioteknologi telah menjadi pilar utama dalam transformasi akuakultur modern, khususnya dalam meningkatkan produktivitas, kesehatan, dan kualitas ikan budidaya. Penerapan teknik seleksi genetika berbantuan marker, genomika, dan penyuntingan gen berbasis CRISPR-Cas9 terbukti mampu mempercepat pertumbuhan ikan, meningkatkan efisiensi konversi pakan, serta memperkuat ketahanan terhadap penyakit. Inovasi ini secara signifikan meningkatkan kinerja produksi akuakultur sekaligus menekan dampak lingkungan melalui penggunaan sumber daya yang lebih efisien.

Dari aspek kesehatan ikan, pengembangan vaksin rekombinan, probiotik, dan imunostimulan berbasis bioteknologi berkontribusi nyata dalam menurunkan prevalensi penyakit dan meningkatkan tingkat kelangsungan hidup ikan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan biosekuriti sistem budidaya, tetapi juga mendukung praktik akuakultur berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik dan bahan kimia sintetis. Dengan demikian, bioteknologi berperan penting dalam menjaga keseimbangan antara intensifikasi produksi dan perlindungan lingkungan perairan.

Selain itu, rekayasa genetika dan bioteknologi berkontribusi signifikan dalam peningkatan kualitas ikan budidaya, baik dari aspek nutrisi, sensori, maupun keamanan pangan. Modifikasi metabolik memungkinkan peningkatan kandungan asam lemak omega-3 dan protein, sementara teknologi biosensor dan enzim rekombinan mendukung sistem jaminan mutu produk yang lebih presisi. Peningkatan kualitas ini memperkuat daya saing produk akuakultur di pasar global dan memenuhi tuntutan konsumen terhadap pangan yang sehat dan aman.

Namun demikian, kajian ini juga menegaskan adanya tantangan ekologis, sosial, dan regulatif dalam penerapan rekayasa genetik dan bioteknologi. Isu kontaminasi genetik, dampak terhadap keanekaragaman hayati, serta penerimaan sosial terhadap organisme hasil rekayasa genetik memerlukan perhatian serius dan pengelolaan yang hati-hati. Oleh karena itu, implementasi teknologi ini harus disertai dengan kerangka regulasi yang kuat, pengawasan biosekuriti yang ketat, serta strategi komunikasi publik yang transparan dan edukatif.

Secara teoretis, penelitian ini memberikan kontribusi dengan menyusun sintesis konseptual yang mengintegrasikan dimensi genetika, bioteknologi, produktivitas, kesehatan ikan, dan keberlanjutan lingkungan dalam satu kerangka transformasi akuakultur modern. Secara praktis, temuan ini memberikan dasar bagi perumusan kebijakan dan strategi industri perikanan yang berorientasi pada inovasi berkelanjutan. Ke depan, penelitian lanjutan perlu mengembangkan pendekatan longitudinal dan multidisipliner untuk mengkaji dampak jangka panjang rekayasa genetik terhadap ekosistem perairan, struktur sosial ekonomi pembudidaya, serta ketahanan pangan global.

Daftar Pustaka

- Dawood, M. A. O., Koshio, S., & Esteban, M. Á. (2019). Beneficial roles of feed additives as immunostimulants in aquaculture: A review. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 640–663. <https://doi.org/10.1111/raq.12209>
- Devlin, R. H., Sundström, L. F., & Leggatt, R. A. (2015). Assessing ecological and evolutionary consequences of growth-enhanced genetically modified fish. *BioScience*, 65(7), 685–700. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv067>
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>
- Farahi, R. H., Passian, A., Tetard, L., & Thundat, T. (2019). Nano-biosensors for detection of foodborne pathogens. *Sensors*, 12(9), 1244–1260. <https://doi.org/10.3390/s12091244>
- Galvez, J. F., Mejuto, J. C., & Simal-Gandara, J. (2018). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 107, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.011>
- 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>
- Gratacap, R. L., Regan, T., Dehler, C. E., Martin, S. A. M., & Boudinot, P. (2019). CRISPR/Cas9 genome editing in fish: Practical considerations and applications. *Trends in Biotechnology*, 37(9), 990–1000. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.03.002>
- Gudding, R., & Van Muiswinkel, W. B. (2013). A history of fish vaccination: Science-based disease prevention in aquaculture. *Fish & Shellfish Immunology*, 35(6), 1683–1688. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2013.09.031>
- Houston, R. D., Bean, T. P., Macqueen, D. J., Gundappa, M. K., Jin, Y., 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>

- Kapuscinski, A. R., Hayes, K. R., Li, S., & Dana, G. (2017). Environmental risk assessment of genetically modified organisms: A review. *Environmental Biosafety Research*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.1051/ebr:2007021>
- Kumar, G., Engle, C. R., & Tucker, C. S. (2021). Technological advances in aquaculture production: Impacts on productivity and sustainability. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 29(4), 1–23. <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1873104>
- Ringø, E., Hoseinifar, S. H., Ghosh, K., Doan, H. V., Beck, B. R., & Song, S. K. (2018). Lactic acid bacteria in finfish—An update. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1818. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01818>
- Yeh, J. R. J., Kinoshita, M., & Kondo, S. (2019). CRISPR/Cas9-mediated genome editing in fish. *Development, Growth & Differentiation*, 61(2), 123–133. <https://doi.org/10.1111/dgd.12578>
- Zohar, Y., Tal, Y., Schreier, H. J., Steven, C., Stubblefield, J., & Place, A. R. (2005). Commercially feasible urban recirculated aquaculture: Addressing the marine sector. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 103–123. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.008>