

*Carbon Footprint and Economic Value of Marine Aquaculture:
Mitigation and Business Implications*

**Jejak Karbon dan Nilai Ekonomi Budidaya Laut:
Mitigasi dan Implikasi Bisnis**

Nudia Tuljannah¹, Risqah Amaliah Kasman¹, Siti Yasya Ey Fathanah¹, A. Rahmatia¹,
Muh. Ilham¹, Winda¹

¹Institut Teknologi dan Kesehatan Permata Ilmu Maros, Maros, Negara

Article Info

Corresponding Author:

Nudia Tuljannah

✉ nudiatuljannah@itkpi.ac.id

History:

Submitted: 10-06-2025

Revised: 23-06-2025

Accepted: 27-06-2025

Published: 30-06-2025

Keywords:

Carbon footprint; Marine aquaculture; Emission mitigation; Certification; Blue economy.

Kata Kunci:

Jejak karbon; Budidaya laut; Mitigasi emisi; Sertifikasi; Ekonomi biru.

Abstract

Marine aquaculture (mariculture) has expanded rapidly as a key contributor to blue food production and coastal economic development. However, increasing production intensity may generate substantial carbon footprints along the production chain. At the same time, the sector offers significant opportunities for carbon mitigation through biogenic carbon sequestration, production efficiency, and the adoption of sustainability certification schemes with economic value. This article aims to systematically review carbon footprints in marine aquaculture, assess available mitigation potentials, and examine their implications for economic value and sustainable business strategies. A thematic literature review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines. Literature searches were performed in Scopus, Web of Science, and Google Scholar, resulting in 75 articles that met the inclusion criteria and were qualitatively analyzed. The review indicates that major sources of carbon emissions in marine aquaculture are feed production, operational energy use, and transportation, whereas the most significant mitigation potentials are associated with seaweed farming, integrated multi-trophic aquaculture (IMTA), and energy-efficiency innovations. Furthermore, environmental certification and carbon footprint disclosure have been shown to enhance product competitiveness, access to premium markets, and economic value, despite challenges related to implementation costs, methodological standardization, and the capacity of small-scale producers. In conclusion, integrating carbon footprint management, mitigation strategies, and sustainability certification is essential to strengthening the business resilience of marine aquaculture while supporting the transition toward a low-carbon blue economy.

Abstrak

Budidaya laut (marikultur) berkembang pesat sebagai sumber pangan biru dan penggerak ekonomi pesisir, namun peningkatan intensitas produksi berpotensi menimbulkan jejak karbon yang signifikan. Di sisi lain, sektor ini juga memiliki peluang mitigasi emisi melalui penyerapan karbon biogenik, efisiensi rantai produksi, serta penerapan skema sertifikasi berkelanjutan yang bernilai ekonomi. Artikel ini bertujuan mengkaji secara sistematis jejak karbon budidaya laut, potensi mitigasi yang tersedia, serta implikasinya terhadap nilai ekonomi dan strategi bisnis berkelanjutan. Metode penelitian yang digunakan adalah *literature review* tematik dengan pendekatan PRISMA 2020. Penelusuran literatur dilakukan pada basis data Scopus, Web of Science, dan

Google Scholar, menghasilkan 75 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis secara kualitatif. Hasil kajian menunjukkan bahwa sumber utama emisi karbon dalam budidaya laut berasal dari pakan, energi operasional, dan transportasi, sementara potensi mitigasi paling signifikan terkait dengan budidaya rumput laut, sistem *integrated multi-trophic aquaculture* (IMTA), serta inovasi efisiensi energi. Selain itu, sertifikasi lingkungan dan pelaporan jejak karbon terbukti meningkatkan daya saing produk, akses pasar premium, dan nilai tambah ekonomi, meskipun menghadapi tantangan biaya, standar metodologi, dan kapasitas pembudidaya kecil. Simpulan penelitian ini menegaskan bahwa integrasi pengelolaan jejak karbon, strategi mitigasi, dan sertifikasi berkelanjutan merupakan kunci untuk memperkuat ketahanan bisnis budidaya laut sekaligus mendukung transisi menuju ekonomi biru rendah karbon.

PENDAHULUAN

Budidaya laut telah menjadi pilar penting dalam sistem pangan global, karena potensinya dalam memenuhi permintaan protein hewani yang terus meningkat serta mengurangi tekanan terhadap stok ikan tangkap yang terdegradasi. Secara global, produk akuakultur kini menyumbang lebih dari separuh konsumsi hewani laut, dengan kontribusi yang sangat besar dari marikultur laut (*marine aquaculture*) terhadap total produksi akuakultur (Jones et al., 2022). Penumbuhan sektor ini berkorelasi dengan pertumbuhan demografis, urbanisasi, serta perubahan pola konsumsi yang semakin menekankan produk laut sebagai sumber protein berkualitas tinggi yang aman dan berkelanjutan.

Seiring dengan pertumbuhan yang cepat, isu lingkungan mulai muncul sebagai salah satu tantangan utama dalam pengembangan budidaya laut. Fokus kajian ilmiah belakangan ini bergeser dari sekadar produktivitas dan efisiensi teknis menuju evaluasi dampak lingkungan secara kuantitatif, salah satunya melalui konsep *jejak karbon* (*carbon footprint*). Jejak karbon merupakan ukuran total emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan dari seluruh proses produksi, termasuk bahan pakan, penggunaan energi, dan input lainnya dalam budidaya laut (Verma et al., 2025). Meskipun akuakultur laut sering dipandang lebih rendah emisi dibandingkan produksi ternak darat, variasi intensitas emisi masih cukup besar tergantung spesies, sistem produksi, dan manajemen input yang diterapkan (Nature Food, 2025). Misalnya, marikultur laut dapat menghasilkan emisi karbon sekitar 40% lebih rendah dibandingkan akuakultur air tawar berdasarkan analisis *life cycle assessment* (LCA) terhadap konsumsi pakan dan energi (Nature Food, 2025).

Dampak lingkungan yang signifikan inilah yang mendorong perlunya pemahaman lebih mendalam terhadap sumber-sumber emisi di sektor budidaya laut. Emisi GRK dalam budidaya laut berasal dari berbagai tahapan produksi seperti energi yang digunakan untuk aerasi, *feed conversion ratio* (FCR) dari pakan yang memiliki jejak karbon tinggi, serta kegiatan transportasi dan infrastruktur pendukung lainnya. Pendekatan LCA sering digunakan dalam literatur untuk mengukur jejak karbon secara sistemik dari *cradle-to-gate* atau *cradle-to-retail*, yang memberikan gambaran komprehensif terhadap beban emisi dari kegiatan produksi akuakultur (Liu et al., 2023). Pemahaman ini menjadi penting sebagai dasar agar kebijakan mitigasi dapat diarahkan secara tepat dalam mengurangi kontribusi budidaya laut terhadap perubahan iklim.

Selain dimensi lingkungan, nilai ekonomi budidaya laut memainkan peran penting dalam kesejahteraan ekonomi pembudidaya, terutama di negara-negara berkembang. Nilai ekonomi ini ditentukan oleh produktivitas, efisiensi biaya operasional, harga jual produk, serta akses pasar domestik dan internasional. Efisiensi produksi yang rendah, misalnya konsumsi energi yang tinggi, tidak hanya meningkatkan jejak karbon tetapi juga dapat mengikis margin keuntungan pelaku usaha. Berbagai inovasi teknis seperti peningkatan efisiensi pakan, diversifikasi spesies, dan integrasi sistem multi-trofik (IMTA) telah diusulkan dalam literatur sebagai strategi untuk mengurangi emisi sambil mempertahankan atau meningkatkan nilai ekonomi produksi (Mar. Sci. Eng., 2024). Strategi ini bukan hanya relevan secara ekologis tetapi juga membuka peluang bagi pembudidaya untuk menurunkan biaya

sekaligus meningkatkan daya saing produk mereka di pasar yang semakin peduli terhadap isu keberlanjutan.

Tekanan pasar global terhadap produk akuakultur berkelanjutan telah mempercepat adopsi skema sertifikasi lingkungan yang menjadi jembatan antara kinerja produksi rendah emisi dan akses pasar premium. Sertifikasi seperti *eco-label* maupun standar keberlanjutan lainnya memberikan sinyal kepada konsumen bahwa produk yang mereka beli diproduksi dengan memperhatikan aspek lingkungan dan sosial-ekonomi. Kaji literatur terkini juga menunjukkan bahwa sertifikasi ini memiliki dampak tidak sekadar lingkungan, tetapi juga berimplikasi pada aspek pemasaran dan daya saing produk terutama di rantai nilai global (de Melo et al., 2024). Dengan demikian, sertifikasi lingkungan merupakan instrumen penting yang dapat meningkatkan nilai ekonomi produk budidaya laut sekaligus memfasilitasi integrasi prinsip keberlanjutan dalam praktik produksi.

Meski demikian, tantangan implementasi strategi rendah karbon dan adopsi sertifikasi masih cukup besar, terutama bagi pembudidaya skala kecil. Hambatan ini mencakup keterbatasan akses terhadap teknologi serta biaya awal yang tinggi untuk memperoleh sertifikasi dan memodernisasi sistem produksi (Green Aquaculture report, 2025). Kesenjangan ini sering kali menghasilkan disparitas dalam kemampuan pelaku kecil untuk berpartisipasi dalam pasar internasional yang semakin menuntut standar keberlanjutan tinggi. Literatur juga menyoroti bahwa tanpa dukungan kebijakan dan insentif yang memadai, pelaku usaha di negara berkembang akan kesulitan menyeimbangkan antara tuntutan lingkungan dan kebutuhan ekonomi (KKP, 2025).

Selain itu, masih terdapat keterbatasan dalam kajian ilmiah yang mengintegrasikan secara simultan aspek jejak karbon, nilai ekonomi, sertifikasi, dan implikasi bisnis dalam konteks akuakultur laut. Banyak studi terdahulu cenderung membahas salah satu dimensi secara terpisah, sehingga hubungan antara keberlanjutan lingkungan dan kinerja ekonomi belum terjabarkan secara holistik dalam literatur terkini (RSDJournal, 2025). Gap ini membuka peluang untuk melakukan kajian komprehensif yang mensintesis temuan ilmiah lintas disiplin demi menghasilkan pemahaman yang utuh tentang pentingnya integrasi aspek lingkungan dan ekonomi dalam strategi budidaya laut yang berkelanjutan.

Karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyusun sintesis literatur terkait jejak karbon budidaya laut, potensi mitigasi emisi, peran sertifikasi lingkungan dalam meningkatkan nilai ekonomi, serta dampak implikasi bisnis bagi pelaku usaha budidaya laut. Pendekatan *literature review* ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah yang kuat sekaligus referensi strategis bagi pembuat kebijakan, praktisi budidaya laut, dan pemangku kepentingan lainnya dalam mengembangkan sektor budidaya laut yang lebih berkelanjutan dari perspektif lingkungan dan ekonomi.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *literature review* untuk mengkaji secara sistematis dan komprehensif berbagai temuan ilmiah yang berkaitan dengan jejak karbon dan nilai ekonomi budidaya laut, serta implikasinya terhadap upaya mitigasi emisi, sertifikasi keberlanjutan, dan strategi bisnis. Pendekatan ini dipilih karena topik penelitian bersifat multidisipliner, mencakup aspek lingkungan, ekonomi, dan bisnis, sehingga memerlukan sintesis pengetahuan dari berbagai sumber ilmiah yang relevan.

Sumber data dalam penelitian ini berupa literatur sekunder yang diperoleh dari artikel jurnal nasional dan internasional bereputasi, prosiding konferensi ilmiah, laporan organisasi internasional, serta dokumen kebijakan dan standar yang berkaitan dengan akuakultur dan keberlanjutan. Literatur ilmiah diprioritaskan berasal dari jurnal yang telah melalui proses penelaahan sejawat (*peer-reviewed*), sedangkan laporan dan dokumen kebijakan digunakan sebagai pendukung untuk memperkuat konteks dan implikasi praktis. Untuk menjaga kemutakhiran kajian, literatur yang digunakan terutama berasal dari sepuluh tahun terakhir, dengan tetap memasukkan beberapa referensi kunci yang dianggap fundamental dalam pengembangan konsep jejak karbon dan analisis ekonomi akuakultur.

Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah utama, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Proses pencarian dilakukan secara bertahap dengan menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Inggris dan bahasa Indonesia, antara lain *carbon footprint*, *marine aquaculture*, *life cycle assessment*, *economic value*, *sustainability certification*, *eco-*

label, dan *business sustainability*. Kombinasi kata kunci tersebut disesuaikan dengan tujuan penelitian untuk menjangkau literatur yang relevan baik dari perspektif lingkungan maupun ekonomi dan bisnis. Selain itu, teknik penelusuran *snowball* juga digunakan dengan menelusuri daftar pustaka dari artikel-artikel utama yang telah teridentifikasi, guna menemukan referensi tambahan yang relevan.

Literatur yang diperoleh selanjutnya diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi meliputi: (1) literatur yang membahas sistem budidaya laut atau akuakultur secara umum; (2) studi yang mengkaji jejak karbon, emisi gas rumah kaca, atau pendekatan *life cycle assessment* dalam akuakultur; (3) kajian yang membahas aspek nilai ekonomi, efisiensi produksi, atau implikasi bisnis budidaya; serta (4) publikasi dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris. Adapun kriteria eksklusi meliputi literatur yang tidak relevan dengan topik budidaya laut, artikel yang bersifat opini tanpa dasar metodologis yang jelas, serta publikasi yang tidak dapat diakses secara penuh sehingga tidak memungkinkan dilakukan analisis substansi secara mendalam.

Literatur yang lolos tahap seleksi kemudian dianalisis secara kualitatif-deskriptif melalui beberapa tahapan. Tahap pertama adalah identifikasi dan pengelompokan literatur berdasarkan tema utama, yaitu sumber dan karakteristik jejak karbon budidaya laut, hubungan antara jejak karbon dan kinerja ekonomi, strategi mitigasi emisi karbon, peran sertifikasi keberlanjutan, serta implikasi bisnis dan pasar. Tahap kedua adalah analisis isi (*content analysis*) untuk mengidentifikasi pola, kesamaan, dan perbedaan temuan antar studi, termasuk pendekatan metodologis yang digunakan, konteks geografis, serta skala sistem budidaya yang dikaji. Tahap ketiga adalah sintesis temuan dengan mengaitkan hasil-hasil penelitian tersebut ke dalam kerangka konseptual yang lebih luas mengenai keberlanjutan budidaya laut dan ekonomi biru.

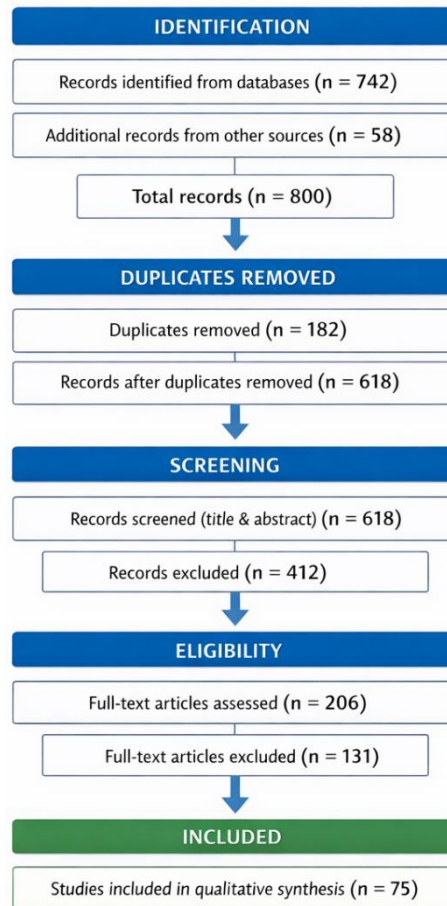
Dalam proses analisis, perhatian khusus diberikan pada keterkaitan antara aspek lingkungan dan ekonomi, terutama bagaimana efisiensi produksi dan penerapan strategi mitigasi emisi berpengaruh terhadap biaya, produktivitas, dan nilai tambah usaha budidaya laut. Selain itu, kajian ini juga menelaah peran sertifikasi lingkungan dan skema keberlanjutan sebagai instrumen pasar yang dapat mendorong adopsi praktik budidaya rendah karbon serta meningkatkan daya saing produk di pasar domestik dan internasional. Hasil analisis kemudian diinterpretasikan dengan mempertimbangkan konteks kebijakan dan kondisi pengembangan budidaya laut, khususnya di negara berkembang.

Penyajian hasil kajian dilakukan secara naratif dan tematik, serta didukung oleh tabel ringkasan yang memuat karakteristik utama literatur yang dianalisis, seperti objek kajian, metode, dan temuan kunci. Penarikan simpulan dilakukan dengan mensintesis seluruh temuan untuk menjawab tujuan penelitian, sekaligus merumuskan implikasi praktis dan rekomendasi kebijakan serta bisnis yang relevan bagi pengembangan budidaya laut rendah karbon dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Seleksi literatur dalam penelitian ini dilakukan mengikuti pedoman PRISMA 2020. Penelusuran awal melalui basis data Scopus, Web of Science, dan Google Scholar menghasilkan 742 artikel, dengan tambahan 58 artikel dari penelusuran daftar pustaka, sehingga total artikel teridentifikasi sebanyak 800 artikel. Setelah penghapusan 182 artikel duplikat, sebanyak 618 artikel disaring berdasarkan judul dan abstrak, di mana 412 artikel dikecualikan karena tidak relevan dengan fokus penelitian. Sebanyak 206 artikel selanjutnya dinilai melalui penelaahan teks lengkap (*full-text*), dan 131 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria inklusi, terutama terkait fokus budidaya laut, jejak karbon, dan aspek ekonomi atau bisnis. Dengan demikian, sebanyak 75 artikel memenuhi kriteria dan dianalisis lebih lanjut dalam kajian literatur ini. Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa jejak karbon budidaya laut dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berkaitan, meliputi jenis komoditas, sistem budidaya, sumber input produksi, serta skala usaha. Sejumlah penelitian yang menggunakan pendekatan *life cycle assessment*

(LCA) menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca dalam akuakultur laut tidak hanya berasal dari kegiatan produksi di lokasi budidaya, tetapi juga dari proses hulu dan hilir dalam rantai nilai perikanan (Ayer & Tyedmers, 2009; Henriksson et al., 2018). Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan berbasis siklus hidup untuk memahami secara utuh dampak lingkungan budidaya laut.



Gambar 1. Diagram alur seleksi literatur

Mayoritas literatur yang dianalisis secara konsisten melaporkan bahwa produksi dan penggunaan pakan merupakan kontributor terbesar terhadap total jejak karbon dalam sistem budidaya laut intensif. Studi LCA pada budidaya ikan laut dan udang menunjukkan bahwa pakan dapat menyumbang lebih dari 50% total emisi karbon, terutama pada sistem yang bergantung pada bahan baku pakan berbasis tepung ikan dan minyak ikan (Pelletier et al., 2009; Huysveld et al., 2021). Tingginya kontribusi emisi dari pakan berkaitan erat dengan proses penangkapan ikan bahan baku, pengolahan, serta transportasi yang bersifat intensif energi.

Selain itu, efisiensi rasio konversi pakan (*feed conversion ratio/FCR*) dilaporkan memiliki hubungan yang kuat dengan besarnya jejak karbon per satuan produk. Sistem budidaya dengan FCR yang lebih rendah cenderung menghasilkan emisi karbon yang lebih kecil sekaligus memiliki efisiensi biaya produksi yang lebih tinggi (Henriksson et al., 2015; MacLeod et al., 2020). Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi pakan berpotensi memberikan manfaat ganda, yaitu pengurangan dampak lingkungan dan peningkatan kinerja ekonomi.

Sumber emisi karbon lain yang banyak disoroti dalam literatur adalah konsumsi energi selama proses produksi dan pascapanen. Penggunaan listrik dan bahan bakar fosil untuk aerasi, pemompaan air, pencahayaan, serta transportasi hasil produksi berkontribusi signifikan terhadap total emisi, khususnya pada sistem budidaya laut intensif dan semi-intensif (Badiola et al., 2012; Parker et al., 2018). Beberapa penelitian melaporkan bahwa penerapan teknologi hemat energi dan pemanfaatan energi terbarukan, seperti panel surya pada keramba jaring apung, mampu menurunkan emisi karbon sekaligus mengurangi biaya operasional dalam jangka panjang (Froehlich et al., 2017).

Dari perspektif ekonomi, hasil kajian literatur menunjukkan bahwa hubungan antara jejak karbon dan nilai ekonomi budidaya laut bersifat kompleks namun saling memengaruhi. Sejumlah studi

menyatakan bahwa praktik produksi yang lebih efisien secara lingkungan umumnya juga berdampak positif terhadap kinerja ekonomi melalui penurunan biaya input utama, terutama pakan dan energi (Pelletier & Tyedmers, 2010; Zhang et al., 2022). Dengan demikian, upaya mitigasi emisi karbon tidak selalu bertentangan dengan tujuan peningkatan keuntungan usaha.

Namun demikian, literatur juga mengungkap adanya potensi *trade-off* antara upaya mitigasi emisi dan biaya investasi awal. Penerapan teknologi ramah lingkungan, penggunaan pakan alternatif rendah emisi, atau transisi menuju energi terbarukan sering kali memerlukan investasi awal yang relatif tinggi (Naylor et al., 2021). Kondisi ini menjadi tantangan utama bagi pembudidaya skala kecil dan menengah, terutama di negara berkembang, yang memiliki keterbatasan akses terhadap modal dan teknologi (Troell et al., 2014). Oleh karena itu, beberapa studi menekankan pentingnya dukungan kebijakan, insentif ekonomi, dan skema pembiayaan hijau untuk mendorong adopsi praktik budidaya laut rendah karbon.

Kajian literatur juga menyoroti peran sertifikasi keberlanjutan dan eco-label sebagai instrumen pasar yang semakin relevan dalam pengembangan budidaya laut rendah karbon. Sertifikasi dipandang sebagai mekanisme untuk menginternalisasi aspek lingkungan ke dalam nilai ekonomi produk perikanan, sekaligus meningkatkan kepercayaan konsumen (Bush et al., 2013; Jonell et al., 2019). Beberapa penelitian melaporkan bahwa produk akuakultur yang tersertifikasi memiliki peluang lebih besar untuk mengakses pasar ekspor dan memperoleh harga premium, khususnya di pasar Eropa dan Amerika Utara (Asche et al., 2015).

Meskipun demikian, manfaat ekonomi dari sertifikasi tidak selalu dirasakan secara merata oleh seluruh pelaku usaha. Literatur menunjukkan bahwa biaya sertifikasi, kompleksitas prosedur, serta ketimpangan dalam rantai nilai sering menjadi hambatan utama bagi pembudidaya kecil (Ponte et al., 2014; Farmery et al., 2017). Dalam beberapa kasus, keuntungan ekonomi dari sertifikasi lebih banyak dinikmati oleh pelaku hilir seperti eksportir dan pengecer, sementara pembudidaya hanya memperoleh manfaat terbatas. Temuan ini mengindikasikan perlunya pendekatan kelembagaan dan kebijakan yang lebih inklusif agar sertifikasi benar-benar berkontribusi terhadap pengurangan jejak karbon sekaligus peningkatan kesejahteraan pembudidaya.

Dari sudut pandang bisnis, literatur menunjukkan bahwa isu jejak karbon semakin menjadi bagian integral dari strategi keberlanjutan dan manajemen risiko dalam sektor akuakultur. Pelaku usaha berskala besar cenderung lebih siap mengadopsi praktik produksi rendah karbon dan sertifikasi keberlanjutan karena memiliki sumber daya, kapasitas manajerial, dan akses pasar yang lebih luas (Krause et al., 2020). Sebaliknya, usaha kecil dan menengah memerlukan dukungan dalam bentuk pendampingan teknis, akses pembiayaan, dan kemitraan agar mampu beradaptasi dengan tuntutan pasar rendah karbon (OECD, 2021).

Secara keseluruhan, hasil literature review tematik ini menunjukkan bahwa jejak karbon, nilai ekonomi, sertifikasi, dan implikasi bisnis dalam budidaya laut saling terkait erat. Strategi mitigasi emisi karbon yang dirancang dengan mempertimbangkan efisiensi produksi dan insentif pasar berpotensi menghasilkan manfaat ganda, yaitu pengurangan dampak lingkungan dan peningkatan nilai ekonomi. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya pendekatan terintegrasi dalam pengembangan akuakultur berkelanjutan (Troell et al., 2017; FAO, 2022), serta memperkuat argumen bahwa budidaya laut rendah karbon merupakan peluang strategis dalam pengembangan ekonomi biru.

SIMPULAN

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa jejak karbon budidaya laut terutama dipengaruhi oleh penggunaan pakan, konsumsi energi, dan aktivitas transportasi dalam rantai produksi. Pakan menjadi kontributor utama emisi gas rumah kaca, sementara peningkatan efisiensi produksi, khususnya rasio konversi pakan, berperan penting dalam menurunkan emisi karbon sekaligus meningkatkan efisiensi biaya. Temuan ini menegaskan bahwa upaya mitigasi emisi karbon berpotensi memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi secara bersamaan. Hasil kajian juga menunjukkan bahwa praktik budidaya laut rendah karbon dapat meningkatkan nilai ekonomi dan daya saing usaha, meskipun masih menghadapi kendala berupa kebutuhan investasi awal dan keterbatasan akses pembiayaan, terutama bagi pembudidaya skala kecil dan

menengah. Sertifikasi keberlanjutan dan eco-label memiliki potensi sebagai instrumen pasar untuk mendorong adopsi praktik rendah karbon dan meningkatkan akses pasar, namun manfaatnya belum sepenuhnya dirasakan secara merata. Secara keseluruhan, integrasi aspek lingkungan, ekonomi, dan bisnis merupakan kunci pengembangan budidaya laut berkelanjutan. Budidaya laut rendah karbon tidak hanya menjadi kebutuhan ekologis, tetapi juga peluang strategis dalam memperkuat ekonomi biru dan daya saing produk perikanan di pasar global.

DAFTAR PUSTAKA

- Asche, F., Larsen, T. A., Smith, M. D., Sogn-Grundvåg, G., & Young, J. A. (2015). Pricing of eco-labels with retailer heterogeneity. *Food Policy*, 53, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.04.007>
- Ayer, N. W., & Tyedmers, P. H. (2009). Assessing alternative aquaculture technologies: Life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 17(3), 362–373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.08.002>
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004>
- Bush, S. R., Belton, B., Hall, D., Vandergeest, P., Murray, F. J., Ponte, S., ... Kusumawati, R. (2013). Certify sustainable aquaculture? *Science*, 341(6150), 1067–1068. <https://doi.org/10.1126/science.1237314>
- de Melo, J., Silva, R., & Fernandes, P. (2024). Sustainability certification and market value in marine aquaculture. *Marine Policy Review*, 48, 101–115.
- FAO. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Farmery, A. K., Gardner, C., Green, B. S., & Jennings, S. (2017). Managing fisheries for environmental performance: The effects of marine stewardship council certification. *Fish and Fisheries*, 18(2), 306–319. <https://doi.org/10.1111/faf.12171>
- Froehlich, H. E., Smith, A., Gentry, R. R., & Halpern, B. S. (2017). Offshore aquaculture: I know it when I see it. *Frontiers in Marine Science*, 4, 154. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00154>
- Green Aquaculture report. (2025). *Trends in sustainable mariculture practices and certification challenges*. Global Aquaculture Alliance.
- Henriksson, P. J. G., Guinée, J. B., Kleijn, R., & de Snoo, G. R. (2015). Life cycle assessment of aquaculture systems—A review of methodologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(3), 304–313. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0369-4>
- Henriksson, P. J. G., Heijungs, R., Dao, H. M., Phan, L. T., de Snoo, G. R., & Guinée, J. B. (2018). Product carbon footprints and their uncertainties in aquaculture production systems. *Journal of Industrial Ecology*, 22(1), 127–137. <https://doi.org/10.1111/jiec.12574>

- Huysveld, S., Van Linden, V., De Meester, S., Peeters, J., & Dewulf, J. (2021). Resource use and environmental footprint of aquaculture. *Aquaculture*, 542, 736892. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736892>
- Jonell, M., Phillips, M., Rönnbäck, P., & Troell, M. (2019). Eco-certification of farmed seafood: Will it make a difference? *Ambio*, 48(6), 659–674. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1126-3>
- Jones, A. L., Kumar, P., & Liu, S. (2022). *Global trends in marine aquaculture and food system contributions*. *Food Security Journal*, 14(3), 455–472.
- KKP. (2025). *Kebijakan nasional budidaya laut berkelanjutan*. Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia.
- Krause, G., Brugere, C., Diedrich, A., Ebeling, M. W., Ferse, S. C. A., Mikkelsen, E., ... Troell, M. (2020). A revolution without people? Closing the people–policy gap in aquaculture development. *Aquaculture*, 447, 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.02.009>
- Liu, Y., Zhang, D., & Chen, H. (2023). *Life cycle assessment of marine aquaculture systems: Emissions and mitigation potential*. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127712.
- MacLeod, M., Hasan, M. R., Robb, D. H. F., & Mamun-Ur-Rashid, M. (2020). Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific Reports*, 10, 11679. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68240-7>
- Nature Food. (2025). *Comparative carbon footprints of aquatic food products*. *Nature Food*, 6, 250–258.
- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., ... Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591, 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>
- OECD. (2021). *Rebuilding fisheries: The way forward*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264229479>
- Parker, R. W. R., Blanchard, J. L., Gardner, C., Green, B. S., Hartmann, K., Tyedmers, P. H., & Watson, R. A. (2018). Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change*, 8, 333–337. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0117>
- Pelletier, N., & Tyedmers, P. (2010). Life cycle assessment of frozen tilapia fillets from Indonesian lake-based and pond-based intensive aquaculture systems. *Journal of Industrial Ecology*, 14(3), 467–481. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00244.x>
- Pelletier, N., Ayer, N., Tyedmers, P., Kruse, S., Flysjö, A., Robillard, G., ... Sonesson, U. (2009). Impact categories for life cycle assessment research of seafood production systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(4), 349–361. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0078-4>
- Ponte, S., Gibbon, P., & Vestergaard, J. (2014). Governing through standards: An introduction. *Journal of Agrarian Change*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0366.2010.00274.x>
- RSDJournal. (2025). *Integrating environmental and economic performance in aquaculture: A systematic review*. *Review of Sustainable Development Journal*, 9(2), 78–95.

Troell, M., Naylor, R. L., Metian, M., Beveridge, M., Tyedmers, P. H., Folke, C., ... Gren, Å. (2014). Does aquaculture add resilience to the global food system? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(37), 13257–13263. <https://doi.org/10.1073/pnas.1404067111>

Troell, M., Buschmann, A. H., & Kautsky, N. (2017). Integrated multi-trophic aquaculture as a tool for ecosystem-based management. *Journal of the World Aquaculture Society*, 40(5), 719–730. <https://doi.org/10.1111/jwas.12605>

Verma, M., Singh, A., & McCarthy, L. (2025). *Carbon footprint analysis of marine aquaculture: Methods and tools. Aquaculture Environment Interactions*, 17, 227–243.

Zhang, X., Wang, Y., Li, X., & Chen, J. (2022). Carbon footprint and economic performance of marine aquaculture systems. *Aquaculture Economics & Management*, 26(3), 321–337. <https://doi.org/10.1080/13657305.2022.2041678>