



# Biotechnological Approaches in Post-Harvest Handling and Quality Control of Capture Fisheries Products: A Systematic Review

(Pendekatan Bioteknologi dalam Penanganan Pascapanen dan Pengendalian Mutu Produk Perikanan Tangkap: Tinjauan Sistematis)

Dullah Irwan Latar <sup>1✉</sup>, Diana Yulanda Syahailatua <sup>2</sup>, Abu Samad Serang <sup>3</sup> dan Jilian Risky Huwae <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknologi Perikanan, Prodi Bioteknologi Perikanan, Politeknik Perikanan Negeri Tual, Kabupaten Tual, Maluku, Indonesia.

<sup>2</sup> Jurusan Teknologi Sumberdaya Perairan, Prodi Teknologi Budidaya Perikanan, Politeknik Perikanan Negeri Tual, Kabupaten Tual, Maluku, Indonesia.

<sup>3</sup> Jurusan Rekayasa Perikan Kelautan, Prodi Teknologi Penangkapan Ikan, Politeknik Perikanan Negeri Tual, Kabupaten Tual, Maluku, Indonesia.

<sup>4</sup> Jurusan Teknologi Perikanan, Prodi Bioteknologi Perikanan, Politeknik Perikanan Negeri Tual, Kabupaten Tual, Maluku, Indonesia.

Email: [irwan.latar@gmail.com](mailto:irwan.latar@gmail.com)

## Article Info:

Received: 26 Feb. 2026

Accepted: 14 April 2026

Online: 2 Mei 2026

## Article type:

<input type="checkbox"/>	Review Article
<input type="checkbox"/>	Common Ser. Article
<input checked="" type="checkbox"/>	Research Article

## Keyword:

Capture Fisheries; Post-Harvest Handling; Biotechnological Approaches; Quality Control; Biopreservation.

## Corresponding Author:

Dullah Irwan Latar  
Politeknik Perikanan Negeri Tual, Tual, Indonesia

Email: [irwan.latar@gmail.com](mailto:irwan.latar@gmail.com)



Copyright©2026, Dullah Irwan Latar, Diana Yulanda Syahailatua, Abu Samad Serang, Jilian Risky Huwae.

## Abstract

Postharvest losses and quality deterioration are major challenges in the capture fisheries sector, affecting food security and economic sustainability. Conventional preservation methods, such as chilling, freezing, and the use of chemicals, have limitations related to safety, environmental impacts, and consumer demand for natural products. Biotechnology approaches offer promising alternatives by utilizing microorganisms, bioactive metabolites, biodegradable biopolymers, molecular detection technologies, and biosensors to improve postharvest management and quality control of fishery products. This Systematic Literature Review (SLR) synthesizes studies published between 2020 and 2026, assessing effectiveness, technological trends, and research gaps related to biotechnology interventions in capture fisheries products. The findings indicate that microbial biopreservation, edible coatings, enzymatic treatments, molecular diagnostics, and nanobiotechnology have significant potential to extend shelf life, ensure safety, and maintain the sensory quality of products. However, most studies remain at the laboratory scale, with limited industrial application and system integration. This review serves as a comprehensive reference for researchers and industry practitioners in developing sustainable, innovative, and efficient postharvest systems.

## I. PENDAHULUAN

Sektor perikanan tangkap memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan global dan menyediakan sumber protein hewani berkualitas tinggi bagi masyarakat. Produk perikanan dikenal memiliki kandungan nutrisi yang tinggi, termasuk protein, asam lemak esensial, vitamin, dan mineral yang berkontribusi pada

kesehatan manusia. Namun, karakteristik biologis ikan yang mudah rusak menjadikannya rentan terhadap penurunan mutu selama penanganan pascapanen, terutama akibat aktivitas mikroba dan proses biokimia (Tavares et al., 2021). Kondisi ini menyebabkan tingginya tingkat kehilangan hasil yang berdampak pada efisiensi rantai pasok dan kesejahteraan pelaku usaha perikanan. Tantangan

tersebut semakin kompleks pada sistem distribusi yang belum didukung oleh manajemen rantai dingin yang optimal dan pengawasan mutu yang konsisten (Amelia et al., 2025).

Metode penanganan pascapanen konvensional seperti pendinginan, pembekuan, dan penggunaan bahan kimia pengawet masih menjadi praktik umum dalam industri perikanan. Meskipun efektif dalam memperlambat kerusakan, pendekatan ini memiliki keterbatasan terkait keamanan pangan, residu bahan kimia, serta dampak lingkungan yang ditimbulkan (Nendissa et al., 2023). Selain itu, tuntutan konsumen terhadap produk yang aman, alami, dan berkelanjutan terus meningkat seiring dengan berkembangnya kesadaran akan kesehatan dan lingkungan. Perubahan preferensi pasar ini mendorong perlunya inovasi teknologi yang mampu menjaga kualitas produk sekaligus memenuhi standar keberlanjutan global (Carlino-Costa & Belo, 2025). Oleh karena itu, transformasi menuju pendekatan yang lebih ramah lingkungan dan berbasis ilmu pengetahuan menjadi kebutuhan yang tidak dapat dihindari.

Perkembangan bioteknologi membuka peluang baru dalam meningkatkan efektivitas sistem penanganan pascapanen melalui pendekatan yang lebih presisi dan adaptif. Pemanfaatan mikroorganisme, metabolit bioaktif, serta material biopolimer biodegradable telah menunjukkan potensi dalam memperpanjang umur simpan dan meningkatkan keamanan produk perikanan. Teknologi preservasi aktif dan kemasan berbasis biopolimer semakin banyak diteliti sebagai alternatif yang mampu mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis (Barbosa & Teixeira, 2022). Selain itu, inovasi dalam sistem pengemasan berbasis biopolimer memberikan solusi untuk meningkatkan stabilitas produk sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Venkatesan et al., 2025). Integrasi teknologi ini juga mendukung pengembangan sistem pascapanen yang lebih efisien dan berkelanjutan (Arana-Linares et al., 2025).

Selain teknologi preservasi, perkembangan metode pengendalian mutu berbasis biologi dan digital juga menunjukkan kemajuan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Teknik deteksi molekuler memungkinkan identifikasi patogen secara cepat dan akurat sehingga dapat meningkatkan keamanan pangan dan ketertelusuran produk (Zhang et al., 2025). Penggunaan DNA barcoding juga berperan dalam memastikan keaslian spesies dan mencegah praktik

kecurangan dalam perdagangan produk perikanan (Filonzi et al., 2023). Di sisi lain, pengembangan biosensor memberikan peluang monitoring kualitas secara real-time sepanjang rantai distribusi (Majer-Baranyi et al., 2023). Kombinasi teknologi ini berpotensi meningkatkan transparansi dan efisiensi pengelolaan mutu produk perikanan tangkap.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan pendekatan bioteknologi dalam sistem pangan dan perikanan. Cocolin (2025) menunjukkan bahwa biopreservasi mikroba efektif dalam meningkatkan keamanan dan kualitas produk pangan melalui penghambatan pertumbuhan mikroorganisme pembusuk. Anumudu et al. (2024) melaporkan bahwa bakteri asam laktat memiliki peran penting dalam meningkatkan stabilitas dan keamanan produk melalui produksi senyawa antimikroba alami. Parada Fabián et al. (2025) menemukan bahwa bakteriosin memiliki potensi tinggi sebagai agen pengawet alami yang mampu menghambat pertumbuhan bakteri patogen. Temuan-temuan ini menegaskan peran penting agen biologis dalam mendukung sistem preservasi yang lebih aman dan berkelanjutan.

Berbagai kajian juga menyoroti efektivitas material biopolimer dan teknologi deteksi dalam meningkatkan mutu produk. Hussain et al. (2025) menunjukkan bahwa pelapisan berbasis kitosan mampu memperpanjang umur simpan dan menjaga kualitas produk selama penyimpanan. Karnwal et al. (2025) melaporkan bahwa penggunaan biopolimer alami sebagai edible coating efektif dalam mengurangi oksidasi dan kerusakan mikrobiologis pada produk pangan. Sobhan et al. (2025) menemukan bahwa biosensor berbasis IoT memungkinkan pemantauan kualitas secara real-time sehingga meningkatkan efisiensi pengendalian mutu. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi teknologi preservasi dan monitoring memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam sistem pascapanen perikanan.

Meskipun berbagai inovasi telah dikembangkan, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait integrasi teknologi bioteknologi dalam konteks perikanan tangkap yang memiliki karakteristik distribusi dan variabilitas lingkungan yang kompleks. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada skala laboratorium dan belum banyak mengevaluasi implementasi pada kondisi rantai pasok nyata (Vidza et al., 2025). Selain itu, kajian terkait analisis sistem dan pendekatan

multi-hurdle dalam preservasi produk perikanan masih terbatas (Tsironi et al., 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis secara sistematis perkembangan pendekatan bioteknologi dalam penanganan pascapanen dan pengendalian mutu produk perikanan tangkap menggunakan metode Systematic Literature Review. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam memetakan tren teknologi, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, serta memberikan rekomendasi strategis bagi pengembangan sistem pascapanen yang berkelanjutan.

Kajian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis dan akademik dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti bagi pemangku kepentingan sektor perikanan. Sintesis literatur yang komprehensif memungkinkan identifikasi teknologi yang paling efektif untuk mengurangi kehilangan hasil dan meningkatkan kualitas produk sepanjang rantai pasok. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi dasar pengembangan kebijakan dan inovasi teknologi yang selaras dengan prinsip keberlanjutan dan keamanan pangan (Atiweh et al., 2021). Penelitian ini juga berpotensi memperkuat integrasi antara pendekatan bioteknologi dan sistem manajemen mutu dalam industri perikanan tangkap. Dengan demikian, studi ini diharapkan mampu mendorong transformasi sistem pascapanen menuju praktik yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

## II. METOD PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan ilmiah terkait penerapan bioteknologi dalam penanganan pasca-panen dan pengendalian mutu produk perikanan tangkap. Pendekatan SLR dipilih karena mampu menyajikan telaah yang sistematis, transparan, dan berbasis bukti (*evidence-based*), sehingga hasil yang diperoleh memiliki tingkat objektivitas, reproducibility, dan relevansi praktis yang tinggi. Metode ini memungkinkan peneliti tidak sekadar merangkum literatur, tetapi juga menelaah tren teknologi, efektivitas pendekatan bioteknologi, serta kesenjangan penelitian yang perlu dikembangkan lebih lanjut dalam konteks industri perikanan tangkap.

Tahapan pelaksanaan SLR dimulai dari perumusan pertanyaan penelitian yang fokus pada jenis dan penerapan bioteknologi dalam penanganan pasca-panen produk perikanan tangkap, efektivitas teknologi bioteknologi dalam

mempertahankan kualitas, umur simpan, dan keamanan produk, serta kesenjangan penelitian dan potensi inovasi untuk implementasi industri skala besar maupun skala kecil. Penelusuran literatur dilakukan secara sistematis melalui basis data ilmiah bereputasi internasional, yaitu Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar, menggunakan kombinasi kata kunci seperti "post-harvest fish", "fish preservation", "biopreservation", "edible coating", "biosensor", "nanotechnology in fish preservation", "quality control", dan "shelf-life extension" dengan operator Boolean (AND, OR) untuk memastikan cakupan literatur yang relevan. Rentang publikasi dibatasi pada periode 2020–2026 guna mencakup inovasi teknologi terkini.

Artikel hasil identifikasi awal kemudian melalui proses penyaringan bertahap berdasarkan judul dan abstrak, di mana artikel yang tidak membahas bioteknologi atau pengendalian mutu produk perikanan tangkap dieliminasi. Selanjutnya dilakukan penilaian kelayakan melalui pembacaan teks lengkap untuk memastikan kesesuaian metodologi, fokus pada produk perikanan tangkap, dan kelengkapan data terkait efektivitas teknologi. Publikasi berupa opini, editorial, review non-sistematis, serta artikel tanpa data empiris dikeluarkan dari korpus akhir penelitian.

Setiap artikel yang lolos seleksi dievaluasi kualitasnya berdasarkan konsistensi metode, validitas analisis, serta transparansi penyajian data. Penelusuran sitasi manual (*backward* dan *forward citation tracking*) juga dilakukan untuk memastikan artikel penting yang relevan tidak terlewatkan. Data dari artikel terpilih diekstraksi ke dalam matriks sintesis yang memuat informasi mengenai penulis, tahun publikasi, jenis produk perikanan, jenis teknologi bioteknologi yang digunakan, serta temuan utama terkait efektivitas dan pengendalian mutu. Analisis dilakukan secara deskriptif-kuantitatif untuk mengidentifikasi kecenderungan teknologi yang paling efektif, serta secara tematik untuk mengelompokkan pendekatan bioteknologi berdasarkan prinsip kerja dan aplikasinya dalam industri.

Melalui pendekatan sintesis yang komprehensif ini, penelitian diharapkan mampu memberikan pemahaman yang terintegrasi mengenai strategi bioteknologi pasca-panen, efektivitasnya dalam pengendalian mutu, serta peluang inovasi yang dapat diimplementasikan secara praktis dalam sistem distribusi produk perikanan tangkap.

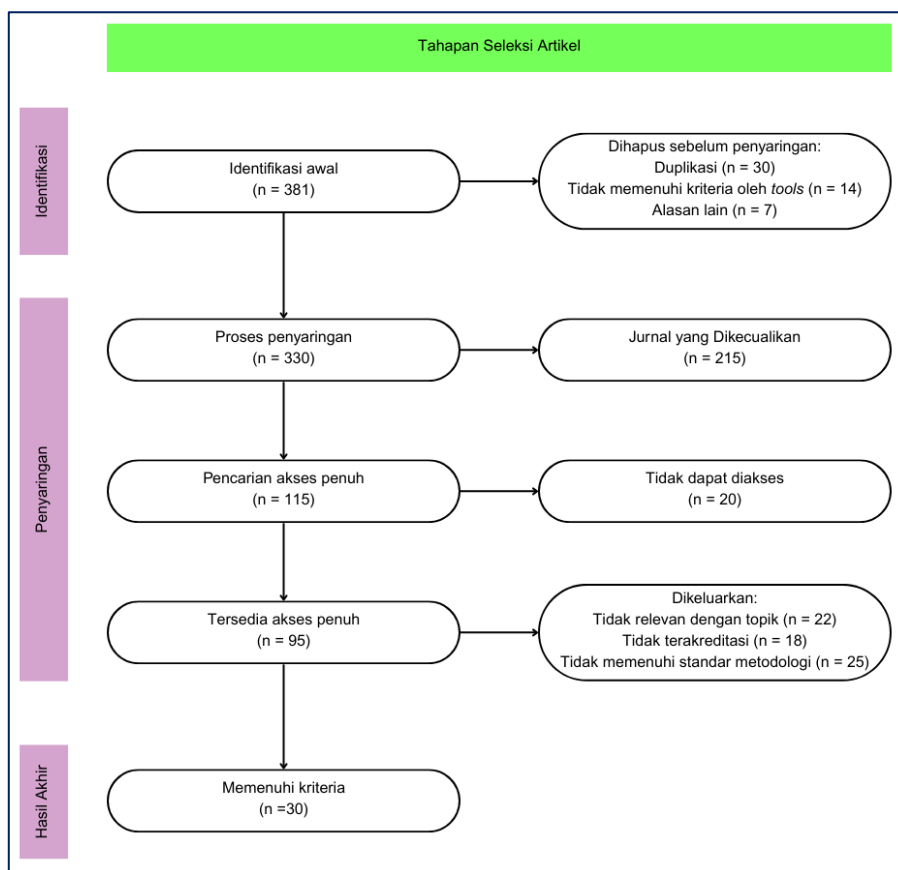
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil Seleksi Literatur dan Pemetaan Umum Penelitian (2020–2025)

Tahap awal identifikasi literatur menghasilkan 381 rekaman dari berbagai basis data ilmiah bereputasi. Pada proses pembersihan pertama, 51 rekaman dieliminasi, yang terdiri atas 30 artikel duplikat, 14 artikel yang tidak memenuhi kriteria kelayakan awal, dan 7 rekaman yang tidak dapat diproses akibat kendala teknis. Dengan demikian, tersisa 330 rekaman yang masuk ke tahap penyaringan selanjutnya. Penyaringan berdasarkan judul dan abstrak terhadap 330 rekaman dilakukan untuk menyesuaikan dengan fokus penelitian. Sebanyak 215 rekaman dieliminasi karena tidak membahas penerapan bioteknologi dalam

penanganan pascapanen atau pengendalian mutu produk perikanan tangkap, sehingga tersisa 115 artikel untuk dianalisis secara lengkap.

Dari 115 artikel tersebut, 20 artikel tidak dapat diakses karena kendala paywall, sehingga 95 artikel menjalani evaluasi kelayakan secara mendalam. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa 65 artikel tidak memenuhi standar, yang terdiri dari 22 artikel yang tidak fokus pada produk perikanan tangkap, 18 artikel dari jurnal yang tidak terindeks atau tidak melalui proses peer-review, serta 25 artikel yang metodologinya tidak memadai. Setelah seluruh proses seleksi dijalankan secara sistematis, diperoleh 30 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis lebih lanjut. Alur seleksi ini ditampilkan pada Gambar 1 untuk menunjukkan transparansi proses Systematic Literature Review.



Gambar 1. Tahapan Seleksi Artikel

Dari 30 artikel yang lolos seleksi akhir, 10 artikel dipilih untuk ditampilkan dalam Tabel 1 sebagai representasi temuan utama mengenai penerapan

bioteknologi dalam penanganan pascapanen dan pengendalian mutu produk perikanan tangkap.

Tabel 1. Artikel yang lolos seleksi

No	Penulis / Tahun	Jenis Produk	Teknologi Bioteknologi	Temuan Utama
----	-----------------	--------------	------------------------	--------------

1	Cocolin, L. (2025)	Produk hewani (umum)	Biopreservasi mikroba	Penggunaan mikroorganisme untuk meningkatkan keamanan dan kualitas produk secara berkelanjutan; prinsip dapat diterapkan pada ikan pascapanen.
2	Anumudu, C. K. et al. (2024)	Fermentasi pangan	Lactic acid bacteria	LAB memiliki peran multifungsi dalam menjaga keamanan, mutu, dan nilai gizi; relevan untuk biopreservasi ikan.
3	Parada Fabián, J. C. et al. (2025)	Produk pangan (umum)	Bakteriosin	Ulasan komprehensif tentang penggunaan bakteriosin untuk pengawetan makanan; potensi aplikasi pada ikan tangkap.
4	Hussain, Z. et al. (2025)	Daging siap masak	Kitosan coating	Kitosan meningkatkan umur simpan dan kualitas produk; prinsip coating dapat diaplikasikan pada ikan pascapanen.
5	Hadidi, M. et al. (2021)	Roti (model fermentasi)	Alginate/fish gelatin coating + Lactobacillus	Studi menunjukkan keberhasilan encapsulasi probiotik dan stabilitas teknologi biopolimer, relevan untuk edible coating ikan.
6	Karnwal, A. et al. (2025)	Pangan umum	Biopolimer alami untuk edible coating	Biopolimer efektif sebagai pelapis aktif; dapat diterapkan untuk pengurangan oksidasi lipid dan perpanjangan shelf-life ikan.
7	Wang, X., & Zheng, Z. (2025)	Produk ikan	Pengawetan terintegrasi	Memberikan mekanisme spoilage ikan dan teknologi preservasi terpadu; mendukung strategi bioteknologi pascapanen.
8	Zhang, B. et al. (2025)	Akuakultur (ikan)	Real-time PCR	Metode molekuler untuk deteksi patogen Vibrio; penting untuk keamanan dan pengendalian mutu ikan.
9	Filonzi, L. et al. (2023)	Seafood	DNA barcoding	Memastikan pelabelan yang tepat dan kualitas ikan; mencegah seafood fraud dan mendukung traceability.
10	Sobhan, A. et al. (2025)	Pangan kemasan	IoT-enabled biosensor	Biosensor terintegrasi untuk monitoring kualitas secara real-time; relevan untuk pengawasan mutu pascapanen ikan.

### 3.2. Pendekatan Bioteknologi dalam Penanganan Pascapanen Produk Perikanan Tangkap

#### 3.2.1. Biopreservasi Berbasis Mikroorganisme dan Metabolit Hayati

Biopreservasi menjadi pendekatan dominan dalam literatur lima tahun terakhir karena kemampuannya menghambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk secara alami (Cocolin, 2025). Bakteri asam laktat (LAB) menjadi agen yang paling banyak diteliti, terutama karena kemampuannya menghasilkan asam organik dan senyawa antimikroba yang efektif menekan populasi bakteri patogen (Anumudu et al., 2024). Implementasi LAB pada ikan segar menunjukkan penurunan signifikan jumlah total bakteri selama penyimpanan dingin. Bakteriosin sebagai metabolit sekunder juga menunjukkan potensi tinggi dalam menghambat bakteri gram positif dan gram negatif tertentu. Keunggulan bakteriosin terletak pada mekanisme kerjanya yang spesifik terhadap membran sel bakteri target, sehingga meminimalkan dampak terhadap karakteristik sensorik ikan (Parada Fabián et al., 2025). Kombinasi bakteriosin dengan sistem pendinginan

memperlihatkan efek sinergis dalam memperlambat pembusukan.

Berdasarkan temuan Sorathiya et al. (2025), senyawa antimikroba alami lain seperti ekstrak tumbuhan dan asam organik juga dimanfaatkan sebagai bagian dari strategi biopreservasi. Pendekatan ini memperluas spektrum pengendalian mikroba serta meningkatkan stabilitas sistem preservasi. Namun demikian, variasi efektivitas antar spesies ikan menunjukkan bahwa karakteristik komposisi protein dan lemak memengaruhi respon terhadap perlakuan biologi (Li et al., 2023). Dari perspektif industri, keunggulan utama biopreservasi adalah citra alami dan keamanan relatif tinggi. Akan tetapi, tantangan seperti stabilitas metabolit, standarisasi dosis, dan regulasi keamanan pangan masih perlu diatasi sebelum adopsi luas dapat dilakukan.

#### 3.2.2. Teknologi Edible Coating dan Biopolimer

Teknologi edible coating berbasis biopolimer menunjukkan perkembangan yang signifikan dalam periode 2020–2026 sebagai alternatif sistem pengawetan yang lebih ramah lingkungan. Kitosan menjadi material yang paling

banyak diteliti karena memiliki sifat antimikroba alami, kemampuan membentuk film yang baik, serta kompatibilitas dengan berbagai bahan aktif tambahan. Aplikasi kitosan pada permukaan ikan segar terbukti mampu menurunkan laju pertumbuhan mikroba dan memperlambat oksidasi lipid selama penyimpanan dingin (Hussain et al., 2025). Selain kitosan, alginat dan gelatin berbasis ikan juga digunakan sebagai bahan pelapis karena sifat biodegradable dan kemampuannya membentuk lapisan semi-permeabel terhadap oksigen dan uap air (Lu et al., 2022). Alginat, yang berasal dari rumput laut, memberikan keuntungan tambahan dalam menjaga kelembapan produk, sedangkan gelatin berbasis ikan berpotensi meningkatkan nilai tambah hasil samping industri perikanan (Hadidi et al., 2021). Penggunaan bahan-bahan ini menunjukkan integrasi antara inovasi teknologi dan prinsip pemanfaatan sumber daya berkelanjutan.

Kombinasi biopolimer dengan ekstrak tanaman atau minyak atsiri semakin meningkatkan efektivitas sistem edible coating (Karnwal et al., 2025). Senyawa bioaktif dalam ekstrak tumbuhan berfungsi sebagai agen antioksidan dan antimikroba tambahan, sehingga menghasilkan sistem kemasan aktif (active packaging). Hasil berbagai penelitian menunjukkan bahwa kombinasi ini mampu memperpanjang umur simpan ikan secara signifikan dibandingkan perlakuan tunggal, sekaligus mempertahankan kualitas sensorik seperti warna dan tekstur. Meskipun demikian, tantangan implementasi pada skala industri masih berkaitan dengan homogenitas lapisan, kestabilan mekanik selama distribusi, serta efisiensi biaya produksi (Tofail et al., 2018). Oleh karena itu, optimalisasi formulasi dan metode aplikasi menjadi aspek krusial untuk memastikan bahwa teknologi ini tidak hanya efektif secara ilmiah, tetapi juga layak secara ekonomis dan operasional dalam rantai pasok perikanan tangkap (Kiani Mavi et al., 2025).

### 3.2.3. *Perlakuan Berbasis Enzim*

Pendekatan berbasis enzim dalam sistem pascapanen diarahkan pada pengendalian tekstur, degradasi protein, serta aktivitas mikroba pembusuk (Wang & Zheng, 2025). Enzim proteolitik, dalam dosis terkendali, digunakan untuk memodifikasi struktur protein guna mempertahankan tekstur yang diinginkan atau menghambat pembentukan senyawa penyebab bau tidak sedap (Solanki et al., 2021). Pendekatan ini

menunjukkan bahwa manipulasi biokimiawi dapat menjadi strategi preventif terhadap penurunan mutu. Selain enzim proteolitik, penelitian juga mengkaji pemanfaatan enzim dengan aktivitas antimikroba, seperti lisozim, yang mampu merusak dinding sel bakteri tertentu. Penggunaan enzim antimikroba dalam kombinasi dengan pendinginan menghasilkan efek sinergis dalam menekan pertumbuhan mikroba selama penyimpanan (Tavares et al., 2021). Hal ini membuka peluang integrasi enzim sebagai komponen sistem preservasi aktif.

Namun demikian, pengendalian dosis menjadi aspek kritis dalam aplikasi enzim. Dosis yang tidak tepat dapat menyebabkan degradasi protein berlebihan, yang justru menurunkan kualitas tekstur dan nilai sensorik ikan (Han & Li, 2024). Oleh karena itu, standarisasi konsentrasi, waktu kontak, dan kondisi suhu menjadi parameter yang harus dikontrol secara ketat. Dari sudut pandang industri, tantangan utama terletak pada konsistensi aktivitas enzim dalam kondisi distribusi yang dinamis serta biaya produksi enzim dalam jumlah besar. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan formulasi enzim yang stabil, efisien, dan kompatibel dengan sistem cold chain perikanan tangkap.

## 3.3. Pendekatan Bioteknologi dalam Pengendalian Mutu Produk Perikanan

### 3.3.1. *Deteksi Cepat Berbasis Molekuler*

Perkembangan teknik deteksi molekuler seperti Polymerase Chain Reaction (PCR) dan Real-Time PCR menjadi tonggak penting dalam sistem pengendalian mutu modern. Metode ini memungkinkan identifikasi cepat dan spesifik terhadap mikroorganisme patogen maupun kontaminan tertentu dalam produk perikanan (Zhang et al., 2025). Sensitivitas tinggi metode molekuler memberikan keunggulan dibandingkan teknik kultur konvensional yang memerlukan waktu inkubasi lebih lama. Selain untuk deteksi patogen, DNA barcoding banyak dimanfaatkan dalam identifikasi spesies ikan guna mencegah praktik seafood fraud (Filonzi et al., 2023). Dalam konteks perdagangan global, kesalahan identifikasi spesies dapat menimbulkan implikasi hukum dan ekonomi yang serius. Oleh karena itu, pendekatan molekuler berperan penting dalam meningkatkan ketertelusuran dan transparansi rantai pasok produk perikanan tangkap (Jin et al., 2025).

Keunggulan utama metode molekuler terletak pada akurasi, kecepatan, dan kemampuan

mendeteksi mikroorganisme dalam jumlah sangat kecil. Namun, keterbatasan biaya peralatan, kebutuhan laboratorium terstandar, serta tenaga ahli terlatih menjadi hambatan utama dalam adopsi luas, terutama pada unit pengolahan skala kecil. Dengan demikian, tantangan ke depan adalah mengembangkan platform deteksi molekuler yang lebih sederhana, portabel, dan terjangkau tanpa mengorbankan akurasi. Inovasi pada perangkat point-of-care testing berpotensi menjadi solusi untuk memperluas akses teknologi ini dalam sistem perikanan nasional (Soares et al., 2024).

### 3.3.2. *Teknologi Biosensor untuk Monitoring Kualitas*

Teknologi biosensor berkembang sebagai solusi monitoring mutu secara real-time yang lebih praktis dibandingkan metode laboratorium konvensional. Biosensor elektrokimia dan biosensor berbasis enzim dirancang untuk mendeteksi senyawa volatil seperti amonia, trimetilamina, dan histamin yang menjadi indikator utama pembusukan ikan (Majer-Baranyi et al., 2023). Kecepatan respons dan kemudahan interpretasi hasil menjadi keunggulan utama teknologi ini. Pengembangan smart packaging indicator memungkinkan perubahan warna sebagai respons terhadap peningkatan konsentrasi senyawa pembusukan. Konsep ini memberikan kemudahan bagi distributor dan konsumen dalam menilai tingkat kesegaran produk tanpa memerlukan alat khusus. Dengan demikian, sistem monitoring mutu menjadi lebih transparan dan partisipatif.

Integrasi biosensor dengan sistem Internet of Things (IoT) membuka peluang terciptanya rantai pasok berbasis data (Sobhan et al., 2025). Sensor yang terhubung dengan perangkat digital memungkinkan pemantauan suhu, kelembapan, dan parameter kimia secara kontinu selama distribusi. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi manajemen logistik dan mengurangi risiko kerugian akibat kerusakan produk. Meskipun menjanjikan, tantangan yang dihadapi meliputi stabilitas sensor dalam kondisi lembap, masa pakai terbatas, serta biaya produksi massal. Oleh karena itu, inovasi material dan desain sensor menjadi fokus penelitian lanjutan untuk memastikan keberlanjutan dan keterjangkauan teknologi ini.

### 3.3.3. *Nanobioteknologi dalam Keamanan Produk*

Nanobioteknologi menawarkan pendekatan inovatif melalui pemanfaatan nanopartikel sebagai agen antimikroba dan sistem penghantar zat aktif.

Nanopartikel perak menjadi salah satu material yang paling banyak diteliti karena efektivitasnya dalam menghambat pertumbuhan berbagai bakteri patogen (Khursheed et al., 2023). Ukuran partikel yang sangat kecil memungkinkan penetrasi lebih efektif terhadap sel mikroba. Selain itu, nanoenkapsulasi agen pengawet alami memungkinkan pelepasan zat aktif secara terkendali selama penyimpanan. Pendekatan ini meningkatkan stabilitas senyawa bioaktif serta memperpanjang durasi efektivitasnya. Dengan demikian, nanoteknologi tidak hanya meningkatkan efisiensi preservasi tetapi juga mengurangi kebutuhan dosis tinggi (Ahmad et al., 2025).

Namun, isu toksisitas dan regulasi menjadi perhatian penting dalam aplikasi nanobioteknologi. Potensi akumulasi nanopartikel dalam jaringan dan dampaknya terhadap kesehatan konsumen masih menjadi perdebatan ilmiah. Oleh karena itu, evaluasi keamanan jangka panjang dan kepatuhan terhadap regulasi pangan internasional menjadi prasyarat utama. Secara keseluruhan, nanobioteknologi menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan keamanan produk perikanan, tetapi penerapannya harus disertai kajian risiko komprehensif agar inovasi tidak menimbulkan konsekuensi yang tidak diinginkan (Khan et al., 2024).

### 3.4. *Sintesis Tematik dan Perbandingan Efektivitas Teknologi*

Sintesis tematik terhadap literatur periode 2020–2026 menunjukkan bahwa pendekatan bioteknologi dalam penanganan pascapanen dan pengendalian mutu dapat dikelompokkan menjadi tiga domain utama, yaitu biopreservasi aktif, sistem kemasan berbasis biopolimer, serta teknologi monitoring mutu berbasis molekuler dan sensor (Venkatesan et al., 2025). Ketiga domain ini memiliki karakteristik efektivitas, tingkat kesiapan teknologi (technology readiness level), serta tantangan implementasi yang berbeda. Secara umum, biopreservasi dan edible coating merupakan teknologi yang paling banyak diteliti karena relatif mudah diintegrasikan dengan sistem cold chain yang sudah ada. Dari sisi efektivitas perpanjangan umur simpan, kombinasi edible coating berbasis kitosan dengan agen antimikroba alami menunjukkan hasil yang paling konsisten dalam menekan pertumbuhan mikroba dan menghambat oksidasi lipid (Muñoz-Tebar et al., 2023). Biopreservasi berbasis mikroorganisme juga menunjukkan efektivitas tinggi, terutama ketika diaplikasikan pada penyimpanan suhu rendah

yang stabil. Sementara itu, perlakuan berbasis enzim menunjukkan efektivitas yang lebih spesifik pada pengendalian tekstur dan komposisi biokimia, namun memerlukan kontrol dosis yang lebih presisi.

Teknologi pengendalian mutu berbasis molekuler dan biosensor tidak secara langsung memperpanjang umur simpan, tetapi meningkatkan kemampuan deteksi dini terhadap kontaminasi dan pembusukan (Singh et al., 2025). Dalam konteks industrialisasi, teknologi biosensor dan smart packaging memiliki potensi tinggi karena dapat diintegrasikan langsung dalam rantai distribusi. Namun, kesiapan komersialnya masih bergantung pada efisiensi biaya dan stabilitas perangkat. Faktor penentu keberhasilan aplikasi teknologi meliputi stabilitas suhu selama distribusi, kompatibilitas dengan sistem pengemasan yang ada, biaya produksi, serta kepatuhan terhadap regulasi keamanan pangan. Analisis kelebihan dan kelemahan menunjukkan bahwa tidak ada satu pendekatan tunggal yang sepenuhnya unggul, melainkan diperlukan strategi kombinasi (multi-hurdle technology) untuk mencapai efektivitas optimal dalam sistem pascapanen perikanan tangkap (Tsironi et al., 2020).

### 3.5. Tren Riset dan Kesenjangan Penelitian (Research Gap) 2020–2026

Analisis tren menunjukkan dominasi penelitian skala laboratorium dengan desain eksperimental terkendali. Meskipun hasilnya menunjukkan efektivitas signifikan dalam kondisi ideal, validasi pada skala industri dan kondisi distribusi nyata masih sangat terbatas. Hal ini menciptakan kesenjangan antara inovasi akademik dan penerapan praktis di lapangan. Minimnya studi uji coba jangka panjang menjadi tantangan tersendiri, terutama dalam menilai stabilitas teknologi selama rantai pasok yang kompleks. Sebagian besar penelitian berfokus pada periode penyimpanan relatif pendek dan tidak mengevaluasi dampak variabilitas suhu atau logistik distribusi. Kondisi ini menunjukkan perlunya penelitian berbasis sistem yang mempertimbangkan faktor operasional secara komprehensif.

Kesenjangan lain terletak pada kurangnya analisis biaya-manfaat (cost-benefit analysis) dalam adopsi teknologi bioteknologi. Aspek ekonomi sering kali tidak dibahas secara mendalam, padahal menjadi faktor utama dalam keputusan investasi industri. Tanpa analisis kelayakan ekonomi, sulit memastikan apakah

inovasi tersebut dapat diadopsi secara luas oleh pelaku usaha, khususnya skala kecil dan menengah. Selain itu, integrasi antara sistem preservasi dan sistem monitoring mutu masih jarang dikaji secara terpadu. Sebagian besar penelitian membahas kedua aspek tersebut secara terpisah. Di sisi lain, terdapat ketimpangan antara penelitian pada perikanan budidaya dan perikanan tangkap, di mana studi pada sektor tangkap relatif lebih sedikit. Hal ini menunjukkan peluang riset lanjutan yang dapat mengisi kekosongan literatur dalam konteks karakteristik unik hasil tangkapan laut.

### 3.6. Implikasi Industri dan Keberlanjutan

Implementasi pendekatan bioteknologi dalam sistem pascapanen berpotensi signifikan dalam mengurangi food loss yang selama ini menjadi permasalahan utama sektor perikanan tangkap (Amelia et al., 2025). Dengan memperpanjang umur simpan dan meningkatkan akurasi deteksi mutu, kerugian akibat pembusukan selama distribusi dapat ditekan. Hal ini tidak hanya berdampak pada peningkatan pendapatan nelayan dan pelaku usaha, tetapi juga pada efisiensi pemanfaatan sumber daya laut. Dari perspektif keberlanjutan global, inovasi ini selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan, khususnya dalam aspek ketahanan pangan, konsumsi dan produksi berkelanjutan, serta perlindungan ekosistem laut. Penggunaan biopolimer biodegradable dan agen biologis alami mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintesis dan plastik konvensional, sehingga berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan (Atiweh et al., 2021).

Namun demikian, tantangan regulasi keamanan pangan menjadi faktor penting yang harus diperhatikan. Setiap inovasi bioteknologi, terutama yang melibatkan nanopartikel atau agen biologis baru, memerlukan evaluasi risiko dan persetujuan otoritas yang ketat. Harmonisasi standar internasional juga menjadi krusial mengingat produk perikanan tangkap banyak diperdagangkan lintas negara. Potensi adopsi pada industri kecil dan menengah sangat bergantung pada ketersediaan teknologi yang sederhana, terjangkau, dan mudah diimplementasikan. Oleh karena itu, arah pengembangan teknologi masa depan perlu menekankan pada integrasi sistem preservasi aktif dengan monitoring mutu berbasis sensor yang ekonomis. Pendekatan holistik ini akan menciptakan sistem pascapanen yang tidak

hanya efektif secara teknis, tetapi juga inklusif dan berkelanjutan secara ekonomi serta lingkungan.

#### IV. PENUTUP

Berdasarkan hasil sintesis sistematis terhadap literatur periode 2020–2025, dapat disimpulkan bahwa pendekatan bioteknologi telah menjadi strategi utama dalam meningkatkan efektivitas penanganan pascapanen dan sistem pengendalian mutu produk perikanan tangkap. Transformasi dari metode konvensional berbasis bahan kimia sintetis menuju pendekatan berbasis agen biologis, biopolimer biodegradable, serta sistem deteksi molekuler presisi menunjukkan adanya pergeseran paradigma yang signifikan dalam manajemen mutu hasil perikanan. Inovasi ini tidak hanya berorientasi pada perpanjangan umur simpan, tetapi juga pada peningkatan keamanan pangan, transparansi rantai pasok, dan keberlanjutan lingkungan.

Pendekatan biopreservasi berbasis mikroorganisme dan metabolit hayati terbukti efektif dalam menekan pertumbuhan mikroba pembusuk dan patogen, khususnya ketika dikombinasikan dengan sistem rantai dingin yang stabil. Teknologi edible coating berbasis biopolimer menunjukkan potensi besar sebagai solusi preservasi aktif sekaligus alternatif kemasan ramah lingkungan. Sementara itu, perlakuan berbasis enzim memberikan kontribusi dalam pengendalian karakteristik biokimia dan tekstur

produk, meskipun memerlukan kontrol aplikasi yang presisi.

Dalam aspek pengendalian mutu, teknologi deteksi molekuler dan biosensor menghadirkan lompatan signifikan dalam kecepatan dan akurasi identifikasi kontaminasi maupun pemalsuan spesies. Integrasi teknologi sensor dengan sistem digital membuka peluang terciptanya monitoring mutu berbasis data secara real-time. Namun demikian, keterbatasan biaya, kesiapan infrastruktur, serta tantangan regulasi masih menjadi hambatan utama dalam adopsi luas, terutama pada industri skala kecil dan menengah.

Meskipun perkembangan penelitian menunjukkan tren positif, kesenjangan masih terlihat pada minimnya uji coba skala industri, kurangnya analisis biaya-manfaat, serta terbatasnya integrasi antara teknologi preservasi dan sistem monitoring mutu dalam satu platform terpadu. Oleh karena itu, arah penelitian masa depan perlu difokuskan pada pengembangan teknologi multi-hurdle yang terintegrasi, ekonomis, dan sesuai dengan karakteristik unik perikanan tangkap. Pendekatan holistik ini diharapkan mampu mendukung pengurangan kehilangan hasil, meningkatkan daya saing produk, serta memperkuat kontribusi sektor perikanan terhadap ketahanan pangan dan pembangunan berkelanjutan.

#### REFERENSI

- Ahmad, N. H., Rukayadi, Y., Khan, S., Parmin, N. A., Ahmad Nizar, N. N., & Mohammad, Z. H. (2025). Nanotechnology in food safety and preservation. In *Innovative food packaging and processing technologies: Present and future* (pp. 233–278). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91742-1.00015-5>.
- Amelia, B. S., Sari, D. W., Tarbiyah Islamiya, H. A., Mukaffi, Z., Sarmidi, T., Cahyono, H., Adli, F. F., Alias, N. S., & Darmawan, R. R. (2025). Navigating post-harvest challenges: Fish loss and safety risks in East Java's small-scale fisheries. *Social Sciences & Humanities Open*, 12, 102103. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.102103>.
- Anumudu, C. K., Miri, T., & Onyeaka, H. (2024). Multifunctional applications of lactic acid bacteria: Enhancing safety, quality, and nutritional value in foods and fermented beverages. *Foods*, 13(23), 3714. <https://doi.org/10.3390/foods13233714>.
- Arana-Linares, A. C., Barrera-Ocampo, A., Patiño, A. C., Ciro, Y., & Salamanca, C. H. (2025). Active packaging based on chitosan, fish gelatin, zein, and kafirin biopolymers: A promising strategy for innovation in the cosmetic sector. *Polymers*, 17(24), 3329. <https://doi.org/10.3390/polym17243329>.
- Atiwesh, G., Mikhael, A., Parrish, C. C., Banoub, J., & Le, T.-A. T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*, 7(9), e07918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918>.
- Barbosa, J., & Teixeira, P. (2022). Biotechnology approaches in food preservation and food safety. *Foods*, 11(10), 1391. <https://doi.org/10.3390/foods11101391>.

- Carlino-Costa, C., & Belo, M. A. d. A. (2025). Ensuring fish safety through sustainable aquaculture practices. *Hygiene*, 5(4), 51. <https://doi.org/10.3390/hygiene5040051>.
- Cocolin, L. (2025). Microbial bioprotection: An opportunity to improve safety and quality of meat products in a sustainable way. *Meat Science*, 219, 109576. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109576>.
- Filonzi, L., Ardenghi, A., Rontani, P. M., Voccia, A., Ferrari, C., Papa, R., Bellin, N., & Nonnis Marzano, F. (2023). Molecular barcoding: A tool to guarantee correct seafood labelling and quality and preserve the conservation of endangered species. *Foods*, 12(12), 2420. <https://doi.org/10.3390/foods12122420>.
- Hadidi, M., Majidiyan, N., Jelyani, A. Z., Moreno, A., Hadian, Z., & Mousavi Khanegah, A. (2021). Alginate/fish gelatin-encapsulated *Lactobacillus acidophilus*: A study on viability and technological quality of bread during baking and storage. *Foods*, 10(9), 2215. <https://doi.org/10.3390/foods10092215>.
- Han, G., & Li, Y. (2024). A review of inhibition mechanisms of surimi protein hydrolysis by different exogenous additives and their application in improving surimi gel quality. *Food Chemistry*, 456, 140002. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140002>.
- Hussain, Z., Ijaz, M., Li, M., Woldemariam, K. Y., Wang, Z., Liu, D., Wu, C., Li, X., Zheng, Q., & Zhang, D. (2025). Impacts of chitosan coating on shelf life and quality of ready-to-cook beef seekh kabab during refrigeration storage. *Foods*, 14(22), 3844. <https://doi.org/10.3390/foods14223844>.
- Jin, Y., Li, C., Zheng, M., Jia, W., & Hu, Q. (2025). An evolutionary game analysis of the aquatic product traceability system from a multi-actor perspective. *Water*, 17(11), 1656. <https://doi.org/10.3390/w17111656>.
- Karnwal, A., Kumar, G., Singh, R., Selvaraj, M., Malik, T., & Al Tawaha, A. R. M. (2025). Natural biopolymers in edible coatings: Applications in food preservation. *Food Chemistry: X*, 25, 102171. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102171>.
- Khan, S. K., Dutta, J., Ahmad, I., & Rather, M. A. (2024). Nanotechnology in aquaculture: Transforming the future of food security. *Food Chemistry: X*, 24, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101974>
- Khursheed, S., Dutta, J., Ahmad, I., Rather, M. A., Badroo, I. A., Bhat, T. A., Ahmad, I., Amin, A., Shah, A., Qadri, T., & Habib, H. (2023). Biogenic silver nanoparticles: Synthesis, applications and challenges in food sector with special emphasis on aquaculture. *Food Chemistry: X*, 20, 101051. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101051>.
- Kiani Mavi, R., Semiari, M., Hosseini Shekarabi, S. A., et al. (2025). Multi-objective optimization of a three-level sustainable food supply chain: Modeling the impact of government subsidies. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 26, 571–600. <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00454-y>.
- Li, P., Song, Z., Huang, L., Sun, Y., Sun, Y., Wang, X., & Li, L. (2023). Effects of dietary protein and lipid levels in practical formulation on growth, feed utilization, body composition, and serum biochemical parameters of growing rockfish *Sebastes schlegeli*. *Aquaculture Nutrition*, 2023, 9970252. <https://doi.org/10.1155/2023/9970252>.
- Lu, Y., Luo, Q., Chu, Y., Tao, N., Deng, S., Wang, L., & Li, L. (2022). Application of gelatin in food packaging: A review. *Polymers*, 14(3), 436. <https://doi.org/10.3390/polym14030436>.
- Majer-Baranyi, K., Székács, A., & Adányi, N. (2023). Application of electrochemical biosensors for determination of food spoilage. *Biosensors*, 13(4), 456. <https://doi.org/10.3390/bios13040456>.
- Muñoz-Tebar, N., Pérez-Álvarez, J. A., Fernández-López, J., & Viuda-Martos, M. (2023). Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review. *Polymers*, 15(2), 396. <https://doi.org/10.3390/polym15020396>.
- Nendissa, D. M., Kaya, A. O. W., Rieuwpassa, F., Loppies, C. R. M., & Lokollo, E. (2023). Penanganan pasca tangkap hasil perikanan di Negeri Waai Kecamatan Salahutu Kabupaten Maluku Tengah. *BALOBÉ: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(1), 28–34. <https://doi.org/10.30598/balobe.2.1.28-34>.
- Parada Fabián, J. C., Álvarez Contreras, A. K., Natividad Bonifacio, I., Hernández Robles, M. F., Vázquez Quiñones, C. R., Quiñones Ramírez, E. I., & Vázquez Salinas, C. (2025). Toward safer and sustainable food preservation: A comprehensive review of bacteriocins in the food industry. *Bioscience Reports*, 45(4), 277–302. <https://doi.org/10.1042/BSR20241594>.

- Singh, P., Pandey, V. K., Sahu, M., Singh, R., & Joshi, R. (2025). Microbial biosensors for rapid and accurate food quality monitoring: Detection of contaminants, pathogens, and spoilage indicators. *Journal of Food Safety*. <https://doi.org/10.1111/jfs.70032>.
- Sobhan, A., Hossain, A., Wei, L., Muthukumarappan, K., & Ahmed, M. (2025). IoT-enabled biosensors in food packaging: A breakthrough in food safety for monitoring risks in real time. *Foods*, 14(8), 1403. <https://doi.org/10.3390/foods14081403>.
- Solanki, P., Putatunda, C., Kumar, A., Bhatia, R., & Walia, A. (2021). Microbial proteases: Ubiquitous enzymes with innumerable uses. *3 Biotech*, 11(10), 428. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02928-z>
- Sorathiya, K. B., Melo, A., Hogg, M. C., & Pintado, M. (2025). Organic acids in food preservation: Exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications. *Sustainability*, 17(8), 3434. <https://doi.org/10.3390/su17083434>.
- Soares, M. S., Singh, R., Kumar, S., Jha, R., Nedoma, J., Martinek, R., & Marques, C. (2024). The role of smart optical biosensors and devices on predictive analytics for the future of aquaculture systems. *Optics & Laser Technology*, 177, 111049. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111049>.
- Tavares, J., Martins, A., Fidalgo, L. G., Lima, V., Amaral, R. A., Pinto, C. A., Silva, A. M., & Saraiva, J. A. (2021). Fresh fish degradation and advances in preservation using physical emerging technologies. *Foods*, 10(4), 780. <https://doi.org/10.3390/foods10040780>.
- Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- Tsironi, T., Houhoula, D., & Taoukis, P. S. (2020). Hurdle technology for fish preservation. *Aquaculture and Fisheries*, 5(2). <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.02.001>.
- Venkatesan, R., Alrashed, M. M., Vetcher, A. A., & Kim, S. C. (2025). Next-generation food packaging: Progress and challenges of biopolymer-based materials. *Polymers*, 17(17), 2299. <https://doi.org/10.3390/polym17172299>.
- Vidza, M.-S., Budka, M., Chai, W. K., Thrush, M., & Teixeira Alves, M. (2025). The applications of complex network analysis in aquaculture and capture fisheries: A systematic review of trends, challenges, and future directions. *Sustainable Futures*, 10, 101382. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101382>.
- Wang, X., & Zheng, Z. (2025). Mechanistic insights into fish spoilage and integrated preservation technologies. *Applied Sciences*, 15(14), 7639. <https://doi.org/10.3390/app15147639>.
- Zhang, B., Qiu, Y., Shi, C., & Zhang, J. (2025). Development of multiple real-time fluorescent quantitative PCR for *Vibrio* pathogen detection in aquaculture. *Veterinary Sciences*, 12(4), 327. <https://doi.org/10.3390/vetsci12040327>.