ISSN : 2621 - 1475

Pemanfaatan Hasil Samping Perikanan sebagai Sumber Kolagen dan Gelatin Halal: Tinjauan Metode Ekstraksi, Karakteristik Fungsional, dan Aplikasinya

Utilization of Fishery Byproducts as Sources of Halal Collagen and Gelatin: A Review of Extraction Methods, Functional Characteristics, and Applications

Rosmawati [1*], Suwarjoyowirayatno[2]
[1]Program Studi Teknologi Hasil Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Muhammadiyah Kendari, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia
[2]Jurusan Teknologi Hasil Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia
* Penulis korespondensi: rosmawati@umkendari.ac.id

Cara sitasi: Rosmawati & Suwarjoyowirayatno. (2026). Pemanfaatan Hasil Samping Perikanan sebagai Sumber Kolagen dan Gelatin Halal: Tinjauan Metode Ekstraksi, Karakteristik Fungsional, dan Aplikasinya. *Jurnal Fish Protech*, *9*(2): 192-208.

ABSTRACT

Fishery byproducts such as skin, bones, scales, heads, fins, and swim bladders contain collagen that can be converted into gelatin. Their utilization is important for reducing processing waste, increasing the added value of fishery industries, and providing halal gelatin alternatives to mammalian sources. This review examines the current direction of fishery byproduct utilization as sources of collagen and gelatin, with emphasis on green extraction, functional characteristics, applications, and research gaps. Although the publication period was not strictly limited, the literature was selected to reflect recent developments while retaining relevant foundational studies. The reviewed literature was chosen based on its relevance to fishery raw materials, extraction methods, quality characterization, and applications in food, pharmaceutical, nutraceutical, cosmetic, packaging, and biomedical fields. Recent studies indicate a shift from merely demonstrating raw-material potential toward process optimization, quality standardization, and application-oriented product development. Ultrasound-assisted extraction, enzyme-assisted extraction, deep eutectic solvents, microwave processing, supercritical fluids, and cold plasma are increasingly explored to improve extraction efficiency and reduce the use of harsh chemicals. However, fish gelatin still faces challenges related to fishy odor, raw-material variability, lower gel strength, limited thermal stability, and insufficient safety and scale-up data. Fishery byproducts have strong potential as sustainable sources of halal collagen and gelatin; nevertheless, industrial development requires process optimization, quality control, safety evaluation, and production feasibility assessment.

Keywords: *circular economy; fish collagen; fishery byproduct; green extraction; halal gelatin*

ABSTRAK

Hasil samping perikanan seperti kulit, tulang, sisik, kepala, sirip, dan gelembung renang mengandung kolagen yang dapat dikonversi menjadi gelatin. Pemanfaatan bahan tersebut penting untuk menurunkan beban limbah pengolahan, meningkatkan nilai tambah industri perikanan, dan menyediakan alternatif gelatin halal selain sumber mamalia. Artikel ini meninjau arah pemanfaatan hasil samping perikanan sebagai sumber kolagen dan gelatin dengan penekanan pada ekstraksi hijau, karakteristik fungsional, aplikasi, serta celah riset. Periode publikasi tidak dibatasi secara ketat, tetapi literatur dipilih agar pembahasan tetap mencerminkan perkembangan mutakhir serta tetap memuat rujukan dasar yang relevan. Literatur diseleksi berdasarkan kesesuaian dengan bahan baku perikanan, metode ekstraksi, karakterisasi mutu, dan aplikasi pada bidang pangan, farmasi, nutraseutika, kosmetik, kemasan, serta biomedis. Hasil kajian menunjukkan bahwa riset terbaru telah bergeser dari pembuktian potensi bahan baku menuju optimasi proses, standardisasi mutu, dan pengembangan produk berbasis aplikasi. Teknologi seperti *ultrasound-assisted extraction*, *enzyme-assisted extraction*, *deep eutectic solvents*, gelombang mikro, fluida superkritis, dan plasma dingin semakin banyak dipelajari untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi dan mengurangi penggunaan bahan kimia keras. Namun, gelatin ikan masih menghadapi kendala berupa bau amis, variasi mutu bahan baku, kekuatan gel yang relatif rendah,

ISSN : 2621 - 1475

stabilitas termal terbatas, serta keterbatasan data keamanan dan skala produksi. Kajian ini menegaskan bahwa hasil samping perikanan berpotensi menjadi sumber kolagen dan gelatin halal yang berkelanjutan, tetapi pengembangannya memerlukan optimasi proses, pengendalian mutu, uji keamanan, dan analisis kelayakan produksi.

Kata kunci: *ekonomi sirkular; ekstraksi hijau; gelatin halal; hasil samping perikanan; kolagen ikan*

PENDAHULUAN

Industri perikanan dan akuakultur menghasilkan biomassa dalam jumlah besar. Pada proses pengolahan ikan, hanya sekitar 25–40% bagian tubuh yang dimanfaatkan sebagai bagian yang dapat dimakan, sedangkan 60–75% sisanya menjadi hasil samping berupa kepala, kulit, tulang, sisik, sirip, jeroan, dan bagian lain (Gaikwad & Kim, 2024; Rosmawati *et al.*, 2024; Nurilmala *et al.*, 2021; Karayannakidis & Zotos, 2016; Usman *et al.*, 2021). Hasil samping tersebut mengandung kolagen, protein, mineral, lipid, dan senyawa bioaktif yang berpotensi dikembangkan menjadi produk bernilai tambah tinggi (Rajabimashhadi *et al.*, 2023; Espinales, Romero-Peña *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023; Waqar *et al.*, 2025). Dalam kerangka ekonomi sirkular, pemanfaatan kembali hasil samping perikanan menjadi kolagen, gelatin, peptida bioaktif, dan komponen fungsional lain dapat mengurangi beban lingkungan sekaligus memperluas diversifikasi produk di sektor pangan, farmasi, nutraseutika, kosmetik, dan biomaterial (Rajabimashhadi *et al.*, 2023; Coppola *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2023; Waqar *et al.*, 2025; Hassoun et al., 2023).

Kolagen merupakan protein struktural utama jaringan ikat dan menjadi prekursor penting dalam produksi gelatin. Pada ikan, kolagen banyak ditemukan pada kulit, tulang, tulang rawan, tendon, sisik, dan bagian kaya jaringan ikat lainnya (Jafari *et al.*, 2020; Subhan *et al.*, 2020; Farooq *et al.*, 2024). Melalui hidrolisis parsial, kolagen dapat diubah menjadi gelatin yang memiliki fungsi sebagai pembentuk gel, penstabil, pengemulsi, pengikat air, pembentuk film, dan bahan kapsul dalam industri pangan maupun farmasi (Karayannakidis & Zotos, 2016; Usman *et al.*, 2021; Lv *et al.*, 2019; Reza & Annissa, 2023; Al-Nimry *et al.*, 2021). Gelatin juga digunakan dalam kosmetik, fotografi, dan produk biomedis, termasuk pembalut luka, perancah jaringan, serta sistem penghantaran obat (Al-Nimry *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023; Jeevithan *et al.*, 2013; Gaikwad & Kim, 2024).

Secara komersial, gelatin masih banyak diproduksi dari sapi dan babi. Kondisi ini menimbulkan isu halal, kekhawatiran terhadap penyakit zoonosis seperti *bovine spongiform encephalopathy* (BSE) dan *foot-and-mouth disease* (FMD), serta keterbatasan penerimaan oleh kelompok konsumen tertentu (Nurilmala *et al.*, 2021; Coppola *et al.*, 2020; Al-Nimry *et al.*, 2021). Kolagen dan gelatin ikan menawarkan alternatif yang lebih mudah diterima oleh konsumen Muslim, Yahudi, Hindu, dan konsumen yang menghindari produk mamalia (Nurilmala *et al.*, 2021; Al-Nimry *et al.*, 2021; Rajabimashhadi *et al.*, 2023). Namun, sumber ikan juga memiliki tantangan teknis, antara lain titik leleh, kekuatan gel, dan stabilitas termal yang cenderung lebih rendah dibanding gelatin mamalia. Kondisi ini berkaitan dengan komposisi asam amino, khususnya prolin dan hidroksiprolin, yang memengaruhi stabilitas heliks rangkap tiga (Karayannakidis & Zotos, 2016; Jafari *et al.*, 2020; Subhan *et al.*, 2020; Farooq *et al.*, 2024). Selain itu, bahan baku ikan mudah rusak, memiliki variabilitas kualitas antarspesies dan antarbagian tubuh, serta berisiko mengandung bau amis, lemak, pigmen, mikroba, dan kontaminan (Espinales *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023; Waqar *et al.*, 2025).

Perkembangan riset mutakhir menunjukkan pergeseran fokus dari pembuktian keberhasilan ekstraksi menuju optimasi proses yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berorientasi pada mutu produk. Beberapa pendekatan yang semakin banyak dikaji meliputi penggunaan *ultrasound*, enzim, *deep eutectic solvents*, gelombang mikro, dan teknologi lain untuk meningkatkan rendemen sekaligus menjaga karakteristik fungsional kolagen dan gelatin dari hasil samping perikanan (Gaikwad & Kim, 2024; Jafari *et al.*, 2020;

ISSN : 2621 - 1475

Espinales *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023; Coppola *et al.*, 2020; Waqar *et al.*, 2025). Aplikasi produk juga terus berkembang, mulai dari makanan fungsional, film dan kemasan aktif, hidrogel, pembalut luka, produk kosmetik, perancah jaringan, hingga sistem penghantaran obat (Al-Nimry *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2023; Subhan *et al.*, 2020; Rajabimashhadi *et al.*, 2023; Amnuaikit *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023). Jika dibandingkan dengan hasil kajian peneliti sebelumnya, kebaruan penelitian ini secara eksplisit mengintegrasikan perspektif halal, metode ekstraksi ramah lingkungan, karakteristik fungsional, aplikasi di berbagai bidang, serta arah pengembangan industri berkelanjutan dalam satu kesatuan analisis yang sistematis dan komprehensif, dimana belum disoroti oleh peneliti sebelumnya. Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan meninjau pemanfaatan hasil samping perikanan sebagai sumber kolagen dan gelatin halal, dengan penekanan pada metode ekstraksi hijau, karakteristik fungsional, aplikasi, serta kebutuhan riset lanjutan menuju pengembangan industri yang berkelanjutan.

METODOLOGI

Panduan dan standard penelitian mengikuti metode *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) untuk menata proses penelusuran, pemilihan, dan pelaporan literatur. Artikel yang digunakan tidak dimaksudkan sebagai meta-analisis dan tidak menerapkan seluruh item PRISMA secara ketat. Total jumlah jurnal yang berkaitan dengan gelatin dan kolagen ikan yang diidentifikasi adalah 877 artikel. Judul dan abstrak disaring, dan studi yang belum memenuhi kriteria inklusi dibuang. Setelah dipersempit berdasarkan sumber bahan baku, metode ekstraksi, sifat funsional dan aplikasinya tersisa 70 artikel yang terdiri dari artikel penelitian, artikel review dan empat artikel lainnya berupa *conference paper*, standard internasional, dan dokumen panduan. Seluruh referensi yang diperoleh berasal dari *database* seperti Scopus, ScienceDirect dan Google Scholar, dengan bahasa pengantar adalah Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia, sebagaimana pada Tabel 1. Strategi penelusuran artikel menggunakan kata kunci *"fish by-product" OR skin OR bone OR scale OR "swimming bladder" AND gelatin OR collagen OR "gelatin halal" OR "fish gelatin" OR "fish collagen" AND "extraction methods" OR "green extraction" AND "functional characteristics" OR application*.

Tabel 1. Tahapan seleksi artikel menggunakan pendekatan PRISMA

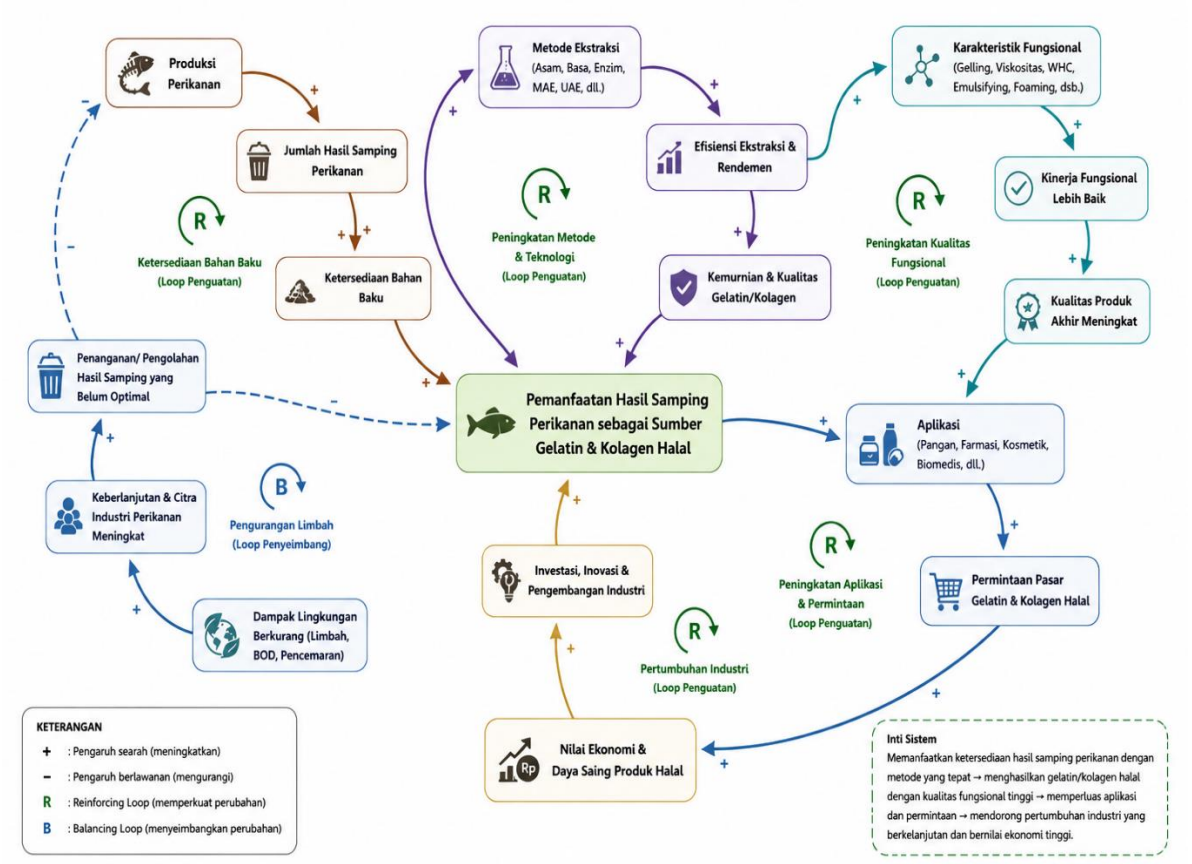
Tahap PRISMA	Uraian	Jumlah Artikel
Identifikasi	Total artikel teridentifikasi dari database ilmiah (Scopus, ScinceDirect, Google Scholar)	n = 877
	Artikel tambahan dari sumber lain	n = 117
	Artikel duplikat	n = 42
Screening	Artikel disaring berdasarkan judul dan abstrak	n = 718
	Artikel dikeluarkan karena tidak relevan dengan topik	n = 423
Kelayakan	Artikel full-text dinilai kelayakannya	n = 295
	Artikel full-text diekslusi karena tidak memenuhi kriteria inklusi	n = 225
Inklusi	Artikel akhir yang dianalisis untuk penulisan artikel	n = 70

Periode publikasi tidak dibatasi, namun seleksi literatur difokuskan pada publikasi terbaru untuk menangkap perkembangan mutakhir, tetapi beberapa rujukan awal yang bersifat dasar tetap dipertahankan karena penting untuk menjelaskan konsep kolagen, gelatin, parameter mutu, dan prinsip ekstraksi. Artikel tidak masuk dalam kategori (ekslusi) adalah, jika: (1) bukan artikel asli (penelitian, *review*, *conference paper*, standard internasional dan dokumen panduan), (2) studi yang berfokus pada kolagen/gelatin dari sumber mamalia tanpa perbandingan dengan sumber ikan, (3) artikel yang tidak membahas aspek ekstraksi,

ISSN : 2621 - 1475

karakterisasi, atau aplikasi, (4) abstrak konferensi tanpa full-text yang dapat diakses, (5) artikel duplikat, (6) studi yang tidak relevan dengan hasil samping perikanan, dan (7) artikel yang diterbitkan tidak berbahasa Inggris atau berbahasa Indonesia. Adapun kategori yang diulas dalam artikel dan memenuhi kriteria penelusuran (inclusi) meliputi: (1) bahan baku hasil samping perikanan (kulit, tulang, sisik dan gelembung renang) (2) metode ekstraksi kolagen dan gelatin dari sumber ikan, termasuk metode konvensional dan teknologi hijau (*ultrasound-assisted extraction, enzyme-assisted extraction, deep eutectic solvents, microwave processing, supercritical fluids, cold plasma*) (3) karakterisasi dan mutu kolagen atau gelatin ikan, dan (4) aplikasi produk (farmasi, pangan, nurasetikal, kosmetik, kemasan dan biomedis).

Selain sintesis naratif, artikel ini menggunakan *causal loop* (Gambar 1) untuk memetakan hubungan antara produksi perikanan, volume hasil samping, pilihan metode ekstraksi, kualitas kolagen/gelatin, ragam aplikasi bernilai tambah, permintaan pasar, dan dampak lingkungan. Pendekatan visual ini membantu memperjelas hubungan sistemik antara pemanfaatan hasil samping, peningkatan nilai ekonomi, dan penguatan ekonomi sirkular dalam industri perikanan.



Gambar 1. *Causal loop* pemanfaatan hasil samping perikanan sebagai sumber kolagen dan gelatin halal

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil samping perikanan sebagai sumber kolagen dan gelatin halal

Hasil samping perikanan memiliki potensi tinggi sebagai sumber kolagen karena mengandung jaringan ikat yang melimpah, terutama pada kulit, tulang, sisik, sirip, dan gelembung renang ikan. Bagian-bagian tersebut selama ini banyak dihasilkan sebagai hasil samping pengolahan dan dapat mencapai 60–75% bobot ikan (Karayannakidis & Zotos, 2016;

ISSN : 2621 - 1475

Nurilmala *et al.*, 2021; Espinales *et al.*, 2023; Rajabimashhadi *et al.*, 2023). Kulit, tulang, sisik, dan gelembung renang telah sering kali dilaporkan sebagai sumber utama kolagen tipe I dari berbagai spesies ikan air tawar maupun laut (García-Sifuentes *et al.*, 2021; Jaziri *et al.*, 2022; Barai *et al.*, 2025; Guan *et al.*, 2022).

Kulit ikan umumnya lebih mudah diekstraksi dan sering memberikan rendemen kolagen atau gelatin yang lebih tinggi dibanding sisik dan tulang. Hal ini terjadi karena kulit tidak memerlukan tahap demineralisasi intensif dan dapat diproses pada kondisi yang relatif lebih mudah (Jaziri *et al.*, 2022; Vázquez *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2025; Gaikwad & Kim, 2024). Sebaliknya, tulang dan sisik memerlukan demineralisasi untuk menghilangkan mineral, terutama kalsium fosfat dan hidroksiapatit, agar ekstraksi kolagen/gelatin berjalan efektif dan kadar abu produk akhir dapat dikendalikan (Karayannakidis & Zotos, 2016; Milovanović & Hayes, 2018; Gaikwad & Kim, 2024; Barai *et al.*, 2025).

Pemilihan bahan baku (Tabel 2) menentukan rendemen, kemurnian, dan sifat fungsional gelatin atau kolagen yang dihasilkan. Faktor yang perlu diperhatikan meliputi spesies, umur, habitat, bagian tubuh, kadar lemak, tingkat kesegaran, serta kondisi penyimpanan (Nurilmala *et al.*, 2021; Espinales *et al.*, 2023; Gaikwad & Kim, 2024; Yin *et al.*, 2025). Bahan baku yang tidak segera ditangani berisiko mengalami degradasi protein oleh enzim endogen dan mikroba, sehingga rendemen dan mutu fungsional dapat menurun (Karayannakidis & Zotos, 2016; Vázquez *et al.*, 2021; Espinales *et al.*, 2023; Somjid *et al.*, 2025). Oleh karena itu, pengendalian bahan baku perlu dimulai sejak tahap penyortiran, pencucian, pendinginan, penghilangan lemak, dan demineralisasi bila diperlukan (Karayannakidis & Zotos, 2016; Nurilmala *et al.*, 2021; Milovanović & Hayes, 2018; Reza & Annissa, 2023).

Pada skala industri, penerapan rantai dingin menjadi prasyarat penting karena kulit dan bagian kaya kolagen mudah terdegradasi pada suhu ruang (Karayannakidis & Zotos, 2016; Vázquez *et al.*, 2021; Espinales *et al.*, 2023; Gaikwad & Kim, 2024). Studi pada bahan lokal menunjukkan bahwa tulang ikan dan hasil samping lain dapat dimanfaatkan sebagai sumber gelatin halal melalui pendekatan hidrotermal maupun bantuan *ultrasound* yang lebih ramah lingkungan (Asih *et al.*, 2019; Adnan *et al.*, 2024; Milovanović & Hayes, 2018; Gaikwad & Kim, 2024). Namun, keberhasilan ekstraksi tidak cukup hanya dinilai dari rendemen; produk akhir tetap perlu diuji melalui *Fourier Transform Infrared* (FTIR), pH, kadar air, kadar abu, viskositas, kekuatan gel, profil protein, serta keamanan mikrobiologis dan logam berat (Karayannakidis & Zotos, 2016; Derkach *et al.*, 2022; Vázquez *et al.*, 2021; Somjid *et al.*, 2025).

Dengan pengendalian proses yang tepat, hasil samping perikanan dapat mengurangi ketergantungan pada gelatin mamalia impor sekaligus mendukung ekonomi sirkular berbasis sumber daya laut (Karayannakidis & Zotos, 2016; Milovanović & Hayes, 2018; Espinales *et al.*, 2023; Rajabimashhadi *et al.*, 2023). Pemanfaatan bahan baku juga membuka peluang nilai tambah bagi industri pengolahan ikan dan pelaku usaha, terutama ketika permintaan terhadap gelatin dan kolagen halal terus meningkat (Nurilmala *et al.*, 2021; Reza & Annissa, 2023; Adnan *et al.*, 2024).

ISSN : 2621 - 1475

Tabel 2. Arah riset pemanfaatan hasil samping perikanan sebagai sumber kolagen dan gelatin

Tema riset	Fokus utama	Peluang	Tantangan	Referensi
Bahan baku	Kulit, tulang, sisik, sirip, kepala, dan gelembung renang.	Mengurangi limbah, meningkatkan nilai tambah, dan mendukung penyediaan bahan halal.	Variasi mutu bahan, bau amis, kadar mineral, kontaminan, dan kebutuhan rantai dingin.	Coppola *et al.* (2020); Nurilmala *et al.* (2021); Nofianti *et al.* (2026)
Ekstraksi konvensional	Pretreatment asam/basa, demineralisasi, dan ekstraksi air panas.	Metode relatif sederhana, peralatan tersedia, dan mudah direplikasi.	Waktu proses lama, konsumsi air tinggi, serta risiko degradasi akibat asam atau suhu berlebihan.	Karim & Bhat (2009); Ahmad & Benjakul (2011)
Ekstraksi hijau	Ultrasound, microwave, enzim, DES/NADES, air terasidifikasi CO_2, dan supercritical CO_2.	Berpotensi menekan penggunaan bahan kimia, mempercepat proses, dan meningkatkan keberlanjutan.	Keamanan pelarut, biaya alat, scale-up, dan standar mutu masih perlu divalidasi.	Bai *et al.* (2017); Bisht *et al.* (2021); Batista *et al.* (2022); Phon *et al.* (2023); Gaikwad & Kim (2024)
Karakterisasi mutu	FTIR, SDS-PAGE, DSC, viskositas, kekuatan gel, pH, kadar air, kadar abu, protein, dan asam amino.	Mendukung standardisasi mutu dan pemilihan aplikasi produk.	Tidak semua studi melaporkan parameter lengkap dan metode uji sering bervariasi.	Muyonga *et al.* (2004); Gómez-Guillén *et al.* (2011); Al-Nimry *et al.* (2021)
Aplikasi produk	Pangan, film biopolimer, kapsul, kosmetik, hidrogel, *wound dressing, scaffold, dan drug delivery*.	Nilai ekonomi tinggi dan peluang substitusi gelatin mamalia.	Kekuatan gel, stabilitas termal, biokompatibilitas, sterilitas, dan regulasi.	Gómez-Guillén *et al.* (2011); Al-Nimry *et al.* (2021); ISO 10993-1:2025

Ekstraksi konvensional dan arah ekstraksi hijau

Sebagaimana disebutkan pada Tabel 2, bahwa ekstraksi gelatin dan kolagen secara konvensional umumnya dilakukan melalui *pretreatment* asam atau basa, diikuti ekstraksi menggunakan air panas atau pelarut berair (Triastuti *et al*., 2022; Rosmawati *et al.*, 2023). Pada produksi gelatin, heliks rangkap tiga kolagen mengalami denaturasi dan hidrolisis parsial sehingga menghasilkan rantai polipeptida yang lebih larut (Ahmed *et al.*, 2020). Perlakuan asam biasanya menghasilkan gelatin tipe A dan lebih sesuai untuk jaringan dengan ikatan silang rendah, seperti kulit ikan (Al-Nimry *et al*., 2021; Ahmed *et al.*, 2020). Sebaliknya, perlakuan basa menghasilkan gelatin tipe B dan lebih sering digunakan pada bahan dengan jaringan lebih kompleks atau ikatan silang lebih kuat (Karim & Bhat, 2009; Ahmad & Benjakul, 2011; Gómez-Guillén *et al*., 2011).

Efisiensi ekstraksi ditentukan oleh spesies, bagian tubuh, rasio pelarut terhadap bahan, konsentrasi asam atau basa, pH, suhu, durasi, ukuran partikel, serta tahap demineralisasi (Rather *et al*., 2022; Samatra *et al*., 2022). Pada bahan kaya mineral seperti tulang dan sisik, demineralisasi merupakan tahap kritis karena mineral yang tersisa dapat meningkatkan kadar abu dan menurunkan kemurnian produk (Cansu *et al*., 2023). Namun, penggunaan asam kuat secara berlebihan dapat mempercepat degradasi protein, menurunkan panjang rantai polipeptida, dan melemahkan sifat gel (Kittiphattanabawon *et al.*, 2005; Karim & Bhat, 2009).

Keterbatasan metode konvensional mendorong pengembangan ekstraksi hijau. Teknologi seperti *ultrasound-assisted extraction,*

ISSN : 2621 - 1475

microwave-assisted extraction, enzyme-assisted extraction, deep eutectic solvents/natural deep eutectic solvents (DES/NADES), air terasidifikasi CO_2, dan *supercritical* CO_2 dikembangkan untuk mengurangi waktu proses, konsumsi energi, serta penggunaan asam atau basa kuat (Bai *et al.*, 2017; Bisht *et al.*, 2021; Batista *et al.*, 2022; Phon *et al.*, 2023; Gaikwad & Kim, 2024; Maulina *et al.*, 2024). Meskipun demikian, pendekatan hijau tidak otomatis lebih unggul dalam semua kondisi. Keberhasilannya perlu dinilai berdasarkan keamanan pelarut, kemampuan pemulihan pelarut, biaya alat, risiko degradasi protein, kelayakan *scale-up*, dan kesesuaian mutu produk akhir (Bisht *et al.*, 2021; Batista *et al.*, 2022; Cansu, 2023; Gaikwad & Kim, 2024).

Dalam rancangan penelitian, target optimasi sebaiknya tidak hanya berfokus pada rendemen. Pendekatan yang lebih kuat adalah optimasi multi-respons yang mempertimbangkan rendemen, kadar abu, kadar protein, FTIR, distribusi berat molekul, kekuatan gel, viskositas, warna, aroma, titik leleh, keamanan, dan biaya proses. Metode *response surface methodology* (RSM) atau desain faktorial dapat digunakan untuk menjelaskan interaksi antarvariabel, misalnya konsentrasi asam, waktu *pretreatment*, amplitudo *ultrasound*, suhu ekstraksi, dan waktu ekstraksi (Jakhar *et al.*, 2014; Ramli *et al.*, 2023; Nurilmala *et al.*, 2023).

Penggunaan enzim protease

Protease seperti alkaline protease, neutral protease, bromelain, papain, pepsin, dan tripsin dapat memengaruhi karakteristik hidrolisat kolagen, terutama distribusi berat molekul dan aktivitas antioksidannya. Karena itu, pemilihan enzim menjadi faktor penting dalam menentukan sifat akhir peptida yang dihasilkan (Huai *et al.*, 2025). Enzim protease halal yang berasal dari tumbuhan, seperti bromelain dan papain, menarik untuk dikaji karena dapat mendukung proses produksi yang selaras dengan kebutuhan pasar halal. Tabel 3 memperlihatkan potensi dari bromelain dan papain sebagai sumber enzim halal.

Bromelain merupakan protease endopeptidase sistein dari nanas yang mampu menghidrolisis protein melalui pemutusan ikatan peptida internal (Triastuti *et al.*, 2025; Chin *et al.*, 2021; Pavan *et al.*, 2012). Enzim ini telah digunakan dalam berbagai aplikasi pangan, termasuk modifikasi protein dan peningkatan hasil produk berbasis kolagen (Pavan *et al.*, 2012). Aktivitas bromelain dipengaruhi oleh pH, suhu, dan waktu inkubasi, dengan kisaran pH optimum sekitar 4–8 dan suhu optimum sekitar 40–60 °C (Coscueta *et al.*, 2021; Nurdiani *et al.*, 2024). Pada suhu yang lebih rendah, aktivitas proteolitik tetap dapat berlangsung, tetapi laju hidrolisis menurun karena energi kinetik reaksi lebih rendah (Matinong *et al.*, 2022). Dengan demikian, penggunaan bromelain pada suhu rendah lebih sesuai untuk pretreatment lembut, sedangkan hidrolisis cepat membutuhkan suhu yang lebih dekat dengan kondisi optimum enzim (Coscueta *et al.*, 2021; Nurdiani *et al.*, 2024).

Kolagen ikan memiliki stabilitas termal yang lebih rendah dibanding kolagen mamalia, sehingga pengendalian suhu sangat penting untuk mencegah denaturasi berlebihan yang dapat merusak struktur triple helix (Zhang *et al.*, 2020). *Pretreatment* dingin perlu dipahami sebagai bagian dari strategi proses terpadu yang juga mencakup pengendalian pH, jenis asam, rasio pelarut, durasi perlakuan awal, ukuran partikel, suhu ekstraksi, dan metode ekstraksi (Gómez-Guillén *et al.*, 2011).

ISSN : 2621 - 1475

Tabel 3. Karakteristik kolagen/gelatin sebagai efek kerja enzim bromelain dan papain

Enzim halal	Bahan baku	Konsentrasi enzim	pH	Suhu (°C)	Waktu hidrolisis (jam)	Rendemen (%)	Referensi
Bromelain	Tulang ikan *Scomberomorus commersonii*	5%	6,5	50	9	18,5	Afifah *et al.* (2024)
Bromelain	Sisik ikan *Lutjanus campechanus*	5%	6,0	50	9	19,2	Triastuti *et al.* (2025)
Papain	Kulit ikan salmon (*Salmo salar*)	4%	5,0	60	6	22,5	Amalia *et al.* (2022)
Papain	Limbah tulang ikan	3%	5,5	55	5	20,8	Nurilmala *et al.* (2022)
Bromelain + *pretreatment* asam sitrat	Kulit ikan tenggiri	4% bromelain + 0,5% asam sitrat	5,5	50	8	21,7	Reza & Devi (2023)

Enzim protease dapat membantu memisahkan kolagen dari protein non-kolagen atau membuka jaringan sehingga proses ekstraksi berlangsung lebih efektif (Wu *et al.*, 2019). Pepsin merupakan salah satu enzim yang umum digunakan untuk memperoleh *pepsin-soluble collagen* (PSC). Pada kulit ikan salmon, penggunaan enzim dilaporkan dapat meningkatkan rendemen hingga 15,38% dengan struktur triple helix yang terkonfirmasi melalui analisis FTIR (Afifah *et al.*, 2024). Papain dan bromelain dapat dipertimbangkan sebagai protease alternatif, terutama untuk pengembangan proses yang memperhatikan aspek halal.

Keunggulan utama pendekatan enzimatik adalah selektivitasnya. Namun, hidrolisis yang terlalu intensif dapat menurunkan berat molekul, melemahkan kekuatan gel, dan mengubah fungsi produk akhir. Oleh karena itu, optimasi konsentrasi enzim, pH, suhu, waktu, dan rasio enzim terhadap substrat perlu dilakukan secara hati-hati. Kombinasi enzim dengan teknologi lain, seperti ultrasound, juga dapat menghasilkan hidrolisat kolagen dengan sifat fungsional berbeda dan membuka peluang pengembangan produk bernilai tambah (Wirayudha *et al.*, 2022).

Karakteristik fungsional dan parameter mutu

Mutu gelatin dan kolagen ikan perlu dinilai sebagai gabungan parameter kimia, fisik, struktural, fungsional, sensorik, dan keamanan. Parameter penting (Tabel 4) mencakup rendemen, kadar air, kadar abu, pH, warna, viskositas, kekuatan gel, distribusi berat molekul, struktur sekunder, stabilitas termal, komposisi asam amino, serta kesesuaian produk dengan aplikasi pangan, farmasi, kosmetik, kemasan, atau biomedis (Karim & Bhat, 2009; Lv *et al.*, 2019; Rather *et al.*, 2022; Cansu, 2023; Farooq *et al.*, 2024; Yin *et al.*, 2025).

Rendemen menunjukkan efisiensi ekstraksi, tetapi tidak selalu berbanding lurus dengan kualitas. Kondisi ekstraksi yang terlalu intensif dapat meningkatkan pelepasan protein, tetapi sekaligus memicu degradasi rantai polipeptida sehingga viskositas dan kekuatan gel menurun (Ahmad & Benjakul, 2011; Jakhar *et al.*, 2014; Nurilmala *et al.*, 2023; Phon *et al.*, 2023). Karena itu, interpretasi rendemen harus selalu dikaitkan dengan distribusi berat molekul, komposisi asam amino, dan sifat gel (Karim & Bhat, 2009; Kittiphattanabawon *et al.*, 2005; Muyonga *et al.*, 2004; Vázquez *et al.*, 2021; Cansu, 2023).

Kekuatan gel dan viskositas merupakan parameter fungsional utama gelatin. Keduanya menentukan kemampuan gelatin membentuk

ISSN : 2621 - 1475

jaringan gel, menahan air, memberi tekstur, serta menjaga kestabilan produk selama penyimpanan atau pengolahan (Karim & Bhat, 2009; Lv *et al.*, 2019; Usman *et al.*, 2021; Rather *et al.*, 2022; Cansu, 2023). Gelatin ikan sering memiliki titik leleh dan titik pembentukan gel yang lebih rendah dibanding gelatin mamalia karena kandungan asam amino, terutama prolin dan hidroksiprolin, cenderung lebih rendah. Kondisi tersebut dapat membatasi penggunaannya pada produk yang membutuhkan stabilitas suhu ruang tinggi, tetapi dapat menguntungkan pada produk yang membutuhkan sensasi cepat lumer di mulut (Karim & Bhat, 2009; Lv *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2025).

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi pita amida A, B, I, II, dan III yang berkaitan dengan gugus fungsional protein serta perubahan struktur sekunder selama konversi kolagen menjadi gelatin (Muyonga *et al.*, 2004; Derkach *et al.*, 2022; Jaziri *et al.*, 2022). Untuk memisahkan protein berdasarkan berat molekul, metode *Sodium Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis* (SDS-PAGE) membantu mengamati keberadaan rantai α, β, γ, serta fragmen peptida yang terbentuk selama ekstraksi, sehingga dapat menjelaskan tingkat degradasi protein dan hubungan antara struktur molekul dengan sifat fungsional produk (Kittiphattanabawon *et al.*, 2005; Vázquez *et al.*, 2021; Guan *et al.*, 2022; Jafari *et al.*, 2020). *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) digunakan untuk mengevaluasi stabilitas termal, suhu denaturasi, dan perubahan energi transisi akibat perlakuan ekstraksi atau modifikasi proses (Jafari *et al.*, 2020; Derkach *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2025).

Untuk aplikasi pangan dan farmasi, aspek keamanan harus menjadi parameter wajib. Produk perlu diuji terhadap cemaran mikrobiologis, logam berat, residu pelarut, kadar abu, kadar air, dan potensi alergen, karena bahan baku berasal dari hasil samping pengolahan yang memiliki risiko kontaminasi berbeda antarspesies dan lokasi produksi (Al-Nimry *et al.*, 2021; Nurilmala *et al.*, 2022; Espinales *et al.*, 2023; Rajabimashhadi *et al.*, 2023; Salim *et al.*, 2024). Pada aplikasi biomedis, evaluasi harus lebih ketat dan mencakup biokompatibilitas, sitotoksisitas, sterilitas, endotoksin, stabilitas penyimpanan, serta penilaian risiko biologis sesuai prinsip ISO 10993-1 dan pedoman regulator yang relevan (Jeevithan *et al.*, 2013; Jafari *et al.*, 2020; Al-Nimry *et al.*, 2021; Magtaan *et al.*, 2020; ISO 10993-1:2025; FDA, 2023).

Tabel 4. Parameter penting dalam evaluasi gelatin dan kolagen ikan

Parameter	Tujuan evaluasi	Metode umum	Catatan interpretasi	Rujukan
Rendemen	Menunjukkan efisiensi ekstraksi.	Perhitungan massa gelatin/kolagen terhadap bahan awal.	Tidak cukup sebagai indikator tunggal; harus dikaitkan dengan mutu.	Karim & Bhat (2009)
Kadar air	Mempengaruhi stabilitas penyimpanan dan risiko mikroba.	Gravimetri/oven sesuai metode standar.	Kadar air terlalu tinggi meningkatkan risiko penurunan mutu.	Al-Nimry *et al.* (2021)
Kadar abu	Menunjukkan efektivitas demineralisasi.	Pengabuan/analisis mineral.	Penting untuk tulang dan sisik yang kaya mineral.	Kittiphattanabawon *et al.* (2005)
pH	Berpengaruh pada rasa, stabilitas, viskositas, dan aplikasi.	pH meter pada larutan gelatin.	pH ekstrem dapat mempercepat degradasi.	Ahmad & Benjakul (2011)
Viskositas	Menunjukkan ukuran molekul dan perilaku larutan.	Viskometer/rheometer.	Sangat dipengaruhi suhu, konsentrasi, dan distribusi berat molekul.	Karim & Bhat (2009)

ISSN : 2621 - 1475

Tabel 4. Parameter penting dalam evaluasi gelatin dan kolagen ikan (lanjutan)

Parameter	Tujuan evaluasi	Metode umum	Catatan interpretasi	Rujukan
Kekuatan gel	Parameter komersial utama gelatin.	Bloom test/texture analyzer.	Rendemen tinggi tidak selalu menghasilkan gel kuat.	Karim & Bhat (2009); Gómez-Guillén *et al.* (2011)
FTIR	Mendeteksi pita amida dan perubahan struktur protein.	Spektroskopi FTIR.	Berguna untuk konfirmasi kolagen/gelatin dan perubahan struktur sekunder.	Muyonga *et al.* (2004)
SDS-PAGE	Menilai distribusi berat molekul dan rantai α/β.	Elektroforesis protein.	Menunjukkan degradasi atau hidrolisis berlebihan.	Kittiphattanabawon *et al.* (2005)
DSC	Menilai stabilitas termal dan suhu denaturasi.	Differential scanning calorimetry.	Penting untuk membandingkan kolagen ikan dan mamalia.	Jafari *et al.* (2020)
Keamanan	Menjamin kelayakan pangan, farmasi, atau biomedis.	Mikrobiologi, logam berat, residu pelarut, endotoksin, dan sitotoksisitas.	Tingkat pengujian bergantung pada aplikasi akhir.	Al-Nimry *et al.* (2021); FDA (2023); ISO 10993-1:2025

Aplikasi pangan, nutraseutika, farmasi, dan biomedis

Aplikasi pangan merupakan jalur pemanfaatan gelatin ikan yang paling langsung dan telah banyak diteliti (Lv *et al.*, 2019). Dalam produk pangan, gelatin ikan berfungsi sebagai pembentuk gel, penstabil, pengemulsi, pengental, bahan film, serta sistem enkapsulasi untuk nutrien dan senyawa bioaktif (Rather *et al.*, 2022). Namun, formulasi produk perlu disesuaikan karena sifat gelatin ikan berbeda dari gelatin mamalia, terutama pada kekuatan gel, viskositas, dan titik leleh yang memengaruhi performa pada berbagai aplikasi (Farooq *et al.*, 2024; Rigueto et al., 2022). Produk dari ikan air hangat cenderung memiliki karakteristik gelatin yang lebih mendekati gelatin mamalia dibanding ikan air dingin, meskipun variasi antarspesies tetap signifikan dan dapat memengaruhi konsistensi produk akhir (Karim & Bhat, 2009).

Pada bidang farmasi dan biomedis, gelatin ikan telah banyak diteliti sebagai bahan kapsul, hidrogel, sistem *drug delivery, wound dressing, scaffold*, dan *bioink* karena fleksibilitasnya dalam berbagai platform biomedis (Al-Nimry *et al.*, 2021). Potensi tersebut muncul dari sifat gelatin yang biodegradable, relatif biokompatibel, dan memiliki gugus fungsional yang memungkinkan modifikasi kimia maupun fisik untuk tujuan tertentu (Jafari *et al.*, 2020). Namun, standar aplikasi biomedis lebih ketat dibanding aplikasi pangan. Produk harus steril, bebas dari kontaminan berbahaya, dan menunjukkan konsistensi mutu antar-batch untuk menjamin keamanan dan efektivitasnya (FDA, 2023; ISO 10993-1:2025).

Untuk aplikasi kemasan pangan, gelatin dapat dibentuk menjadi *film biodegradable*. Kombinasi dengan polisakarida, plasticizer, antioksidan, atau antimikroba dapat memperbaiki sifat mekanik dan aktivitas perlindungan film (Rather *et al.*, 2022; Farooq *et al.*, 2024; Salim *et al.*, 2024). Tantangan utama film gelatin adalah sensitivitas terhadap kelembapan, permeabilitas uap air, dan kekuatan mekanik (Rosmawati *et al.*, 2025). Karena itu, riset film gelatin ikan perlu mengukur ketebalan, kuat tarik, elongasi, permeabilitas uap air, kelarutan, warna, aktivitas antioksidan atau antimikroba, migrasi bahan aktif, serta stabilitas selama penyimpanan (Rather *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2025).

Celah riset dan agenda penelitian di Indonesia

Celah riset pertama dalam pengembangan gelatin dan kolagen ikan di Indonesia adalah standardisasi bahan baku. Banyak studi melaporkan spesies ikan dan metode ekstraksi,

ISSN : 2621 - 1475

tetapi tidak selalu menyertakan informasi penting seperti ukuran ikan, umur, bagian tubuh yang digunakan, waktu pascapanen, suhu penyimpanan, kadar lemak awal, kadar mineral, dan tingkat kesegaran (Karim & Bhat, 2009; Lv *et al.*, 2019; Salim *et al.*, 2024). Padahal, variabel-variabel tersebut dapat memengaruhi komposisi kolagen dan sifat fungsional gelatin, termasuk kekuatan gel, viskositas, dan kemampuan membentuk jaringan gel (Rather *et al.*, 2022; Cansu, 2023). Oleh karena itu, penelitian di Indonesia perlu menyusun lembar karakterisasi bahan baku sebelum optimasi proses agar konsistensi mutu dan reproduktibilitas hasil dapat ditingkatkan (Nurilmala *et al.*, 2023).

Celah kedua adalah optimasi proses ekstraksi dengan penggunaan bahan kimia yang lebih rendah atau lebih ramah lingkungan. Sebagian riset masih menggunakan asam mineral kuat dan ekstraksi konvensional. Agenda penelitian berikutnya dapat mengeksplorasi asam organik, ultrasound, enzim, DES/NADES, CO_2, atau kombinasi pretreatment dingin dengan ekstraksi suhu terkontrol (Farooq *et al.*, 2024; Salim *et al.*, 2024). Desain penelitian sebaiknya menerapkan optimasi multi-respons yang menyeimbangkan rendemen, mutu fungsional, keamanan, dan biaya proses, bukan hanya mengejar rendemen tertinggi (Nurilmala *et al.*, 2023; Rather *et al.*, 2022).

Celah ketiga adalah pengendalian bau amis dan oksidasi yang dapat muncul akibat lipid teroksidasi, amina volatil, atau protein non-kolagen yang tersisa (Yin *et al.*, 2025; Jafari *et al.*, 2020). Strategi yang dapat diuji meliputi pencucian dingin, *defatting*, penggunaan adsorben atau karbon aktif, pengendalian pH, perlakuan enzim, serta formulasi dengan bahan penyangga aroma (Al-Nimry *et al.*, 2021; Farooq *et al.*, 2024). Evaluasi strategi tersebut perlu mencakup dampaknya terhadap warna, rasa, kekuatan gel, viskositas, keamanan, dan penerimaan produk.

Celah keempat adalah aspek keamanan dan regulasi. Produk pangan harus diuji terhadap cemaran mikroba, logam berat, kadar air, kadar abu, residu pelarut, dan ketertelusuran halal. Produk farmasi dan biomedis membutuhkan evaluasi lebih ketat, termasuk sterilitas, endotoksin, sitotoksisitas, biokompatibilitas, dan validasi proses produksi (ISO 10993-1:2025; FDA, 2023; Al-Nimry *et al.*, 2021; Jafari *et al.*, 2020). Dengan demikian, agenda penelitian gelatin dan kolagen ikan di Indonesia perlu bergerak dari ekstraksi skala laboratorium menuju sistem mutu, scale-up, dan kajian kelayakan industri (Rather *et al.*, 2022; Salim *et al.*, 2024).

Berdasarkan celah tersebut, topik penelitian yang potensial adalah optimasi ekstraksi gelatin halal bersumber dari tulang, sisik, atau kulit ikan menggunakan kombinasi asam organik, pretreatment dingin, dan *ultrasound*. Variabel independen dapat mencakup konsentrasi asam, waktu pretreatment, rasio pelarut, amplitudo ultrasound, suhu ekstraksi, dan waktu ekstraksi. Variabel respon dapat mencakup rendemen, kadar air, kadar abu, pH, protein, viskositas, kekuatan gel, FTIR, SDS-PAGE, warna, bau, total mikroba, dan logam berat (Nurilmala *et al.*, 2023; Ideia *et al.*, 2020). Pendekatan faktorial atau RSM sesuai untuk mengevaluasi pengaruh beberapa faktor proses secara simultan dan menentukan kondisi optimal yang kuat untuk publikasi maupun pengembangan produk (Nurilmala *et al.*, 2023; Farooq *et al.*, 2024).

KESIMPULAN

Hasil samping perikanan seperti kulit, tulang, sisik, kepala, sirip, dan gelembung renang memiliki potensi besar sebagai sumber kolagen dan gelatin halal untuk aplikasi pangan, farmasi, nutraseutika, kosmetik, kemasan, dan biomedis. Tren penelitian terkini menunjukkan pergeseran dari eksplorasi bahan baku menuju optimasi proses, ekstraksi ramah lingkungan, karakterisasi fungsional, dan pengembangan produk hilir. Teknik seperti *ultrasound-assisted extraction, enzyme-assisted extraction, deep eutectic solvents*, gelombang mikro, fluida superkritis, dan plasma dingin menawarkan peluang untuk meningkatkan efisiensi proses serta mengurangi penggunaan bahan kimia keras. Namun, setiap teknologi tetap memerlukan validasi terhadap mutu, keamanan, biaya, dan kelayakan skala industri. Gelatin ikan masih menghadapi sejumlah

ISSN : 2621 - 1475

tantangan, antara lain kekuatan gel yang relatif rendah, stabilitas termal terbatas, bau amis, variasi bahan baku, dan belum seragamnya standardisasi mutu. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengintegrasikan optimasi proses, parameter mutu yang komprehensif, pengujian keamanan, dan analisis ekonomi. Bidang penelitian yang mendesak meliputi standardisasi bahan baku lokal, optimasi ekstraksi rendah bahan kimia, peningkatan sifat fungsional, pengendalian bau, pengujian kontaminan, dan pengembangan produk yang sesuai dengan kebutuhan industri halal. Dengan dukungan penelitian terukur dan pengendalian mutu, hasil samping perikanan dapat menjadi bahan baku strategis dalam ekonomi sirkular berbasis sumber daya laut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan teknis dalam proses penelusuran, penyuntingan bahasa, dan pengorganisasian literatur, melalui alat bantu berbasis kecerdasan buatan, termasuk ChatGPT, Scispace, dan Consensus, yang telah digunakan secara terbatas untuk membantu penyuntingan dan pengelompokan informasi; verifikasi sumber termasuk interpretasi ilmiah. Tanggung jawab akhir atas substansi manuskrip berada pada penulis.

REFERENSI

Adnan, S., Kresnowati, M., Marlina, M., & Bindar, Y. (2024). Preliminary evaluation of halal gelatin production from Indonesian local fish by hydrothermal. The 7th Biomedical Engineering's Recent Progress in Biomaterials, Drugs Development, and Medical Devices: The 15th Asian Congress On Biotechnology in conjunction with the 7th International Symposium on Biomedical Engineering (ACB-ISBE 2022). https://doi.org/10.1063/5.0196017.

Afifah, A., Suparno, O., Haditjaroko, L., Tarman, K., Setiyono, A., & Nugraha, A. W. (2024). Isolation and characterization of collagen from salmon (Salmo salar) skin using papain enzyme: Isolasi dan karakterisasi kolagen dari kulit ikan salmon (Salmo salar) menggunakan enzim papain. Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia, 27(6), 536–552. https://doi.org/10.17844/jphpi.v27i6.53285.

Ahmad, M., and Benjakul, S. (2011). Characteristics of gelatin from the skin of unicorn leatherjacket (Aluterus monoceros) as influenced by acid pretreatment and extraction time. Food Hydrocolloids, 25(3), 381–388. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.07.004.

Ahmed, M., Verma, A., & Patel, R. (2020). Collagen extraction and recent biological activities of collagen peptides derived from sea-food waste: A review. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 18, 100315. https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100315.

Al-Nimry, S., Dayah, A., Hasan, I., & Daghmash, R. (2021). Cosmetic, Biomedical and Pharmaceutical Applications of Fish Gelatin/Hydrolysates. Marine Drugs, 19. https://doi.org/10.3390/md19030145.

Amnuaikit, T., Shankar, R., & Benjakul, S. (2022). Hydrolyzed Fish Collagen Serum from By-Product of Food Industry: Cosmetic Product Formulation and Facial Skin Evaluation. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su142416553.

Asih, I., Kemala, T., & Nurilmala, M. (2019). Halal gelatin extraction from Patin fish bone (Pangasius hypophthalmus) by-product with ultrasound-assisted extraction. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 299. https://doi.org/10.1088/1755-1315/299/1/012061.

Bai, C., Wei, Q., & Ren, X. (2017). Selective extraction of collagen peptides with high purity from cod skins by deep eutectic solvents. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 5(8), 7220– 7227.

https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01439.

Batista, M. P., *et al.* (2022). Extraction of biocompatible collagen from blue shark skins through the conventional extraction process intensification using natural deep eutectic solvents. Frontiers in Chemistry, 10, 937036. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.937036

Barai, A., Inhamuns, A., Nóbrega, T., Guimarães, C., Mourão, L., De Souza, A., Pontes, F., Farias, F., Mendes, J., Rufino, J., & De Oliveira, A. (2025). Extraction of collagen from by-products of Amazonian fish tambaqui, Colossoma macropomum and pirarucu Arapaima gigas. Applied Food Research. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100720

Bisht, M., Martins, M., Dias, A. C. R. V., Ventura, S. P. M., and Coutinho, J. A. P. (2021). Uncovering the potential of aqueous solutions of deep eutectic solvents for the extraction and purification of collagen type I from Atlantic codfish (Gadus morhua). Green Chemistry, 23(20), 8940–8948. https://doi.org/10.1039/D1GC01432C

Cansu, Ü. (2023). Comparative evaluation of different separation and concentration procedures on some quality and functional properties of fish gelatin. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 83, 103237. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103237.

Coppola, D., Oliviero, M., Vitale, G., Lauritano, C., D'Ambra, I., Iannace, S., & De Pascale, D. (2020). Marine Collagen from Alternative and Sustainable Sources: Extraction, Processing and Applications. Marine Drugs, 18. https://doi.org/10.3390/md18040214.

Coscueta, E. R., Brassesco, M. E., & Pintado, M. (2021). Collagen-based bioactive bromelain hydrolysate from salt-cured cod skin. Applied Sciences, 11(18), 8538. https://doi.org/10.3390/app11188538

Derkach, S., Kolotova, D., Kuchina, Y., & Shumskaya, N. (2022). Characterization of Fish Gelatin Obtained from Atlantic Cod Skin Using Enzymatic Treatment. Polymers, 14. https://doi.org/10.3390/polym14040751.

Ersinger, V., Lamas, D., & Massa, Á. (2025). A review of marine collagens: approaches on extractions, applications, market, and future trends. Environmental Science and Pollution Research, 32, 16077 - 16097. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36684-x.

Espinales, C., Romero-Peña, M., Calderón, G., Vergara, K., Cáceres, P., & Castillo, P. (2023). Collagen, protein hydrolysates and chitin from by-products of fish and shellfish: An overview. Heliyon, 9 4, e14937. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14937.

Farooq, S., Ahmad, M., Zheng, S., Ali, U., Li, Y., Cui, S., & Zhang, H. (2024). A review on marine collagen: sources, extraction methods, colloids properties, and food applications. Collagen and Leather, 6, 1-27. https://doi.org/10.1186/s42825-024-00152-y.

Food and Drug Administration (FDA). (2023). Use of International Standard ISO 10993-1, Biological evaluation of medical devices — Part 1: Evaluation and testing within a risk management process: Guidance for industry and Food and Drug Administration staff.

Gaikwad, S., & Kim, M. (2024). Fish By-Product Collagen Extraction Using Different Methods and Their Application. Marine Drugs, 22. https://doi.org/10.3390/md22020060.

García-Sifuentes, C., Zamorano-Apodaca, J., Martínez-Porchas, M., Scheuren-Acevedo, S., & Mazorra-Manzano, M. (2021). Isolation and properties of collagen extracted from mixed byproducts obtained from different fish species. Biotecnia. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i3.1463.

Guan, Y., He, J., Chen, J., Li, Y., Zhang, X., Zheng, Y., & Jia, L. (2022). Valorization of Fish Processing By-Products:

Microstructural, Rheological, Functional, and Properties of Silver Carp Skin Type I Collagen. Foods, 11. https://doi.org/10.3390/foods11192985.

Hassoun, A., Cropotova, J., Trollman, H., Jagtap, S., Garcia-Garcia, G., Parra-López, C., Nirmal, N., Özoğul, F., Bhat, Z., Aït-Kaddour, A., & Bono, G. (2023). Use of industry 4.0 technologies to reduce and valorize seafood waste and by-products: A narrative review on current knowledge. Current Research in Food Science, 6. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100505.

Huai, X., Hou, Y., Li, K., Zhang, X., Sun, J., Zheng, M., Wang, K., & Sang, Y. (2025). Structural characterization and enzymatic hydrolysis of tilapia skin and scale gelatin: Antioxidant properties and peptide profiling of hydrolysates. LWT–Food Science and Technology, 118885. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118885.

Ideia, P., Pinto, J., Ferreira, R., & Figueiredo, L. (2020). Fish processing industry residues: A review of valuable products extraction and characterization methods. Waste and Biomass Valorization, 11(9), 3899–3912. https://doi.org/10.1007/s12649-019-00739-1.

International Organization for Standardization. (2025). ISO 10993-1:2025: Biological evaluation of medical devices — Part 1: Requirements and general principles for the evaluation of biological safety within a risk management process.

Jafari, H., Lista, A., Siekapen, M., Ghaffari-Bohlouli, P., Nie, L., Alimoradi, H., & Shavandi, A. (2020). Fish Collagen: Extraction, Characterization, and Applications for Biomaterials Engineering. Polymers, 12. https://doi.org/10.3390/polym12102230.

Jakhar, J. K., Basu, S., Sasidharan, S., Chouksey, M. K., & Gudipati, V. (2014). Optimization of process parameters for gelatin extraction from the skin of Blackspotted croaker using response surface methodology. Journal of Food Science and Technology, 51(11), 3235– 3243. https://doi.org/10.1007/s13197-012-0883-9.

Jaziri, A., Shapawi, R., Mokhtar, R., Noordin, W., & Huda, N. (2022). Physicochemical and Microstructural Analyses of Pepsin-Soluble Collagens Derived from Lizardfish (Saurida tumbil Bloch, 1795) Skin, Bone and Scales. Gels, 8. https://doi.org/10.3390/gels8080471.

Jeevithan, E., Zhao, Q., Bao, B., & Wu, W. (2013). Biomedical and Pharmaceutical Application of Fish Collagen and Gelatin: A Review. Journal of Nutritional Therapeutics, 2, 218-227. https://doi.org/10.6000/1929-5634.2013.02.04.6.

Karayannakidis, P., & Zotos, A. (2016). Fish Processing By-Products as a Potential Source of Gelatin: A Review. Journal of Aquatic Food Product Technology, 25, 65 - 92. https://doi.org/10.1080/10498850.2013.827767.

Karim, A. A., & Bhat, R. (2009). Fish gelatin: Properties, challenges, and prospects as an alternative to mammalian gelatins. Food Hydrocolloids, 23(3), 563–576. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.07.002.

Kittiphattanabawon, P., Benjakul, S., Visessanguan, W., Nagai, T., & Tanaka, M. (2005). Characterisation of acid-soluble collagen from skin and bone of bigeye snapper (Priacanthus tayenus). Food Chemistry, 89(3), 363–372. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.02.042.

Lv, L., Huang, Q., Ding, W., Xiao, X., Zhang, H., & Xiong, L. (2019). Fish gelatin: The novel potential applications. Journal of Functional Foods, 63, 103581. https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103581.

Magtaan, J., Fitzpatrick, B., & Murphy, R. (2020). Elucidating the Biological Activity of Fish-Derived Collagen and Gelatine Hydrolysates using Animal Cell Culture-A review. Current pharmaceutical design.

https://doi.org/10.2174/1381612826666201210112119.

Martins, E., Reis, R., & Silva, T. (2023). In Vivo Skin Hydrating Efficacy of Fish Collagen from Greenland Halibut as a High-Value Active Ingredient for Cosmetic Applications. Marine Drugs, 21. https://doi.org/10.3390/md21020057.

Matinong, M., Gatchalian, R., & Acierto, R. (2022). Plant-derived proteases for enzymatic extraction of collagen and gelatin: a review. Biology, 11(6), 905. https://doi.org/10.3390/biology11060905.

Maulina, D. E., Ismayanti, A. P., Ana, S. S., & Hasdar, M. (2024). Tinjauan produksi gelatin: Sumber, bahan baku, pretreatment, dan teknik ekstraksi lanjutan. Jurnal Agroindustri Pangan, 3(3), 125–137. doi:10.47767/agroindustri.v3i3.753

Milovanović, I., & Hayes, M. (2018). Marine Gelatine from Rest Raw Materials. Applied Sciences. https://doi.org/10.20944/preprints201810.0174.v1.

Muyonga, J. H., Cole, C. G. B., & Duodu, K. G. (2004). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopic study of acid soluble collagen and gelatin from skins and bones of young and adult Nile perch (Lates niloticus). Food Chemistry, 86(3), 325–332. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.038.

Nofianti, K. A., Safitri, N., Januar, K. N., Paramita, D. P., Norhayati, & Hakim, L. (2026). Collagen and gelatin extraction from Manyung bone waste as alternative halal raw materials for food production. Indonesian Journal of Halal Research, 8(1), 34–51. https://doi.org/10.15575/ijhar.v8i1.48828

Nurdiani R, Firdaus M, Prihanto A. A, Jaziri A. A, Jati M. R, Abdurrahman T. R, Ifilah S, Debataraja E. R, Huda N. Enzymatic Hydrolysis of Protein Hydrolysate from Pangasius sp. by-Product using Bromelain. Curr Res Nutr Food Sci 2024; 12(1). http://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.12.1.10

Nurilmala, M. , Sriwahyuni, D., Nugraha, R., Kartika, V. R., Darmawan, N., Putri, E. A. W., Pranata, A. W., and Ochiai, Y. (2023). Response surface methodology (RSM) for optimization of gelatin extraction from pangasius fish skin and its utilization for hard capsules. Arabian Journal of Chemistry, 16(8), Article 104789. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104938.

Nurilmala, M., Suryamarevita, H., Hizbullah, H. H., Jacoeb, A. M., & Ochiai, Y. (2022). Fish skin as a biomaterial for halal collagen and gelatin. Saudi Journal of Biological Sciences, 29(2), 1100–1110. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.056.

Nurilmala, M., Darmawan, N., Putri, E. A. W., Jacoeb, A. M., & Irawadi, T. T. (2021). Pangasius fish skin and swim bladder as gelatin sources for hard capsule material. *International Journal of Biomaterials*, *2021*, Article 6658002. https://doi.org/10.1155/2021/6658002.

Pavan, R., Jain, S., Shraddha, & Kumar, A. (2012). Properties and therapeutic application of bromelain: A review. Biotechnology Research International, 2012, 976203. https://doi.org/10.1155/2012/976203

Phon, S., Pradana, A. L., & Thanasupsin, S. P. (2023). Recovery of collagen/gelatin from fish waste with carbon dioxide as a green solvent: An optimization and characterization. Recycling, 8(2), 30. https://doi.org/10.3390/recycling8020030

Putri, E. A. W., Pranata, A. W., and Ochiai, Y. (2023). Response surface methodology (RSM) for optimization of gelatin extraction from pangasius fish skin and its utilization for hard capsules. Arabian Journal of Chemistry, 16(8), Article 104789. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104938

Rajabimashhadi, Z., Gallo, N., Salvatore, L., & Lionetto, F. (2023). Collagen Derived from Fish Industry Waste: Progresses and Challenges. Polymers, 15. https://doi.org/10.3390/polym15030544.

Ramli, R. A., Mohamad Razali, U. H., & Mohd Noor, N. Q. I. (2023). Optimization of extraction conditions of gelatin from buffalo (Bubalus bubalis) skins using response surface methodology. Heliyon, 9(3), e14367. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14367.

Rather, J. A., Akhter, N., *et al.* (2022). A comprehensive review on gelatin: Understanding impact of the sources, extraction methods, and modifications on potential packaging applications. Food Packaging and Shelf Life, 34, 100945. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100945.

Reza, M., & Annissa, D. (2023). Fish-based gelatin: exploring a sustainable and halal alternative. Journal of Halal Science and Research. https://doi.org/10.12928/jhsr.v4i2.8596.

Rigueto, C., Rosseto, M., Alessandretti, I., De Oliveira, R., Wohlmuth, D., Menezes, J., Loss, R., Dettmer, A., & Pizzutti, I. (2022). Gelatin films from wastes: A review of production, characterization, and application trends in food preservation and agriculture.. Food research international, 162 Pt B, 112114 . https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112114.

Rosmawati, Sari, S. F., Asnani, & Rohma, A. Y. (2024). Characterisation of snakehead fish, Channa striata (Bloch, 1793), byproduct and its gelatin properties. Asian Fisheries Science, 37(3), 159–173. https://doi.org/10.33997/j.afs.2024.37.3.003

Rosmawati, Sari, S.F., Asnani, *et al.* (2023). Effect of various extraction times on the physicochemical properties, functional groups, and microstructure of snakehead fish Channa striata skin– scale blended gelatin. Fish Sci 89, 853–862. https://doi.org/10.1007/s12562-02301713-6

Rosmawati, R., Sari, S. F., & Asnani, A. (2025). Influence of sorbitol and glycerol on physical and tensile properties of biodegradable–edible film from snakehead gelatin and κ- carrageenan. Journal of Food Science. https://doi.org/10.1155/ijfo/7568352

Salim, N., Madhan, B., Glattauer, V., & Ramshaw, J. (2024). Comprehensive review on collagen extraction from food by-products and waste as a value-added material. International journal of biological macromolecules, 134374. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134374.

Samatra, M. Y., Mohd Noor, N. Q. I., Mohamad Razali, U. H., Bakar, J., & Md Shaarani, S. (2022). Bovidae-based gelatin: Extractions method, physicochemical and functional properties, applications, and future trends. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 21(4), 3153–3176. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12967.

Silva, I., Vaz, B., Sousa, S., Pintado, M., Coscueta, E., & Ventura, S. (2024). Gastrointestinal delivery of codfish Skin-Derived collagen Hydrolysates: Deep eutectic solvent extraction and bioactivity analysis. Food research international, 175, 113729. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113729.

Somjid, P., Klomklao, S., Benjakul, S., & Kishimura, H. (2025). Influence of drying techniques on the properties of gelatin derived from Atlantic salmon skin. International journal of biological macromolecules, 147537. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147537.

Subhan, F., Hussain, Z., Tauseef, I., Shehzad, A., & Wahid, F. (2020). A review on recent advances and applications of fish collagen. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61, 1027 - 1037. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1751585.

Triastuti, W. E., Suprapto, Agustiani, E., Qomariyah, L., Subyakto, A., Widasgantri, T., & Septa K, M. A. (2022). The Production

of Gelatin from Snapper Scales (Lutjanus camphecanus sp.) through Enzymatic Pretreatment. IPTEK The Journal of Engineering, 8(1), 44–48. https://doi.org/10.12962/j23378557.v8i1.a1286. 0

Triastuti, W. E., Suprapto, S., Putri Hani, R. S., & Lestari, H. D. (2025). The effect of bromelain enzyme on crosslinking fish-based halal gelatin. Engineering Headway, 14, 3–11. https://doi.org/10.4028/p-e9JFTU

Usman, M., Sahar, A., Inam-Ur-Raheem, M., Rahman, U., Sameen, A., & Aadil, R. (2021). Gelatin Extraction from Fish Waste and Potential Applications in Food Sector. International Journal of Food Science & Technology. https://doi.org/10.1111/ijfs.15286.

Vázquez, J., Hermida-Merino, C., Hermida-Merino, D., Piñeiro, M., Johansen, J., Sotelo, C., PérezMartín, R., & Valcárcel, J. (2021). Characterization of Gelatin and Hydrolysates from Valorization of Farmed Salmon Skin By-Products. Polymers, 13. https://doi.org/10.3390/polym13162828.

Waqar, M., Sajjad, N., Ullah, Q., Vasanthkumar, S., Ahmed, F., Panpipat, W., Aluko, R., Kaur, L., Chaijan, M., & Ageru, T. (2025). Fish By-Products Utilization in Food and Health: Extraction Technologies, Bioactive, and Sustainability Challenges. Food Science & Nutrition, 13. https://doi.org/10.1002/fsn3.71184.

Wirayudha, R. H., Herawati, D., Kusnandar, F., & Nurhayati, T. (2022). Kapasitas Antioksidan dan Sifat Fisikokimia Hidrolisat Kolagen dari Kulit Ikan Tuna Sirip Kuning dengan Metode Ultrasound Assisted Enzymatic Reaction: The Antioxidant Capacity and Physicochemical Properties of Yellowfin Tuna Skin Collagen Hydrolysate Using Ultrasound-Assisted Enzymatic Hydrolysis. Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia, 25(3), 393404. https://doi.org/10.17844/jphpi.v25i3.43325.

Wu, J., Kong, L., Zhang, J., & Chen, W. (2019). Extraction and properties of acid-soluble collagen and pepsin-soluble collagen from silver carp scales. Polish Journal of Environmental Studies, 28(4), 2923–2930. https://doi.org/10.15244/pjoes/93742.

Zhang, X., Xu, S., Shen, L. *et al.* (2020) Factors affecting thermal stability of collagen from the aspects of extraction, processing and modification. J Leather Sci Eng 2:19. https://doi.org/10.1186/s42825-020-00033-0.

Yin, Q., Shi, H., Zhao, Y., Yu, G., Wu, H., Xia, G., & Yang, T. (2025). Physiochemical and functional properties of gelatin obtained from frigate mackerel (Auxis thazard), skipjack tuna (Katsuwonus pelamis), Longtail tuna (Thunnus tonggol) and yellowfin tuna (Thunnus albacares) skin. Food Chemistry: X, 27. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102360.

Xu, S., Zhao, Y., Song, W., Zhang, C., Wang, Q., Li, R., Shen, Y., Gong, S., Li, M., & Sun, L. (2023). Improving the Sustainability of Processing By-Products: Extraction and Recent Biological Activities of Collagen Peptides. Foods, 12. https://doi.org/10.3390/foods12101965.