

**ANALISIS HIGH-PRESSURE PROCESSING PADA PRODUK DAGING RTE:
TINJAUAN TERHADAP STRUKTUR PROTEIN MIOFIBRIL DAN WHC**

***A Review of High-Pressure Processing in RTE Meat Products: Myofibrillar
Structure and WHC***

Aulia Alfianti^{1*)}

¹⁾Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas
Tanjungpura

*0895709907890 dan *Email korespondensi : auliaalfianti45@gmail.com

Diajukan: 30/04/2026 Diperbaiki: 09/06/2026 Diterima: 21/07/2026

ABSTRAK

Produk daging *ready-to-eat* (RTE) merupakan salah satu pangan olahan yang semakin berkembang karena praktis dan memiliki kandungan gizi yang tinggi. Namun, kadar air dan nutrisi yang tinggi menyebabkan produk ini rentan terhadap pertumbuhan mikroorganisme serta penurunan mutu selama penyimpanan. High-pressure processing (HPP) merupakan teknologi pengolahan non-termal yang berpotensi meningkatkan keamanan mikrobiologis dengan mempertahankan karakteristik sensori dan nilai gizi produk. Kajian ini bertujuan menganalisis pengaruh high-pressure processing (HPP) terhadap perubahan struktur protein miofibril serta implikasinya terhadap water holding capacity (WHC) pada produk daging RTE. Metode pada penelitian ini adalah literatur review terhadap artikel ilmiah *peer-reviewed* periode 2015–2025 yang diperoleh dari basis data Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan PubMed. Artikel dipilih berdasarkan relevansinya dengan topik perubahan struktur protein miofibril, mekanisme kerja HPP, dan karakteristik WHC pada produk daging RTE. Hasil kajian menunjukkan bahwa HPP memodifikasi struktur sekunder, tersier, dan kuaterner protein miofibril melalui perubahan interaksi non-kovalen tanpa merusak struktur primer. Pada tekanan moderat (100–200 MPa), HPP memicu *unfolding* parsial protein yang meningkatkan kelarutan, mengekspos gugus reaktif, serta memperkuat interaksi protein-air dan protein-protein sehingga membentuk jaringan gel yang lebih kompak dan meningkatkan water holding capacity (WHC). Sebaliknya, tekanan yang terlalu tinggi menyebabkan denaturasi berlebih dan agregasi protein sehingga menghasilkan struktur gel yang lebih kasar dan menurunkan retensi air. Dengan demikian, optimasi tingkat tekanan dan durasi perlakuan high-pressure processing (HPP) menjadi faktor penting untuk mengendalikan perubahan konformasi protein miofibril sehingga menghasilkan struktur gel yang optimal dan meningkatkan WHC pada produk daging RTE.

Kata kunci: HPP; Protein Miofibril; RTE; Water Holding Capacity (WHC)

ABSTRACT

Ready-to-eat (RTE) meat products are a rapidly growing category of processed foods due to their convenience and high nutritional value. However, their high

moisture and nutrient content makes them susceptible to microbial growth and quality deterioration during storage. High-pressure processing (HPP) is a non-thermal processing technology with the potential to enhance microbiological safety while preserving the product's sensory characteristics and nutritional value. This review aims to analyze the impact of HPP on myofibrillar protein structural changes and the resulting implications for water-holding capacity (WHC) in RTE meat products. The study employed a literature review of peer-reviewed scientific articles published between 2015 and 2025, sourced from Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and PubMed. Articles were selected based on their relevance to myofibrillar protein structural changes, HPP mechanisms, and WHC characteristics in RTE meat products. The findings indicate that HPP modifies the secondary, tertiary, and quaternary structures of myofibrillar proteins by altering non-covalent interactions, without disrupting the primary structure. At moderate pressures (100–200 MPa), HPP induces partial protein unfolding, which increases solubility, exposes reactive groups, and strengthens protein-water and protein-protein interactions; this results in a more compact gel network and enhanced WHC. Conversely, excessively high pressures cause excessive denaturation and protein aggregation, leading to a coarser gel structure and reduced water retention. Therefore, optimizing pressure levels and treatment duration is crucial for controlling myofibrillar protein conformational changes, thereby achieving an optimal gel structure and improving WHC in RTE meat products.

Keywords: High-pressure-processing, Myofibrillar Protein, Ready-to-eat meat, Water Holding Capacity (WHC)

PENDAHULUAN

Ready-to-eat (RTE) merupakan produk pangan yang telah melalui seluruh proses pengolahan sehingga dikonsumsi tanpa perlakuan tambahan sebelum penyajian. Produk RTE, khususnya produk daging, menunjukkan tren peningkatan konsumsi dalam beberapa tahun terakhir seiring dengan kebutuhan masyarakat terhadap pangan yang praktis dan mudah diakses. Faktor kenyamanan, keterjangkauan harga, cita rasa, dan variasi produk mendorong peningkatan konsumsi produk daging RTE di masyarakat (Esemu dkk., 2023; Naseem dkk., 2025).

Peningkatan permintaan pasar mendorong untuk memperkuat aspek keamanan dan mutu produk daging RTE. Produk siap saji menghadapi risiko kontaminasi mikroorganisme patogen akibat penerapan higiene yang kurang optimal pada tahap pascapengolahan dan pra-pengemasan (Jeon dkk., 2022). Produk daging RTE mengandung protein, vitamin, dan mineral dalam jumlah relatif tinggi sehingga memberikan nilai gizi penting bagi konsumen (Lee dkk., 2022). Kandungan gizi tersebut menyebabkan produk rentan terhadap kerusakan mikrobiologis dan

reaksi kimia yang dapat menurunkan mutu. Klasifikasi pangan berdasarkan kadar air (*moisture content*) dan aktivitas air (A_w) membagi produk ke dalam tiga kategori, yaitu *high-moisture* ($A_w > 0,90$), *intermediate-moisture* ($A_w 0,60-0,90$), dan *low-moisture* ($A_w < 0,60$) (Fellows, 2017). Sosis fermentasi seperti *salchichón* memiliki nilai A_w awal sekitar 0,94 sehingga termasuk kategori *high moisture* (Martín dkk., 2021). Produk *beef jerky* dengan $A_w 0,70-0,85$ dikategorikan sebagai *intermediate-moisture* (Ojha dkk., 2018), dan produk *meat powder* dengan $A_w 0,093-0,470$ termasuk *low-moisture* (Uzzaman dkk., 2018). Pengendalian A_w menjadi aspek penting dalam pengolahan karena berperan langsung dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme serta memperpanjang umur simpan tanpa menurunkan kualitas fisikokimia dan sensori produk.

Pengolahan termal berperan sebagai metode konvensional dalam menginaktivasi mikroorganisme pada produk daging. Suhu tinggi menyebabkan degradasi komponen sensitif panas, perubahan tekstur, modifikasi sifat reologi, dan penurunan karakteristik sensori. Teknologi non-termal dikembangkan sebagai alternatif metode pengolahan yang mampu mempertahankan karakteristik mutu produk sekaligus menjamin keamanan mikrobiologisnya. Salah satu teknologi yang banyak dikaji adalah *High Pressure Processing* (HPP), yang memanfaatkan tekanan tinggi pada kisaran 100–800 MPa untuk menginaktivasi mikroorganisme dan enzim dengan paparan panas yang minimal (Toledo dkk., 2018). Penerapan HPP pada tekanan 400–600 MPa terbukti efektif menginaktivasi patogen umum pada produk *seafood*, seperti *Vibrio* dan *Listeria spp.*, serta memperlambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk (Evelyna & Silva, 2019), sehingga teknologi HPP menunjukkan potensi luas dalam meningkatkan keamanan mikrobiologis berbagai produk pangan tanpa menyebabkan kerusakan mutu yang signifikan. Produk daging RTE umumnya telah melalui proses pemasakan sebelum perlakuan tekanan, sehingga protein berada dalam kondisi terdenaturasi parsial akibat paparan panas awal. Tekanan tinggi memodifikasi struktur protein pada daging mentah melalui perubahan ikatan non-kovalen dan struktur sekunder. Respons protein dalam sistem daging matang menunjukkan karakteristik berbeda karena telah mengalami denaturasi sebelumnya (Bolumar dkk., 2024; B. Wang dkk., 2025). Perbedaan kondisi awal tersebut menjadi faktor penting dalam evaluasi efektivitas HPP pada produk daging RTE.

Protein miofibril (MP) menyumbang sekitar 50-60% dari total protein daging dan berperan sebagai komponen utama dalam pembentukan tekstur serta stabilitas gel (Li dkk., 2023). Perlakuan HPP mengubah konformasi protein miofibril dan memengaruhi kemampuan pembentukan jaringan gel serta daya ikat air. Perubahan struktur tersebut menentukan *water holding capacity* (WHC) yang berperan dalam retensi air, tekstur, dan kualitas sensori produk daging RTE (X. Wang dkk., 2025).

Meskipun beberapa penelitian telah melaporkan efektivitas high-pressure-processing (HPP) dalam keamanan pangan mikrobiologis dan mempertahankan mutu produk daging. Penelitian ini secara komprehensif menghubungkan perubahan struktur protein myofibril akibat HPP dengan mekanisme peningkatan water holding capacity (WHC), khususnya pada produk daging ready-to-eat (RTE) yang masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada sistesis bukti ilmiah mengenai hubungan antara perubahan konformasi protein miofibril yang mengaitkan perubahan struktural protein miofibril dan implikasinya terhadap WHC sebagai dasar optimasi parameter HPP pada produk daging RTE.

METODE PENELITIAN

Tinjauan literatur ini disusun secara sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengintegrasikan bukti ilmiah mengenai pengaruh *High Pressure Processing* (HPP) terhadap perubahan struktur protein miofibril (MP) serta implikasinya terhadap water holding capacity (WHC) pada produk daging *ready-to-eat* (RTE). Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan PubMed menggunakan kombinasi kata kunci, seperti **("high pressure processing" OR HPP) AND (myofibrillar protein OR myofibril) AND ("water holding capacity" OR WHC) AND ("ready-to-eat" OR RTE OR meat)***. Artikel yang disertakan merupakan publikasi *peer-reviewed* berbahasa Inggris pada periode 2015–2025 yang membahas perlakuan HPP pada produk daging RTE serta mengevaluasi perubahan struktur protein miofibril dan/atau WHC. sementara studi yang hanya berfokus pada aspek mikrobiologi dikecualikan. Seleksi dilakukan melalui tahap identifikasi, penyaringan judul dan abstrak, serta evaluasi teks lengkap hingga diperoleh 40 artikel yang memenuhi kriteria. Data kemudian diklasifikasikan berdasarkan jenis produk, tingkat tekanan dan durasi perlakuan, serta metode analisis yang digunakan. Analisis dilakukan secara deskriptif-kualitatif dengan

pendekatan komparatif untuk mengidentifikasi pola perubahan struktur protein dan hubungannya dengan WHC, kemudian disintesis secara naratif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Produk Daging *Ready-To-Eat* (RTE) terhadap Aplikasi HPP

Produk daging RTE (*Ready-to-Eat*) seperti *cooked ham*, dada ayam rendah natrium, sosis rendah garam, dan *chicken batter* menunjukkan respons yang beragam terhadap aplikasi *High Pressure Processing* (HPP) yang dipengaruhi oleh tingkat tekanan, lama penahanan, formulasi, serta tahapan pemanasan. *Cooked ham* yang diberi perlakuan HPP setelah proses pemasakan tidak mengalami perubahan signifikan pada komposisi proksimat meskipun terjadi reduksi atau eliminasi nitrit, sehingga kualitas nutrisinya tetap terjaga (Karwowska dkk., 2020; Molina dkk., 2025). Nilai pH pada sampel HPP meningkat secara signifikan ($P < 0,05$) akibat perubahan konformasi protein selama proses penekanan. Nilai TBARS tidak menunjukkan perbedaan signifikan akibat kombinasi HPP dan sistem pengemasan, yang mengindikasikan stabilitas oksidatif tetap terkendali selama penyimpanan (Molina dkk., 2025). Parameter warna relatif stabil pada sampel yang mengandung nitrit dan dikemas dengan *vacuum skin packaging*, sehingga tekanan tinggi pascapemasakan tidak langsung memicu perubahan struktur protein yang cukup besar untuk mengubah warna secara nyata (Bolumar dkk., 2020; Molina dkk., 2025). Nilai kekerasan pada *ham* tanpa nitrit menurun setelah HPP, sedangkan sampel dengan nitrit tidak menunjukkan perbedaan signifikan ($P > 0,05$), yang menunjukkan bahwa komposisi formulasi berperan dalam menentukan respons tekstural terhadap tekanan tinggi (Molina dkk., 2025).

Produk dada ayam RTE rendah natrium memperlihatkan peningkatan pH signifikan setelah perlakuan HPP akibat terbenamnya gugus asam amino selama *unfolding* protein (Orell dkk., 2020). Aktivitas air (A_w) tidak terpengaruh oleh perlakuan tekanan tinggi, sejalan dengan temuan Ros-Polski dkk., 2015. Kandungan air meningkat secara signifikan ($P < 0,05$) karena peningkatan transfer massa larutan marinasi dan peningkatan kelarutan protein miofibrilar yang berkontribusi pada peningkatan *water holding capacity* (O'Neill dkk., 2019; Orell dkk., 2020). Perubahan tekstur bergantung pada lama *holding time* dan tingkat substitusi NaCl. Perlakuan tekanan dalam waktu singkat menurunkan kekerasan akibat *unfolding*

miosin dan denaturasi kolagen, sedangkan perlakuan lebih lama atau tekanan lebih tinggi menghasilkan respons tekstural berbeda sesuai kondisi sistem (Khan dkk., 2019; Orell dkk., 2020).

Sosis rendah garam yang diproses dengan HPP menunjukkan perubahan pada parameter warna terutama nilai b^* . Nilai b^* pada sampel HPP mendekati kontrol, sedangkan kombinasi *starter culture* dan HPP meningkatkan nilai b^* secara signifikan ($p < 0,05$) akibat inaktivasi enzim dan denaturasi protein yang memengaruhi intensitas kekuningan (Chai & Sheen, 2021; Sun dkk., 2019; Xiao dkk., 2021). Jumlah *Clostridium perfringens* pada kelompok HPP lebih rendah secara signifikan setelah 16 hari penyimpanan, yang menunjukkan kemampuan tekanan tinggi dalam menghambat germinasi dan *outgrowth spora* (Silva & Evelyn, 2023; Smith dkk., 2021). Kerusakan subletal pada bakteri asam laktat terjadi pada awal penyimpanan, yang memungkinkan terjadinya pemulihan populasi pada fase akhir penyimpanan (Xiao dkk., 2021).

Chicken batter yang diproses dengan kombinasi tekanan dan pemanasan menunjukkan perbedaan karakteristik yang jelas pada tingkat tekanan berbeda. Perlakuan 200 MPa menghasilkan gel yang lebih halus dan kompak, sedangkan 400 MPa menghasilkan struktur lebih longgar dan berair pada tahap awal pemanasan (Zheng dkk., 2021; Zheng dkk., 2015). Nilai kekerasan meningkat lebih optimal pada 200 MPa dibandingkan 400 MPa, yang justru dapat menurunkan kualitas tekstur (Zheng dkk., 2021; Zheng dkk., 2017). Gangguan struktur miofibril terjadi sangat cepat pada tekanan 200 dan 400 MPa sebelum suhu mencapai titik denaturasi miosin sekitar 55 °C, yang menunjukkan bahwa tekanan tinggi mampu memicu perubahan struktural independen dari efek termal (Zheng dkk., 2021). Jaringan gel yang terbentuk pada 200 MPa lebih terorganisasi dan berpori, sehingga meningkatkan *water holding capacity* dan memperbaiki kualitas tekstur produk (Zheng dkk., 2018). Literatur-literatur tersebut menunjukkan bahwa aplikasi HPP pada produk daging RTE memengaruhi karakteristik fisikokimia, mikrobiologis, warna, dan tekstur tanpa selalu mengubah komposisi dasar produk. Respons produk sangat dipengaruhi oleh level tekanan, lama penahanan, formulasi, serta tahap pemanasan yang diterapkan. Optimalisasi parameter proses menjadi faktor kunci dalam menjaga keseimbangan antara keamanan mikrobiologis, stabilitas oksidatif, mutu sensori, dan karakteristik tekstural pada produk daging RTE.

Tabel 1. Pengaruh HPP terhadap Struktur Protein Miofibril dan *Water Holding Capacity* (WHC)

Referensi	Sampel	Tekanan (MPa)	Hasil Utama	Dampak WHC
Li <i>et al.</i> (2021)	Sistem protein	200–400	Mobilitas air turun	Meningkat
Molina <i>et al.</i> (2025)	<i>Cooked ham</i>	400–600	pH naik, TBARS stabil	Stabil
Orell <i>et al.</i> (2020)	<i>Chicken RTE</i>	300–500	pH & kadar air naik	Meningkat
Tamm <i>et al.</i> (2016)	Sistem daging	>300	Agregasi tinggi	Menurun
Wang <i>et al.</i> (2020)	Protein miofibril	100–300	Kelarutan naik	Meningkat
Wang <i>et al.</i> (2025)	Protein miofibril	100–500	<i>Unfolding</i> diikuti agregasi	Meningkat kemudian menurun
Xiao <i>et al.</i> (2021)	Sosis rendah garam	200–400	Warna & mikroba berubah	Stabil
Zhang <i>et al.</i> (2017)	Protein miofibril	100–500	α -heliks turun, β -sheet naik	Meningkat pada tekanan moderat
Zhao <i>et al.</i> (2022)	Protein miofibril	100–400	<i>Unfolding</i> & agregasi	Bersifat bifasik
Zheng <i>et al.</i> (2021)	<i>Chicken batter</i>	200 vs 400	Gel lebih kompak (200 MPa)	Lebih tinggi pada tekanan moderat

Tabel 2. Ringkasan Perubahan Struktur Protein Miofibril

Produk RTE	Kondisi HPP	Perubahan Struktur Protein Miofibril	Dampak terhadap WHC	Referensi
Cooked ham	Pascapemasakan, tekanan moderat	Perubahan konformasi terbatas, struktur relatif stabil	WHC relatif stabil	Karwowska <i>et al.</i> , 2020; Molina <i>et al.</i> , 2025
Dada ayam rendah natrium	100–200 MPa	Unfolding parsial, peningkatan kelarutan protein	WHC meningkat	O'Neill <i>et al.</i> , 2019; Orell <i>et al.</i> , 2020
Sosis rendah garam	HPP + starter culture	Denaturasi ringan, dipengaruhi formulasi	WHC relatif stabil, tekstur membaik	Sun <i>et al.</i> , 2019; Xiao <i>et al.</i> , 2021
Chicken batter	± 200 MPa	Gel lebih homogen dan kompak	WHC tertinggi	Zheng <i>et al.</i> , 2018; Zheng <i>et al.</i> , 2021
Chicken batter	≥ 400 MPa	Agregasi protein berlebih	WHC menurun	Zheng <i>et al.</i> , 2021

Perubahan Struktur Protein Miofibril (MP) terhadap Aplikasi HPP

Perubahan struktur protein miofibril akibat aplikasi *High Pressure Processing* (HPP) menunjukkan respons bertahap pada tingkat sekunder, tersier, hingga kuaterner tanpa merusak struktur primer yang tersusun atas ikatan kovalen rantai polipeptida (Zhang dkk., 2017). Struktur primer tetap stabil karena tekanan hingga 500 MPa tidak cukup untuk memutus ikatan peptida maupun disulfida intramolekul. Modifikasi terutama terjadi pada interaksi nonkovalen yang mempertahankan konformasi tiga dimensi protein. Penurunan proporsi α -heliks disertai peningkatan β -sheet, β -turn, dan *random coil* mencerminkan *unfolding* parsial akibat pelemahan ikatan hidrogen intra dan intermolekul (Zhang dkk., 2017; Zhao dkk., 2022). Restrukturisasi tersebut menunjukkan bahwa HPP memicu reorganisasi konformasi menuju konfigurasi yang lebih adaptif terhadap pembentukan jaringan gel.

Tekanan moderat sekitar 100–200 MPa meningkatkan kelarutan protein melalui disosiasi kompleks aktomiosin dan depolimerisasi filamen tebal serta tipis sehingga fraksi miosin dan aktin lebih mudah terdispersi dalam medium (Wang dkk., 2020; Zhang dkk., 2017). Peningkatan kelarutan berkorelasi dengan terbukanya struktur globular yang mengekspos residu hidrofobik, tirosin, triptofan, serta gugus sulfhidril reaktif yang sebelumnya terpendam di bagian interior molekul (Wang dkk., 2020; Zhao dkk., 2022). Paparan gugus reaktif tersebut memperkuat interaksi protein–air dan protein–protein selama pemanasan sehingga mendukung pembentukan jaringan gel tiga dimensi yang lebih homogen. Reduksi ukuran partikel dan peningkatan nilai zeta *potential* absolut pada tekanan moderat mempertahankan dispersi protein dalam keadaan stabil sehingga kemampuan gelasi dan *water holding capacity* meningkat (Wang dkk., 2020; Zhao dkk., 2022).

Tekanan lebih tinggi di atas 300 MPa memicu denaturasi berlebihan yang diikuti pembentukan agregat melalui interaksi hidrofobik dan pembentukan ikatan disulfida antarmolekul (Wang dkk., 2020; Zhang dkk., 2017). Kandungan sulfhidril reaktif menurun akibat oksidasi dan pembentukan jembatan disulfida sehingga terbentuk polimer berat molekul tinggi yang kurang larut. Agregasi prematur sebelum pemanasan menghambat reorganisasi protein selama gelasi termal dan menghasilkan struktur gel kasar dengan rongga besar serta elastisitas lebih rendah. Penurunan entalpi denaturasi dan perubahan profil reologi dinamis menunjukkan berkurangnya fraksi protein natif yang mampu berpartisipasi dalam pembentukan jaringan elastis (Zhang et al., 2017).

Perubahan struktur protein miofibril akibat HPP menunjukkan pola bifasik yang ditandai peningkatan sifat fungsional pada tekanan moderat dan penurunan kualitas pada tekanan berlebih (Xue dkk., 2018; Zhao dkk., 2022). *Unfolding* parsial pada tekanan sekitar 200 MPa menghasilkan keseimbangan optimal antara disosiasi struktur kuarterner dan pembentukan ulang interaksi antarmolekul sehingga gel yang terbentuk memiliki kekuatan tinggi, struktur kompak, serta kapasitas ikat air lebih baik. Regulasi tekanan menjadi faktor kunci dalam mengendalikan keseimbangan antara denaturasi terkontrol dan agregasi berlebihan, yang pada akhirnya menentukan kualitas struktural dan fungsional protein miofibril pada sistem pangan berbasis daging (Wang dkk., 2020; Zhao dkk., 2022).

Keterkaitan *Water Holding Capacity* terhadap Aplikasi HPP

Water holding capacity (WHC) merupakan salah satu sifat fungsional penting dalam sistem pangan yang menggambarkan kemampuan bahan pangan, khususnya protein, untuk mengikat dan mempertahankan air selama proses pengolahan maupun penyimpanan. Kapasitas ini sangat dipengaruhi oleh struktur protein, interaksi antar molekul, serta kondisi proses yang diterapkan pada bahan pangan. Aplikasi *High Pressure Processing* (HPP) mampu memodifikasi struktur protein tanpa melibatkan suhu tinggi secara dominan, sehingga perubahan sifat fungsional seperti WHC dapat terjadi melalui perubahan konformasi protein, peningkatan interaksi protein–air, serta pembentukan jaringan gel yang lebih stabil (Wang dkk., 2025).

Tekanan tinggi pada proses HPP dapat menyebabkan perubahan struktur protein mulai dari tingkat kuarterner hingga sekunder. Tekanan rendah hingga moderat pada proses HPP menyebabkan *unfolding* parsial pada struktur protein sehingga gugus hidrofobik dan gugus reaktif seperti sulfihidril yang sebelumnya tersembunyi menjadi terekspos. Kondisi ini meningkatkan interaksi antarprotein serta meningkatkan kemampuan protein untuk berinteraksi dengan molekul air. Perubahan konformasi tersebut berkontribusi pada peningkatan kelarutan protein serta perbaikan sifat fungsionalnya dalam sistem pangan, termasuk kemampuan pengikatan air (Wang dkk., 2025).

Peningkatan WHC pada sistem protein daging akibat perlakuan HPP berkaitan erat dengan pembentukan jaringan gel protein yang lebih kompak. Pembentukan gel protein terjadi melalui berbagai interaksi kimia, antara lain ikatan

hidrogen, interaksi hidrofobik, ikatan ionik, serta ikatan disulfida yang membentuk struktur tiga dimensi sehingga mampu menahan air di dalam matriks protein. Penerapan tekanan moderat sekitar 200 MPa meningkatkan kelarutan protein miofibril dan mendorong terbentuknya jaringan gel yang lebih seragam serta padat. Kondisi tersebut memungkinkan air terperangkap lebih efektif di dalam matriks protein sehingga meningkatkan WHC pada produk daging (Wang dkk., 2020).

Perubahan distribusi dan mobilitas air dalam sistem protein juga terjadi akibat penerapan HPP. Perlakuan tekanan tinggi mampu menurunkan ukuran partikel protein serta meningkatkan luas permukaan interaksi antara protein dan air. Kondisi tersebut menyebabkan air lebih terikat kuat dalam matriks protein dan menurunkan mobilitas air bebas sehingga kemampuan bahan pangan dalam mempertahankan air selama proses pemanasan atau penyimpanan menjadi meningkat (Li dkk., 2021).

Pengaruh HPP terhadap *water holding capacity* juga berkaitan dengan perubahan sifat gelasi protein (Xu et al., 2024). Kombinasi tekanan tinggi dan pemanasan memodifikasi proses denaturasi dan gelasi protein miofibril sehingga terbentuk jaringan gel dengan struktur mikro yang berbeda. Struktur gel yang dihasilkan cenderung lebih lunak namun memiliki kemampuan menahan air yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan pemanasan saja. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tekanan tinggi memodifikasi interaksi protein selama pembentukan gel sehingga meningkatkan kemampuan jaringan protein dalam mempertahankan air (Zheng dkk., 2019).

Efektivitas HPP terhadap WHC sangat dipengaruhi oleh tingkat tekanan yang digunakan. Tekanan yang terlalu tinggi menyebabkan denaturasi protein secara berlebihan sehingga protein mengalami agregasi dan membentuk struktur jaringan yang tidak homogen. Struktur jaringan yang terbentuk menjadi lebih kasar dan berpori besar sehingga kemampuan pengikatan air menurun. Kondisi tersebut umumnya terjadi pada tekanan di atas sekitar 300 MPa yang menyebabkan agregasi protein berlebihan dan penurunan kapasitas pengikatan air (Wang dkk., 2025). Fenomena serupa juga dilaporkan pada produk daging yang mengalami perlakuan tekanan tinggi pada tahap proses tertentu, di mana perubahan struktur protein akibat tekanan memengaruhi kemampuan retensi air produk (Tamm dkk., 2016).

Pengaruh HPP terhadap WHC tidak hanya terjadi pada sistem protein hewani tetapi juga pada bahan pangan berbasis tanaman. Perlakuan HPP pada tekanan

sekitar 300 MPa mampu meningkatkan WHC dibandingkan metode pemanasan konvensional. Peningkatan tersebut berkaitan dengan kemampuan HPP dalam mempertahankan struktur sel bahan pangan sehingga jaringan sel tetap mampu mengikat dan menahan air secara optimal tanpa mengalami kerusakan struktural yang signifikan (Nandang dkk., 2025).

Keseluruhan hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi HPP memberikan pengaruh signifikan terhadap WHC melalui modifikasi struktur protein, pembentukan jaringan gel yang lebih stabil, serta peningkatan interaksi antara protein dan air. Tekanan moderat meningkatkan kemampuan bahan pangan dalam menahan air, sedangkan tekanan yang terlalu tinggi menyebabkan agregasi protein yang menurunkan kemampuan retensi air.

Kesenjangan Tinjauan dan Arah Tinjauan

Sebagian besar penelitian mengenai penerapan *High Pressure Processing* (HPP) pada sistem daging masih berfokus pada aspek inaktivasi mikroorganisme dan peningkatan keamanan pangan, sementara kajian mengenai keterkaitan antara perubahan struktur protein miofibril (MP) dan implikasinya terhadap sifat fungsional, khususnya *water holding capacity* (WHC) pada produk daging *ready-to-eat* (RTE) masih terbatas. Penelitian yang tersedia umumnya mengevaluasi perubahan kualitas seperti tekstur, kehilangan cairan, atau stabilitas fisikokimia tanpa mengaitkannya secara mekanistik dengan perubahan konformasi protein yang mendasarinya. Sebagian besar kajian juga dilakukan pada daging mentah atau protein terisolasi, sedangkan respons protein dalam sistem daging matang atau RTE yang telah mengalami denaturasi parsial akibat pemanasan awal belum banyak dievaluasi secara komprehensif. Variasi parameter proses HPP, termasuk tingkat tekanan, waktu penahanan, serta perbedaan formulasi produk, menghasilkan respons yang beragam terhadap karakteristik struktural protein dan kemampuan retensi air sehingga mekanisme interaksi antar faktor tersebut belum sepenuhnya dipahami. Tinjauan ini diarahkan untuk mengintegrasikan berbagai temuan penelitian mengenai karakteristik produk daging RTE terhadap aplikasi HPP, perubahan struktur protein miofibril akibat tekanan tinggi, serta hubungan mekanistik antara modifikasi struktur protein dan dinamika WHC, sehingga dapat memberikan kerangka konseptual yang lebih jelas dalam memahami peran HPP terhadap sifat struktural dan fungsional protein pada produk daging RTE serta mendukung

optimalisasi parameter proses dalam pengembangan produk pangan yang aman dan berkualitas.

KESIMPULAN DAN SARAN

High Pressure Processing (HPP) berpotensi meningkatkan kualitas produk daging *ready-to-eat* (RTE) melalui pengendalian perubahan struktur protein miofibril yang berpengaruh terhadap water holding capacity (WHC). Berdasarkan hasil kajian, tekanan moderat (100–200 MPa) memberikan kondisi yang paling optimal karena mampu meningkatkan WHC dan mempertahankan kualitas tekstur, sedangkan tekanan yang terlalu tinggi cenderung menurunkan sifat fungsional protein. Oleh karena itu, optimasi tingkat tekanan dan waktu penahanan HPP menjadi faktor penting dalam menghasilkan produk daging RTE yang aman dan berkualitas. Variasi formulasi produk, tingkat tekanan, serta waktu penahanan menjadi faktor penting yang menentukan keseimbangan antara perubahan struktur protein dan sifat fungsional yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengaturan parameter proses HPP secara tepat berperan penting dalam mengoptimalkan stabilitas struktural protein, mempertahankan kualitas tekstur, serta meningkatkan kemampuan retensi air pada produk daging RTE.

Kajian ini memberikan implikasi praktis bagi industri pangan dalam menentukan parameter HPP yang tepat untuk meningkatkan mutu dan daya simpan produk daging RTE. Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada optimasi parameter HPP pada berbagai jenis produk daging RTE serta evaluasi perubahan struktur protein miofibril dan WHC selama penyimpanan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini, baik dalam bentuk dukungan teknis, fasilitas, maupun kontribusi pemikiran, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian ini tidak menerima dukungan pendanaan dari pihak mana pun.

DAFTAR PUSTAKA

Bolumar, T., Lohmayer, R., Peukert, M., Thiemann, K., Münch, S., & Brüggemann, D. A. (2024). High-pressure processing enhances saltiness perception and

sensory acceptability of raw but not of cooked cured pork loins leveraging salty and umami taste. *Frontiers in Nutrition*, 11 (1): 1352550.

- Bolumar, T., Orlie, V., Bak, K. H., Aganovic, K., Sikes, A., Guyon, C., Stübler, A.-S., Lamballerie, M., Hertel, C., & Brüggemann, D. A. (2020). High-pressure processing (HPP) of meat products: Impact on quality and applications. In F. J. Barba, C. Tonello-Samson, E. Puértolas, & M. Lavilla (Eds.), *Present and future of high pressure processing*. 12(2) : 221–244
- Chai, H.-E., & Sheen, S. (2021). Effect of high pressure processing, allyl isothiocyanate, and acetic acid stresses on *Salmonella* survivals, storage, and appearance color in raw ground chicken meat. *Food Control*, 123(1) : 107784.
- Esemu, S. N., Njoh, S. T., Ndip, L. M., Kenek, N. K., Kfusi, J. A., & Njukeng, A. P. (2023). Ready-to-Eat foods: A potential vehicle for the spread of coagulase-positive staphylococci and antimicrobial-resistant *Staphylococcus aureus* in Buea Municipality, South West Cameroon. *Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*. 13(1): 9735319.
- Evelyna, & Silva, F. V. M. (2019). Heat assisted HPP for the inactivation of bacteria, moulds and yeasts spores in foods: Log reductions and mathematical models. *Trends in Food Science & Technology*. 88(1)1: 43–156.
- Fellows, P. J. (2017). *Food Processing Technology: Principles and Practice* (4th ed.). Woodhead Publishing.
- Jeon, Y. J., Myung, G. E., & Min, S. C. (2022). In-package cold plasma treatment enhances the antimicrobial efficacy of malic acid-incorporated whey protein edible coating against *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* in steamed fish paste. *Food Packaging and Shelf Life*. 33(2) : 100905.
- Karwowska, M., Kononiuk, A., & Wójciak, K. M. (2020). Impact of sodium nitrite reduction on lipid oxidation and antioxidant properties of cooked meat products. *Antioxidants*, 9(1): 9-15.
- Khan, M. A., Ali, S., Yang, H., Kamboh, A. A., Ahmad, Z., Tume, R. K., & Zhou, G. (2019). Improvement of color, texture and food safety of ready-to-eat high pressure-heat treated duck breast. *Food Chemistry*. 277(4): 646–654.
- Lee, H. S., Kim, N., & Min, S. C. (2022). Inactivation of *Salmonella* in steamed fish cake using an in-package combined treatment of cold plasma and ultraviolet-activated zinc oxide. *Food Control*. 135(1) : 108772.
- Li, N., Zhang, K., Dong, X., Xu, Y., Tan, Z., Cao, G., Liu, X., Zhou, D., & Li, D. (2023). Modification of the structure and function of myofibrillar protein by structurally relevant natural phenolic compounds. *Food Bioscience*. 53 (2) : 102676.
- Li, Y., Kang, Z., Sukmanov, V., & Ma, H. (2021). Effects of soy protein isolate on gel properties and water holding capacity of low-salt pork myofibrillar protein under high pressure processing. *Meat Science*. 176 (1): 108471.
- Martín, I., Rodríguez, A., Sánchez-Montero, L., Padilla, P., & Córdoba, J. J. (2021). Effect of the dry-cured fermented sausage “Salchichón” processing with a selected *Lactobacillus sakei* on *Listeria monocytogenes* and microbial

- population. *Foods*, 10(4), 856.
- Molina, J. R. G., Melios, S., Crofton, E., Frias Celayeta, J. M., Bolton, D. J., & Boinestean, A. (2025). Effects of nitrite level, packaging system and high-pressure processing treatment on physicochemical and sensory properties of cooked ham. *LWT – Food Science and Technology*, 231, 118345.
- Nandang, S. A., Setiawan, P. B., Purnomo, E. H., Qin, S., Ketnawa, S., Wongsu, P., & Konsue, N. (2025). Comparative effects of high-pressure and thermal processing on the nutritional and functional properties of duckweed. *Food Chemistry Advances*, 9: 101176.
- Naseem, T., Zahid, U., Shahzad, A., Hassan, S. A., Abdi, G., & Aadil, R. M. (2025). Cold plasma as a frontier in combating foodborne bacterial pathogens in ready-to-eat (RTE) foodstuff. *Applied Food Research*, 5(1): 100842.
- O'Neill, C. M., Cruz-Romero, M. C., Duffy, G., & Kerry, J. P. (2019). Improving marinade absorption and shelf life of vacuum packed marinated pork chops through the application of high pressure processing as a hurdle. *Food Packaging and Shelf Life*. 21 (2) : 100350.
- Ojha, K. S., Granato, D., Rajuria, G., Barba, F. J., Kerry, J. P., & Tiwari, B. K. (2018). Application of chemometrics to assess the influence of ultrasound frequency, *Lactobacillus sakei* culture and drying on beef jerky manufacture: Impact on amino acid profile, organic acids, texture and colour. *Food Chemistry*, 239 (4) : 544–550.
- Orell, R., Muñoz, G. T., Cepero-Betancourt, Y., Reyes-Parra, J. E., Badillo-Ortiz, A., & Pérez-Won, M. (2020). Effects of high hydrostatic pressure processing and sodium reduction on physicochemical properties, sensory quality, and microbiological shelf life of ready-to-eat chicken breasts. *LWT – Food Science and Technology*. 127 (2) : 109352.
- Ros-Polski, V., Koutchma, T., Xue, J., Defelice, C., & Balamurugan, S. (2015). Effects of high hydrostatic pressure processing parameters and NaCl concentration on the physical properties, texture and quality of white chicken meat. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 30 (2) : 31–42.
- Silva, F. V. M., & Evelyn. (2023). Pasteurization of food and beverages by high pressure processing (HPP) at room temperature: Inactivation of *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, and other microbial pathogens. *Applied Sciences*. 13(2) : 1193.
- Smith, C. J., Olszewska, M. A., & Diez-Gonzalez, F. (2021). Selection and application of natural antimicrobials to control *Clostridium perfringens* in sous-vide chicken breasts. *International Journal of Food Microbiology*. 347 : 109193.
- Sun, S., Rasmussen, F. D., Cavender, G. A., & Sullivan, G. A. (2019). Texture, color and sensory evaluation of sous-vide cooked beef steaks processed using high pressure processing as method of microbial control. *LWT – Food Science and Technology*, 103 (2) : 169–177.
- Tamm, A., Bolumar, T., Bajovic, B., & Toepfl, S. (2016). Salt (NaCl) reduction in cooked ham by a combined approach of high pressure treatment and the salt

replacer KCl. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 36 (2) : 294–302.

- Toledo, R. T., Singh, R. K., & Kong, F. (2018). *Fundamentals of food process engineering* (4th ed.). Springer Cham.
- Uzzaman, M. A., Bakar, J., Rahman, R. A., Mustapha, N. M., & Idris, M. I. (2018). Storage stability of spray-dried tilapia meat powder produced under optimized condition. *Journal of Food Technology & Preservation*, 2(1): 6–14.
- Wang, B., Chen, X., Yan, B., Zhang, N., Tao, Y., Hu, J., Zhao, J., Zhang, H., Chen, W., & Fan, D. (2025). Precooked state based on protein denaturation kinetics impacts moisture status, protein oxidation and texture of prepared chicken breast. *Food Chemistry*, 462, 140994.
- Wang, X., Han, R., Ramaswamy, H., Wang, C., & Duan, H. (2025). Effects of high-pressure processing on physicochemical, structural and emulsifying properties of chicken myofibrillar proteins. *LWT – Food Science and Technology*, 229, 118168.
- Wang, Y., Zhou, Y., Wang, X., Jin, P., Xu, B., & Chen, C. (2020). Water-holding capacity of sodium-reduced chicken breast myofibrillar protein gel as affected by combined CaCl₂ and high-pressure processing. *International Journal of Food Science & Technology*, 55: 601–609.
- Wang, Y., Zhou, Y., Wang, X., Ma, F., Xu, B., Li, P., & Chen, C. (2020). Origin of high-pressure induced changes in the properties of reduced-sodium chicken myofibrillar protein gels containing CaCl₂: Physicochemical and molecular modification perspectives. *Food Chemistry*, 319, 126535.
- Xiao, Q., Xu, M., Xu, B., Chen, C., Deng, J., & Li, P. (2021). Combined effect of high-pressure processing with spice extracts on quality of low-salt sausage during refrigerated storage. *Foods*, 10(11), 2610.
- Xu, M., Ni, X., Liu, Q., Chen, C., Deng, X., Wang, X., & Yu, R. (2024). Ultra-high pressure improved gelation and digestive properties of Tai Lake whitebait myofibrillar protein. *Food Chemistry: X*, 21, 101061.
- Xue, S., Xu, X., Shan, H., Wang, H., Yang, J., & Zhou, G. (2018). Effects of high-intensity ultrasound, high-pressure processing, and high-pressure homogenization on the physicochemical and functional properties of myofibrillar proteins. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 45: 354–360.
- Zhang, Z., Yang, Y., Zhou, P., Zhang, X., & Wang, J. (2017). Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein. *Food Chemistry*. 217: 678–686.
- Zhao, S., Li, Z., Liu, Y., Zhao, Y., Yuan, X., Kang, Z., Zhu, M., & Ma, H. (2022). High-pressure processing influences the conformation, water distribution, and gel properties of pork myofibrillar proteins containing *Artemisia sphaerocephala* Krasch gum. *Food Chemistry X*, 14, 100320.
- Zheng, H.-B., Han, M.-Y., Yang, H.-J., Tang, C.-B., Xu, X.-L., & Zhou, G.-H. (2018). The effect of pressure-assisted heating on the water holding capacity of chicken batters. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 45 : 280–286.

- Zheng, H.-B., Xu, B.-C., Xu, X.-L., Li, C., Bolumar, T., & Zhen, Z.-Y. (2021). Gelation of chicken batters during heating under high pressure. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 74, 102848.
- Zheng, H. B., Han, M. Y., Yang, H. J., Tang, C. B., Xu, X. L., & Zhou, G. H. (2017). Application of high pressure to chicken meat batters during heating modifies physicochemical properties, enabling salt reduction for high-quality products. *LWT*. 84 : 693–700.
- Zheng, H., Han, M., Bai, Y., Xu, X., & Zhou, G. (2019). Combination of high pressure and heat on the gelation of chicken myofibrillar proteins. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 52 : 122–130.
- Zheng, H., Xiong, G., Han, M., Deng, S., Xu, X., & Zhou, G. (2015). High pressure/thermal combinations on texture and water holding capacity of chicken batters. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 30 : 8–14.