



TEKNOLOGI HIGH PRESSURE PROCESSING (HPP) TERHADAP KEAMANAN MIKROBIOLOGIS DAN KUALITAS PRODUK PANGAN BEKU (FROZEN FOOD): REVIEW JURNAL

Stephen Davtaniel Brenario^{1*}, Talitha Azmi Tahara², Tania Roitona Boangmanalu³, Tyara Dewi Safitri⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Indonesia
Email: stephendavtaniel@gmail.com

Abstract

Frozen food is a popular food product due to its long shelf life and ease of preparation. However, conventional freezing processes at high temperatures can reduce nutritional and sensory quality. Non-thermal technologies such as High Pressure Processing (HPP) are innovative solutions to maintain quality without high heating. This article examines the potential application of HPP in frozen food to improve product quality and safety. The method used is a literature review of the latest studies on the working principles, effectiveness, and impacts of HPP on the physical, chemical, and microbiological characteristics of food ingredients. High Pressure Processing (HPP) is able to deactivate pathogenic and spoilage microorganisms at a pressure of 200–600 MPa without damaging sensitive components such as vitamins, proteins, and natural pigments. However, the response of food ingredients to HPP varies depending on their characteristics, such as water content, protein type, and fat content.

Keywords: Food Safety, Frozen Food, High Pressure Processing, Non-Thermal Technology, Sensory Quality

Abstrak

Frozen food merupakan produk pangan yang populer karena daya simpan yang lama dan kemudahan penyajian. Namun, proses pembekuan konvensional dengan suhu tinggi dapat menurunkan kualitas nutrisi dan sensorik. Teknologi non-termal seperti High Pressure Processing (HPP) menjadi solusi inovatif untuk menjaga kualitas tanpa pemanasan tinggi. Artikel ini mengkaji potensi penerapan HPP pada makanan beku untuk meningkatkan kualitas dan keamanan produk. Metode yang digunakan adalah telaah pustaka dari penelitian-penelitian terbaru mengenai prinsip kerja, efektivitas, dan dampak HPP terhadap karakteristik fisik, kimia, dan mikrobiologis bahan pangan. High Pressure Processing (HPP) mampu menonaktifkan mikroorganisme patogen dan pembusuk pada tekanan 200–600 MPa tanpa merusak komponen sensitif seperti vitamin, protein, dan pigmen alami. Namun, respons bahan pangan terhadap HPP bervariasi tergantung karakteristiknya, seperti kadar air, jenis protein, dan kandungan lemak.

Kata Kunci: Frozen food, High Pressure Processing (HPP), Keamanan Pangan, Kualitas Sensori, Teknologi Non-Termal

1. Pendahuluan

Frozen food merupakan salah satu jenis produk pangan yang sangat populer karena daya simpannya yang panjang dan kemudahan dalam penyajian. Dalam beberapa tahun terakhir, konsumsi makanan beku (*frozen food*) menunjukkan peningkatan yang cukup pesat di tengah masyarakat. Hal ini tidak lepas dari berbagai keunggulan yang ditawarkan, salah satunya adalah masa simpan yang lebih lama berkat penyimpanan pada suhu beku, yang membantu menjaga kesegaran serta kualitas makanan (Sundari, 2024), ditengah gaya hidup modern yang serba cepat, banyak orang memilih solusi makanan yang praktis, mudah disajikan, namun tetap lezat dan bergizi. *Frozen food* pun menjadi alternatif yang ideal karena tidak hanya mudah diolah, tetapi juga dapat disimpan dalam jangka waktu panjang tanpa mengalami penurunan kualitas. Meski proses pengawetan umumnya menggunakan suhu tinggi, hal ini dapat memengaruhi kandungan nutrisi. Oleh karena itu, teknik pengolahan non-termal kini mulai banyak diterapkan untuk menjaga nilai gizi dalam produk makanan beku.

Teknik pengolahan non-termal merupakan teknologi pengolahan pangan yang tidak menggunakan panas tinggi untuk menjaga keamanan dan kualitas makanan. Teknologi ini bertujuan untuk mengawetkan makanan tanpa merusak nilai gizi, warna, rasa, dan teksturnya (Chacha *et al.*, 2021). Pemrosesan tekanan tinggi (*High Pressure Processing/HPP*) merupakan metode non-termal yang efektif dalam meningkatkan keamanan mikrobiologis produk pangan tanpa mengubah sifat organoleptik. Proses ini melibatkan pemberian tekanan statis melalui media cair yang mengelilingi produk makanan (Al-Sharif *et al.*, 2025). Saat ini, meningkatnya permintaan konsumen terhadap makanan yang bergizi, berkualitas tinggi, dan memiliki karakteristik menyerupai produk segar tanpa tambahan bahan aditif telah mendorong lahirnya berbagai inovasi dalam teknik pemrosesan dan pengawetan pangan (Nurita & Ningrum, 2023). Penggunaan metode non-termal ini membantu memperpanjang umur simpan makanan dengan tetap mempertahankan sifat alaminya (Al-Sharif *et al.*, 2025).

Proses pada *Frozen food* teknik non-termal HPP (*High Pressure Processing*) menjadi pilihan, karena teknik HPP (*High Pressure Processing*) ini merupakan teknik pengolahan pangan non-termal di mana produk makanan diberi tekanan tinggi umumnya antara (≥ 100 MPa) dengan suhu yang rendah, menggunakan media seperti air (Chen *et al.*, 2022). Proses ini bertujuan untuk menginaktivasi mikroorganisme, spora, dan enzim, tanpa merusak kualitas nutrisi, rasa, warna, dan tekstur makanan. Teknik HPP sangat cocok untuk makanan beku (*frozen food*) karena bisa digunakan baik sebelum maupun sesudah dibekukan, bahkan saat suhunya sangat rendah. Ini menjadikannya lebih fleksibel dibandingkan metode non-termal lainnya kombinasi HPP dengan penyimpanan beku dapat mengoptimalkan keamanan mikrobiologis serta meminimalkan kerusakan pada protein dan kualitas visual produk (Okur *et al.*, 2023).

Dengan mempertimbangkan semua aspek tersebut, HPP lebih unggul untuk pengolahan *Frozen food* dibandingkan teknik non-termal lain. Efektivitasnya dalam inaktivasi mikroba bahkan pada suhu rendah, kemampuan mempertahankan kualitas sensorial, serta fleksibilitas aplikasinya menjadikan HPP sebagai teknologi kunci dalam industri *Frozen food* masa kini dan mendatang.

2. Bahan dan Metode

Metode penulisan yang digunakan dalam review artikel ini adalah metode komparatif, yaitu dengan membandingkan dan menganalisis berbagai temuan dari studi-studi sebelumnya yang diperoleh melalui penelusuran jurnal ilmiah. Kriteria dalam pemilihan jurnal meliputi publikasi dalam kurun waktu 10 tahun terakhir. Proses pencarian literatur dilakukan melalui basis data ScienceDirect dan Google Scholar. Pencarian dilakukan dengan menggunakan kombinasi kata kunci seperti '*High Pressure Processing*', '*frozen food*', dan '*quality*'. Tinjauan ini mencakup metode *High Pressure Processing* yang digunakan dalam masing-masing bahan, tekanan, suhu, penyimpanan.

3. Hasil dan Pembahasan

Table 1. Aplikasi teknologi *high pressure processing*

Peneliti	Jenis Bahan	Tekanan (MPa)	Suhu (°C)	Waktu Paparan (menit)	Efisiensi
(Zhou <i>et al.</i> , 2016)	Daging sapi giling	400	25, 35, dan 45	15	Penurunan <i>E. coli</i> O157:H7 hingga 5-log
(Boziaris <i>et al.</i> , 2021)	Fillet ikan beku (salmon, tuna, pollock)	250–400	-32 dan -50	0.5–10	Penurunan <i>L. monocytogenes</i> dan <i>Salmonella</i> hingga 3.5-log
(Okur <i>et al.</i> , 2023)	Bakso Inegol	100–600	4	10	Penurunan total aerob (<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , dan <i>Salmonella</i>) hingga 1-log, stabil 11 bulan

Mekanisme *High Pressure Processing* (HPP)

High Pressure Processing (HPP) merupakan metode pengolahan pangan yang memanfaatkan air sebagai media untuk mentransmisikan tekanan tinggi secara merata ke seluruh permukaan produk. Teknologi ini efektif dalam menurunkan populasi mikroorganisme patogen seperti bakteri Gram-negatif, bakteri Gram-positif, ragi, dan kapang, sehingga memperpanjang masa simpan produk pangan. Efektivitas inaktivasi mikroba sangat dipengaruhi oleh besarnya tekanan dan suhu selama proses berlangsung, serta bergantung pada karakteristik masing-masing jenis pangan. Dalam penerapannya, produk dikenai tekanan hidrostatik tinggi dalam rentang 200 hingga 700 MPa untuk durasi waktu yang relatif singkat. Kualitas makanan olahan HPP dalam hal komponen nutrisi, sensori, dan tekstur sangat baik karena makanan tersebut terpapar pada kondisi pengolahan dalam waktu yang sangat singkat. Dengan demikian, makanan yang diolah dengan HPP menunjukkan atribut seperti segar karena tidak ada intervensi suhu tinggi dan bahan tambahan kimia. Tekanan 350–450 MPa cukup untuk menonaktifkan bakteri Gram-negatif, ragi, dan jamur pada suhu ruangan, tetapi untuk menonaktifkan bakteri Gram-positif, diperlukan tekanan lebih dari 1.100 MPa (Jadhav *et al.*, 2021).

Pengaruh Karakteristik Bahan Terhadap Teknologi *High Pressure Processing* (HPP)

High Pressure Processing (HPP) merupakan metode pengolahan pangan non-termal yang efektif dalam menonaktifkan mikroorganisme patogen maupun pembusuk tanpa menyebabkan kerusakan signifikan pada komponen sensitif panas, seperti vitamin, protein, dan pigmen alami. Meskipun demikian, efektivitas dan dampak dari aplikasi HPP sangat bergantung pada karakteristik bahan pangan yang diproses. Faktor-faktor seperti kadar air, protein, lemak, dan pigmen dari bahan pangan, memainkan peran kunci dalam

menentukan keberhasilan proses HPP, sehingga setiap produk membutuhkan optimasi parameter tekanan dan waktu yang spesifik untuk menjaga mutu sekaligus menjamin keamanan mikrobiologis (Bi *et al.*, 2020).

Penelitian Zhou *et al.* (2016) menunjukkan bahwa respons daging sapi giling terhadap HPP dipengaruhi oleh komposisi matriksnya. Kandungan protein, lemak, dan air memberikan efek pelindung terhadap mikroba, sehingga diperlukan tekanan dan waktu yang tepat untuk inaktivasi optimal. Tekanan 400 MPa pada 25°C selama lima siklus (3 menit/siklus) efektif menurunkan *E. coli* O157:H7 hingga 5-log CFU/g tanpa merusak warna. Namun, tekanan >200 MPa dapat menyebabkan denaturasi protein miofibrilar, menurunkan kapasitas menahan air, dan meningkatkan drip loss (Boziaris *et al.*, 2021). Perbedaan respons antar bahan terhadap HPP juga ditunjukkan dalam penelitian Boziaris *et al.* (2021) pada fillet ikan (salmon, pollock, dan tuna). Salmon dan pollock mengalami peningkatan drip loss yang signifikan setelah HPP ultra-rendah (HPPULT), sementara tuna relatif stabil. Semua jenis ikan menunjukkan peningkatan nilai L^* (kecerahan), peningkatan ini disebabkan oleh denaturasi protein myofibrillar dan sarcoplasmic, yang mengubah struktur permukaan daging ikan dan meningkatkan refleksi cahaya, memberikan tampilan yang lebih cerah (Castrica *et al.*, 2021), tetapi dampaknya terhadap warna keseluruhan tergantung pada pigmen alami masing-masing ikan, seperti astaxanthin pada salmon dan mioglobin pada tuna. Meskipun tidak terdapat perbedaan signifikan dalam skor bau, terjadi perubahan karakteristik aroma, yang menunjukkan bahwa struktur otot, kadar air, dan komposisi pigmen memengaruhi sensorik produk pasca-HPP.

Studi oleh Okur *et al.* (2023) menunjukkan tekanan tinggi dapat menyebabkan perubahan warna permukaan bakso mentah, terutama karena konversi oksimioglobin menjadi metmioglobin, yang ditandai dengan penurunan nilai a^* (kemarahan) dan peningkatan nilai L^* (kecerahan). Respons HPP bervariasi tergantung komposisi kimia dan struktur fisik bahan. Bahan pangan dengan kandungan protein tinggi seperti daging cenderung mengalami denaturasi protein lebih signifikan, yang menyebabkan perubahan tekstur dan tampilan lebih nyata dibandingkan dengan bahan nabati. Selain itu, jenis lemak dalam bahan pangan juga mempengaruhi kestabilan warna dan tekstur pasca-HPP. Daging dengan kadar lemak tinggi cenderung menunjukkan warna yang lebih cerah setelah proses tekanan tinggi karena reflektansi permukaan yang lebih tinggi akibat distribusi lemak yang lebih homogen. Sebaliknya, produk rendah lemak lebih sensitif terhadap oksidasi mioglobin, sehingga perubahan warna menjadi lebih mencolok. (Chmiel *et al.*, 2025).

Pengaruh Besar Tekanan *High Pressure Processing* (HPP) Terhadap Kualitas *Frozen food*

High Pressure Processing (HPP) adalah metode pasteurisasi non-termal yang menggunakan tekanan hidrostatik tinggi (100–600 MPa) secara merata ke seluruh bagian pangan dalam kemasan tertutup, dengan air sebagai media penghantar. Prinsip kerjanya mengikuti hukum isostatik dan Pascal, sehingga tekanan menyebar seragam tanpa bergantung pada bentuk atau ukuran produk (Huang *et al.*, 2020).

Tekanan sedang (≤ 180 MPa) memperlambat pertumbuhan mikroba dan menyebabkan kerusakan ringan pada sel, sedangkan tekanan tinggi (> 200 MPa) dapat membunuh mikroorganisme. Inaktivasi mikroba vegetatif biasanya terjadi pada tekanan

200–600 MPa dalam suhu ruang atau dingin, yang umum digunakan dalam industri. Efektivitas HPP dalam menonaktifkan mikroba bergantung pada besar tekanan. Tekanan tinggi dapat merusak membran sel, mendenaturasi protein, dan mengganggu metabolisme mikroba. Zhou *et al.* (2016) melaporkan bahwa tekanan 400 MPa selama 15 menit dalam lima siklus menurunkan populasi *E. coli* O157:H7 hingga 5-log CFU/g pada daging sapi giling. Namun, tekanan tinggi juga berdampak pada sifat fisikokimia. Tekanan ≥ 300 MPa menyebabkan perubahan struktur protein dan denaturasi mioglobin, membuat warna daging menjadi lebih pucat akibat terbentuknya metmioglobin (Zhou *et al.*, 2016). Tekanan di bawah 200 MPa menimbulkan perubahan warna. Bolumar *et al.* (2021) menyatakan bahwa tekanan >400 MPa menurunkan kapasitas menahan air (WHC) dan kelarutan protein sarkoplasma. Denaturasi protein mulai terjadi pada sekitar 200 MPa. Pada produk seperti bakso, tekanan 400–600 MPa selama 10 menit menyebabkan penurunan warna merah, tekstur lebih keras, dan peningkatan kehilangan cairan saat dimasak karena penurunan kelarutan protein miofibrilar (Okur *et al.*, 2023).

Secara keseluruhan, besar tekanan HPP memengaruhi stabilitas mikrobiologis, mutu sensori (warna, tekstur, aroma), nilai gizi, dan umur simpan *frozen food*. Penentuan tekanan optimal penting untuk menjaga keseimbangan antara keamanan pangan dan kualitas produk, serta harus disesuaikan dengan jenis pangan dan preferensi konsumen. Pada tekanan sekitar 300 MPa, perubahan fisik masih relatif ringan; tekstur produk umumnya tetap lentur dan warna cenderung terjaga karena denaturasi protein miofibrilar belum terlalu intens. Namun, saat tekanan meningkat hingga 600 MPa, terjadi perubahan struktural yang lebih drastis, seperti penguatan tekstur menjadi lebih keras akibat koagulasi protein yang lebih kuat, serta peningkatan kecerahan warna (nilai L^*) yang dipicu oleh denaturasi protein, yang meningkatkan reflektansi cahaya di permukaan makanan. Pada produk pangan beku (*frozen food*), tekanan 300–400 MPa umumnya dianggap optimal, karena cukup efektif menonaktifkan mikroorganisme patogen tanpa menyebabkan kerusakan besar pada tekstur, warna, dan kandungan gizi. Tekanan di atas 400 MPa sebaiknya digunakan dengan hati-hati, terutama untuk produk berbasis daging, karena dapat menurunkan kualitas sensori.

Pengaruh Suhu *High Pressure Processing* (HPP) Terhadap Kualitas *Frozen food*

Prinsip mesin HPP adalah terdapat tekanan hidrostatis tinggi berkisar 100–600 MPa menggunakan transmisi tekanan sedang dengan suhu 5–350°C dan waktu berkisar 3–10 menit. Proses HPP dapat mereduksi mikroorganisme dengan cara memberikan tekanan secara bertahap dan terjadi peningkatan suhu (*adiabatic heating*), namun selama proses penahanan tekanan (*the pressure holding time*), suhu akan menuju suhu awal yang ditetapkan (Liamri & Kusumawati, 2024).

Penelitian yang dilakukan Zhou *et al.* (2016) didapatkan hasil terbaik dengan tekanan 400 MPa, suhu 45°C, dengan lima siklus tekanan masing-masing selama 3 menit (total 15 menit) mampu menurunkan populasi *Escherichia coli* O157:H7 hingga 5-log CFU/g pada produk daging sapi giling. Perubahan kecil pada suhu pemrosesan dapat berdampak dramatis pada inaktivasi patogen. Setiap peningkatan suhu pemrosesan sebesar 10°C menghasilkan inaktivasi yang lebih besar pada *E. coli* O157:H7. Penurunan *E. coli* lebih besar terjadi pada suhu 45°C dibandingkan dengan 25°C, ini menunjukkan bahwa siklus tekanan yang dipadukan dengan suhu pemrosesan yang optimal secara efektif

mengurangi populasi *E. coli* O157:H7 dalam daging sapi giling. Inaktivasi mikroba yang terkait dengan HPP mungkin berhubungan dengan satu atau lebih faktor termasuk gangguan membran sel, denaturasi protein, perubahan biokimia, dan perubahan makromolekul (penghambatan sintesis DNA, RNA, atau protein). Peningkatan suhu media tekanan karena pemanasan kompresi juga dapat berkontribusi pada inaktivasi mikroba. Sebagai akibat dari pemanasan adiabatik selama proses *High Pressure Processing* (HPP), suhu air dapat meningkat sekitar 2 hingga 3°C untuk setiap kenaikan tekanan sebesar 100 MPa. Produk pangan dengan kandungan air yang tinggi akan mengalami kenaikan suhu yang sebanding selama proses ini. Namun demikian, pada beberapa produk, peningkatan suhu dapat mencapai hingga 9°C per 100 MPa, tergantung pada komposisi dan sifat termal dari produk yang bersangkutan.

Penelitian lainnya mendapat perlakuan terbaik dari jurnal Boziaris *et al.*, (2021) adalah *High Pressure Processing* pada tekanan 250 MPa selama 3 menit pada suhu -32°C pada produk ikan beku, seperti salmon dan tuna, menunjukkan menurunkan jumlah *Listeria monocytogenes* dan *Salmonella enterica* tanpa merusak kualitas visual dan sensorik. Proses ini diperkuat oleh transisi fase es dari kristal es I ke es III yang turut merusak struktur mikroba.

Pengaruh Tekanan *High Pressure Processing* (HPP) Terhadap Daya Simpan *Frozen food*

Daya simpan produk pangan beku yang diproses dengan teknologi *High Pressure Processing* (HPP) sangat dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang digunakan, jenis produk, suhu penyimpanan, dan kondisi kemasan. HPP mampu secara signifikan menurunkan jumlah mikroorganisme patogen dan pembusuk, yang menjadi faktor utama dalam pembatasan umur simpan produk pangan. Selain itu, kemampuan HPP dalam menstabilkan struktur protein, mempertahankan warna, tekstur, dan kualitas sensorik menjadikannya teknologi unggul dalam memperpanjang masa simpan produk *Frozen food* tanpa perlakuan termal yang merusak.

Penelitian oleh Zhou *et al.* (2016) pada produk daging sapi giling menunjukkan bahwa perlakuan tekanan 400 MPa selama total 15 menit (5 siklus × 3 menit) berhasil menurunkan populasi *Escherichia coli* O157:H7 hingga 5-log CFU/g, yang merupakan batas minimum keamanan mikrobiologis menurut standar FDA. Meskipun tidak secara eksplisit menyebutkan lama daya simpan, pengurangan mikroba patogen ini mengindikasikan potensi perpanjangan umur simpan, terutama jika produk disimpan dalam kondisi beku dan dikemas dengan benar.

Pada produk ikan beku, penerapan HPP menunjukkan hasil yang lebih konkret terkait daya simpan. Boziaris *et al.* (2021) melaporkan bahwa fillet ikan seperti salmon, tuna, dan pollock yang diberi perlakuan HPP pada suhu ultra-rendah (-32°C hingga -50°C) dengan tekanan 250–400 MPa selama 0,5 hingga 10 menit mengalami penurunan populasi *Listeria monocytogenes* dan *Salmonella enterica* hingga 3,5-log CFU/g. Selain meningkatkan keamanan, perlakuan ini mempertahankan kualitas fisik dan sensorik produk selama 3 hari penyimpanan pada -20°C tanpa perlunya pembekuan ulang. Dukungan lebih lanjut datang dari studi Riekkinen *et al.*, (2023) yang menunjukkan bahwa trout asap dingin yang diproses dengan HPP pada 600 MPa selama 3 menit dan disimpan pada suhu

4°C tetap stabil secara mikrobiologis selama 28 hari penyimpanan. Ini menandakan bahwa dengan tekanan tinggi dan suhu penyimpanan yang terkontrol, umur simpan produk olahan ikan dapat diperpanjang hingga satu bulan, bahkan tanpa pembekuan ekstrem.

Penelitian lain oleh Tsevdou *et al.*, (2023) menemukan bahwa fillet ikan segar seperti salmon dan plaice yang diberi perlakuan HPP pada tekanan 500 MPa selama 2 menit tetap stabil secara sensorik dan mikrobiologis selama penyimpanan dingin selama 15–21 hari. Mereka mencatat bahwa pertumbuhan mikroba berlangsung lambat dan tidak melampaui ambang batas pembusukan selama periode tersebut, menunjukkan potensi HPP dalam memperpanjang kesegaran produk laut beku maupun dingin.

Konteks produk olahan daging, studi oleh Okur *et al.* (2023) pada bakso Inegol menunjukkan hasil yang sangat signifikan. Perlakuan HPP dengan tekanan 400–600 MPa selama 10 menit pada suhu 4°C, diikuti penyimpanan pada -18°C, mampu mempertahankan stabilitas mikrobiologis hingga 11 bulan. Selain menjaga keamanan mikrobiologis, HPP juga membantu mempertahankan profil warna, tekstur, dan protein miofibrilar, dengan perubahan sensori yang masih dalam batas dapat diterima. Ini menunjukkan bahwa untuk produk daging olahan matang yang dikemas dengan baik, HPP dapat memperpanjang umur simpan mendekati satu tahun tanpa kompromi terhadap kualitas.

Secara keseluruhan, penerapan tekanan tinggi dalam HPP terbukti memiliki pengaruh besar dalam memperpanjang daya simpan *frozen food*. Hal ini dicapai melalui inaktivasi mikroba patogen dan pembusuk, stabilisasi kualitas fisik dan sensorik, serta pengurangan kebutuhan akan aditif atau perlakuan termal. Dengan optimalisasi parameter tekanan, durasi, dan suhu, teknologi ini dapat menjadi solusi berkelanjutan dalam industri pangan beku masa kini.

4. Simpulan

Teknologi *High Pressure Processing* (HPP) terbukti efektif dalam meningkatkan keamanan mikrobiologis dan mempertahankan kualitas sensorik produk pangan beku (*frozen food*), berbeda dari pasteurisasi termal, HPP tidak mengandalkan suhu tinggi dalam prosesnya sehingga dapat disebut efisiensi energi. *High Pressure Processing* (HPP) mampu menonaktifkan mikroorganisme melalui mekanisme kerusakan membran sel. Namun, efektivitas HPP sangat bergantung pada karakteristik produk seperti kandungan air, jenis protein, lemak, serta parameter proses (tekanan, suhu, dan durasi). Pengembangan riset lanjutan diperlukan untuk memperluas aplikasi HPP pada berbagai kategori pangan serta mengintegrasikan teknologi ini dengan sistem pengemasan dan distribusi rantai dingin modern guna mendukung ketahanan pangan dan efisiensi industri pengolahan makanan beku secara berkelanjutan. Berbeda dari pasteurisasi termal, HPP tidak mengandalkan suhu tinggi dalam prosesnya.

5. Referensi

- Al-Sharif, Z. T., Al-Najjar, S. Z., Anumudu, C. K., Hart, A., Miri, T., & Onyeaka, H. (2025). Non-Thermal Technologies in Food Processing: Implications for Food Quality and Rheology. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/app15063049>
- Bi, X., Zhou, Z., Qin, T., Wang, X., Ma, Y., Xing, Y., & Che, Z. (2020). Effects of high pressure processing (HPP) on microorganisms and the quality of mango smoothies during storage. *RSC Advances*, 10(52),

- 31333–31341. <https://doi.org/10.1039/d0ra05181k>
- Bozariis, I. S., Parlapani, F. F., & Mireles DeWitt, C. A. (2021). High pressure processing at ultra-low temperatures: Inactivation of foodborne bacterial pathogens and quality changes in frozen fish fillets. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 74(March), 102811. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102811>
- Castrica, M., Pavlovic, R., Balzaretto, C. M., Curone, G., Brecchia, G., Copelotti, E., Panseri, S., Pessina, D., Arnoldi, C., & Chiesa, L. M. (2021). Effect of high-pressure processing on physico-chemical, microbiological and sensory traits in fresh fish fillets (*Salmo salar* and *pleuronectes platessa*). *Foods*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/foods10081775>
- Chacha, J. S., Zhang, L., Ofoedu, C. E., Suleiman, R. A., Dotto, J. M., Roobab, U., Agunbiade, A. O., Duguma, H. T., Mkojera, B. T., Hossaini, S. M., Rasaq, W. A., Shorstkii, I., Okpala, C. O. R., Korzeniowska, M., & Guiné, R. P. F. (2021). Revisiting non-thermal food processing and preservation methods—action mechanisms, pros and cons: A technological update (2016–2021). *Foods*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/foods10061430>
- Chen, L., Wang, Y., Zhu, C., Zhang, D., & Liu, H. (2022). Effects of high-pressure processing on aquatic products with an emphasis on sensory evaluation. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(11), 6980–6996. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16068>
- Chmiel, M., Świder, O., Roszko, M., Adamczak, L., Cegiełka, A., Pietrzak, D., Florowski, T., Bryła, M., & Florowska, A. (2025). Effect of High-Pressure Processing and Long-Time Storage on Color, Lipid Oxidation, and Free Amino Acids Profile of Beef. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/app15052382>
- Huang, H. W., Hsu, C. P., & Wang, C. Y. (2020). Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry. *Journal of Food and Drug Analysis*, 28(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2019.10.002>
- Jadhav, H. B., Annapure, U. S., & Deshmukh, R. R. (2021). Non-thermal Technologies for Food Processing. *Frontiers in Nutrition*, 8(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.657090>
- Liamri, C., & Kusumawati, N. (2024). PENGARUH HIGH PRESSURE PROCESSING (HPP) TERHADAP JUMLAH MIKROORGANISME DAN MASA SIMPAN SUSU HEWANI. 39(2), 1–23.
- Nurita, D., & Ningrum, E. (2023). Plasma-Activated Water : Terobosan pada Industri Makanan. *Jurnal Teknologi Pangan*, 7(2), 69–72.
- Okur, G., Tavman, S., Tsutsuura, S., & Nishiumi, T. (2023). Effect of high pressure processing on traditional Turkish meatballs properties and microbiological safety during frozen storage. *Lwt*, 185(April), 115110. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115110>
- Riekkinen, K., Martikainen, K., & Korhonen, J. (2023). Effectiveness of High-Pressure Processing Treatment for Inactivation of *Listeria monocytogenes* in Cold-Smoked and Warm-Smoked Rainbow Trout. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063735>
- Sundari, R. (2024). Preferensi Konsumen Dalam Membeli Produk Makanan Beku / Frozen Food Dikota Pekanbaru (Studi Kasus Comel Frozen Food). *Jurnal Bisnis Kompetitif*, 2(3), 203–209. <https://doi.org/10.35446/bisniskompetitif.v2i3.1629>
- Tsevdou, M., Dimopoulos, G., Limnaios, A., Semenoglou, I., Tsironi, T., & Taoukis, P. (2023). High Pressure Processing under Mild Conditions for Bacterial Mitigation and Shelf Life Extension of European Sea Bass Fillets. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063845>
- Zhou, Y., Karwe, M. V., & Matthews, K. R. (2016). Differences in inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 strains in ground beef following repeated high pressure processing treatments and cold storage. *Food Microbiology*, 58, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.02.010>