

ANALISIS KONSEP FISIKA PADA TEKNOLOGI HIGH PRESSURE PROCESSING (HPP) UNTUK STERILISASI TANAMAN PERKEBUNAN

Kiki Dinda Octari¹, Nurul Maghfirotul Laili², Kendid Mahmudi³, Sudarti⁴
kikioctd@gmail.com¹, maghfirohlala12@gmail.com², kendidmahmudi.fkip@unej.ac.id³
Universitas Jember

ABSTRAK

Permintaan konsumen terhadap produk pangan yang bergizi dan minim proses termal mendorong pengembangan teknologi pengolahan yang mampu mempertahankan kualitas nutrisi dan bioaktif buah, khususnya polifenol. High Pressure Processing (HPP) merupakan teknologi non-termal yang menggunakan tekanan hidrostatik tinggi (100–600 MPa) untuk menonaktifkan mikroorganisme tanpa merusak struktur kimia senyawa penting. Kajian ini membahas penerapan HPP pada buah apel dan stroberi yang kaya polifenol namun memiliki karakteristik jaringan berbeda. Hasil kajian menunjukkan bahwa pada apel, HPP efektif dalam menonaktifkan mikroba dan menjaga stabilitas nutrisi berkat prinsip tekanan isostatik dan hukum Le Chatelier. Pada stroberi, HPP mempertahankan hingga 90% kandungan antosianin, meningkatkan pelepasan asam ellagik dan PACs dari jaringan tanaman, serta menghasilkan kerusakan minimal dibandingkan metode termal. Namun, degradasi selama penyimpanan masih terjadi akibat enzim yang tidak sepenuhnya terinaktivasi. Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip fisika seperti mekanika fluida, termodinamika, dan kinetika reaksi, HPP menjadi teknologi yang menjanjikan untuk menghasilkan olahan buah berkualitas tinggi dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: High Pressure Processing, Apel, Stroberi, Fisika Pangan, Pengolahan Non-Termal.

PENDAHULUAN

Permintaan konsumen terhadap produk pangan yang segar, bergizi, dan minim proses pengolahan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kesadaran akan gaya hidup sehat dan keberlanjutan lingkungan. Dalam konteks tersebut, pengolahan buah secara minimal menjadi tantangan sekaligus peluang bagi industri pangan. Salah satu aspek penting dalam pengolahan minimal adalah mempertahankan kandungan senyawa bioaktif, khususnya polifenol, yang diketahui memiliki peran penting dalam aktivitas antioksidan, anti-inflamasi, dan pencegahan penyakit degeneratif.

Senyawa polifenol dalam buah sangat rentan terhadap degradasi akibat panas, oksigen, dan aktivitas enzim, sehingga metode konvensional seperti pasteurisasi atau sterilisasi termal sering kali menyebabkan penurunan kualitas gizi dan sensorik. Oleh karena itu, diperlukan teknologi alternatif yang mampu menonaktifkan mikroorganisme dan memperpanjang masa simpan tanpa merusak struktur kimia senyawa-senyawa tersebut.

High Pressure Processing (HPP) atau pemrosesan bertekanan tinggi merupakan teknologi non-termal yang telah berkembang pesat dalam industri pengolahan buah. Teknologi ini bekerja dengan memberikan tekanan hidrostatik sebesar 100–600 MPa secara merata ke seluruh bagian produk menggunakan medium cair, tanpa meningkatkan suhu secara signifikan. Secara fisika, prinsip kerja HPP didasarkan pada hukum Pascal, serta melibatkan konsep mekanika fluida, elastisitas, dan termodinamika untuk menjelaskan bagaimana tekanan memengaruhi struktur sel, enzim, dan mikroorganisme dalam buah.

HPP terbukti efektif dalam mempertahankan stabilitas senyawa polifenol pada berbagai produk buah olahan. Beberapa studi menunjukkan bahwa HPP mampu meningkatkan pelepasan polifenol dari jaringan tanaman serta mempertahankan kestabilannya selama penyimpanan, dengan kerusakan minimal dibandingkan metode

termal. Oleh karena itu, analisis terhadap interaksi antara tekanan tinggi dan senyawa polifenol menjadi penting dalam konteks pengembangan teknologi pengolahan buah yang berkualitas dan ramah lingkungan.

Dalam kajian ini, stroberi dan apel dipilih sebagai objek penelitian karena keduanya merupakan buah populer yang kaya akan polifenol, namun memiliki karakteristik kimia dan jaringan tanaman yang berbeda. Stroberi mengandung antosianin, asam ellagik, dan proantosianidin, sedangkan apel kaya akan flavonol, dihidrokalkon, dan asam hidroksisinamat. Perbandingan efek HPP terhadap kedua buah ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai efektivitas teknologi dalam mempertahankan senyawa bioaktif pada produk olahan buah.

METODE PENELITIAN

Bagian ini menguraikan pendekatan metodologis yang digunakan untuk menjabarkan dan mensistesis tentang analisis konsep fisika pada teknologi High Pressure Processing (HPP). Penelitian ini menggunakan metode kajian pustaka yang bersumber dari referensi yang relevan dengan penelitian ini seperti artikel, jurnal, buku, prosiding, dan sebagainya yang memiliki rentang waktu publikasi lima tahun terakhir. Data dikumpulkan melalui penelusuran daring di google scholar untuk jurnal nasional maupun internasional. Seluruh data kemudian dianalisis secara kualitatif dan disusun hingga menjadi artikel yang utuh.

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 1. Mesin High Pressure Processing (HPP) untuk sterilisasi tanpa panas (Sumber: FOX, n.d.)

A. Teknologi HPP pada Buah Apel

High Pressure Processing (HPP) merupakan teknologi non-termal yang semakin banyak diterapkan untuk sterilisasi makanan, termasuk buah apel, karena kemampuannya dalam menonaktifkan mikroorganisme patogen tanpa merusak kualitas sensorik dan nutrisi buah. Dari sudut pandang fisika, mekanisme kerja alat HPP sangat erat kaitannya dengan prinsip-prinsip dalam mekanika fluida, termodinamika, serta kinetika reaksi. Dalam proses ini, buah apel dimasukkan ke dalam ruang tertutup berisi medium cair (biasanya air), kemudian dikenai tekanan isostatik yang sangat tinggi, berkisar antara 400 hingga 600 MPa. Menurut prinsip Le Chatelier, setiap proses biologis yang menyebabkan penurunan volume akan dipercepat oleh tekanan tinggi; artinya, tekanan tersebut mendorong terjadinya perubahan struktur mikroba menuju kondisi yang tidak stabil secara volume, yang pada akhirnya menyebabkan kematian mikroba. Selain itu, tekanan tinggi menyebar secara merata ke seluruh bagian apel melalui medium cair sesuai prinsip isostatik, tanpa

memandang bentuk dan ukuran apel, sehingga tidak menyebabkan kerusakan mekanik pada produk. Pada tingkat seluler, tekanan tinggi menyebabkan kerusakan pada membran sel mikroba, termasuk denaturasi protein membran dan fosfolipid, yang menyebabkan gangguan fungsi sel dan kebocoran isi sel, lalu berujung pada kematian mikroorganisme.

Ketika tekanan tinggi ini dikombinasikan dengan suhu moderat (sekitar 45–75 °C), efisiensinya meningkat karena suhu mempercepat denaturasi protein dan enzim vital pada mikroba, sejalan dengan prinsip termodinamika di mana energi panas membantu sistem berpindah ke keadaan entropi yang lebih tinggi (lebih tidak teratur), sehingga mempercepat kematian mikroba. Namun, jika digunakan suhu yang terlalu tinggi, maka dapat merusak senyawa sensori dan nutrisi dalam apel. Oleh karena itu, kombinasi suhu sedang dan tekanan tinggi menjadi solusi optimal dalam mempertahankan kualitas apel. Dalam versi lain dari HPP, yaitu high-pressure freezing, apel dapat dibekukan terlebih dahulu dan diproses pada tekanan tinggi di bawah 0 °C. Dalam kondisi ini, terjadi perubahan fase air dalam jaringan buah dari es kristal tipe I ke tipe III. Fase transisi ini menyebabkan perubahan volume secara tiba-tiba, yang menghasilkan gaya mekanik besar yang merobek struktur mikroba, terutama dinding selnya. Efek mekanik ini, yang terjadi akibat perubahan struktur kristal es, sangat efektif dalam menonaktifkan mikroorganisme tanpa penggunaan suhu tinggi.

Secara kinetika, inaktivasi mikroba pada proses HPP sering mengikuti model orde pertama, di mana jumlah mikroba menurun secara eksponensial terhadap waktu. Namun, dalam beberapa kasus ditemukan model inaktivasi non-linier, misalnya model Weibull, terutama bila terdapat mikroba yang tahan tekanan atau mengalami kerusakan subletal. Selain tekanan dan suhu, efektivitas HPP juga dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimia buah apel itu sendiri, seperti pH, kandungan gula, aktivitas air, dan keberadaan senyawa pelindung lainnya. pH apel yang cenderung asam (sekitar 3,5) membuat mikroba lebih rentan terhadap tekanan, sedangkan kandungan gula tinggi bisa sedikit melindungi mikroba sehingga memerlukan penyesuaian parameter proses. Aktivitas air yang tinggi dalam apel sangat menguntungkan proses HPP karena memungkinkan tekanan merata ditransmisikan ke seluruh jaringan buah. Oleh karena itu, dalam perancangan dan optimasi alat HPP untuk sterilisasi apel, perlu mempertimbangkan interaksi kompleks antara tekanan, suhu, waktu proses, serta sifat fisik-kimia apel. Pemahaman mendalam terhadap prinsip-prinsip fisika yang terlibat akan membantu memastikan bahwa proses ini tidak hanya aman dari sisi mikrobiologi, tetapi juga mampu mempertahankan kualitas alami apel secara optimal tanpa perlu bahan pengawet tambahan.

B. Teknologi HPP pada Buah Stroberi

Buah stroberi dikenal sebagai salah satu buah dengan kandungan polifenol tinggi yang mencakup antosianin, asam ellagik, dan proantosianidin (PACs). Ketiga golongan ini berperan penting sebagai antioksidan, serta mendukung berbagai manfaat kesehatan seperti anti-inflamasi, kardioprotektif, dan antikarsinogenik. Namun, senyawa-senyawa tersebut sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan seperti suhu tinggi, oksigen, dan aktivitas enzim, yang umumnya terjadi pada proses termal. Oleh karena itu, teknologi High Pressure Processing (HPP) menjadi solusi non-termal yang potensial dalam mempertahankan stabilitas senyawa polifenol dalam produk stroberi olahan.

Antosianin adalah pigmen utama yang memberi warna merah pada stroberi, dengan pelargonidin-3-O-glukosida sebagai komponen dominan. HPP menunjukkan kemampuan mempertahankan hingga 90% kandungan antosianin tergantung tekanan, suhu, dan durasi. Studi oleh Stübler et al. (2021) mencatat bahwa HPP pada 600 MPa selama 1 menit mampu mempertahankan kadar antosianin secara signifikan tanpa perubahan warna yang mencolok. Dalam beberapa kasus, terjadi peningkatan konsentrasi antosianin yang diduga akibat pelepasan dari dinding sel yang rusak oleh tekanan. Namun, HPP tidak sepenuhnya

menginaktivasi enzim polifenol oksidase (PPO) dan peroksidase (POD), sehingga selama penyimpanan terjadi degradasi progresif terhadap antosianin. Penurunan 20–30% tercatat setelah 4–8 minggu penyimpanan pada suhu 4–6 °C, bergantung pada varietas stroberi dan kondisi penyimpanan.

Asam ellagik terutama berasal dari hidrolisis ellagitannin yang banyak ditemukan di achenes (biji kecil stroberi). Studi menunjukkan bahwa proses HPP mampu meningkatkan pelepasan asam ellagik dari achenes melalui disrupsi mikrostruktur jaringan. Dalam beberapa perlakuan, seperti pada 500 MPa selama 15 menit, peningkatan kandungan asam ellagik hingga 30% tercatat pada produk puree stroberi. Keuntungan HPP dalam hal ini adalah prosesnya tidak merusak struktur kimia asam ellagik yang cenderung lebih stabil terhadap tekanan dibanding suhu. Hal ini menjadikannya lebih efektif dibanding perlakuan termal yang justru dapat mengakibatkan oksidasi dan penurunan signifikan asam ellagik selama pemanasan.

PACs adalah polimer flavan-3-ol seperti katekin dan epikatekin yang berfungsi sebagai antioksidan kuat. Pada produk stroberi puree yang diproses menggunakan HPP, tercatat peningkatan PACs hingga 40–60% yang diindikasikan sebagai hasil disintegrasi dinding sel dan pelepasan senyawa dari jaringan tanaman. Beberapa tekanan tinggi (400–600 MPa) juga mendorong de-polimerisasi PACs menjadi bentuk yang lebih sederhana dan lebih mudah diserap tubuh. Namun, selama penyimpanan, kandungan PACs bisa menurun akibat aktivitas enzim oksidatif yang tidak sepenuhnya terinaktivasi oleh HPP. Oleh karena itu, kombinasi HPP dengan suhu sedang (40–50 °C) atau penggunaan inaktivator enzimatis tambahan sedang dikembangkan untuk memperpanjang stabilitas senyawa ini.

KESIMPULAN

Teknologi High Pressure Processing (HPP) merupakan metode non-termal yang efektif untuk meningkatkan keamanan mikrobiologis dan mempertahankan kualitas nutrisi serta sensorik pada buah-buahan seperti apel dan stroberi. Pada buah apel, HPP bekerja dengan prinsip tekanan isostatik tinggi yang merusak struktur sel mikroba tanpa merusak jaringan buah, serta dapat dikombinasikan dengan suhu sedang untuk meningkatkan efisiensi tanpa merusak kandungan gizi. Pada buah stroberi, HPP terbukti mampu mempertahankan dan bahkan meningkatkan kandungan senyawa bioaktif penting seperti antosianin, asam ellagik, dan PACs, meskipun degradasi selama penyimpanan masih menjadi tantangan akibat enzim yang tidak sepenuhnya terinaktivasi. Oleh karena itu, HPP menjadi solusi menjanjikan dalam pengolahan buah yang sensitif terhadap panas, dengan potensi besar untuk menghasilkan produk olahan berkualitas tinggi dan bernilai gizi tinggi, asalkan parameter proses dioptimalkan dengan mempertimbangkan karakteristik masing-masing buah.

DAFTAR PUSTAKA

- Afraz, M. T., Xu, X., Zeng, X. A., Zhao, W., Lin, S., Woo, M., & Han, Z. (2024). The science behind physical field technologies for improved extraction of juices with enhanced quality attributes. *Food Physics*, 100008.
- Aganovic, K., Hertel, C., Vogel, R. F., Johne, R., Schlüter, O., Schwarzenbolz, U., ... & Heinz, V. (2021). Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3225-3266.
- Aguilera, J. M. (2024). Berries as foods: processing, products, and health implications. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15.
- Ahuja, A., Lee, R., & Joshi, Y. M. (2021). Advances and challenges in the high-pressure rheology of complex fluids. *Advances in Colloid and Interface Science*, 294, 102472.
- Al-Ghamdi, S., Sonar, C. R., Patel, J., Albahr, Z., & Sablani, S. S. (2020). High pressure-assisted

- thermal sterilization of low-acid fruit and vegetable purees: Microbial safety, nutrient, quality, and packaging evaluation. *Food Control*, 114, 107233
- Carpentieri, S., Larrea-Wachtendorff, D., Barbosa-Cánovas, G. V., & Ferrari, G. (2024). In vitro digestibility of rice and tapioca starch-based hydrogels produced by high-pressure processing (HPP). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 93, 103646.
- Deng, H., Zhao, P. T., Yang, T. G., & Meng, Y. H. (2021). A comparative study of the cloudy apple juice sterilized by high-temperature short-time or high hydrostatic pressure processing: shelf-life, phytochemical and microbial view. *Food Science and Technology*, 42, e63620.
- FOX – Food Processing in a Box. (n.d.). High Pressure Processing (HPP) Technology. <https://www.fox-foodprocessinginabox.eu/nl/high-pressure-processing-hpp-technology/>
- Hu, X., Yu, C., Ahmadi, S., Wang, Y., Ye, X., Hou, Z., & Chen, S. (2022). Optimization of high-pressure processing-assisted extraction of pectic polysaccharides from three berries. *Food Quality and Safety*, 6, fyac051.
- Govaris, A., & Pexara, A. (2021). Inactivation of foodborne viruses by high-pressure processing (HPP). *Foods*, 10(2), 215
- Houška, M., Silva, F. V. M., Evelyn, Buckow, R., Terefe, N. S., & Tonello, C. (2022). High pressure processing applications in plant foods. *Foods*, 11(2), 223.
- Morata, A., Del Fresno, J. M., Gavahian, M., Guamis, B., Palomero, F., & López, C. (2023). Effect of HHP and UHPH high-pressure techniques on the extraction and stability of grape and other fruit anthocyanins. *Antioxidants*, 12(9), 1746.
- Nath, K. G., Pandiselvam, R., & Sunil, C. K. (2023). High-pressure processing: Effect on textural properties of food-A review. *Journal of Food Engineering*, 351, 111521.
- Nema, P. K., Sehrawat, R., Ravichandran, C., Kaur, B. P., Kumar, A., & Tarafdar, A. (2022). Inactivating food microbes by high-pressure processing and combined nonthermal and thermal treatment: A review. *Journal of Food Quality*, 2022(1), 5797843.
- Ningrum, D. N. E. (2024). Plasma-Activated Water: Terobosan pada Industri Makanan. *Jurnal Teknologi Pangan*, 7(2), 69-72.
- Pulgarín, O., Larrea-Wachtendorff, D., & Ferrari, G. (2023). Effects of the amylose/amylopectin content and storage conditions on corn starch hydrogels produced by high-pressure processing (HPP). *Gels*, 9(2), 87.
- Salazar-Orbea, G. L., García-Villalba, R., Tomás-Barberán, F. A., & Sánchez-Siles, L. M. (2021). High-pressure processing vs. thermal treatment: Effect on the stability of polyphenols in strawberry and apple products. *Foods*, 10(12), 2919.
- Serna-Hernandez, S. O., Escobedo-Avellaneda, Z., García-García, R., Rostro-Alanis, M. D. J., & Welti-Chanes, J. (2021). High hydrostatic pressure induced changes in the physicochemical and functional properties of milk and dairy products: A review. *Foods*, 10(8), 1867.
- Waseem, M., Tahir, A. U., & Majeed, Y. (2024). Printing the future of food: The physics perspective on 3D food printing. *Food Physics*, 1, 100003.
- Wulandari, S., Nisa, Y. S., Taryono, T., Indarti, S., & Sayekti, R. S. (2022). Sterilisasi peralatan dan media kultur jaringan. *Agrotechnology Innovation (Agrinova)*, 4(2), 16-19.
- Zhang, S., Meenu, M., Hu, L., Ren, J., Ramaswamy, H. S., & Yu, Y. (2022). Recent progress in the synergistic bactericidal effect of high pressure and temperature processing in fruits and vegetables and related kinetics. *Foods*, 11(22), 3698