

## Histological and Microbiological Effects of High-Pressure Processing (HPP) on Fresh Juice Products

Afia Saad. Alhade. Ebraheem \*

General Department, Faculty of Nursing and Microbiology, Sebha University, Sebha, Libya

النسجية والميكروبيولوجية لمنتجات تأثير استخدام المعالجة بالضغط العالي للعصائر الطازجة

عافيه سعد الهادي إبراهيم\*

القسم العام، كلية التمريض و علم الأحياء الدقيقة، جامعة سبها، سبها، ليبيا

\*Corresponding author: [F.Ebraheem@Sebhau.Edu.Ly](mailto:F.Ebraheem@Sebhau.Edu.Ly)

Received: February 19, 2026

Accepted: March 26, 2026

Published: April 23, 2026



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Abstract:

High-pressure processing (HPP) is an emerging non-thermal pasteurization technique that applies hydrostatic pressure of 100–600 MPa to food packaged in flexible, airtight containers. The goal is to extend product shelf life by inactivating unwanted microorganisms and enzymes. This paper aims to provide a detailed analysis of the effects of HPP on the histological (rheological) and microbiological properties of fresh juice products. The research reviews the scientific principles underlying the effect of high pressure on juice components, providing precise definitions of key concepts. The review documents the positive effects of HPP, which include a significant improvement in microbiological safety through a substantial reduction in bacteria, yeasts, and molds, as well as its ability to preserve sensory and nutritional properties better than conventional heat treatments. The paper also discusses the physical changes in juice viscosity resulting from high-pressure processing and their effect on texture, and how these changes relate to the activation or deactivation of enzymes such as pectin methyl esterase. The results from peer-reviewed scientific studies demonstrate that HPP technology represents a promising and effective alternative for producing high-quality, safe, and fresh juices that meet the growing consumer demand for minimally processed and healthy foods.

**Keywords:** High-Pressure Processing, HPP, Fresh Juices, Textural Properties, Microbiological Properties, Non-Thermal Pasteurization, Shelf Life.

### المخلص

تُعد المعالجة بالضغط العالي (High Pressure Processing - HPP) تقنية بسترة غير حرارية ناشئة، تعتمد على تطبيق ضغط هيدروستاتيكي يتراوح بين 100 و600 ميجا باسكال على الأغذية المعبأة في حاويات مرنة ومحكمة الإغلاق، وذلك بهدف إطالة العمر الافتراضي للمنتج عبر تعطيل الكائنات الحية الدقيقة والإنزيمات غير المرغوب فيها. تهدف هذه الورقة البحثية إلى تقديم تحليل مفصل لتأثير تقنية HPP على الخواص النسجية (الريولوجية) والخواص الميكروبيولوجية لمنتجات العصائر الطازجة. يستعرض البحث المبادئ العلمية الكامنة وراء تأثير الضغط العالي على مكونات العصير، مع تقديم تعريفات دقيقة للمفاهيم الأساسية. توثق المراجعة التأثيرات الإيجابية لتقنية HPP، والتي تشمل تحسناً ملحوظاً في السلامة الميكروبيولوجية من خلال تحقيق خفض كبير في أعداد البكتيريا والخمائر والعفن، بالإضافة إلى قدرتها على الحفاظ على الخصائص الحسية والغذائية بشكل يفوق المعالجات الحرارية التقليدية. كما تناقش الورقة التغيرات الفيزيائية التي تطرأ على لزوجة العصائر نتيجة المعالجة بالضغط العالي وتأثيرها على القوام، وكيف ترتبط هذه التغيرات بتفعيل أو تعطيل إنزيمات مثل بكتين ميثيل إستراز. تُظهر النتائج المستخلصة من الدراسات العلمية المحكمة أن تقنية HPP تمثل بديلاً واعداً وفعالاً لإنتاج عصائر طازجة عالية الجودة وأمنة ومطابقة لطلب المستهلكين المتزايد على الأطعمة قليلة التصنيع والصحية.

## 1. مقدمة

في العقود الأخيرة، شهد قطاع الصناعات الغذائية تحولاً ملحوظاً نحو تطوير منتجات تلبى متطلبات المستهلكين الباحثين عن أغذية آمنة، وغنية بالعناصر الغذائية، وقليلة التصنيع مع الحفاظ على صفاتها الطازجة (Mohamed & Salih, 2026). تُعتبر عصائر الفاكهة والخضراوات الطازجة من المنتجات سريعة التلف نظراً لارتفاع نشاطها المائي وملاءمتها كوسط لنمو مختلف الكائنات الحية الدقيقة المسببة للفساد والأمراض المنقولة بالأغذية (ألاء محمد سدخان البيضاني، ساره هاشم موسى، حيدر كاطع حبيب القطيفي، 2023). بالإضافة إلى ذلك، تساهم الإنزيمات الذاتية الموجودة في العصير، مثل بولي فينول أوكسيديز (Polyphenol Oxidase - PPO) وبكتين ميثيل إستراز (Pectin Methyl Esterase - PME)، في حدوث تغييرات غير مرغوب فيها في اللون (اسمرار إنزيمي) والقوام (فقدان العكارة والترسيب) أثناء التخزين.

اعتمدت الصناعة تقليدياً على المعالجات الحرارية (بسترة وتعقيم) لضمان السلامة الميكروبيولوجية وإطالة العمر الافتراضي لهذه العصائر. ومع ذلك، فإن التعرض لدرجات حرارة مرتفعة، وإن كان فعالاً في تعطيل الكائنات الدقيقة والإنزيمات، إلا أنه يرتبط بآثار سلبية كبيرة على جودة المنتج. تؤدي المعالجة الحرارية إلى تدهور المركبات الحساسة للحرارة مثل فيتامين C والمركبات الفينولية، بالإضافة إلى تغيير الصفات الحسية الأصلية من خلال تطور نكهات "مطبوخة" غير مرغوب فيها وتغير لون المنتج. أدى هذا التناقض بين الحاجة إلى السلامة الميكروبيولوجية والرغبة في الحفاظ على الجودة الطازجة إلى دفع عجلة البحث والتطوير نحو تقنيات بسترة غير حرارية بديلة.

برزت تقنية المعالجة بالضغط العالي (HPP)، والمعروفة أيضاً باسم الضغط الهيدروستاتيكي العالي (High Hydrostatic Pressure - HHP)، كواحدة من أنجح وأكثر هذه التقنيات الواعدة تطبيقاً على نطاق تجاري. تعتمد هذه التقنية على تطبيق ضغط عالٍ جداً (يصل إلى 600 ميجا باسكال) على المنتج الغذائي المعبأ والمحكم الإغلاق، وذلك من خلال وسيط نقل الضغط (عادةً الماء)، لفترة زمنية محدودة. بما أن عملية الضغط تتم في درجات حرارة منخفضة أو محيطية (عادةً أقل من 45 درجة مئوية)، فإنها تتجنب الآثار الضارة للحرارة على الجودة الغذائية والحسية، مما يحافظ على نكهة العصير الطازجة ولونه وعناصره الغذائية.

تركز هذه الورقة البحثية على جانبين حاسمين من جوانب جودة العصائر الطازجة المعالجة بتقنية HPP وهما:

1. الخواص النسيجية: وتشمل الخصائص الريولوجية مثل اللزوجة والمرونة، والتي تؤثر بشكل مباشر على قوام المنتج ومقبوليته الحسية.
2. الخواص الميكروبيولوجية: وتشمل تعطيل الكائنات الدقيقة المسببة للفساد (البكتيريا، الخمائر، والعفن) ومسببات الأمراض، وهو الأساس في ضمان سلامة المنتج وإطالة عمره الافتراضي.

سيتم تقديم شرح مفصل لمبدأ عمل التقنية، يليه تحليل نقدي لأحدث النتائج العلمية حول تأثيرها على هذين النوعين من الخواص، مع مقارنتها بالمعالجات الحرارية التقليدية، للخروج باستنتاجات وتوصيات قائمة على الأدلة.

## 3. مبدأ تقنية المعالجة بالضغط العالي (HPP)

تقوم تقنية HPP على مبدأين فيزيائيين أساسيين: مبدأ باسكال (Pascal's Principle) ومبدأ التحجم (Le Chatelier's Principle).

ينص مبدأ باسكال على أن الضغط الواقع على سائل محصور في وعاء مغلق ينتقل بشكل منتظم وموحد في جميع الاتجاهات. في تطبيقات HPP، يتم وضع العبوة المرنة المحتوية على العصير في حاوية ضغط مملوءة بمائع نقل الضغط (عادةً الماء). عند تطبيق الضغط، ينتقل هذا الضغط بشكل فوري وموحد إلى جميع نقاط العصير، بغض النظر عن حجمه أو شكله. هذا يضمن معالجة متجانسة للمنتج دون الحاجة إلى مراعاة تدرجات حرارية كما هو الحال في المعالجات الحرارية.

أما مبدأ التحجم (Le Chatelier)، فينص على أن أي تفاعل كيميائي أو فيزيائي يصاحبه نقص في الحجم سوف يتم تعزيره تحت تأثير الضغط العالي. وهذا يفسر سبب تأثير HPP على الروابط غير التساهمية (مثل الروابط الهيدروجينية، التفاعلات الأيونية، والتفاعلات الكارهة للماء)، بينما تبقى الروابط التساهمية (كروابط الببتيد في البروتينات والروابط الغليكوزيدية في الكربوهيدرات) غير متأثرة بشكل كبير. تطبيق الضغط العالي يؤدي إلى انضغاط الجزيئات وتقليل المسافات بينها، مما يخل بالتوازنات الهيكلية الدقيقة ويسبب تشوه أو تدمير الهياكل الثانوية والثلاثية والرابعة للبروتينات (ومنها الإنزيمات)، وتغيير في نفاذية الأغشية الخلوية للكائنات الحية الدقيقة، مما يؤدي في النهاية إلى تعطيلها.

نظرًا لأن عملية الضغط لا تؤثر بشكل كبير على الروابط التساهمية، فإن المكونات الأساسية المسؤولة عن النكهة والرائحة والقيمة الغذائية (كالفيتامينات والمركبات الفينولية والسكريات) تبقى محتقظة ببنيتها ووظيفتها، وهو ما يفسر الحفاظ على الجودة "الطازجة" للمنتج بعد المعالجة.

#### 4. تأثير المعالجة بالضغط العالي على الخواص النسيجية للعصائر الطازجة

تشير الخواص النسيجية في العصائر إلى مجموعة الخصائص الفيزيائية المتعلقة بالاستجابة الميكانيكية للمادة عند تطبيق قوة عليها. في سياق العصائر، يركز الاهتمام بشكل أساسي على الخواص الريولوجية، وأهمها اللزوجة (Viscosity) والسلوك المرن اللزج (Viscoelastic behavior). تُعد اللزوجة مؤشرًا هامًا على القوام "في الفم" Mouthfeel، حيث أن العصائر ذات اللزوجة الأعلى تعطي إحساسًا بالثقل والجسم، بينما العصائر منخفضة اللزوجة تعطي إحساسًا بالمائية. يرتبط هذا السلوك ارتباطًا وثيقًا بوجود الألياف الغذائية الذائبة (مثل البكتين) والمعلقات الصلبة العالقة في العصير.

#### 3.1 آلية التأثير: دور إنزيم البكتين ميثيل إسترز (PME)

التأثير الرئيسي لتقنية HPP على الخواص النسيجية للعصائر يتم بشكل غير مباشر من خلال تأثيرها على إنزيم بكتين ميثيل إسترز (PME). PME هو إنزيم موجود طبيعيًا في جدران الخلايا النباتية ولب الفاكهة. وظيفته الأساسية هي تحفيز عملية نزع ميثيل ester من جزيئات البكتين، محولاً إياها من بكتين عالي الميثوكسيل إلى بكتين منخفض الميثوكسيل. هذا التعديل الكيميائي يقلل من قدرة البكتين على الارتباط بالماء والبقاء في صورة ذائبة، مما يؤدي إلى تراكم جزيئات البكتين مع بعضها البعض أو مع أيونات الكالسيوم ثنائية التكافؤ ( $Ca^{2+}$ ) الموجودة في العصير، مكوناً رواسب وهلاميات تتسبب في فقدان العكارة (Cloud loss) وترسب المواد الصلبة في قاع العبوة، وبالتالي انخفاض واضح في اللزوجة.

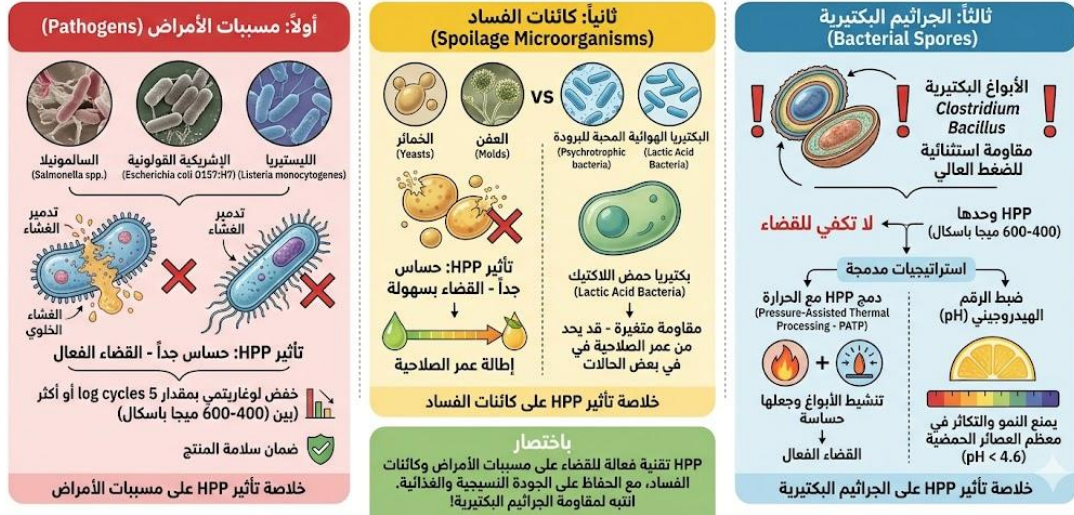
يعتمد تأثير HPP على PME بشكل كبير على الرقم الهيدروجيني (pH) للعصير. أظهرت الدراسات أن فعالية الضغط العالي في تعطيل PME تزداد بشكل ملحوظ في الأوساط الحامضية. في عصير البرتقال ذي pH منخفض ( $\geq 3.6$ )، يمكن لتقنية HPP عند 600 ميجا باسكال لمدة 2-5 دقائق أن تخفض نشاط PME بشكل فعال. ومع ذلك، عندما يرتفع pH العصير فوق 4.0، يبقى إنزيم PME نشطاً حتى بعد المعالجة بالضغط العالي لفترات أطول، مما سيؤدي حتمًا إلى فقدان اللزوجة والقوام أثناء التخزين. في المقابل، تُظهر المعالجة الحرارية التقليدية قدرة أكبر على تعطيل PME بشكل شبه كامل بغض النظر عن pH، ولكن على حساب تدهور المكونات الأخرى الحساسة للحرارة.

### 3.2. تأثير HPP على اللزوجة مقارنة بالمعالجة الحرارية

تختلف تأثيرات HPP عن المعالجة الحرارية بشكل ملحوظ فيما يتعلق باللزوجة. أشارت العديد من الدراسات المقارنة إلى أن:

1. المعالجة بالضغط العالي تؤدي غالبًا إلى زيادة في اللزوجة: في دراسة حديثة قارنت تأثير HPP والمعالجات الحرارية المختلفة على عصير البرتقال، لوحظت زيادة ملحوظة (بنسبة +20%) في لزوجة العصير المعالج بـ HPP مقارنة بالعصير غير المعالج. في المقابل، أدت جميع المعالجات الحرارية إلى انخفاض في اللزوجة (بنسبة تصل إلى -22%). يُعزى هذا الاختلاف إلى أن HPP، وخاصة عند مستويات الضغط العالية جدًا (< 400 ميغا باسكال)، يمكن أن يؤدي إلى تنشيط جزئي لـ PME في بعض الظروف، مما يسبب تغييرات هيكلية في البكتين تزيد من قدرته على الاحتفاظ بالماء، أو قد تؤدي إلى تحسين بنية المعلفات العالقة.
  2. تأثيرات HPP تتغير أثناء التخزين: خلال فترة التخزين المبرد، يظل سلوك اللزوجة للعصائر المعالجة بـ HPP ديناميكيًا. دراسة أجريت على عصير البرتقال غير المركز (NFC) عولج بـ 600 ميغا باسكال لمدة 10 دقائق، ثم خُزن عند 4 درجات مئوية لمدة 3 أشهر. أظهرت النتائج أن معامل اللزوجة (Viscosity Coefficient K) انخفض بنسبة تراوحت بين 8.03% و 39.4% خلال هذه الفترة، مما يشير إلى أن اللزوجة تتناقص تدريجيًا مع الوقت. ومع ذلك، كان هذا الانخفاض أقل حدة من ذلك الذي لوحظ في العصائر المعالجة حراريًا (والتي سجلت انخفاضًا بنسبة 17.8% - 49.1%). يُظهر هذا أن HPP لا يمنع فقدان اللزوجة تمامًا، ولكنه يبطئ من تأثيره بشكل ملحوظ مقارنة بالمعالجة الحرارية.
  3. السلوك المرن للزج: العصائر الطبيعية تُظهر سلوكًا مرئيًا لزجًا، بمعنى أنها تمتلك خصائص بين السائل المثالي والجسم المرن المثالي. قياس معاملي التخزين (G') والفقدان (G'') يعطي فكرة عن هذا السلوك. في نفس الدراسة، كان معامل الفقدان G'' (الذي يمثل السلوك اللزج) أكبر من معامل التخزين G' (الذي يمثل السلوك المرن) طوال فترة التخزين، وكلاهما أظهر اتجاهًا نازلًا. هذا يعني أن العصير المعالج بـ HPP يحافظ على طابعه اللزج، ولكن مرونته العامة تقل مع الوقت، مما يؤدي إلى قوام أكثر ميوعة.
  4. تؤثر HPP على الخواص النسيجية للعصائر بشكل مختلف جوهريًا عن الحرارة. بينما تحافظ HPP على لزوجة أعلى مقارنة بالمعالجات الحرارية، فإن التغييرات الدقيقة في بنية البكتين بسبب التأثير الجزئي على PME تسبب انخفاضًا تدريجيًا في اللزوجة أثناء التخزين، وإن كان بمعدل أبطأ.
4. تأثير المعالجة بالضغط العالي على الخواص الميكروبيولوجية للعصائر الطازجة
- يمثل التلوث الميكروبيولوجي التحدي الأكبر أمام سلامة واستقرار العصائر الطازجة. تشمل الكائنات المستهدفة في عمليات البسترة كلاً من:
- مسببات الأمراض (Pathogens): مثل السالمونيلا (*Salmonella spp.*)، الإشريكية القولونية (*Escherichia coli O157:H7*)، والليستيريا (*Listeria monocytogenes*).
  - كائنات الفساد (Spoilage Microorganisms): مثل البكتيريا الهوائية المحبة للبرودة (*Psychrotrophic bacteria*)، الخمائر (Yeasts)، والعفن (Molds).
  - الجراثيم البكتيرية (Bacterial Spores): والتي تكون مقاومة بشكل كبير للضغط العالي وتتطلب دمجها مع الحرارة للقضاء عليها.

## تأثير المعالجة بالضغط العالي (HPP) على الكائنات الدقيقة في العصائر الطازجة



شكل (1): مراحل تأثير المعالجة بالضغط العالي على الكائنات الدقيقة في العصائر الطازجة.

### 4.1 آلية التعطيل تحت تأثير الضغط العالي

تعمل تقنية HPP على تعطيل الكائنات الحية الدقيقة من خلال آليات فيزيائية في المقام الأول. يسبب الضغط العالي تغييرات لا رجعة فيها في البنية الثلاثية والرابعة للبروتينات والإنزيمات الحيوية داخل الخلية، مما يؤدي إلى تعطيل وظائفها. الأكثر أهمية هو تأثير الضغط على الغشاء الخلوي (Cell Membrane). يتسبب الضغط في زيادة النفاذية بشكل حاد، مما يؤدي إلى تسرب المحتويات الخلوية الأساسية (أيونات، أحماض أمينية، ATP) إلى الوسط المحيط. علاوة على ذلك، يمكن أن يتسبب الضغط العالي في تمسخ الحمض النووي (DNA) وتعطيل آلية نسخه. هذه التأثيرات التراكمية تؤدي إلى موت الخلية بشكل سريع وفعال.

### 4.2 فعالية HPP على مختلف أنواع الكائنات الدقيقة

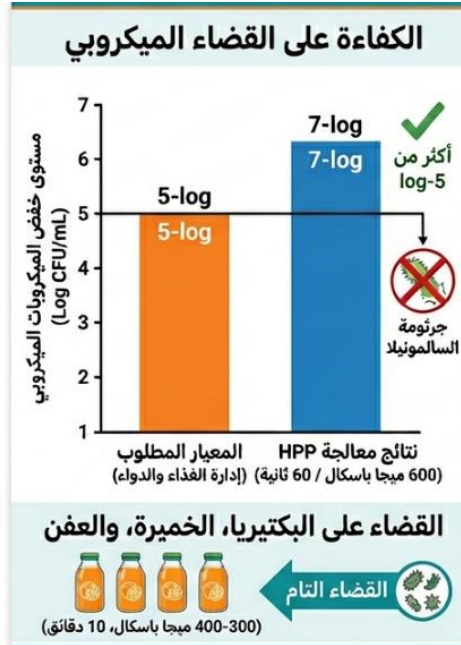
تختلف حساسية الكائنات الدقيقة للضغط العالي بشكل كبير. بشكل عام، كلما كان التركيب الخلوي للكائن أكثر تعقيداً، زادت مقاومته للضغط.

- الأكثر حساسية: الخمائر والعفن هي الأكثر حساسية للضغط العالي. أظهرت دراسة على عصير الأناناس أن معالجة بـ 400 ميجا باسكال لمدة 5 دقائق أدت إلى خفض أعداد الخمائر والعفن من حوالي  $5.89 \log \text{CFU/mL}$  إلى أقل من  $1.18 \log \text{CFU/mL}$ . هذا يجعل HPP فعالة جداً في السيطرة على مسببات الفساد الرئيسية في العصائر.
- حساسية متوسطة: البكتيريا الخضرية (Vegetative Bacteria) مثل الإشريكية القولونية والسالمونيلا. غالباً ما تكون أكثر مقاومة من الخمائر وتتطلب ضغوطاً أعلى ( $\leq 400$  ميجا باسكال) لتحقيق تعطيل كافٍ.
- الأكثر مقاومة: الجراثيم البكتيرية (Bacterial Endospores) مقاومة بشدة للضغط العالي عند درجات الحرارة المحيطة. يتطلب تعطيلها عادةً دمج الضغط العالي مع درجات حرارة مرتفعة ( $> 60$  درجة مئوية) في عملية تعرف باسم "البسترة بالضغط العالي الحراري".

### 4.3 نتائج دراسات التعطيل الميكروبيولوجي

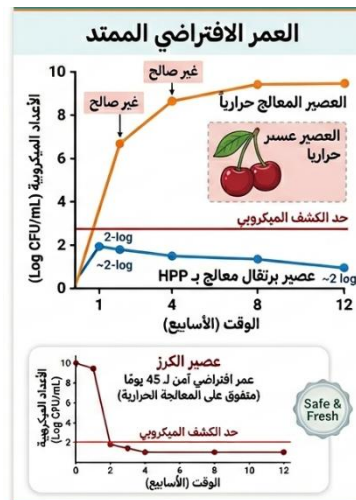
تدعم الأدلة العلمية بقوة فعالية HPP في تحقيق السلامة الميكروبيولوجية للعصائر:

1. الوصول إلى مستويات آمنة: أظهرت دراسة على عصير البرتقال أن HPP عند 600 ميغا باسكال لمدة 60 ثانية حققت خفضاً لا يقل عن 7 دورات لوغاريتمية (7-log reduction) لجراثومة السالمونيلا، وهو ما يتجاوز بكثير معيار الخمس دورات لوغاريتمية الذي تطلبه إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) لسلامة العصائر. كما تم القضاء على البكتيريا والخمائر والعفن بشكل كامل في عصائر حمضيات مختلفة عند تعريضها لضغط 300-400 ميغا باسكال لمدة 10 دقائق.



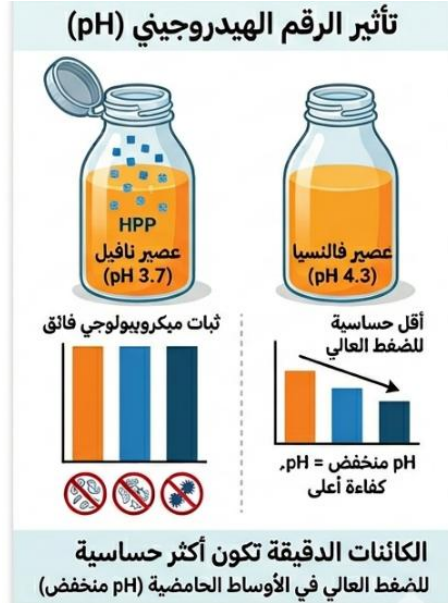
شكل (2): معالجة HPP تتجاوز الـ FDA للقضاء على السالمونيلا في عصير البرتقال.

2. العمر الافتراضي الممتد: قدرة HPP على خفض الأحمال الميكروبية بشكل كبير تؤدي مباشرة إلى إطالة العمر الافتراضي. عند تخزين عصير البرتقال المعالج بـ HPP في درجة حرارة التبريد (4 درجات مئوية)، بقي مستقرًا ميكروبيولوجيًا لمدة 12 أسبوعًا كاملة. ظلت الأعداد الميكروبية أقل من حد الكشف خلال الأسابيع الأربعة الأولى، ولم تتجاوز 2 log CFU/mL طوال فترة الدراسة. بالمقارنة، فإن العمر الافتراضي للعصائر المعالجة حراريًا والمخزنة في نفس الظروف يكون أقصر بكثير. وجدت دراسة على عصير الكرز أن HPP أتاح عمرًا افتراضيًا آمنًا يصل إلى 45 يومًا، متفوقًا على المعالجة الحرارية.



شكل (3): توضيح أن HPP يطيل العمر الافتراضي لعصير البرتقال عند درجة حرارة التبريد (4 °C).

3. العامل الحاسم: الرقم الهيدروجيني pH:pH) العصور له تأثير كبير على كفاءة التعطيل. الكائنات الدقيقة تكون أكثر حساسية للضغط العالي في الأوساط الحامضية (pH منخفض). هذا ما لاحظته دراسة Bull وزملائها (2004) عندما قارنت بين نوعين من البرتقال: عصير نافيل ذي pH 3.7 أظهر ثباتًا ميكروبيولوجيًا فائقًا مقارنة بعصير فالنسيا ذي pH 4.3 بعد المعالجة بـ HPP.



شكل (4): الرقم الهيدروجيني (pH):p

##### 5. الدراسات المقارنة: HPP مقابل المعالجة الحرارية التقليدية

لطالما كانت المعالجة الحرارية هي المعيار الذهبي في صناعة العصائر. لذلك، فإن أي تقنية جديدة يجب أن تُظهر تفوقًا أو تكافؤًا في السلامة الميكروبيولوجية مع تحسين واضح في جودة المنتج. تجمع الدراسات المقارنة بين HPP والمعالجة الحرارية (بأسترجة سريعة بدرجة حرارة عالية HTST) على أن HPP تتفوق في عدة جوانب رئيسية:

**جدول 1: ملخص مقارنة بين تأثير HPP والمعالجة الحرارية على عصائر الفاكهة الطازجة**

وجه المقارنة	المعالجة بالضغط العالي (HPP)	المعالجة الحرارية التقليدية (TP)
آلية التأثير	ضغط هيدروستاتيكي موحد (تصل إلى 600 ميجا باسكال).	انتقال الحرارة (بالتوصيل أو الحمل) لرفع درجة الحرارة.
سلامة الروابط	تؤثر فقط على الروابط الضعيفة (غير التساهمية)؛ تبقى الجزيئات الصغيرة (الفيتامينات) سليمة.	تكسر الروابط التساهمية؛ مما يغير التركيب الكيميائي للمركبات الحساسة.
التعبئة والتغليف	يجب أن تتم في "العبوة النهائية" وتكون مرنة (البلاستيك).	يمكن التعبئة قبل أو بعد المعالجة (زجاج، معدن، بلاستيك).
استهلاك الطاقة	كفاءة عالية؛ الضغط ينتقل آنيًا دون الحاجة لطاقة تسخين مستمرة.	استهلاك عالٍ للطاقة لتوليد البخار أو التسخين المباشر.
التكلفة الرأسمالية	مرتفعة جداً (تكلفة أجهزة الضغط العالي).	متوسطة إلى منخفضة (تقنيات البسترة والتعقيم التقليدية).
القبول التسويقي	يوضع عليها ملصق "طبيعي بالكامل" أو "Raw"؛ جاذبية عالية للمستهلك الصحي.	توصف بأنها "معالجة"؛ قد يُنظر إليها كأقل جودة من الناحية الغذائية.

تتفوق HPP بوضوح في الحفاظ على الجودة الغذائية والحسية، مما يجعلها التقنية المفضلة للعصائر عالية الجودة، بينما تبقى المعالجة الحرارية فعالة من حيث التكلفة وتعطيل الإنزيمات والجراثيم.

## 6. الخلاصة والتوصيات

تمثل تقنية المعالجة بالضغط العالي (HPP) نقلة نوعية في مجال حفظ الأغذية، حيث تقدم حلاً متكاملًا يوازن بين متطلبات السلامة الميكروبيولوجية الصارمة ورغبة المستهلك المتزايدة في منتجات طازجة، صحية، وقليلة التصنيع. تستند هذه الورقة إلى الأدلة العلمية لتقديم الاستنتاجات التالية:

1. تفوق في الحفاظ على الجودة: أثبتت HPP قدرتها الفائقة على الحفاظ على الخواص الحسية (اللون، النكهة) والقيمة الغذائية (فيتامين C، مضادات الأكسدة) للعصائر الطازجة بشكل يفوق بكثير المعالجات الحرارية التقليدية. هذا يعود إلى طبيعة العملية غير الحرارية التي لا تؤثر على الروابط التساهمية للمركبات المسؤولة عن هذه الصفات.
2. فعالية ميكروبيولوجية عالية: توفر HPP مستوى عالٍ من الأمان الميكروبيولوجي، حيث تقضي بشكل فعال على مسببات الأمراض الشائعة (كالسالمونيلا والإشريكية القولونية) وكائنات الفساد (الخمائر والعفن) في العصائر. هذا يؤدي إلى إطالة العمر الافتراضي للمنتج بشكل ملحوظ عند حفظه مبرداً.
3. تأثير ديناميكي على الخواص النسيجية: تؤثر HPP على قوام العصير بشكل مختلف عن الحرارة. بينما تحافظ على لزوجة أعلى، فإن نشاط إنزيم PME المتبقي (خاصة في العصائر ذات pH المرتفع) يؤدي إلى تغيرات تدريجية في اللزوجة أثناء التخزين. هذا يستدعي فهماً عميقاً لكيمياء المنتج لتحسين ظروف المعالجة.
4. الملاءمة للتطبيقات الصناعية: أثبتت العديد من الدراسات على نطاق شبه صناعي جدوى HPP وفعاليتها الاقتصادية، خاصة للعصائر ذات القيمة المضافة العالية والمنتجات المميزة بكونها "طازجة" و"طبيعية".

توصيات للباحثين والصناعيين:

- تحسين ظروف المعالجة: يجب تصميم بروتوكولات HPP (الضغط، الزمن، درجة الحرارة) بناءً على نوع العصير المحدد، مع الأخذ بعين الاعتبار pH، ونشاط إنزيم PME، ونوع الكائنات الدقيقة المستهدفة.
- الرقابة على المواد الخام: نظراً لأن فعالية HPP تعتمد بشكل كبير على pH، يجب على المصنعين مراقبة حموضة الثمار المستخدمة (خاصة الموسمية منها) لتعديل ظروف المعالجة وفقاً لذلك وضمان ثبات الجودة.
- التخزين المبرد: يجب التأكيد على أن HPP ليست تقنية تعقيم، بل هي بسترة. المنتجات المعالجة بـ HPP لا تزال قابلة للتلف ويجب حفظها في سلسلة تبريد مستمرة لضمان سلامتها وإطالة عمرها الافتراضي.
- دمج HPP مع تقنيات أخرى: لتعطيل الجراثيم البكتيرية المقاومة بشكل كامل، يمكن دمج HPP مع درجات حرارة مرتفعة (60-90 درجة مئوية) في عملية البسترة بالضغط العالي الحراري، أو مع إضافات طبيعية مضادة للميكروبات.

في الختام، تمثل تقنية HPP مستقبل صناعة العصائر الطازجة، حيث توفر للمستهلك منتجاً يجمع بين سلامة الغذاء والمعالج ونضارة العصير الطازج غير المعالج، مما يلبي احتياجات السوق الحديثة المتطورة.

## 7. المراجع

- [1] Ravichandran, C., Jayachandran, L. E., Kothakota, A., Pandiselvam, R., & Balasubramaniam, V. M. (2022). Influence of high pressure pasteurization on nutritional,

functional and rheological characteristics of fruit and vegetable juices and purees-an updated review. Bohrium.

- [2] Yang, Y., Wang, Z., Guo, X., Hu, Y., Chen, H., & Zhang, F. (2023). Storage characteristics of high-pressure processing NFC orange juice. *Food and Fermentation Industries*, 49 (9), 259-268 .
- [3] Al Hammadi, A. A. (2021). EFFECT OF HIGH-PRESSURE PROCESSING ON QUALITY AND SHELF LIFE OF GREEN FRESH JUICE PRODUCED FROM A BLEND OF FRUIT AND VEGETABLE (Master's thesis). United Arab Emirates University .
- [4] Dhenge, R., Langialonga, P., Alinovi, M., Lolli, V., Aldini, A., & Rinaldi, M. (2022). Evaluation of quality parameters of orange juice stabilized by two thermal treatments (helical heat exchanger and ohmic heating) and non-thermal (high-pressure processing). *Food Control*, 141, 109150 .
- [5] Hiperbaric. (2025, November 13). HPP for Orange Juice: Optimizing Safety & Quality. Retrieved from [<https://www.hiperbaric.com/en/hpp-orange-juice-optimizing-safety-quality/>](<https://www.hiperbaric.com/en/hpp-orange-juice-optimizing-safety-quality/>)
- [6] Bull, M. K., Zerdin, K., Howe, E., Goicoechea, D., Paramanandhan, P., Stockman, R., & Stewart, C. M. (2004). The effect of high pressure processing on the microbial, physical and chemical properties of Valencia and Navel orange juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(2), 135-149 .
- [7] Chuensombat, N., Rungraeng, N., Setha, S., & Suthiluk, P. (2019). A preliminary study of high pressure processing effect on quality changes in 'Nanglae' pineapple juice during cold storage. *Journal of Food Science and Agricultural Technology*, 5, 1-8 .
- [8] Pandraju, S., & Rao, P. S. (2020). High-Pressure Processing of Sugarcane Juice (*Saccharum officinarum*) for Shelf-Life Extension During Ambient Storage. *Sugar Tech*, 22, 1043–1052 .
- [9] Ahmad, T., Shahbaz, M. H., Saeed, K., Iqbal, S., & Rehman, H. (2024). Comparative evaluation of high pressure processing and thermal pasteurisation on phytochemicals, microbial and sensorial attributes of sweet cherry (*Prunus avium* L.) juice. *Czech Journal of Food Sciences*, 42(6), 405-414 .
- [10] Juarez-Enriquez, E., Salmeron-Ochoa, I., Gutierrez-Mendez, N., Ramaswamy, H. S., & Ortega-Rivas, E. (2015). Shelf life studies on apple juice pasteurised by ultrahigh hydrostatic pressure. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1), 915-919 .
- [11] Kurek, M. A., Wyrwisz, J., Karp, S., & Wierzbicka, A. (2022). Impact of High-Pressure Processing (HPP) on Selected Quality and Nutritional Parameters of Cauliflower (*Brassica oleracea* var. *Botrytis*). *Applied Sciences*, 12(12), 6013 .
- [12] Ogawa, H., Fukuhisa, K., & Fukumoto, H. (1992). Effect of hydrostatic pressure on sterilization and preservation of non-pasteurized citrus juice. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 39(11), 1020-1025 .
- [13] Yang, X., & Ruan, M. (2012). Bactericidal Effect of Ultra-high Pressure on the Clarified Apple Juice. *Modern Food Science and Technology*, 28(9), 1170-1172 .
- [14] Chuchuca Moran, G. W. (2017). A Comparison among Different Alternatives of Processed Green Juice Blends (Master's thesis). University of Florida.

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **JSHD** and/or the editor(s). **JSHD** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.