مجلة علوم البحار والتقنيات البيئية
المجلد (9)، العدد (1) (يونيو-2023)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

DOI: https://doi.org/10.59743/jmset.v9i1.149

استخدام المجال الكهربائي النبضي كتقنية لا حرارية في معاملة وحفظ الغذاء: دراسة مرجعية

علاء رياض عبد الستار، صباح مالك حبيب الشطي* و اسعد رحمان سعيد الحلفي

قسم علوم الأغذية، كلية الزراعة، جامعة البصرة، البصرة، العراق.

*البريد الإلكتروني: sabahalshatty@gmail.com

Use of Pulsed Electric Field (PEF) as a Non Thermal Technique in Treatment and Preservation of Food: A Review Study

Alaa R. Abdulstar, Sabah M.H. Al-Shatty*, and Asaad R.S. Al-Hilphy

Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah, Basrah, Iraq.

Received: 28 December 2022; Revised: 25 February 2023; Accepted: 30 April 2023.

الملخص

سيطرت الطرق الحرارية بشكل عام على صناعة وتجهيز الأغذية. ومع ذلك، قد تؤدي مثل هذه المعاملات إلى العديد من التغييرات في الخصائص الحسية والوظيفية للأغذية. ظهرت العديد من التقنيات اللاحرارية خلال السنوات الماضية، نتيجة للطلب المتزايد من قبل المستهلكين في تجهيز أغذية أمنة وعالية الجودة، من بين هذه التقنيات هي تقنية المجال الكهربائي النبضي. يعد المجال الكهربائي النبضي Pulsed Electric Field (PEF) أحد أكثر طرق اللاحرارية الواعدة التي تضمن المحافظة على الخصائص التغذوية للمادة الغذائية يعمل الـPEF على تثبيط الأحياء المجهرية والإنزيمات الموجودة في الأغذية ومنتجاتها مع الحد الأدنى من التغييرات في خصائصها الفيزيائية والحسية والوظيفية، وبالتالي يمكن القول أن الـPEF يعد خيارًا بديلاً واعداً للمعاملات الحرارية في معاملة وحفظ مختلف المنتجات الغذائية، لاسيما الأغذية السائلة. لذا جاءت هذه الدراسة المرجعية بهدف تلخيص المبادئ الأساسية لعمل المجالات الكهربائية النبضية ودورها في تحسين الخصائص الوظيفية للأغذية فضلا عن تأثيرها المثبط للأنزيمات والأحياء المجهرية.

الكلمات الدالة: المجال الكهربائي النبضي PEF، تثبيط الأحياء المجهرية، تثبيط الإنزيمات، المركبات النشطة بايولوجياً.

Abstract

Thermal methods generally dominate the food industry and processing. However, such transactions may lead to many changes in the sensory and functional properties of foods. Many non-thermal technologies have emerged during the past years due to the increasing demand by consumers in the processing of safe and high-quality foods. Among these technologies is the pulsed electric field technology. Pulsed electric field (PEF) is one of the most promising thermogenic methods that ensure the preservation of the nutritional properties of food. PEF works to inhibit microorganisms and enzymes present in foods and their products with minimal changes in their physical, organoleptic, and functional properties. Therefore, it can be said that PEF is a promising alternative option for heat treatments in the treatment and preservation of various food products, primarily liquid foods. This came from the reference study aimed at summarizing the basic principles of the action of pulsed electric fields and their role in improving the functional properties of foods as well as their inhibitory effect on enzymes and microorganisms.

Keywords: *Pulsed Electric Field PEF; Microbial Inhibition; Enzyme Inhibition; Bioactive Compounds.*

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

1. المقدمة

تمتاز الأغذية بمحتواها الجيد من العناصر الغذائية التي تعد مصدر جيد لنمو وتكاثر المايكروبات لذلك فأن تثبيطها يعد أمراً مهماً لإطالة العمر الخزني للغذاء (Giner *et al.*, 2013). المعاملة الحرارية هي تقنية فعالة لتثبيط المايكروبات، ومع ذلك، فإن المعاملة المفرطة للأغذية قد تسبب تغيرات غير مرغوبة للخصائص الوظيفية للأغذية مثل دنترة البروتين، فقدان الفيتامينات وتكون نكهات غير مرغوب (Yang *et al.*, 2021; Bhargava *et al.*, 2021). تتطلب المعاملات الحرارية طاقة عالية، وقت أطول، مستوى عالي من المدخلات الخارجية (Barba *et al.*, 2017). فضلا عن كونها تقنية غير صديقة للبيئة بسب استخدامها للوقود أو السخانات في إنتاج الحرارة ومن ثم نقلها إلى الغذاء، كما أنها تحتاج إلى وحدة معاملة للمياه مما يجعلها تقنية باهظة الثمن (Iqbal *et al.*, 2019). اتجه العالم الآن نحو إنتاج أغذية صحية بخصائص مماثلة للأغذية الطازجة (Martinho *et al.*, 2022; Hidayat *et al.*, 2021)، عن طريق تطوير تقنيات لا حرارية فعالة ومبتكرة تضمن المحافظة على خصائص المادة الغذائية (Barba, 2017; Yildiz *et al.*, 2019; Chiozzi *et al.*, 2022) تعد المعاملات اللاحرارية بديلا واعدا للطرق التقليدية في حفظ الغذاء حيث بدأت تكتسب مقبولية كبيرة من قبل المستهلكين ومنتجي الغذاء على حدا سواء (Adebo *et al.*, 2021)، بسبب قدرتها على تحسين جودة وسلامة الغذاء وتقديمه بصوره شبه طازجة للمستهلك كما أنها تجنب أو تقلل بدرجة كبيرة الكثير من التغيرات الضارة على الخواص الحسية والطبيعية مثل اللون والنكهة والملمس للمواد الغذائية فضلا عن كونها تقنية صديقة للبيئة وغير مكلفة ولا تستغرق وقت طويلاً مما يجعلها خيار آمن في حفظ الأغذية. ومن الأمثلة على هذه العمليات المجالات الكهربائية النبضية Pulsed Electric Fields، الموجات فوق الصوتية Ultrasound، والضغط العالي Ultra-High Pressure، والأشعة السينية النبضية Pulsed X-Ray، و الإشعاع المؤين Ionising Radiation، والضوء النبضي Pulsed Light، والتفريغ القوسي عالي الجهد High Voltage Arc Discharge، وتقنيات الحواجز Hurdle Technologies والمجالات المغناطيسية Magnetic Fields (Siddiqui & Chand, 2022) . تعد تقنية المجال الكهربائي النبضي (PEF) واحدة من وسائل الحفظ اللاحرارية القادرة على تثبيط المايكروبات والأنزيمات عن طريق تعريض الغذاء الموضوع بين قطبين كهربائيين إلى نبضات كهربائية عالية القوة (1-45 كيلوفولت/سم ولمدة زمنية قصيرة مايكروثانية) مع الحفاظ على الخصائص الوظيفية للمادة الغذائية (Oey *et al.*, 2016; Li & Farid, 2016; Wang *et al.*, 2018) . إن لهذه التقنية العديد من التطبيقات الغذائية الأخرى مثل تعزيز استخراج المركبات النشطة بايولوجياً، تطرية اللحوم، التخفيض المحتمل لملوثات الغذاء وبقايا مبيدات الآفات وتجفيف الغذاء (Bhat *et al.*, 2019). تعمل المجالات الكهربائية النبضية على إحداث مسامات Micropores في غشاء الخلية، مقدار وحجم هذه المسامات يتوقف على عدة عوامل أهمها شدة المجال الكهربائي وعدد النبضات المطبقة ووقت المعاملة (Dellarosa *et al.*, 2016).

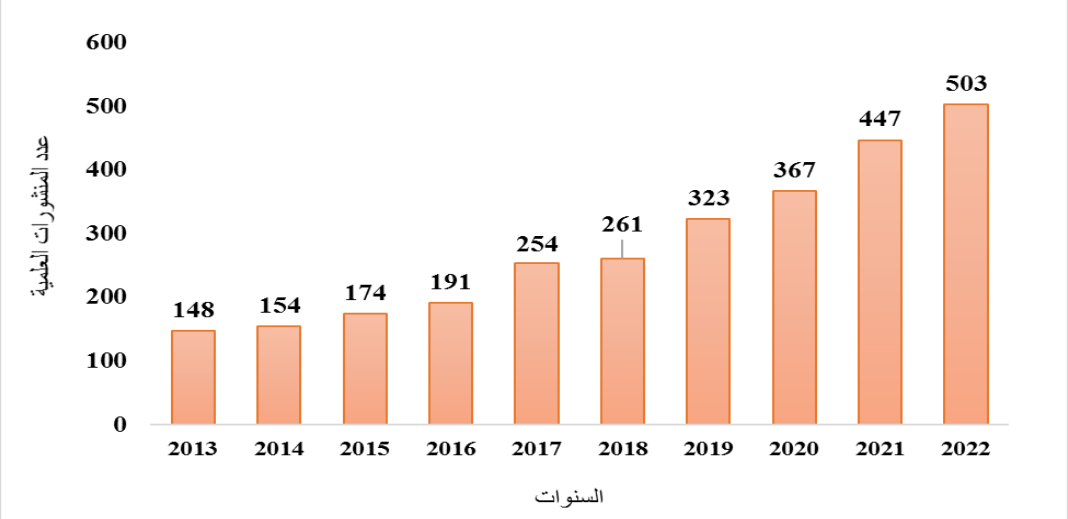
2. نبذه تاريخية مختصرة عن تطبيقات المجال الكهربائي النبضي في الغذاء

يرجع تاريخ تطبيق المجالات الكهربائية بنوعيها المستمر والمتناوب في معاملة الغذاء إلى حوالي 100 عام. استخدم العلماء الأمريكان منذ عام 1920 المجال الكهربائي الذي كان يعرف بذلك الوقت باسم Electropure في معاملة الأغذية السائلة

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

(Palaniappan *et al.*, 1990). وفي نهاية الأربعينات من القرن الماضي طبقت المجالات الكهربائية النبضية في تكسير الخلايا النباتية والفاكهة وسميت هذه العملية في الاتحاد السوفياتي السابق باسم "التحليل الكهربائي Electroplasmolysis (Sitzmann *et al.*, 2022)، بعد ذلك أجرى باحثون أوكرانيون ومولدافيون العديد من الدراسات حول تطبيق المجالات الكهربائية في معاملة الأغذية النباتية (Sitzmann *et al.*, 2016 a.b).

كما فحصت قابلية المجال الكهربائي النبضي في الخمسينات من القرن الماضي في تثبيط المايكروبات، عن طريق تعريض الغذاء الموضوع بين قطبين كهربائيين إلى مجال كهربائي عالي الشدة (Edebo & Selin, 1968)، واستطاع Zagorul'ko (1958) من استخدام المجال الكهربائية النبضي (PEF) من أجل زيادة الاستخلاص في معاملة بنجر السكر. وبسبب المشاكل الفنية ونقص الموارد المالية، لم تطبق هذه الدراسات صناعيا حيث كانت الأعمال السوفيتية في ذلك الوقت غير معروفة في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية. استخدم المجال الكهربائي النبضي العالي الشدة من قبل العالم الألماني فرونكل (Früngel, 1960) في تثبيط المايكروبات من خلال مكثف كهربائي مفرغ ينتج أقواس كهربائية وشدة موجة صادمة مقدارها 5,000 بار قادرة على إحداث تأثير المثبط للأحياء المجهرية وسميت هذه التقنية بالمعاملة الكهروهيدروليكية Electrohydraulic treatment، هذه التقنية تستخدم في الوقت الحالي في تطرية لحم الخنزير لديهم. بعد ذلك أدخل المجال الكهربائي النبضي في العديد من العمليات الغذائية في معاملة عصير الفاكهة (Yeom *et al.*, 2000)، تثبيط الإنزيمات (Giner *et al.*, 2000)، وعمليات تجفيف الغذاء (Wiktor *et al.*, 2013) يوضح الشكل (1) إحصائية بعدد المنشورات الخاصة بتطبيقات المجال الكهربائي النبضي في مجال حفظ الأغذية خلال العشر السنوات الماضية (2013-2022)، وأجري البحث المنهجي عبر موقع Science Direct التابع لقاعدة بينات سكوبس نظراً لرصانة العلمية واحتوائه على مجموعة جيدة من الأبحاث والمجلات المفهرسة، إضافة إلى كونه واجهة سهلة الاستخدام، أنتج البحث في الكلمات المفتاحية (المجال الكهربائي النبضي، غذاء، عصير) 2,822 منشوراً ، نشر منها 1,133 بحثاً علمياً و776 مقالة علمية و913 فصل في كتاب. يتضح من الشكل (1) التطور السريع في تطبيق المجال الكهربائي النبضي في مجال حفظ الغذاء، حيث اكتسبت هذه التقنية اهتماما كبيرا خلال السنوات العشر الماضية لكونها تقنية لا حرارية قادرة على إنتاج أغذية بخصائص مماثلة الأغذية الطازجة.

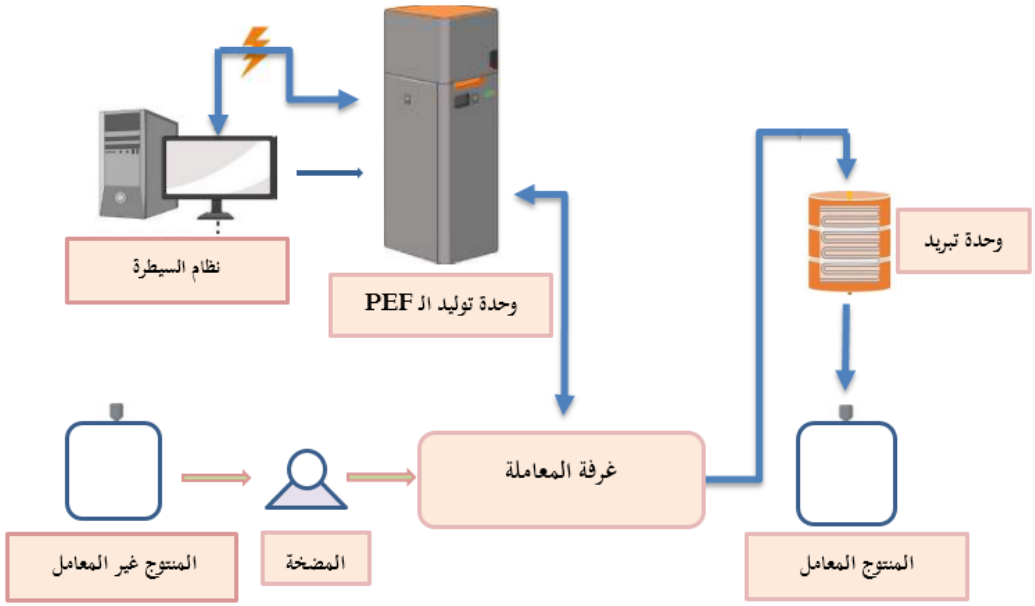


شكل 1. إحصائية بأعداد البحوث المفهرسة المنشورة بمنصة Science Direct بالفترة (2013-2022)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

3. مكونات الجهاز وتوليد النبضات

يتكون نظام PEF من ثلاثة مكونات أساسية وهي وحدة توليد PEF (مولد النبض)، غرفة المعاملة، ونظام التحكم (Buchmann *et al.*, 2018). يوضح الشكل (2) مخططًا لجهاز PEF ذو التدفق المستمر المستخدم في معاملة الأغذية السائلة.



شكل 2. رسم تخطيطي لجهاز PEF ذو التدفق المستمر المستخدم في معاملة الأغذية السائلة

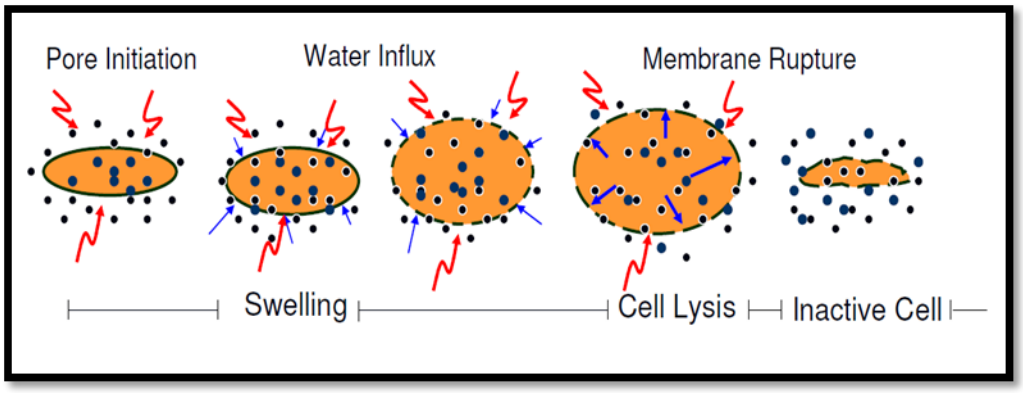
يتكون الجهاز من وحدة توليد النبض من مكونات كهربائية مختلفة مثل المقاومات والمحولات ومفاتيح الطاقة (Arshad *et al.*, 2020)، تلعب هذه الوحدة دوراً هاماً في تخزين الطاقة وتوليد نبضات عالية الطاقة وبموجات مختلفة (Kumar *et al.*, 2019). يعتمد نظام PEF على تعريض الغذاء الموضوع بين قطبين إلى نبضات ولمدة تتراوح بين (مايكروثانية إلى نانوثانية) عند شدة مجال كهربائي من 10–80 كيلو فولت/سم (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2006). يمكن حساب وقت معاملة PEF بضرب مدة النبضة الفعالة في عدد النبضات. يتم التحكم في مقدار ومسار PEF بواسطة مولد الجهد (Taha *et al.*, 2022). غرفة المعاملة هي المكان الذي يتم فيه معاملة المنتج بنبضات كهربائية عالية الطاقة، تتكون غرف المعاملة من الأقطاب الكهربائية التي تعد الجزء الأساسي فيها، وهي على ثلاثة أنواع أقطاب محورية coaxial، المتوازية Parallel والمستوية المشتركة Co-Planar (Kandušer *et al.*, 2017). تصمم غرف المعاملة تبعاً للغرض المستخدم لأجله إذ يستخدم نظام السيور في معاملة الأغذية الصلبة، مثل البطاطا أو الأغذية البحرية، بينما تستخدم أنظمة الأنابيب لمعاملة المنتجات السائلة مثل الحليب والعصائر (Heinz and Toepfl, 2022). لذا يجب أن تصنع الأقطاب من مواد خاملة عالية التوصيل الكهربائي من أجل المحافظة على جودة الغذاء. واستخدم الكربون سابقاً في صناعة الأقطاب الكهربائية بسبب موصليته العالية وطبيعته الخاملة لكن من مساوئه عمره الافتراضي القصير، ويعد الذهب والبلاتين خياراً مثالياً للأقطاب الكهربائية إلا أن التكلفة العالية حدة من استعمالهما في نظام الـ PEF (Naliyadhara *et al.*, 2022). كما أستخدم الفولاذ المقاوم للصدأ نظراً لتكلفته المنخفضة، وموصليته العالية، وطبيعته الخاملة ومقاومته للتأكل (Toepfl *et al.*, 2007). ويعد المفتاح Switcher أحد

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

مكونات أنظمة PEF المهمة، حيث يعمل عن توصيل أو فصل التيار الكهربائي فضلاً عن تفريغ الطاقة المخزنة في المكثف، وهناك نوعان رئيسيان من المحولات، محولات ذات شبه التحكم ومحولات التحكم الكامل (Arshad *et al.*, 2020). كما أن لمعدل ونوع التدفق تأثير هام على نتائج معاملة الأغذية بنظام PEF، حيث أنه كلما قل معدل التدفق كلما زادت كفاءة PEF فضلاً عن أن التدفق المضطرب له خصائص نقل طاقة أفضل من التدفق الصفحي (Buchmann *et al.*, 2018). نظام التحكم هو أحد الأجزاء المهمة في نظام الـPEF الذي يمكن من خلاله التحكم والسيطرة على شدة المجال الكهربائي، وعدد النبضات، عرض، نوع النبضة، وتدفق المنتج، التي يمكن من خلالها تحسين نتائج المعاملة.

4. المبادئ الأساسية للمجالات الكهربائية النبضية

تتضمن معاملة PEF تطبيق نبضات قصيرة (µs) مع شدة المجالات الكهربائية تتراوح ما بين 0.1 -40 كيلو فولت/سم حسب الهدف المنشود منه. تستخدم المجالات الكهربائية النبضية العالية الشدة (High-Intensity Pulsed Electric Field-HIPEF) (20-40 كيلو فولت/سم) في تثبيط المايكروبات والإنزيمات في الأغذية السائلة (Qin *et al.*, 1996). بينما يتم تطبيق المجالات الكهربائية المتوسطة الشدة MIPEF (1-20 كيلو فولت/سم) في تحسين عمليات التجفيف والتجميد والاستخلاص الأغذية الصلبة والسائلة (Morales-de la Peña *et al.*, 2021)، بغض النظر عن شدة المعاملة، فإن درجة الحرارة التي تحققت أثناء العملية أقل بكثير مقارنة بالمعاملات التقليدية (Gabrić *et al.*, 2018)، وهذا يضمن المحافظة على معظم المركبات النشطة بايولوجياً والحساسة للحرارة. إن معرفة الآلية الكامنة وراء التثبيط المايكروبي يعد أمراً مهماً من أجل تصميم وتطوير الأجهزة الخاصة بالمجالات الكهربائية واستخدامها في بسترة وتعقيم الأغذية (Martin-Belloso & Elez-Martinez, 2005). وقد تم اقتراح آليتين لتأثير المجالات الكهربائية على أغشية المايكروبات وهي electroporation وelectrical breakdown، وتقترح electroporation حدوث زيادة في نفاذية غشاء الخلية نتيجة للمجالات الكهربائية العالية التي تعمل على إحداث ثقوب في أغشيتها، حيث إن الخلايا التي تعاني ظاهرة electroporation فإنها تعاني أيضاً اختلال في التوازن الأسموزي نتيجة لتسرب الأيونات والجزيئات الصغيرة إلى داخل الخلية وبالتالي يصبح الغشاء منفذ للماء الذي يتسبب في انتفاخ وتمزق الخلية وانهيارها بشكل كامل في نهاية المطاف، كما هو موضح في الشكل (3) (Tsong, 1990).

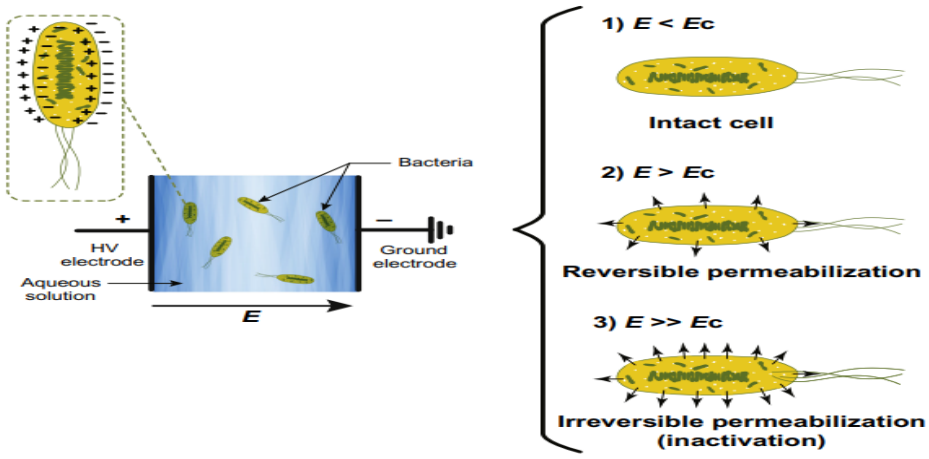


شكل 3. مراحل الصعق الكهربائي في غشاء الخلية، تشير الأسهم الحمراء إلى كثافة الحقل والنقاط الزرقاء إلى جزيئات ماء (Tsong, 1990)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

حيث أن ظاهرة electroporation تتسبب في زعزعة استقرار الطبقة الثنائية (الدهن، البروتين) في أغشية الخلايا وبالتالي فإن غشاء الخلية يصبح قابل للاختراق من قبل الجزيئات الصغيرة التي تتسبب في تورم وتمزق الغشاء (Wang *et al.*, 2018; Breton and Mir 2018; Kotnik *et al.* 2019). كما أن زيادة كل من شدة المجال الكهربائي ومدة النبضة أو خفض القوة الأيونية تعمل مجتمعة على زيادة تكون المسامات الكبيرة وانهيار الغشاء كهربائياً دون رجعة. إن ميكانيكية التثبيط بواسطة الصعق الكهربائي تكون على ثلاث مراحل، المرحلة الأولى هي مرحلة تكوين المسامات الصغيرة على غشاء الخلية عند تعرضها إلى المجال الكهربائي، المرحلة الثانية؛ وهي المرحلة التي يعاني فيها غشاء الخلية تغيراً في عدد وحجم المسامات أثناء التعرض للمجال الكهربائي، أما المرحلة الثالثة فهي مرحلة ما بعد المعاملة وهي مرحلة انهيار الخلية بشكل كامل أو عودتها إلى حالتها الطبيعية.

أما بالنسبة لظاهرة Electrical breakdown فقد ذكر Zimmermann (1986) أن غشاء الخلية عبارة عن مكثف مملوء بمادة عازلة وكما هو موضح في الشكل حيث يتسبب المجال الكهربائي في توليد شحنات كهربائية حرة على سطح غشاء الخلية التي تنجذب بعضها إلى البعض الآخر نتيجة الاختلاف في الشحنات والتي تتسبب في إحداث ضغوط كبيرة تعمل على إضعاف غشاء الخلية .حيث إن زيادة شدة المجال الكهربائي يرافقه زيادة في الشحنات الحرة المتولدة على الغشاء ومن ثم حدوث ارتفاع في الجهد الكهروميكانيكي وانهيار قابل للإلتحام في الغشاء، بينما زيادة شدة المجال الكهربائي تؤدي إلى إحداث مسام كبيرة في غشاء الخلية وبالتالي حدوث انهيار كلي في الغشاء كما هو موضح في الشكل (4).



شكل 4. الانهيار الجزئي والكلي لغشاء الخلية المايكروبية بسبب الجهد الكهربائي

حيث أن Ec: المجال الكهربائي الحرج، E: قوة المجال الكهربائي، (1): الخلية السليمة، (2): تشكيل المسامات القابلة للإلتحام، (3): الانهيار الكلي مع تشكيل المسامات الكبيرة (Koubaa *et al.*, 2018).

تختلف البكتريا فيما بينها في درجة مقاومتها للمجال الكهربائي، فالبكتريا الموجبة لصبغة جرام تتميز بأنها أكثر مقاومة من البكتيريا السالبة لصبغة جرام، وهذا يعود لطبقة البيبتيدوكلايكان Peptidoglycan السميكة التي تحيط بغشاء من الفوسفوليبيدات phospholipid مما يوفر لها الصلابة والمقاومة الفيزيائية، على العكس من البكتريا السالبة لصبغة جرام، إذ تكون طبقة Peptidoglycan رقيقة ومحاطة بغشاء من الليبيدات المتعدد الكاربوهيدرات Lipopolysaccharides

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

(Delso *et al*., 2022). في الخمائر يكون الغشاء السيتوبلازمي محاط بجدار خلوي صلب يتكون من السكريات، والتي توفر قوة ميكانيكية لها. تمتاز الخمائر بكونها أكثر حساسية للمجالات الكهربائية من البكتريا الموجبة لصبغة جرام، نظراً لكبر حجمها، ولكنها قد تكون أكثر مقاومة من البكتريا السالبة لصبغة جرام (Qin *et al*., 1995). تعتبر مرحلة نمو الأحياء المجهرية عاملاً مهماً في التثبيط المايكروبي عند البسترة في المجالات الكهربائية، خلايا الأحياء المجهرية في الطور اللوغارتيمي تكون حساسيتها أكثر من الخلايا في الطور الثابت لأن الخلايا في هذا الطور تمر بمرحلة الانقسام وبالتالي تكون الأغشية أكثر حساسية للمجالات الكهربائية، حيث يكون التثبيط في الطور اللوغارتيمي أكبر بمقدار 30% من الطور الثابت. ذكر Chen and Lee (1994) إن تعرض غشاء الخلية إلى المجال الكهربائي يتسبب في عزل قشرة من السايتوبلازم، حيث إن التوصيل الكهربائي في السايتوبلازم أكبر من 6–8 من التوصيل الكهربائي في غشاء الخلية. يحسن PEF بشكل كبير من عملية استخلاص المركبات عن طريق تمزيق جداران الخلايا النباتية (Vinceković *et al*., 2017). كما يعزز من المواد المضادة للأكسدة في الفاكهة Soliva-Fortuny *et al*., 2017). وبناءاً على ما تقدم يمكن القول بأن كفاءة PEF في معاملة الأغذية تعتمد على عدة عوامل منها شدة المجالات الكهربائية (كيلوفولت/سم)، شكل النبض (المربعة أو التصاعدية)، قطبية النبض (أحادية القطب، ثنائي القطب)، التردد (هرتز) ووقت المعاملة من مايكروثانية إلى مللي ثانية وخصائص الغذاء مثل التوصيل الكهربائي، الأس الهيدروجيني (Gabrić *et al*., 2018).

5. العوامل المؤثرة في كفاءة نظام الـ PEF

1.5. شدة المجال الكهربائي (Electric Field Intensity)

شدة المجال الكهربائي هي إحدى العوامل الأكثر تأثراً في زيادة معدل الاستخلاص، فضلاً عن زيادة معدل التثبيط المايكروبي في الحليب أو عصائر الفاكهة ويعود ذلك إلى زيادة مدخلات الطاقة، إذ يحدث التثبيط المايكروبي عندما يجتاز المجال الكهربائي المطبق مقدرة الغشاء الحرجة (Peiro *et al*., 2019; Pashazadeh *et al*., 2020; and Visockis *et al*., 2021). تعتمد شدة المجال الكهربائي اللازمة لتثبيط المايكروبات بشكل كبير على حجم الخلايا وتكيف الخلايا، فالخلايا الصغيرة تتطلب شدة مجال كهربائي أكبر مقارنة بالخلايا الكبيرة.

2.5 وقت المعاملة وإجمالي النبض ومدخلات الطاقة

وقت المعاملة هو أحد المعالم الأساسية الحاسمة في نظام الـ PEF وهو عبارة عن عدد النبضات المطبقة في عرض النبضة في عدد غرف المعاملة (Parniakov *et al*., 2016). إن العلاقة بين وقت المعاملة ومدخلات الطاقة هي علاقة طردية حيث أن زيادتهما تؤدي إلى زيادة التثبيط المايكروبي والإنزيمي. تبقى النبضة الكهربائية المطبقة في ذروة اتساعها لمدة زمنية معينة وتعرف باسم مدة النبض أو عرض النبضة إذ تتراوح عادةً من مايكرو ثانية إلى مللي ثانية، حيث يزداد معدل التثبيط المايكروبي مع زيادة مدة النبضة (Jin, 2017)؛ إلا أن زيادة مدة النبضة يرافقه ارتفاع غير مرغوب في درجة حرارة الغذاء لذلك يجب اتخاذ التدابير المناسبة من أجل الحصول على أعلى معدل تثبيط مع أقل تأثير تسخين. يُعرف العدد الإجمالي للنبضات التي تم تمريرها في ثانية واحدة بتردد النبض. يمكن تعريف مدخلات الطاقة المحددة (U) على أنها تطبيق الطاقة الكهربائية لكل وحدة كتلة (Heinz and Toepfl, 2022).

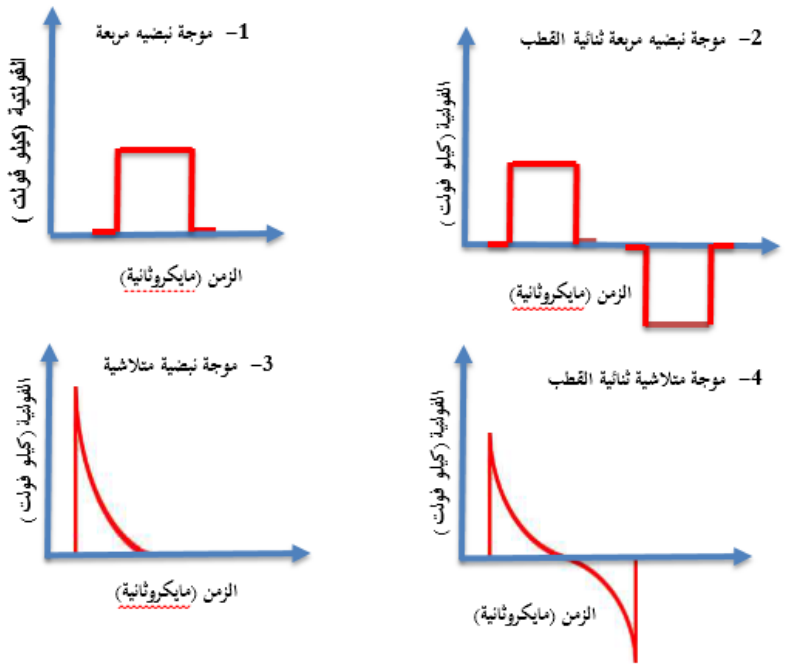
ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

3.5. درجة حرارة المعاملة

أظهرت العديد من الدراسات أن الدمج ما بين المعاملة بالمجال الكهربائي النبضي ودرجات حرارة معتدلة (50–68 °م) له تأثيرًا تآزريًا واضحاً في تثبيط المايكروبات من خلال سيولة الدهون الفوسفاتية في غشاء الخلية مما يزيد من قابلية PEF على تكوين المسامات، يزداد هذا المعدل مع زيادة درجة الحرارة، قد يتسبب PEF في زيادة درجة حرارة الغذاء، لذلك يجب أن تكون هناك وحدة تبريد مناسبة للحفاظ على درجات حرارة الغذاء.

4.5 شكل الموجة النبضية

يعد شكل النبض عاملاً مهماً في عمليات الاستخلاص والتثبيط المايكروبي على حد سواء، تكون النبضات المطبقة في نظام الPEF على أشكال موجية مختلفة مثل الموجات التصاعدية المتلاشية والموجات المربعة والموجات التصاعدية المتلاشية ذات القطبين والموجات المربعة ذات القطبين (شكل 5). تعتبر الموجات التصاعدية المتلاشية والموجات المربعة هي الأكثر شيوعاً في نظام PEF، حيث ترتفع الموجات التصاعدية المتلاشية بسرعة وتصل إلى أعلى قيمة ثم تبدأ بالتلاشي والهبوط ببطء إلى أن تصل إلى الصفر وتمتلك هذه الموجات ذيل طويل مع نبض قصير. تمتاز الموجات النبضية المربعة بكونها أكثر فتكاً وذات طاقة كفوءة مقارنة بالموجات التصاعدية المتلاشية، ويعزى سبب ذلك لقدرتها في المحافظة على القيمة القصوى للفولتية لفترة أطول تصل إلى أكثر من 2 مايكروثانية لكنها بنفس الوقت مكلفة نسبياً وأكثر تعقيداً مقارنة بالموجات النبضية التصاعدية المتلاشية التي تتميز بسهولة التوليد والتغير (Elgenedy *et al.*, 2017). تتميز الموجات ثنائية القطب بقدرتها في المحافظة على الأقطاب من التآكل بسبب التبادل المستمر للكاثود والأنود مما يؤدي إلى انخفاض رواسب على سطح القطب الكهربائي بسبب قلة التحليل الكهربائي للغذاء مقارنة بالموجات أحادية القطب التي يتسبب المجال الكهربائي فيها في فصل الجزيئات المشحونة وبشكل معاكس وتكون طبقة على الأقطاب مما يقلل من كفاءة المعاملة (Zhang *et al.*, 2018).



شكل 5. أشكال الموجات النبضية الشائعة الاستعمال في تكنولوجيا PEF.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

5.5. نوع ومرحلة النمو في الأحياء المجهرية

تختلف البكتريا فيما بينها في درجة مقاومتها للمجال الكهربائي، فالبكتريا الموجبة لصبغة جرام تتميز بأنها أكثر مقاومة من البكتريا السالبة لصبغة جرام وهذا يعود إلى تركيب الجدر الخلوي الذي يتميز بطبقاته السميكة المتعددة من البيبتيدوكلايكان Peptidoglycan، حيث يبلغ سمك جدار الخلية 20-80 nm مقارنة بسمك الجدار الخلوي لبكتريا السالبة لصبغة جرام 8-12 nm . في حين تمتاز الخمائر بكونها أكثر حساسية للمجالات الكهربائية من البكتريا الموجبة لصبغة جرام، نظراً لكبر حجمها، ولكنها قد تكون أكثر مقاومة من البكتريا السالبة لصبغة جرام (Qin *et al.*, 1995). تعتبر مرحلة نمو الأحياء المجهرية عاملاً مهماً في التثبيط المايكروبي عند البسترة في المجالات الكهربائية، تكون حساسية خلايا الأحياء المجهرية في الطور اللوغارتيمي أكثر من الخلايا في الطور الثابت لأن الخلايا في هذا الطور تمر بمرحلة الانقسام وبالتالي تكون الأغشية أكثر حساسية للمجالات الكهربائية، حيث يكون التثبيط في الطور اللوغارتيمي أكبر بـ 30% من الطور الثابت (Gaskova *et al.*, 1996).

6. المميزات والعيوب

يعمل PEF على إحداث تغييرات إيجابية في خصائص الغذاء الأساسية مثل المحتوى المايكروبي، والتوصيل الكهربائي، ومعامل الانتشار، والمسامية، والملمس (Bekhit *et al.*, 2016). كرست أغلب الدراسات حول تطبيق PEF في تثبيط الإنزيمات والأحياء المجهرية حيث يعمل المجال الكهربائي والنبضات العالية الطاقة على زعزعة غشاء الخلية من خلال إحداث مسامات في غشاء الخلايا المايكروبية وجعلها قابلة للاختراق من قبل الجزيئات الصغيرة مما يتسبب في تضخم الخلايا ومن ثم تمزقها. (Zimmerman, 1986). يمكن استخدام نظام PEF في معاملة الأغذية السائلة والشبه صلبة و الصلبة على حد سواء مثل العصائر و الحليب والحساء والبيض (Qin *et al.*, 1995). أدخل نظام الـ PEF إلى سوق العمل الأمريكية عام 2005م في بسترة عصائر الفاكهة (Ravishankar *et al.*, 2008). كما استخدم نظام الـ PEF في معاملة الأغذية الصلبة مثل البطاطا من خلال تعريضها المباشر للمجال الكهربائي بعد التقشير وقبل خطوة التقطيع (Faridnia *et al.*, 2015) أو في شكل شرائح. يعمل الـ PEF على إحداث تغييرات هيكلية في الأنسجة، من خلال التحكم في إطلاق المركبات داخل الخلايا مثل تقليل السكريات أو الأحماض الأمينية النشطه في تفاعلات ميلارد، وبالتالي يقلل محتوى مادة الأكريلاميد في منتجات البطاطا المطبوخة أو المقلية (Genovese *et al.*, 2019). البطاطا المعاملة بـ PEF تتميز بلونها الموحد فضلاً عن انخفاض كمية الزيت الممتصة أثناء القلي (Liu *et al.*, 2018 a, b). كما أن المعاملة المسبقة للأغذية بالمجال الكهربائي PEF يعمل بشكل فعال على زيادة معدل انتشار الماء داخل الأنسجة إلى أضعاف مضاعفة مع زيادة شدة المجال الكهربائي مما يسهم في التخلص من الرطوبة الموجودة على السطح التي قد تشكل حاجز لمنع نفاذ الزيت إلى داخل الأنسجة والحصول على غلي جيد (Dermesonlouoglou *et al.*, 2016). كما يسهم PEF في إعطاء نسيج أكثر ليونة مما يسهل من عمليات طبخ البطاطا (Lebovka *et al.*, 2004). كما أن للـ PEF تأثير معنوي في التقليل من زمن تجفيف أقراص البطاطا (Fauster *et al.*, 2018). يمتلك الـ PEF القدرة العالية على تحسين إنتاجية الزيت المستخلصة من ثمار الزيتون وبنسبة تصل إلى 25% مع المحافظة على كافة الصفات الحسية والفيزيائية والكيميائية لزيت المستخلص مقارنة الطرق التقليدية (Navarro *et al.*, 2022). تقنية المجال الكهربائي النبضي بشكل عام هي تقنية آمنة للإنسان. ومع ذلك فإن نتائج بعض الدراسات تشير إلى حدوث عملية اطلاق لبعض عناصر مادة القطب الكهربائي مثل (Mn, Cr, Ni, Fe) إلى الغذاء نتيجة

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

لتآكل الأقطاب الكهربائية (Pataro *et al.*, 2014). هذه المشكلة يمكن التغلب عليها عن طريق استخدام أقطاب ذات نوعية جيدة مثل أقطاب الكربون (Toepfl *et al.*, 2004). يرافق معاملة الغذاء باستخدام نظام PEF ارتفاع درجات الحرارة الناتجة عن النبضات الكهربائية المطبقة لذا فإن التبريد ضروري للحفاظ على درجة حرارة منخفضة للمنتج المعامل بـ PEF (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009). ومن جهة أخرى، يمكن أن يسهم الإرتفاع المعتدل في درجات الحرارة في إذابة الطبقة الدهنية لجدار الخلايا البكتيرية وبتالي زيادة معدل تكوين المسام ومن ثم معدل التشبيط. كما يمكن أن يؤدي كل من التركيب الكيميائي للمادة الغذائية المعاملة وتردد النبض في رفع نسبة المعادن المهاجرة إلى الغذاء (Pataro *et al.*, 2014). واجهت تقنية الـ PEF مشكلة عدم انتظام توزيع المجال الكهربائي داخل غرفة المعاملة وقد يرجع ذلك إلى تكون فقاعات أو وجود شوائب فضلاً عن الخصائص الفيزيائية للمادة الغذائية (Zhang *et al.*, 1995) .

7. دور PEF و HIPEF في تحسين الخصائص الوظيفية للأغذية

تتأثر معظم المركبات النشطة بايولوجياً وبشكل كبير عند المعاملة الحرارية للأغذية، لذلك يعد المجال الكهربائي النبضي بديلاً واعداً للطرق الحرارية للحصول على منتجات آمنة ومدة صلاحية أطول (Barba *et al.*, 2015). أشارت العديد من الدراسات إلى إمكانية المجالات الكهربائية الواطئة والعالية الشدة على حدا سواء في الحفاظ على الخصائص البايولوجية لمكونات المواد الغذائية مثل الفيتامينات والمركبات الفينولية والكاروتينات والكلوروفيل أو إجراء تغير طفيف عليها أو زيادتها مقارنة بالتأثيرات الكبيرة التي تحدثها الطرق التقليدية على هذه المكونات (جدول 1).

8. تأثير المجال الكهربائي النبضي PEF على الفيتامينات

الفيتامينات هي مركبات عضوية حيوية لها دور مهم في عمليات التمثيل الغذائي. بالإضافة إلى أن بعضها عبارة عن مضادات أكسدة تتميز بقدرتها العالية على التخلص من الجذور الحرة لذلك فإن الحفاظ عليها في الأغذية المصنعة أمر بالغ الأهمية. أظهرت العديد من الدراسات تفوق المجال الكهربائي النبضي في الحفاظ على محتوى فيتامين C في الأغذية المصنعة مقارنة بالطرق التقليدية، ذكر Buitimea-Cantúa *et al.* (2022) أن المجال الكهربائي عالي الشدة أدى إلى زيادة معنوية في محتوى عصير التوت الأحمر من فيتامين C عند معاملة العصير عند شدة مجال كهربائي (11.3، 23.3) كيلو فولت/سم وعرض نبضة 25 مايكروثانية عند مدخلات طاقة 100 هرتز/19.7 كيلوجول/لتر و200 هرتز/42.9 كيلوجول/لتر و500 هرتز/113.8 كيلوجول/لتر بزيادة وقدرها (64، 65 ، 65)%على التوالي، بينما أدت المعاملات التالية 100 هرتز/79.7 كيلوجول/لتر و200 هرتز/168.4 كيلوجول/لتر إلى زيادة وقدرها (67،77، 77)% على التوالي، قد يرجع هذا الإرتفاع لقابلية الـ PEF على تحرير الفيتامين من الأجزاء التي تحتوي على نسبة عالية منه مثل العصارة الخلوية. أظهرت دراسة أخرى Lee *et al.* (2018) عدم تأثر حامض الأسكوربيك في عصير اليوسفي المعامل عند شدة مجال كهربائي 16 كيلو فولت/سم ومدخلات طاقة وقدرها 100 كيلوجول/لتر مقارنة بالعينة الضابطة. بينما وجد Supasin *et al.* (2022) انخفاض ملحوظ في محتوى مخلل المانجو من فيتامين C عند شدة مجال كهربائي 3 كيلو فولت/سم وعدد نبضات 500 نبضة و تردد

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

جدول 1. تأثير المجال الكهربائي النبضي PEF والعالي الشدة HIPEF على المركبات النشطة بايولوجياً الموجودة في الأغذية

المكونات الفعالة	نوع الغذاء	المجال الكهربائي	التأثير	المصدر
المركبات الفينولية	عصير مانجو	35 كيلو فولت/سم، عرض النبضة (4 مايكرو ثانية) تردد النبضة 200 هرتز، وقت المعاملة 1800 مايكرو ثانية.	زادت بمقدار 350 مايكروجرام من حمض الجاليك/مللتر خلال فترة التخزين 75 يومًا.	(Salinas-Roca *et al.*, 2017)
	طحين الذرة المخمر	2 كيلو فولت/سم ، زمن المعاملة 875 مايكرو ثانية	زادت بمقدار 24.8%	(Lohani and Muthukumarappan, 2016)
الكاروتين	شرائح جزر	1.85 كيلو فولت/سم، 50 نبضة	زاد بمقدار 11.34%	(Wiktor *et al.*, 2015)
البولي فينول	عصير التفاح	30 كيلو فولت/سم، 200 و400 نبضة	دون تأثير	(Dziadek *et al.*, 2019)
بيتا – كاروتين	عصير البروكلي	35 كيلو فولت/سم، وقت معاملة 2000 مايكروثانية ثنائية القطب	تم تحقيق اعلى محتوى نسبي 130٪	(Sánchez-Vega *et al.*, 2015)
بيتا –كاروتين **الثيامين** **الريبوفلافين** **النياسين**	حليب الماعز	(40 كيلو فولت/سم، وقت المعاملة 13 مايكرو ثانية، 20 كيلو فولت/سم /وقت المعاملة 5 مايكروثانية	انخفاض طفيف بنسبة (0.1 و0.01)٪ على التوالي انخفض بنسبة (4.36 و 1.74)٪ على التوالي انخفض بنسبة (2.35 و 1.35)٪ على التوالي بنسبة (1.56 و 0.71)٪ على التوالي	(Mohamad *et al.*, 2021)
الكلوروفيل	عصير البروكلي	25–35 كيلو فولت/سم ، 1250 مايكرو ثانية	زادت بمقدار (16–20.7٪)	(Sanchez-Vega *et al.*,2014)
Chlorophyll a **Chlorophyll b** **الانثوسيانين**	عصير السبانخ	9 كيلو فولت/سم، تردد النبض 1 كيلو هرتز، عرض النبضة 80 مايكرو ثانية، ومدة المعاملة 335 مايكرو ثانية، 30 درجة مئوية.	زادت بمقدار 11.8% زادت بمقدار 14.94% زادت بمقدار 8.23%	(Faisal Manzoor *et al.*, 2021)
فيتامين C	عصير التفاح عصير الطماطة عصير الأناناس عصير البرتقال	35 كيلو فولت/سم، 1575 مايكروثانية، تردد النبض 180 هرتز 35 كيلو فولت/سم، 1500 مايكرو ثانية، تردد النبض 100 هرتز 35 كيلو فولت/سم، 2000 مايكرو ثانية، تردد النبضات 200 هرتز 35 كيلو فولت/سم، 1700 مايكرو ثانية، تردد النبضات 235 هرتز	انخفاض طفيف بمقدار 2 ملجم حامض الأسكوربيك/لتر من العصير انخفض بمقدار 18 مجم حمض الأسكوربيك/لتر من العصير انخفض بمقدار 86 مجم من حمض الأسكوربيك/لتر من العصير انخفض بمقدار 68 مجم من حمض الأسكوربيك / لتر من العصير	(Odriozola-Serrano *et al.*, 2022)
نارنجين	قشور السندي	4 كيلو فولت/سم، 30 نبضة	زاد بمقدار 20%	(Niu *et al.*, 2021)
ليمونين	قشور البرتقال	1–5 كيلو فولت/سم، مدخلات الطاقة 1–40 كيلو جول/كجم	زاد معدل الاستخلاص بمقدار 33%	(Carpentieri,*et al.*, 2021)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

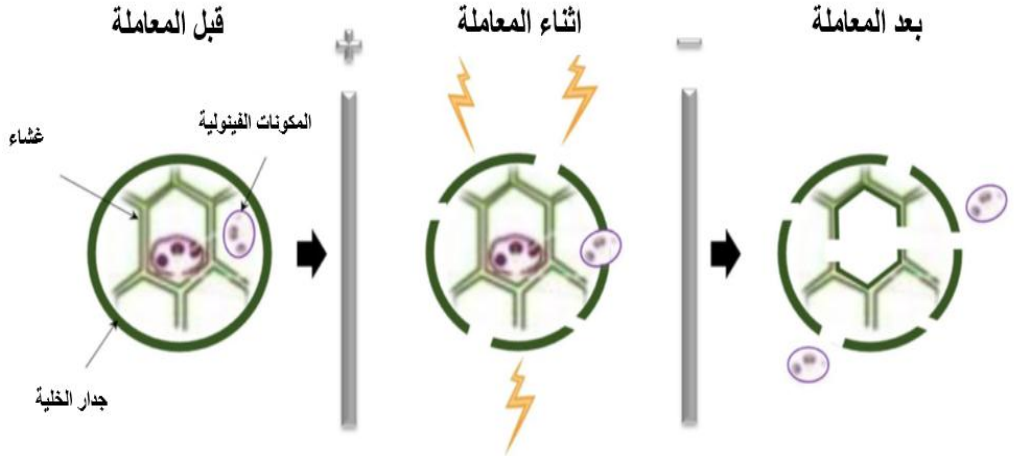
نبضي 1 هرتز ومتوسط مدخلات طاقة 180 كيلوجول/لتر، إذ انخفض محتوى الفيتامين بمقدار 26٪ مقارنةً بالمانجو الطازج وبنسبة 47٪ مقارنةً بالمانجو المخلل تقليديًا وقد عزى الباحثين سبب الانخفاض إلى تأثير PEF على مجموعة الهيدروكسيل، في ذرة الكربون الثانية لحامض الأسكوربيك أو إلى تفاعلات الأكسدة الكيميائية. في حين أشار Li *et al.* (2021) إلى إمكانية PEF عند شدة المجال الكهربائي 30 كيلوفولت/سم ووقت معاملة 400 مايكروثانية في المحافظة على محتوى فيتامين C في عصير البطيخ حيث انخفض محتوى الفيتامين وبشكل غير معنوي وبمقدار0.207 ملجم/100مللتر مقارنة بالطريقة التقليدية حيث كان الانخفاض معنوي وبمقدار 0.401 ملجم/100مللتر.

9. تأثير المجال الكهربائي النبضي PEF على محتوى الأغذية من المركبات الفينولية

المركبات الفينولية هي عبارة عن مركبات عضوية منتشرة بشكل واسع في المملكة النباتية تتميز ببنيتها الأساسية التي تتكون من حلقة بنزين مرتبطة معها مجموعة هيدروكسيل حرة واحدة على الأقل أو مجموعة استرية أو كلايكوسيدية. تعمل على هذه المواد كمضادات أكسدة طبيعية لتثبيط الكثير من الإنزيمات المؤكسدة وإزالة الجذور الحرة فضلاً عن قدراتها الوقائية لمعالجة الكثير من الأمراض المزمنة (Mtaoua *et al.*, 2017) وبغض النظر عن قدراتها البايولوجية داخل جسم الكائن الحي فإنها تتميز بتأثيراتها الوقائية ضد تلف الأغذية والمشروبات بسبب إمكانيتها العالية كمضادات للأكسدة طبيعيا (Rodríguez-Solana *et al.*, 2022) نظراً للأهمية البالغة لهذه المركبات فقد تناولت الكثير من الدراسات الأثار المعاملة لنظام الـ PEF على ثباتية المركبات الفينولية. وفي دراسة Rios-Corripio *et al.* (2022) جاءت بهدف تقييم أثار المجال الكهربائي النبضي عند شدة مجال كهربائي (11.7 و18)كيلو فولت/سم على محتوى عصير الرمان من المركبات الفينولية حيث أظهرت جميع العينات المبسترة بالمجال الكهربائي انخفاضا طفيفا في محتوى المركبات الفينولية خلال فترة التخزين مقارنة بالطرق الحرارية. وهذا كان مقاربا لما أشار إليه Odriozola-Serrano *et al.* (2022) عند دراسته لتأثير PEF عند شدة مجال كهربائي 35 كيلو فولت/سم على محتوى الكلي للمركبات الفينولية لأربعة أنواع من العصائر (الطماطم، التفاح، والأناناس، البرتقال) عند تردد نبض وعرض نبضة (100 هرتز/1500 مايكرو ثانية، 180 هرتز/1575 ، 200 هرتز/2000 مايكروثانية و235 هرتز/1700 مايكروثانية) على التوالي إذ لاحظ الباحثين حدوث انخفاض طفيف في المحتوى الكلي للمركبات الفينولية وبمقدار (13 ، 4 ، 4 و 53) ملغم حامض الكاليك/ 100غم على التوالي . ومن ناحية أخرى، أشار Buitimea-Cantúa *et al.* (2022) إلى زيادة ملحوظة في محتوى المركبات الفينولية لعصير التوت الأحمر بعد معاملة بالمجال الكهربائي النبضي وعند جميع مدخلات الطاقة إذ زاد المحتوى الكلي للمركبات الفينولية (426.4–567.2) ملجم حامض الكاليك/100 جم مقارنة بالعينة الضابطة 316.3 ملجم حامض الكاليك/100جم وبمعدل زيادة من 35–74%. قد تعود هذه الزيادة إلى تأثير PEF على نفاذية الخلايا الأغشية النباتية وبالتالي زيادة الإفراز الفينولي ومن هنا يمكن القول إن نظام PEF قادر على إحداث تغيرات إيجابية في التركيبة الكيمائية للغذاء، وبالتالي زيادة إمكانية الوصول الحيوي للمركبات النشطة بايولوجياً (شكل 6). جاءت هذه النتائج متوافقة مع دراسة Faisal Manzoor *et al.* (2021) حيث لوحظ وجود زيادة معنوية في محتوى العصير السبانخ من الفينولات الكلية ومركبات الفلافونويد الكلية والفلافونول الكلية (934.01 حامض كاليك مايكروجرام/جم، 744.09 كاتكين مايكروجرام/جم، 3.75 كيرسيتين مايكرجرام/جم) على التوالي مقارنة بالعينة الضابطة (860.87 حامض كاليك مايكروجرام/جم، 703.18 كاتكين مايكروجرام/جم، 3.08 كيرسيتين مايكروجرام/جم)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

على التوالي بعد معاملة العصير PEF عند (شدة مجال كهربائي 9 كيلو فولت/سم، عرض نبضة 80 مايكروثانية، تردد نبضي 40 كيلوهرتز، معدل جريان 60 مللتر/دقيقة، درجة حرارة 30 م°، وقت معاملة 335 مايكروثانية). أكدت دراسة أخرى (Ozkan *et al*., 2022) تأثر المعاملات اللاحرارية (PEF) عند مدخلات طاقة 15 كيلو جول/لتر في تعزيز إمكانية الوصول الحيوي للمركبات الفينولية في عصير التوت البري المخلوط مع حليب الأبقار واللوز، حيث أظهرت الدراسة قابلية الـ PEF في تعزيز استعادة الفلافونويدات الكلية وحمض الكلوروجينيك (بمقدار 3.9٪، 29.9٪) على التوالي. كما لاحظ Bilge *el al*. (2022) أن المعاملة المسبقة لحبوب القهوة الأثيوبية العربية قبل وبعد عملية التحميص بالPEF عند مدخلات طاقة (1.742،3.484،7.840) كيلو جول/لتر زاد من استخلاص المركبات الفينولية والنشاط المضاد للأكسدة لحبوب القهوة مقارنة بالحبوب غير المعاملة بنسبة تصل إلى 24٪ و31٪ على التوالي مع تقليل في نواتج تفاعل ميلارد.



شكل 6. يوضح تأثير المجال الكهربائي النبضي على نفاذية جدار الخلية وتحرير المركبات الفينولية (Morales-de la Peña *et al*., 2021)

10. تأثير المجال الكهربائي النبضي على الأحياء المجهرية

تعد المايكروبات أحد الأسباب الرئيسة لتدهور وفساد الأغذية، لذلك فهي محط اهتمام لكثير من منتجي الغذاء، تعد الطرق الحرارية واحدة من طرق الحفظ التقليدية لضمان سلامة الأغذية من الناحية المايكروبية فهي تضمن تقديم أغذية خالية من البكتيريا الممرضة، ومع ذلك فأن للمعاملات الحرارية تداعيات على الخصائص الوظيفية والحسية للأغذية مثل دنترة البروتين، الإسمرار غير الأنزيمي، وفقدان الفيتامينات ومركبات النكهة المتطايرة (Ling *et al*., 2015). نتيجة لذلك يمكن القول إن المعاملة الحرارية لا تلبي متطلبات المستهلك والسوق للحصول على منتجات ذات خصائص طازجة (Augustin *et al*., 2016). لذلك زاد الاهتمام بتطوير تقنيات لا حرارية قادرة على إطالة مدة الصلاحية عن طريق تثبيط الأحياء المجهرية المسببة للأمراض والفساد مع الحفاظ على الخصائص الغذائية والحسية (Barba1*et al*., 2017). يعد المجال الكهربائي النبضي (PEF) أحد أكثر التقنيات غير الحرارية الواعدة بسبب قدرتها على تحسين جودة وسلامة الغذاء وتتضمن آلية عمل PEF في التأثير على عدم استقرارية الأغشية المايكروبية عن طريق المجال الكهربائي والضغط الكهروميكانيكي الذي يؤدي إلى تكوين المسامات في الغشاء. درس

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Wu *et al.* (2022) تأثير PEF على *E.coli* في عصير التفاح عند (شدة مجال 53 فولت/سم ، تردد نبضي 400 هرتز) حيث حقق اختزال بأعداد البكتيريا بمقدار 4.5 لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر في أعداد بكتيريا القولون البرازية *E.coli* وعزى ذلك إلى التدمير العكسي لغشاء الخلية ، متبوعًا بدنترة الأنزيمات داخل الخلايا، وأخيرًا تمزق غشاء الخلية الذي لا رجعة فيه. كما لوحظ زيادة مستويات البروتينات خارج الخلية والأحماض النووية وهذا يمكن أن يعطي دليل على إمكانية PEF على تحسين استقرارية عصير التفاح ومحتوى المكونات النشطة بايولوجياً. بين Duvoisin *et al.* (2022) مقدرة الـ PEF العالية على إحداث التثبيط الكامل لكل من *E. coli Clostridium difficile, Salmonella* spp. و البكتيريا المحبة للحرارة المتوسطة Meshophilic bacteria عند (شدة مجال كهربائي 40 –450 كيلو فولت، تردد 350 كيلوهرتز، ومعدل جريان 10 مللتر/دقيقة. أشار Kantala *et al.* (2022) إلى قابلية نظام PEF على تثبيط المايكروبات في عصير جوز الهند عند (شدة مجال كهربائي 40 كيلوفولت/سم، عرض نبضة 10 مايكروثانية وعدد نبضات 20–100 نبضة)، إذ انخفض العد الكلي للبكتريا إلى أقل من واحد وحدة تكوين مستعمرة/مللتر مقارنة بعينة التحكم 6.5 وحدة تكوين مستعمرة/مللتر. أجريت دراسة أخرى حول تأثير المجال الكهربائي النبضي (PEF) على تثبيط خميرة الخبز *Saccharomyces cerevisiae* في عصير التفاح Eshtiaghi *et al.* (2021) أظهرت الدراسة أن مقدار التثبيط اعتمد بشكل أساسي على عدد النبضات وشدة المجال وعرض النبضة ، بينت الدراسة أن عدد النبضات الأقل من 20 نبضة (عند 12.6 كيلو فولت/سم) كان له تأثير ضئيل على تثبيط الخميرة بينما أدت زيادة عدد النبضات إلى 400 نبضة إلى تثبيط الخميرة بمقدار 3 لوغارتيم. كما درس (Yildiz *et al.*, 2021) تأثير PEF على الاستقرار المايكروبي (العد الكلي للبكتريا الهوائية المحبة للحرارة المعتدلة) لعصير الفراولة المبستر عند (35 كيلو فولت/سم، عرض نبضة 27 مايكرو ثانية أحادية القطب، وقت معاملة 27 مايكروثانية، تردد 155 هرتز) والمخزن عند 4 درجات مئوية مقارنة بالبسترة الحرارية التقليدية كمعاملة مرجعية (72 درجة مئوية، 15 ثانية)، أظهرت نتائج الدراسة إمكانية نظام الـ PEF على إطالة مدة صلاحية العصير إلى 28 يوما مقارنة بالطريقة التقليدية التي أعطت 42 يوم. درس كل من Pebrianti and Vazirani (2021) تأثير PEF عند 65 كيلو فولت/سم وعدد نبض 11.3 نبضة وتردد نبض 250 هرتز على ثلاث تراكيز من عصير الأناناس (10، 20، 30) بركس والملقح بعفن *Eupenicillium Javanicum* بتركيز 106 وحدة تكوين مستعمرة، أظهرت النتائج انخفاض ملحوظ في أعداد العفن خصوصا عند أقل تركيز للمواد الصلبة وبمقدار (4.0، 3.1، 1.3) لوغارتيم على التوالي بعد المعاملة بالـ PEF. أشار Mohamad *et al.* (2021) إلى أن مستوى تثبيط بكتيريا القولون البرازية *E. coli* المعلقة في حليب الماعز قد زاد معنويا ($p < 0.05$) مع زيادة شدة المجال الكهربائي ووقت المعاملة حيث حققت المعاملة 40 كيلو فولت/سم لمدة 13 مايكروثانية بأقصى مستوى تثبيط بلغ 3.87 لوغارتيم وحدة تكوين مستعمر/مللتر بينما انخفض مستوى التثبيط إلى 3.14 لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة/مللتر عند 35 كيلو فولت/سم ووقت معاملة 7 مايكروثانية.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

جدول 3. تأثير المجال الكهربائي النبضي على التثبيط المايكروبي للعصائر

نوع الغذاء	نوع الكائن المجهري	المجال الكهربائي	التأثير	المصدر
عصير الرمان	البكتيريا الهوائية المحبة للحرارة المتوسطة	(18 كيلو فولت/سم، نبضات موجة مربعة ثنائية القطب، تردد 200 هرتز، أوقات المعاملة 6 مللي ثانية).	انخفضت بمقدار 4 لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر	(Rios-Corripio *et al.*, 2022)
عصير فراولة	الخمائر والأعفان	(35 كيلو فولت/سم، 2 مايكرو ثانية عرض النبضة، التردد 155 هرتز، وقت معاملة 27 مايكرو ثانية ومعدل التدفق 350 مللتر/دقيقة).	انخفض من 3.4 لوغارتيم (قبل المعاملة) إلى 2.6 لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر .	(Yildiz *et al.*, 2021)
ماء جوز الهند	العد الكلي للبكتيريا	(20 و 40) كيلو فولت/سم، التردد 30 كيلو هرتز ومعدل التدفق 1 لتر/دقيقة	انخفض من 4.32 لوغارتيم (قبل المعاملة) إلى (3.36 و 2.84) لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر على التوالي.	(Godard, 2021)
عصير دوريان			انخفض من 5.50 لوغارتيم (قبل المعاملة) إلى (5.02 و4.78) لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر على التوالي.	
هريس مانغوستين			انخفض من 7.77 لوغارتيم (قبل المعاملة) إلى (6.81 و 5.85) لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر على التوالي.	
عصير البرتقال			انخفض من 4.06 لوغارتيم (قبل المعاملة) إلى (4.04 و3.66) لوغارتيم وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر على التوالي.	
عصير جوز الهند	العد الكلي للبكتيريا	شدة مجال كهربائي 40 كيلو فولت/سم، عرض نبضة 10مايكروثانية وعدد نبضات 20-100 نبضة	انخفض إلى أقل من 1 وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر مقارنة بعينة التحكم 6.5 وحدة تكوين مستعمرة لكل مللتر	(Kantala *et al.*, 2022)

11. مبدأ عمل نظام المجال الكهربائي النبضي في تثبيط الانزيمات

يعد تثبيط الإنزيمات أمرًا بالغ الأهمية في صناعة و إنتاج عصير الفاكهة التجاري حيث يتم تطبيق مجموعة متنوعة من الأساليب لتحقيق التثبيط المطلوب للانزيمات. تعد المعاملة الحرارية من أكثر الطرق استخدامًا لتحقيق التثبيط الكامل للانزيمات، ومع ذلك، فأن الطرق اللاحرارية مثل (PEF) تعد بديلاً واعداً في الحفاظ على الصفات النوعية الجيدة للعصائر الطازجة من خلال تثبيط الإنزيمات والبكتيريا بكفاءة (Roobab *et al.*, 2022). إن الآلية الدقيقة لعمل PEF على الإنزيمات على المستوى الذري

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

ليست مفهومة تمامًا، إشارات العديد من الدراسات أن نظام الـ PEF يعمل على إحداث تغيرات في البنية الثانوية (β-sheet, β-turn, α-helix) و الثلاثية و الرباعية (عدد الوحدات الفرعية البروتينية وترتيبها) مما يتسبب في تغيير المواقع النشطة للانزيم ومن ثم انخفاض في النشاط الإنزيمي ولا يوجد دليل قوي حتى الآن على أن نظام الـ PEF يعمل على احداث تغييرات كيميائية في البنية الأولية. كما تساهم كل من التأثيرات الكهروكيميائية والتسخين الأومي المرتبط بتأثير PEF على احدث تغييرات في تراكيب الانزيم ووظائفه (Poojary *et al*., 2017). يتأثر مقدار تثبيط الإنزيمات باستخدام الـ PEF بالعديد من العوامل، مثل نوع الإنزيم، وتركيب الإنزيم، ووجود العوامل المساعدة مثل درجة الحرارة (Alirezalu *et al*., 2019) إضافة إلى عوامل أخرى متعلقة بنظام الـ PEF نفسه على سبيل المثال التوصيل الكهربائي للمادة الغذائية، هندسة غرفة المعاملة، وشدة المجال الكهربائي ووقت المعاملة والتردد وشكل النبض والطاقة المحددة، لمسافة بين الأقطاب الكهربائية، وشكل النبض (أحادي القطب وثنائي القطب) والتي تحتاج إلى تحسين للحصول على نتائج عالية الجودة (Salehi, 2020). أكدت العديد من الدراسات أن استخدام المجال لكهربائي العالي الكثافة أو بالاشتراك مع حرارة معتدلة يتسبب في تثبيط كبير للعديد من الإنزيمات المرتبطة بجودة الاغذية مثل البكتينيز Pectinase، لايبيزLipase، البروتيز Protease، بيروكسيديز Peroxidase، الفوسفاتيز القاعدي Alkaline phosphatase، بولي فينول اوكسيديز polyphenol oxidase مثيل استريز Methylesterase (Poojary *et al*., 2017).

12. التطبيقات الرئيسية لـ PEF على انزيمات عصائر الفاكهة

في سياق صناعة العصير، أبلغ الباحثون عن نتائج مفيدة لـ PEF لتثبيط إنزيمات مختلفة في عصائر الفاكهة المتنوعة بما في ذلك التفاح (Sulaiman *et al*., 2017; Wibowo *et al*., 2019) والفراولة (Aguiló-Aguayo *et al*., 2010a) والرقي (Aguiló-Aguayo *et al*., 2010b). أشارت نتائج العديد من الدراسات أن بعض الإنزيمات أظهرت مقاومة عالية عند المعاملة بنظام الـ PEF مثل Lipoxygenase (LOX) وPolygalacturonase (PG) وβ-Glucosidase (GLUC) ومع ذلك إنخفض نشاط الإنزيم بنسبة أقل من 50٪، مقارنة بالأنزيمات الأخرى التي كانت أقل مقاومة عند المعاملة بالـ PEF مثل polyphenoloxidase (PPO) و peroxidase (POD) و Pectin Methylesterase (PME) حيث بلغت نسبة التثبيط فيها 85–100٪ (Zhao *et al*., 2012). درس Sánchez-Vega *et al*. (2020) تأثير المجال الكهربائي النبضي العالي الكثافة HIPEF (35 كيلو فولت/سم لمدة 2000 مايكرو ثانية في الوضع ثنائي القطب) على (PPO) polyphenoloxidase وLipoxygenase(LOX) في عصير البروكلي تم الوصول إلى أدنى مستوى من النشاط المتبقي (36.11 ، 68.71)% على التوالي قد يرجع مستوى التثبيط الخطي للإنزيمات بسبب التغيرات في البنية الثانوية والثلاثية والرباعية للإنزيمات (Zhong*et al*., 2008; Luo *et al*., 2010). ودرس Agcam *et al*. (2014) تأثير المجال الكهربائي النبضي PEF عند (25.26 كيلو فولت/سم ووقت معاملة 1206.2 مايكرو ثانية) والبسترة الحرارية (90 م° عند 20 ثانية) لعينات من عصير البرتقال الطازج على مستوى تثبيط إنزيم pectin methyl esterase (PME) أظهرت نتائج الدراسة تحقيق مستوى تثبيط يصل إلى (93.8٪ و95.2)% على التوالي. كما حققت المعاملة باستخدام الـ PEF استقرار في نشاط انزيم Pectin Methyl Esterase وبفارق معنوي ($p<0.01$) مقارنة بعينة البسترة الحرارية. في حين أشار Ertugay *et al*. (2013) إلى إمكانية تحقيق التثبيط الكامل في نشاط إنزيم PPO عند 100 نبضة و مجال الكهربائي أعلى

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

من 40 كيلو فولت/سم، بينما يمكن المجال الكهربائي النبضي عند 30 كيلو فولت/سم (50 و100 و150 و200) نبضة من تحقيق انخفض في النشاط المتبقي بنسبة يصل إلى (32.1٪ و7.0٪ و2.9٪ و1.6٪) على التوالي. كما أشار Min*et1al.* (2003) بأن لزيادة لشدة المجال الكهربائي ووقت المعاملة تأثير واضح في خفض نشاط إنزيم Lipoxygenase (LOX) فقد حققت شدة المجال الكهربائي 35 كيلو فولت/سم عند 30 م° ولمدة 50 أو 60 ثانية عند 30 م° انخفاض واضح في نشاط الإنزيم في عصير الطماطم بلغ 80٪. إن تأثير الجمع بين تقنيتين كان لهما تأثير واضح في خفظ نشاط الإنزيمات، درس (Tian *et al.*, 2018) تأثير المعاملة المسبقة للترددات الراديوية (RF) جنباً إلى جنب مع معاملة المجال الكهربائي النبضي (PEF) لتثبيط إنزيم polyphenol oxidase (PPO) في عصير التفاح، أدت المعاملة المسبقة لنسيج التفاح باستخدام الموجات الراديوية RF لمدة 10 دقائق الى انخفض النشاط المتبقي لـ PPO إلى 13.57٪ في حين أسهمت المعاملة اللاحقة بواسطة PEF عند 15-35 كيلو فولت/سم لمدة 400 مايكرو ثانية في انخفاض النشاط المتبقي من 13.57٪ إلى 5٪. كما كان للتاثير التأزري بين التسخين المسبق إلى 50 م° لعصير التفاح والمعاملة بالـ PEF عند (40 كيلو فولت/سم، ووقت معاملة 100 مايكرو ثانية) قد اسهم في خفض نشاط كل من إنزيم peroxidase (POD) وpolyphenoloxidase (PPO) إلى (71 و68)٪ على التوالي وبفارق معنوي ($P<0.05$) عن مستوى التثبيط في العصير المعالج بالبسترة المعتدلة التقليدية (72 م°، 26 ثانية) حيث انخفض نشاط PPO و POD بنسبة (46 و 48) ٪ على التوالي (Riener *et al.*, 2008). كما كان ايضاً للتأثيرات التآزرية لـ PEF عند (30 كيلو فولت/سم) مع الحرارة لعصير التفاح المسخن مسبقًا إلى 40 م° تأثير واضح في خفض نشاط إنزيم polyphenol oxidase (PPO) إلى 48٪ في حين تم تحقيق التثبيط الكامل عند 60 م° (Schilling *et al.*, 2008) (الجدول 4).

13. الاستنتاجات

أسفرت هذه الدراسة المرجعية عن جملة أمور منها التعرف على المبادئ الأساسية لنظام الـ PEF كأحد التقنيات الواعدة التي تلبي احتياجات المستهلك من خلال تقديم منتجات غذائية بشكل شبه طازج ومعاملة بالحد الأدنى. فضلا عن دور هذه التقنية الواعدة في تحسين الخصائص الوظيفية للأغذية وخفض النشاط المايكروبي والإنزيمي للمنتجات الغذائية. كما تأكد من هذه الدراسة أن للمجال الكهربائي النبضي فعالية عالية في الحفاظ على الخصائص البايولوجية للمواد الغذائية مثل الفيتامينات والمركبات الفينولية والكاروتينات والكلوروفيل أو إجراء تغير طفيف عليها أو زيادتها مقارنة بالتأثيرات الكبيرة التي تحدثها الطرق الحرارية التقليدية فضلا عن امكانيتها الجيدة في تثبيط المايكروبات والإنزيمات خصوصا عند المجالات الكهربائية من 35-40 كيلو فولت/سم حيث يعتمد معدل التثبيط على شدة المجال الكهربائي ووقت المعاملة وعدد النبضات ونوعها ودرجة حرارة المعاملة ونوع الكائن المجهري أو الإنزيم. فقد أثبتت الدراسات أن استخدام التأثير التآزري بين PEF والتقنيات اللاحرارية الأخرى أو الحرارة المعتدلة كان له دور فعال في تثبيط كل من البكتريا والإنزيمات مع الحفاظ على الخصائص الفيزيو كيميائية للمنتجات الغذائية. أجريت العديد من البحوث والدراسات في مجال تكنولوجيا المجالات الكهربائية النبضية في جميع أنحاء العالم. على الرغم من ذلك فإن معظم النتائج التي تم الحصول عليها لا تزال على نطاق المختبر ولا يمكن مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها في دراسات مختلفة لأن المعدات المستخدمة ومعايير المعاملة والوسط غير متشابهة في هذه الدراسات. واخيراً توصي هذه الدراسة إلى إجراء المزيد من الأبحاث حول تحسين معالم وظروف نظام الـ PEF بهدف الوصول إلى أفضل الظروف لتحقيق أفضل معاملة.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

جدول 4. تأثيرات المجال الكهربائي النبضي على مستوى التثبيط الإنزيمي لعصائر الفاكهة

نوع الغذاء	الإنزيم	المجال الكهربائي	التأثير	المصدر
عصير مانجو	بولي فينول أوكسيديز، ليبوكسيجينيز، بيروكسيديز	35 كيلو فولت/سم، أوقات المعاملة 1800 مايكرو ثانية	نسبة النشاط المتبقي (70 ، 53 ، 44)% على التوالي	(Rios-Corripio *et al*., 2017)
عصير تفاح	بولي فينول أوكسيديز، بيروكسيديز، بكتين ميثيل إستريز	12.5كيلو فولت/سم، معدل التدفق 27.6 لتر/ساعة ، التردد 62 هرتز، درجة حرارة الدخول 37.6 م درجة حرارة خروج 59.5 °م	انخفض (36 ، 49 ، 50) % على التوالي	(Wibowo *et al*., 2019)
عصير تفاح	بولي فينول أوكسيديز، بيروكسيديز	35 كيلو فولت/سم، وقت ارتفاع النبض 2 مايكرو ثانية	نسبة النشاط المتبقي (1.5 و 5.8)% على التوالي	(Bi *et al*., 2013)
عصير العنب	بولي فينول أوكسيديز، بيروكسيديز	25-35 كيلوفولت/سم لمدة 1-5 مايكرو ثانية	انخفض بنسبة (100 و 50) %على التوالي	(Marsellés-Fontanet, and Martín- Belloso, 2007)
عصير تفاح	بولي فينول أوكسيديز، بيروكسيديز	30كيلو فولت/سم، أوقات المعاملة 1000 مايكرو ثانية و60 درجة مئوية	نسبة النشاط المتبقي (0.04 و 0.16)% على التوالي	(Katiyo, *et al*., 2014)
عصير مانجو	بولي فينول أوكسيديز، ليبوكسيجينيز، بيروكسيديز	35كيلو فولت/سم، 200 هرتز، عرض النبضة 4 مايكرو ثانية وأوقات المعاملة 1800 مايكرو ثانية.	نسبة النشاط المتبقي (70 ، 85 ، 44)% على التوالي .	(Salinas-Roca *et al*., 2017)
عصير الرقي	بيروكسيديز، ليبوكسيجينيز، البكتين ميثيل استريز، بولي كالاكتورونيز	35كيلو فولت/سم لمدة 1727 مايكرو ثانية، تردد نبضي 188 هرتز، عرض النبض 4 مايكرو ثانية، ثنائية القطب	نسبة النشاط المتبقي (1.7، 85، 8.34، 86.4)% على التوالي.	Aguiló-Aguayo *et al*., 2010)
عصير البرتقال	بكتين مثيل استريز، بيروكسيديز	23كيلو فولت/سم، التردد 90 هرتز، عرض النبض 2 مايكرو ثانية في الوضع أحادي القطب.	نسبة النشاط المتبقي (60.7، 68.4)% على التوالي	(Vervoort, *et al*., 2011)
عصير البرتقال	بيروكسيديز	35 كيلو فولت/سم لمدة 1500 مايكرو ثانية عند درجة الحرارة اقل من 40 °م	نسبة النشاط المتبقي 5%	Elez-Martínez *et al*., 2006)
عصير التفاح	بولي فينول بيروكسيديز أوكسيديز	40كيلو فولت/سم لمدة 1-100 مايكرو ثانية	نسبة النشاط المتبقي (42، 47.5)% على التوالي	(Noci, *et al*., 2008)

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

المراجع

Adebo, O.A.; Molelekoa, T.; Makhuvele, R.; Adebiyi, J.A.; Oyedeji, A.B.; Gbashi, S.; Adefisoye, M.A.; Ogundele, O.M. and Njobeh, P.B. (2021). A review on novel non-thermal food processing techniques for mycotoxin reduction. *International Journal of Food Science & Technology*, 56, 13–27.

Agcam, E.; Akyıldız, A. and Evrendilek, G. A. (2014). Effects of PEF and heat pasteurization on PME activity in orange juice with regard to a new inactivation kinetic model. *Food Chemistry*, *165*, 70-76.

Aguiló- Aguayo, I.; Soliva- Fortuny, R., and Martín- Belloso, O. (2010a). High- intensity pulsed electric fields processing parameters affecting polyphenoloxidase activity of strawberry juice. *Journal of Food Science*, 75(7), C641-C646.

Aguiló-Aguayo, I. ; Soliva-Fortuny, R. and Martín-Belloso, O. (2010b). Impact of high-intensity pulsed electric field variables affecting peroxidase and lipoxygenase activities of watermelon juice. *LWT-Food Science and Technology*, *43*(6), 897-902.

Alirezalu, K.; Munekata, P. E.; Parniakov, O.; Barba, F. J.; Witt, J.; Toepfl, S.; and Lorenzo, J. M. (2020). Pulsed electric field and mild heating for milk processing: A review on recent advances. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, *100*(1), 16-24.

Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Munir, A., Buntat, Z., Ahmad, M. H., Jusoh, Y. M., and Aadil, R. M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. T*rends in Food Science & Technology*, 104, 1-13.

Augustin, M. A., Riley, M., Stockmann, R., Bennett, L., Kahl, A., Lockett, T., and Cobiac, L. (2016). Role of food processing in food and nutrition security. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 115-125.

Barba, F. J. (2017). Microalgae and seaweeds for food applications: Challenges and perspectives. *Food Research International*, 99(Part3), 969-970.

Barba, F. J., Koubaa, M., do Prado-Silva, L., Orlien, V., and de Souza Sant'Ana, A. (2017). Mild processing applied to the inactivation of the main foodborne bacterial pathogens: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 20-35.

Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., ... and Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77, 773-798.

Barbosa-Cánovas, G. V., and Altunakar, B. (2006). Pulsed electric fields processing of foods: an overview. **In** : *Pulsed electric fields technology for the food industry*, Raso, J. and Heinz, V. (eds,) . pp:3-26.

Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., and Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, *70*, 105293.

Bi, X., Liu, F., Rao, L., Li, J., Liu, B., Liao, X., and Wu, J. (2013). Effects of electric field strength and pulse rise time on physicochemical and sensory properties of apple juice

by pulsed electric field. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *17*, 85-92.

Bilge, G., Yurdakul, M., Buzrul, S., and Bulut, O. (2022). Evaluation of the effect of pulsed electric field on coffee arabica beans. *Food and Bioprocess Technology*, *15*(5), 1073-1081.

Breton, M. and Mir, L.M. (2018). Investigation of the chemical mechanisms involved in the electropulsation of membranes at the molecular level. *Bioelectrochemistry*, 119:76–83.

Buchmann, L. (2020). *Emerging pulsed electric field process development for bio-based applications*. Ph.D. Thesis, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.

Buchmann, L., Bloch, R., and Mathys, A. (2018). Comprehensive pulsed electric field (PEF) system analysis for microalgae processing. *Bioresource Technology*, 265, 268–274.

Buitimea-Cantúa, G. V., Rico-Alderete, I. A., Rostro-Alanís, M. D. J., Welti-Chanes, J., Escobedo-Avellaneda, Z. J., and Soto-Caballero, M. C. (2022). Effect of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields processes on microbial safety and quality of black/red raspberry juice. *Foods*, *11*(15), 2342.

Carpentieri, S., Jambrak, A. R., Ferrari, G., and Pataro, G. (2021). Pulsed electric field-assisted extraction of aroma and bioactive compounds from aromatic plants and food by-products. *Frontiers in Nutrition*, *8*. Cham, pp 1–20.

Chiozzi, V., Agriopoulou, S., and Varzakas, T. (2022). Advances, applications, and comparison of thermal (pasteurization, sterilization, and aseptic packaging) against non-thermal (ultrasounds, UV radiation, ozonation, high hydrostatic pressure) technologies in food processing. *Applied Sciences*, *12*(4),1-40. https://doi.org/10.3390/app12042202

Dellarosa, N., Ragni, L., Laghi, L., Tylewicz, U., Rocculi, P., and Dalla Rosa, M. (2016). Time domain nuclear magnetic resonance to monitor mass transfer mechanisms in apple tissue promoted by osmotic dehydration combined with pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 345-351.

Delso, C., Martínez, J. M., Cebrián, G., Condón, S., Raso, J., and Álvarez, I. (2022). Microbial inactivation by pulsed electric fields. In: *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry* (pp. 169-207). Springer, Cham.

Dermesonlouoglou, E., Zachariou, I., Andreou, V., and Taoukis, P. S. (2016). Effect of pulsed electric fields on mass transfer and quality of osmotically dehydrated kiwifruit. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 535-544.

Duvoisin, C. A., Horst, D. J., Vieira, R. D. A., Baretta, D., Pscheidt, A., Secchi, M. A., ... and Lannes, S. C. D. S. (2022). Finite element simulation and practical tests on Pulsed Electric Field (PEF) for packaged food pasteurization: Inactivating *E. coli*, *C. difficile*, *Salmonella* spp. and mesophilic bacteria. *Food Science and Technology*, *42*,1-20.

Dziadek, K Kopeć, A., Drożdż, T., Kiełbasa, P., Ostafin, M., Bulski, K.,and Oziembłowski, M. (2019). Effect of pulsed electric field treatment on shelf life and nutritional value of apple juice. *Journal of Food Science and Technology*, 56(3),1184–1191.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Edebo, L., and Selin, I. (1968). The effect of the pressure shock wave and some electrical quantities in the microbicidal effect of transient electric arcs in aqueous systems. *Journal of General Microbiology*, 50, 253–259.

Elez-Martínez, P.; Aguií O-Aguayo, I., and Martín-Belloso, O. (2006). Inactivation of orange juice peroxidase by high-intensity pulsed electric fields as influenced by process parameters. *Journal Sciences Food Agriculture*, 86, 71–81.

Elgenedy, M. A., Darwish, A., Ahmed, S., and Williams, B. W. (2017). A transition arm modular multilevel universal pulse-waveform generator for electroporation applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32, 8979–8991.

Ertugay, M. F., Başlar, M., and Ortakci, F. (2013). Effect of pulsed electric field treatment on polyphenol oxidase, total phenolic compounds, and microbial growth of apple juice. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *37*(6), 772-780.

Eshtiaghi, M. N., and Nakthong, N. (2021). Application of pulsed electric field for inactivation of Yeast *S. cerevisiae* in apple juice. *Journal of Physics, Conference Series*, 1893(1). 012008.

Faisal Manzoor, M., Ahmed, Z., Ahmad, N., Karrar, E., Rehman, A., Muhammad Aadil, R., ... and Zeng, X. A. (2021). Probing the combined impact of pulsed electric field and ultra- sonication on the quality of spinach juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, *45*(5), e15475.

Faridnia, F., Burritt, D. J., Bremer, P. J., and Oey, I. (2015). Innovative approach to determine the effect of pulsed electric fields on the microstructure of whole potato tubers: Use of cell viability, microscopic images and ionic leakage measurements. *Food Research International*, 77, 556-564.

Fauster, T., Schlossnikl, D., Rath, F., Ostermeier, R., Teufel, F., Toepfl, S., and Jaeger, H. (2018). Impact of pulsed electric field (PEF) pretreatment on process performance of industrial French fries production. *Journal of Food Engineering*, 235, 16-22.

Fruengel, F. (1960). *Method and device for electrically sterilizing and cleaning milking machines or the like*. (Patent) ,US 2931947.

Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzahedi, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P., and Bursać Kovačević, D. (2018). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), 1-14.

Gaskova, D.; Sigler, K.J.; Anderova, B. and Plasek, J. (1996). Effect of high voltage electric pulses on yeast cells: Factors influencing the killing efficiency. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 39: 195-202.

Genovese, J., Tappi, S., Luo, W., Tylewicz, U., Marzocchi, S., Marziali, S., ... and Rocculi, P. (2019). Important factors to consider for acrylamide mitigation in potato crisps using pulsed electric fields. *Innovative food science & emerging technologies*, 55, 18-26.

Giner, M. J., Hizarci, Õ., Martí, N., Saura, D., and Valero, M. (2013). Novel approaches to reduce brown pigment formation and color changes in thermal pasteurized tomato juice. *European Food Research and Technology*, 236(3), 507-515.

Godard, N. (2021). Setup of a continuous pulsed electric field system for microbial reduction in some liquid foods. *American Journal of Applied Sciences*, 11(02): (ISSN: 2321–089X).

Heinz, V., and Toepfl, S. (2022). Pulsed electric fields industrial equipment design. In: Pulsed electric fields technology for the food industry. Food Engineering Series. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, and S. Toepfl (eds.). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2-17.

Hidayat, A., Wijaya, T., Ishak, A., Rejeki Ekasasi, S., and Zalzalah, G. G. (2021). Model of the consumer switching behavior related to healthy food products. *Sustainability*, 13(6), 3555. https://doi.org/10.3390/su13063555

Iqbal, A., Murtaza, A., Hu, W., Ahmad, I., Ahmed, A., and Xu, X. (2019). Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing. *Food and Bioproducts Processing*, *117*, 170-182. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.006

Jin, T. (2017). Pulsed electric fields for pasteurization: Defining processing conditions. Handbook of electroporation. Cham: Springer Publisher.

Kandušer, M., Belič, A., Čorović, S., and Škrjanc, I. (2017). Modular serial flow through device for pulsed electric field treatment of the liquid samples. *Scientific Reports*, *7*(1), 1-12.

Kantala, C., Supasin, S., Intra, P., and Rattanadecho, P. (2022). Design and analysis of pulsed electric field processing for microbial inactivation (case study: Coconut juice). *Sciences Technology Asia*, 28(4),1-4.

Katiyo, W., Yang, R., Zhao, W., Hua, X., and Gasmalla, M. A. A. (2014). Optimization of combined pulsed electric fields and mild temperature processing conditions for red apple juice polyphenol oxidase and peroxidase inactivation. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 6(5), 638-646.

Kotnik, T., Rems, L., Tarek, M., and Miklavčič, D. (2019). Membrane electroporation and electropermeabilization: Mechanisms and models. Annual Review of Biophysics, 48, 63-91.

Kumar, R., Vijayalakshmi, S., Kathiravan, T., and Nadanasabapathi, S. (2019). PEF processing of fruits, vegetables, and their products. In: *Non-thermal Processing of Foods*. CRC Press. pp: 107-127.

Lee, S.L., Bang, I.H., Choi, H.j. and Min, S.C. (2018) Pasteurization of mixed mandarin and Hallabong tangor juice using pulsed electric field processing combined with heat. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 669–675.

Li, X., and Farid, M. (2016). A review on recent development in nonconventional food sterilization technologies. Journal of Food Engineering, 182, 33–45.

Li, L., Yang, R., and Zhao, W. (2021). The effect of Pulsed Electric Fields (PEF) combined with temperature and natural preservatives on the quality and microbiological shelf-life of cantaloupe juice. *Foods*, *10*(11), 2606

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E.J. and Wang, S. (2015). Kinetics of food quality changes during thermal processing: A review. *Food Bioprocess Technology*, 8(2), 343–358.

Liu, C., Grimi, N., Lebovka, N., and Vorobiev, E. (2018a). Effects of preliminary treatment by pulsed electric fields and convective air-drying on characteristics of fried potato. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 454-460.

Liu, Z. W., Zeng, X. A., and Ngadi, M. (2018b). Enhanced extraction of phenolic compounds from onion by pulsed electric field (PEF). *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(9), e13755.

Lohani, U. C., and Muthukumarappan, K. (2016). Application of the pulsed electric field to release bound phenolics in sorghum flour and apple pomace. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *35*, 29-35.

Luo, W., Zhang, R. B., Wang, L. M., Chen, J., and Guan, Z. C. (2010). Conformation changes of polyphenol oxidase and lipoxygenase induced by PEF treatment. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(2), 295-301.

Marsellés-Fontanet, Á. R., and Martin-Belloso, O. (2007). Optimization and validation of PEF processing conditions to inactivate oxidative enzymes of grape juice. *Journal of food engineering*, *83*(3), 452-462.

Martin-Belloso, O. and Elez-Martinez, P. (2005b) Food safety aspects of pulsed electric field. **In**: *Emerging technologies for food processing*. Da-Wen, S. (ed.). Elsevier Academic Press, London pp:184-217.

Martinho, V. J., Bartkiene, E., Djekic, I., Tarcea, M., Barić, I. C., Černelič-Bizjak, M., and Guiné, R. P. (2022). Determinants of economic motivations for food choice: Insights for the understanding of consumer behaviour. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, *73*(1), 127-139. https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1939659

Min, S., Min, S. K., and Zhang, Q. H. (2003). Inactivation kinetics of tomato juice lipoxygenase by pulsed electric fields. *Journal of Food Science*, *68*(6), 1995-2001.

Mohamad, A., Abdul Karim Shah, N. N., Sulaiman, A., Mohd Adzahan, N., and Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field of goat milk: Impact on *Escherichia coli* ATCC 8739 and vitamin constituents. *Journal of Food Process Engineering*, *44*(9), e13779.

Morales-de la Peña, M., Rábago-Panduro, L. M., Soliva-Fortuny, R., Martín-Belloso, O., and Welti-Chanes, J. (2021). Pulsed electric fields technology for healthy food products. *Food Engineering Reviews*, 13(3), 509-523.

Mtaoua, H., Sanchez-Vega, R., Ferchichi, A., and Martin-Belloso , O. (2017) Impact of high-intensity pulsed electric fields or thermal treatment on the quality attributes of date juice. *Journal of Food Processing and Preservation*,47: e13052.

Naliyadhara, N., Kumar, A., Girisa, S., Daimary, U. D., Hegde, M., and Kunnumakkara, A. B. (2022). Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction escalation technology in food industry. *Trends in Food Science & Technology*,122, 238–255.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Navarro, A., Ruiz-Méndez, M. V., Sanz, C., Martínez, M., Rego, D., and Pérez, A. G. (2022). Application of pulsed electric fields to pilot and industrial scale virgin olive oil extraction: impact on organoleptic and functional quality. *Foods*, *11*(14),1-15.

Niu, D., Ren, E. F., Li, J., Zeng, X. A., and Li, S. L. (2021). Effects of pulsed electric field-assisted treatment on the extraction, antioxidant activity and structure of naringin. *Separation and Purification Technology*, *265*, 118480.

Noci, F.; Riener, J.; Walkling-Ribeiro, M.; Cronin, D.A.; Morgan, D.J. and Lyng, J.G. (2008). Ultraviolet irradiation and pulsed electric fields (PEF) in a hurdle strategy for the preservation of fresh apple juice. *Journal Food Engineering*, 85, 141–146.

Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U. and Kowalski, R. (2021). The application of PEF technology in food processing and human nutrition. *Journal of Food Science and Technology*, 58(2), 397-411.

Odriozola-Serrano, I., Bellí, G., Puigpinós, J., Herrero, E., and Martín-Belloso, O. (2022). Screening the antioxidant activity of thermal or non-thermally treated fruit juices by *in vitro* and *in vivo* assays. *Beverages*, *8*(2), 36.

Oey, I., Roohinejad ,S., Leong, S.Y., Faridnia, F., Lee, P.Y. and Kethireddy, V. (2016). Pulsed electric field processing: Its technological opportunities and consumer perception. In: *Food processing technologies*. Jaiswal, A.K. (ed). CRC Press, Boca Raton, pp: 447–451.

Ozkan, G., Kostka, T., Dräger, G., Capanoglu, E., and Esatbeyoglu, T. (2022). Bioaccessibility and transepithelial transportation of cranberrybush (*Viburnum opulus*) phenolics: Effects of non-thermal processing and food matrix. *Food Chemistry*, *380*, 132036.

Palaniappan, S., Sastry, S. K., and Richter, E. R. (1990). Effects of electricity on microorganisms - A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 14, 393–414.

Parniakov, O., Barba, F. J., Grimi, N., Lebovka, N., and Vorobiev, E. (2016). Extraction assisted by pulsed electric energy as a potential tool for green and sustainable recovery of nutritionally valuable compounds from mango peels. *Food Chemistry*,192, 842–848.

Pashazadeh, B., Elhamirad, A. H., Hajnajari, H., Sharayei, P., and Armin, M. (2020). Optimization of the pulsed electric field-assisted extraction of functional compounds from cinnamon. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101461.

Pataro, G., Falcone, M., Donsı,` G., and Ferrari, G. (2014). Metal release from stainless steel electrodes of a PEF treatment chamber: Effects of electrical parameters and food composition. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,1:58–65.

Pebrianti, E., and Vazirani, W. (2021). Use of pulsed electric field for the inactivation of *Eupenicillium javanicum* ascospores in pineapple juice. *Journal of Physics: Conference Series*, 2049(1), 012020.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Peiro, S., Luengo, E., Segovia, F., Raso, J., and Almajano, M. P. (2019). Improving polyphenol extraction from lemon residues by pulsed electric fields. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 889–897.

Poojary, M.M., Roohinejad, S., Koubaa,M., Barba, F.J., Passamonti, P., Jambrak, A.R, and Greiner, R. (2017). Impact of pulsed electric fields on enzymes, **In**: *Handbook of Electroporation*, MiklavˇciˇC. D. (ed.) ,Springer, Cham, Switzerland, pp: 2369–2998.

Qin, B.L.; Pothakamury, U.R.; Vega-Mercado, H.; Martin, O.; Barbosa-Canovas, G.V. and Swanson, B.G. (1995). Food pasteurisation using high-intensity pulsed electric fields. *Food Technology*, 49(12), 55-60.

Qin, B. L., Pothakamury, U. R., Barbosa-Cánovas, G. V., Swanson, B. G., and Peleg, M. (1996). Nonthermal pasteurization of liquid foods using high-intensity pulsed electric fields. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 36(6), 603-627.

Ravishankar, S., Zhang, H. and Kempkes, M.L. (2008). Pulsed electric fields. *Food Science and Technology International*, 14, 429–432.

Riener, J., Noci, F., Cronin, D. A., Morgan, D. J., and Lyng, J. G. (2008). Combined effect of temperature and pulsed electric fields on apple juice peroxidase and polyphenoloxidase inactivation. *Food Chemistry*, *109*(2), 402-407.

Rios-Corripio, G., Morales-de la Peña, M., Welti-Chanes, J., and Guerrero-Beltrán, J. Á. (2022). Pulsed electric field processing of a pomegranate (*Punica granatum* L.) fermented beverage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 103045.

Rodríguez-Solana, R., Pereira-Caro, G., and Moreno-Rojas, J. M. (2022). Phenolic profiling and antioxidant capacity in agrifood products. *Processes*, *10*(10), 1950.

Roobab, U., Abida, A., Chacha, J. S., Athar, A., Madni, G. M., Ranjha, M. M. A. N., ... and Trif, M. (2022). Applications of innovative non-thermal pulsed electric field technology in developing safer and healthier fruit juices. *Molecules*, *27*(13), 4031.

Salehi, F. (2020). Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by pulsed electric field: A Review. *International Journal of Food Properties*, 23, 1036–1050.

Salinas-Roca, B., Elez-Martínez, P., Welti-Chanes, J., and Martín-Belloso, O. (2017). Quality changes in mango juice treated by high-intensity pulsed electric fields throughout the storage. *Food and Bioprocess Technology*, *10*(11), 1970-1983.

Sanchez-Vega, R., Elez-Martinez, P. and Martin-Belloso, O. (2014). Effects of high-intensity pulsed electric fields processing parameters on the chlorophyll content and its degradation compounds in broccoli juice. *Food Bioprocess Technology*, 7, 1137–1148.

Sánchez-Vega, R., Elez-Martínez, P., and Martín-Belloso, O. (2015). Influence of high-intensity pulsed electric field processing parameters on antioxidant compounds of broccoli juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *29*, 70-77.

Sánchez-Vega, R., Rodríguez-Roque, M. J., Elez-Martínez, P., and Martín-Belloso, O. (2020). Impact of critical high-intensity pulsed electric field processing parameters on oxidative enzymes and color of broccoli juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(3), e14362.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Schilling, S., Schmid, S., Jäger, H., Ludwig, M., Dietrich, H., Toepfl, S., and Carle, R. (2008). Comparative study of pulsed electric field and thermal processing of apple juice with particular consideration of juice quality and enzyme deactivation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(12), 4545-4554.

Siddiqui, A., and Chand, K. (2022). Non-thermal processing of food: an alternative for traditional food processing. *Innovative Approaches for Sustainable Development*. Springer, Cham. pp:19-131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90549-1_7

Sitzmann, W., Vorobiev, E.,and Lebovka, N. (2016a). Pulsed electric fields for food industry: Historical overview. **In**: *Handbook of electroporation*. Miklavcic, D. (ed). Springer International Publishing,

Sitzmann, W., Vorobiev, E., and Lebovka, N. (2016b). Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds. *Innovative Food Science and Emerging*, 37C, 302–311.

Sitzmann, W., Vorobiev, E., Raso, J., Álvarez, I., and Lebovka, N. (2022). History of Pulsed Electric Fields in Food Processing. **In** : Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry, Raso, J. ;Volker Heinz, V. Alvarez, L. and Toepfl, S. (eds.).. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_1. pp: 3-54

Soliva-Fortuny, R., Balasa, A., Knorr, D., and Martín-Belloso, O. (2009). Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(11-12), 544-556.

Soliva-Fortuny R, Vendrell-Pacheco M, Martin-Belloso O, Elez– Martinez P (2017). Effect of pulsed electric fields on the antioxidant potential of apples stored at different temperatures. *Postharvest Biology and Technology*, 132:195–201.

Sulaiman, A., Farid, M., and Silva, F. V. (2017). Quality stability and sensory attributes of apple juice processed by thermosonication, pulsed electric field and thermal processing. *Food Science and Technology International*, 23(3), 265-276.

Supasin, S., Kantala, C., Intra, P., and Rattanadecho, P. (2022). postharvest preservation of thai mango var. chok-anan by the combination of pulsed electric field and chemical pickling. *Horticulturae*, *8*(7), 584.

Taha, A., Casanova, F., Šimonis, P., Stankevič, V., Gomaa, M. A., and Stirkė, A. (2022). Pulsed electric field: fundamentals and effects on the structural and techno-functional properties of dairy and plant proteins. *Foods*, *11*(11), 1556.

Tian, Y., Wang, S., Yan, W., Tang, Y., Yang, R., and Zhao, W. (2018). Inactivation of apple (*Malus domestica* Borkh) polyphenol oxidases by radio frequency combined with pulsed electric field treatment. *International Journal of Food Science & Technology*, *53*(9), 2054-2063.

Toepfl, S., Heinz, V., and Knorr, D. (2007). High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing:Process Intensification*, 46(6), 537-546.

Tsong, T.Y. (1990). Reviews on electroporation of cell membranes and some related phenomena. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 24(3), 271-295.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Vervoort, L., Van der Plancken, I., Grauwet, T., Timmermans, R. A., Mastwijk, H. C., Matser, A. M., and Van Loey, A. (2011). Comparing equivalent thermal, high pressure and pulsed electric field processes for mild pasteurization of orange juice: Part II: Impact on specific chemical and biochemical quality parameters. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *12*(4), 466-477.

Vinceković, M., Viskić, M., Jurić, S., Giacometti, J., Kovačević, D. B., Putnik, P., and Jambrak, A. R. (2017). Innovative technologies for encapsulation of Mediterranean plants extracts. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 1-12.

Visockis, M., Bobinaitė, R., Ruzgys, P., Barakauskas, J., Markevičius, V., Viškelis, P., and Šatkauskas, S. (2021). Assessment of plant tissue disintegration degree and its related implications in the pulsed electric field (PEF)–assisted aqueous extraction of betalains from the fresh red beetroot. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102761.

Wang, Q., Li, Y., Sun, D. W. and Zhu, Z. (2018). Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: principles and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2285-2298.

Wang, M.-S., Wang, L.-H., Bekhit, A. E.-D. A., Yang, J., Hou, Z.-P., Wang, Y.-Z., … Zeng, X.-A. (2018). A review of sublethal effects of pulsed electric field on cells in food processing. *Journal of Food Engineering*, 223, 32–41..

Wibowo, S., Essel, E. A., De Man, S., Bernaert, N., Van Droogenbroeck, B., Grauwet, T., ... and Hendrickx, M. (2019). Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses. *Innovative food science & emerging technologies*, *54*, 64-77.

Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M., Rybak, K., Chudoba, T., Lojkowski, W., and Witrowa-Rajchert, D. (2015). The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *30*, 69-78.

Wu, S., Xu, X., Yang, N., Jin, Y., Jin, Z., and Xie, Z. (2022). Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 in apple juice via induced electric field (IEF) and its bactericidal mechanism. *Food Microbiology*, *102*, 103928.

Yang, S., Yuan, Z., Aweya, J. J., Huang, S., Deng, S., Shi, L., ... and Liu, G. (2021). Low-intensity ultrasound enhances the antimicrobial activity of neutral peptide TGH2 against *Escherichia coli*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77, 105676.

Yildiz, S., Pokhrel, P. R., Unluturk, S., and Barbosa-Cánovas, G. V. (2019). Identification of equivalent processing conditions for pasteurization of strawberry juice by high pressure, ultrasound, and pulsed electric fields processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *57*, 102195. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102195.

Yildiz, S., Pokhrel, P. R., Unluturk, S., and Barbosa-Cánovas, G. V. (2021). Shelf life extension of strawberry juice by equivalent ultrasound, high pressure, and pulsed electric fields processes. *Food Research International*, *140*, 110040.

ISSN (Print): 2413-5267
ISSN (Online): 2706-9966

Zhao, W., Yang, R., and Zhang, H. Q. (2012). Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins. *Trends in Food Science & Technology*, 27(2), 83-96.

Zhang, Q., Barbosa-Cánovas, G. V., and Swanson, B. G. (1995). Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal of food engineering*, 25(2), 261-281.

Zhang, R., Li, X., Wang, Z., Chen, Z., and Du, G. (2018). Prediction of the electric discharge occurrence under repetitive bipolar rectangular pulsed electric field< 20 kV/cm. *Applied Physics Letters*, 113(6), 063701.

Zhong, K., Wu, J., Wang, Z., Chen, F., Liao, X., Hu, X., and Zhang, Z. (2007). Inactivation kinetics and secondary structural change of PEF-treated POD and PPO. *Food Chemistry*, 100(1), 115-123.

Zhang, J., Portela, S. B., Horrell, J. B., Leung, A., Weitmann, D. R., Artiuch, J. B., and Yates, S. N. (2019). An integrated, accurate, rapid, and economical handheld consumer gluten detector. *Food Chemistry*, 275, 446-456.

Zimmermann, U. (1986). Electrical breakdown, electropermeabilization and electrofusion. Reviews of Physiology. *Biochemistry and Pharmacology* ,105:175-256.