

**การทบทวนวรรณกรรมเรื่อง: การแปรรูปโดยไม่ใช้ความร้อนสำหรับ
อาหารเหลวด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า**

**REVIEW ARTICLES: NON-THERMAL PROCESSING FOR LIQUID FOOD
USING ELECTRICAL PULSED FIELD TECHNIQUE**

ฤทธิชัย อัสวราชันย์

สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63 หมู่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

Rittichai Assawarchan

Department of Food Engineering; Faculty of Engineering and Argo Industry, Maejo University.
63 M.4 Tambon Nongharn, San Sai District, Chiang Mai, 50290

บทคัดย่อ

การแปรรูปอาหารเหลวด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเป็นทางเลือกในการแปรรูปอาหารเหลวที่ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการทำลายจุลินทรีย์สำหรับการแปรรูปอาหารเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่าการทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อนแบบดั้งเดิม วิธีการทำลายจุลินทรีย์เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อาหารเหลวภายใต้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อกระตุ้นการเคลื่อนที่ของไอออนและค่าสภาพยอมไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ ส่งผลให้ผนังเซลล์ฉีกขาดและเกิดรูพรุนทำให้การถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับไซโทพลาซึมทำให้เซลล์จุลินทรีย์ฉีกขาดและสูญเสียสภาพการซ่อมแซมตัวเองและตายอย่างถาวรภายใต้อุณหภูมิต่ำ เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่รูปที่ไม่ใช้ความร้อนที่ประสบความสำเร็จสามารถประยุกต์ใช้ในการพาสเจอร์ไรส์อาหารเหลวในระดับอุตสาหกรรมเหมาะสมกับการแปรรูปอาหารเหลวที่มีความไวการสูญเสียคุณภาพจากความร้อน วัตถุประสงค์ของบทความนี้จึงรวบรวมและเรียบเรียงบทความวิจัยจากเอกสารวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อพัฒนาการสังเคราะห์เชิงความคิด และเรียบเรียงเนื้อหาให้สอดคล้องกับงานวิจัยในปัจจุบันเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการศึกษาวิจัยหลักการที่เกี่ยวกับการแปรรูปแบบด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า

คำสำคัญ : การแปรรูปแบบไม่ใช้ความร้อน; การพาสเจอร์ไรส์; พัลส์สนามไฟฟ้า

ABSTRACT

Pulsed electric field (PEF) is a commercially viable food processing technology designed to inactivate microorganisms in liquid food at lower temperatures than those used in thermal processing. The procedure consists in applying brief, high-voltage pulses that induce the permeabilization of the microbial cytoplasmic membrane and, accordingly, the loss of its properties as a semipermeable barrier. PEF is one of the most promising non-thermal emerging technologies for the preservation of foods, applications of this technology are mainly focused on the pasteurization of heat-sensitive foods. The purpose of this article was to systematically review the related literatures in accordance with the recent researches as a guideline for research and development of PEF technologies for food processing.

KEYWORDS: Non-thermal processing, Pasteurization, Pulsed electric fields

1. บทนำ

ปัจจุบันการแปรรูปในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารเหลวของประเทศไทยแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม (Thermal Processing) เช่น การพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) การสเตอริไลซ์ (Sterilization) และการแปรรูปแบบปลอดเชื้อ (Aseptic Processing) ใช้ความร้อนเพื่อทำลายสารพิษ จุลินทรีย์ เอนไซม์ และพยาธิในการแปรรูปอาหาร แต่การแปรรูปด้วยความร้อนยังมีข้อจำกัดทั้งด้านการสูญเสียคุณภาพ และข้อเสียเปรียบด้านวิศวกรรม เนื่องจากการแปรรูปด้วยความร้อนใช้การถ่ายเทความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เกิดข้อเสียต้นทุนด้านการผลิตด้านวิศวกรรมในการสร้างไอน้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน และมีต้นทุนด้านการบำรุงรักษาใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเวลานานจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงเนื่องจากการเกิดตะกอนเกาะที่ผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงส่งผลให้มีต้นทุนในการบำรุงรักษาสูง แต่ในขณะข้อจำกัดด้านการสูญเสียคุณภาพเนื่องจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน

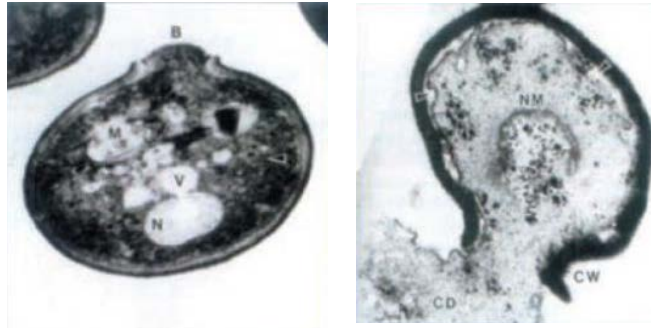
Assawarachan, R and A. Noomhorm [1] ได้นำเสนอแนวเลือกของการแปรรูปอาหารสมัยใหม่ ซึ่งแบ่งเป็นสองกลุ่มได้แก่ กลุ่มแรกเป็นการสร้างความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การเกิดความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) การเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ เกิดความร้อนจากภายในอาหารด้วยอัตราการความร้อนสูงแต่สภาวะการให้ความร้อนเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ยังคงเท่ากับสภาวะคงเหมือน และกลุ่มที่สองคือการแปรรูปแบบไม่ใช้ความร้อนใช้วิธีการกระตุ้นด้วยให้เซลล์จุลินทรีย์เกิดการเสียหายด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิในแปรรูปไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส ปัจจุบันการพาสเจอร์ไรส์อาหารเหลวด้วยเทคนิคพัลส์

สนามไฟฟ้าประสบความสำเร็จอย่างมาก และถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม ได้รับการยกย่องว่าเป็นการพาสเจอร์ไรส์ระบบเย็น (Cold Pasteurization) เนื่องจากสามารถรักษาคุณภาพอาหารเหลวไว้ได้อย่างครบถ้วนและได้รับการยอมรับในความปลอดภัยในการทำลายจุลินทรีย์ หลักการทำงานของเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าประกอบด้วยองค์ความรู้ในลักษณะสหวิทยาการประกอบกัน เช่น ความรู้พื้นฐานด้านแม่เหล็กไฟฟ้า ความรู้พื้นฐานทางความร้อน ความรู้พื้นฐานทางด้านสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ระเบียบเชิงตัวเลข ดังนั้นจึงมีข้อมูลและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องน้อย และเข้าถึงแหล่งข้อมูลได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นบทความวิชาการนี้จึงรวบรวมและสังเคราะห์เนื้อหาเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการพาสเจอร์ไรส์อาหารเหลวด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์ในการ แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนได้แก่หลักการพื้นฐานของการแปรรูปอาหารแบบไม่ใช้ความร้อนด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า อุปกรณ์และเครื่องการแปรรูปอาหารแบบไม่ใช้ความร้อนด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า และการพัฒนาเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าในงานแปรรูปในระดับอุตสาหกรรม โดยรวบรวมผลงานวิจัยผ่านการวิเคราะห์สังเคราะห์ให้เกิดความเหมาะสมกับผู้ที่สนใจในด้านเทคโนโลยีการแปรรูปอาหารเหลวด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าต่อไป

2. หลักการพื้นฐานของเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า

การแปรรูปด้วยเทคโนโลยีการแปรรูปโดยไม่ใช้ความร้อน (Non-Thermal Process) แต่ยังคงประสิทธิภาพในการในการทำลายสารพิษ จุลินทรีย์ และเอนไซม์ เทียบเท่าวิธีการแปรรูปด้วยความร้อนแบบดั้งเดิม ปัจจุบันประเทศในกลุ่มยุโรปและสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาการเทคโนโลยีการแปรรูปน้ำผลไม้และอาหารเหลวด้วยการใช้เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นการพัฒนาเทคนิคการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic heating) ด้วยวิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้าในอาหารเหลวซึ่งถูกบรรจุอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด [2] และปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อาหารเหลวภายใต้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อกระตุ้นการเคลื่อนที่ของไอออนด้วยอัตราการส่งถ่ายคลื่นพลังงานไฟฟ้าที่ความถี่ที่ไม่ทำให้เกิดความร้อนหลงเหลือในอาหารเหลว เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไอออนจนเกิดเสียดสีกันระหว่างเซลล์ในระดับโมเลกุลทำให้เกิดคลื่นความดัน (Pressure shock wave) และเกิดการเหนี่ยวนำบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้ผนังของเซลล์จุลินทรีย์เกิดการฉีกขาดเป็นรูพรุนรอบเซลล์ และความดันภายในเซลล์จุลินทรีย์มีค่าน้อยกว่าความดันบริเวณรอบโมเลกุลของน้ำจึงเกิดการแพร่เข้าสู่เซลล์ จุลินทรีย์จะเกิดการบวม ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่เกิดโทษในอาหารเกิดการแตกหรือฉีกขาดที่ผนังเซลล์ที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์จนเซลล์ของจุลินทรีย์ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้และตายในเวลาต่อมา [3, 4] สอดคล้องกับบทความที่ถูกตีพิมพ์เผยแพร่ในนิตยสาร Italian Food Materials and Machinery [5] ได้นำเสนอหลักการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าโดยเผยแพร่ภาพถ่ายของเซลล์จุลินทรีย์ก่อนและหลังการผ่านการแปรรูปด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าอันเป็นส่วนหนึ่งของ

การศึกษาประสิทธิภาพการทำลายเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าของ Washington State University ในปี 1996 (รูปที่ 1)



เซลล์จุลินทรีย์ก่อนกระบวนการผ่าน
เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า

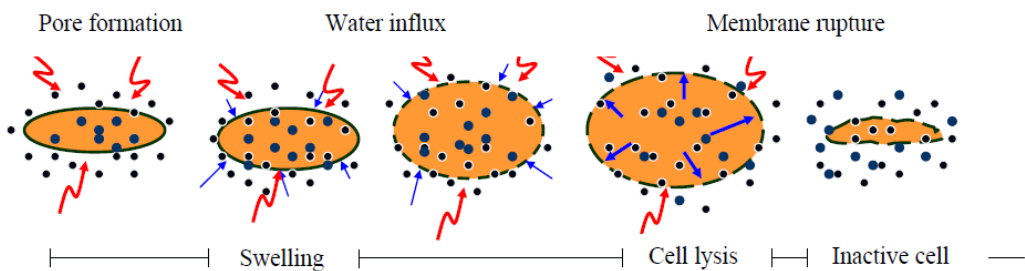
เซลล์จุลินทรีย์หลังกระบวนการ
ผ่านเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า

รูปที่ 1 เปรียบเทียบเซลล์ของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคก่อนและหลังการใช้เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าการแปรรูปในการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้ [5]

การใช้เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าทดแทนการแปรรูปด้วยความร้อนนั้นมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์สูงมาก แต่เกิดพลังงานสะสมจากกระบวนการเพียงเล็กน้อยและไม่ทำให้เพิ่มอุณหภูมิในอาหารเหลว หรืออาหารเหลวมีอุณหภูมิต่ำกว่าค่า Thermal death point (ระดับอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์ใน Aqueous solution ภายในเวลา 10 นาที) การแปรรูปด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเป็นนวัตกรรมการแปรรูปอาหารเหลวโดยไม่ใช้ความร้อนแบบใหม่ สำหรับการพาสเจอร์ไรส์อาหารเหลวในกลุ่มการแปรรูปน้ำผลไม้ และถูกนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม เช่นในกลุ่มประเทศยุโรป และกลุ่มประเทศอเมริกา กระบวนการ PEF มีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่เทียบเท่าการใช้ความร้อนในกระบวนการพาสเจอร์ไรส์แต่มีคุณภาพทางเคมี-กายภาพ รวมถึงคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับน้ำผลไม้สด [5]

หลักการพื้นฐานของเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเป็นเทคนิคการจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารเหลวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพลีเซชัน (Electroporation) ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) โดยเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และค่าสภาพยอมไฟฟ้า (Permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์จุลินทรีย์ซึ่งมีขนาดเล็กและมีชั้นผนังเซลล์ที่บางกว่าเซลล์อาหารหลายล้านเท่า รูปที่ 2 แสดงกลไกการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ภายใต้สภาวะด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเซลล์จุลินทรีย์ทางด้านซ้ายมือสุดพบว่าเมื่อถูกกระตุ้นด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าส่งผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์จะเกิดการฉีกขาดจนทะลุเป็นลักษณะรูพรุนรอบๆ

เยื่อหุ้มเซลล์ และเกิดความแตกต่างกันระหว่างความดันออสโมติกของเหลวที่อยู่ภายนอกเซลล์ โดยความดันออสโมติกจากภายนอกเยื่อหุ้มเซลล์จูลินทรีย์มีค่าความดันน้อยกว่าความดันออสโมติกที่บริเวณภายนอกเซลล์จูลินทรีย์ของเหลวจะภายนอกเซลล์จูลินทรีย์ก็จะไหลย้อนเข้าสู่โครงสร้างภายในของเซลล์จูลินทรีย์พร้อมทั้งถูกกระตุ้นรูพรุนรอบเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยพัลส์สนามไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องส่งผลให้รูพรุนรอบมีขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้นและเซลล์ของจูลินทรีย์ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เมื่อของเหลวจะภายนอกไหลเข้าสู่โครงสร้างภายในของเซลล์จูลินทรีย์ ส่งผลให้เซลล์จูลินทรีย์เกิดการบวม (Swelling) และเซลล์จูลินทรีย์เกิดการแตกตัว (Membrane rupture) และตายอย่างสมบูรณ์ (Inactive cell) ในขณะที่เซลล์อาหารที่มีขนาดใหญ่กว่าเซลล์จูลินทรีย์นั้นจะไม่เกิดผลกระทบดังกล่าวเนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์อาหารมีผนังความหนาจึงเกิดการฉีกขาดเพียงเล็กน้อย และเซลล์อาหารสามารถซ่อมแซมตัวเองกับสู่สภาพเดิมได้ [6-8]

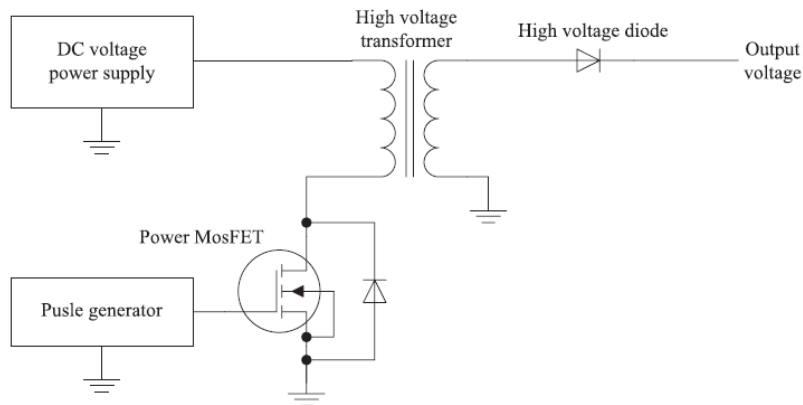


รูปที่ 2 ลำดับการทำลายเซลล์จูลินทรีย์ภายใต้สภาวะด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า [6]

3. อุปกรณ์ของการแปรรูปด้วยพัลส์สนามไฟฟ้า

การพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ (High voltage pulse generator), ห้องฆ่าเชื้ออาหารเหลว (Treatment chamber) และ ระบบการควบคุมและตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ในระหว่างกระบวนการ [9]

Yawootti et al [10] ได้ออกแบบวงจรการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ของระบบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ต้นทุนต่ำเพื่อใช้พัฒนาระบบการพาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ไดอะแกรมของวงจรการกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ [10]

Pan-klang et al [11] การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ โดยขนาดของเซลล์ และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ เมื่อเยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุนจะทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกเซลล์กับไซโทพลาซึม (Cytoplasm) ซึ่งเป็นของเหลวภายในเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นและนำไปสู่การหยุดการซ่อมแซมตัวเองของเยื่อหุ้มเซลล์ การเกิดรูพรุนที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้า รูพรุนที่เกิดขึ้นต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปสู่การตายของเซลล์ โดยลักษณะของการเกิดรูพรุนที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่รูพรุนแบบไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) และไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) [3-4, 11] โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิเช่น ความนำไฟฟ้า อัตราการไหลของอาหารเหลวและความเข้มข้นไฟฟ้า ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) ที่ใช้ในการสร้างพัลส์สนามไฟฟ้าของห้องฆ่าเชื้อได้จากสมการ (1)-(4)

$$V_{cell} = f r_{cell} E_{cell} \quad (1)$$

เมื่อ V_{cell} คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมที่เยื่อหุ้มเซลล์ f คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลล์ r_{cell} คือรัศมีวงนอกสุดของเยื่อหุ้มเซลล์ และ E_{cell} คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์

$$P_{max} = 2k\pi\sigma E^2 \left(\frac{Q}{\pi v} \right) \quad (2)$$

เมื่อ $P_{\max}$ คือกำลังไฟฟ้าสูงสุด Q คืออัตราการไหลของอาหารเหลว E คือความเข้มสนามไฟฟ้าของห้องฆ่าเชื้อ σ คือค่าความนำไฟฟ้าของอาหารเหลว v คือความเร็วในการไหลอาหารเหลวและ k คือสัดส่วนของความยาว (L) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของห้องฆ่าเชื้อ

$$k = \frac{L}{D} \quad (3)$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของห้องฆ่าเชื้อที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม (Coaxial treatment chambers) สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$E = \frac{V}{r \ln(r_2 / r_1)} \quad (4)$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดของห้องฆ่าเชื้อ r คือระยะรัศมี และ r_1 และ r_2 คือระยะรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านใน (Inner) และด้านนอก (Outer)

จากหลักการดังที่กล่าวมา วิกานดาและคณะ [3] พัฒนาระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีอัตราการป้อนของน้ำนมเข้าสู่ห้องฆ่าเชื้อที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการสร้างสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ความเข้มสูง 5.53×10^3 กิโลโวลต์ต่อเมตรโดยอาหารเหลวจะไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพัลส์ 30 กิโลโวลต์ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ระบบฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนมด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ขนาดห้องปฏิบัติการ [3]

4. การพัฒนาเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าในงานแปรรูปในระดับอุตสาหกรรม

ปัจจุบันเทคโนโลยีการแปรรูปโดยไม่ใช้ความร้อนด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าได้ถูกศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการสร้างระบบการพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าและสามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม Pure Pulse Company เป็นบริษัทที่สร้างเครื่องจักรแปรรูปน้ำผลไม้ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาระบบการพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ในระหว่างการแปรรูปแบบไม่ใช้ความร้อนลงได้ $4-6 \log_{10} \text{CFU}$ โดยทำลายเชื้อจุลินทรีย์พวกเชื้อราและยีสต์ (yeast and moulds) น้ำผลไม้พร้อมดื่ม เช่น น้ำส้ม น้ำแอปเปิ้ล น้ำสับปะรด น้ำมะเขือเทศ และอุณหภูมิของน้ำผลไม้มีค่าไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสและมีอายุการเก็บรักษามากกว่าหรือเท่ากับ 21 วัน ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาไม่เกิน 7 องศาเซลเซียสมีคุณภาพสี รสชาติ กลิ่นเทียบเท่าน้ำผลไม้สด โดยอายุการเก็บรักษาขึ้นอยู่กับลักษณะการบรรจุ (Hygienic filling) และวัสดุของบรรจุภัณฑ์ (Packaging properties) รวมถึงสภาวะการเก็บรักษาในระหว่างการขนย้าย (Food chain conditions) ก่อนถึงผู้บริโภค บริษัท Pure Pulse ผู้ออกแบบระบบการพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า ดังกล่าวได้นิยามแนวความคิดและเทคนิคการแปรรูปดังกล่าวเป็นเทคนิคการแปรรูปแบบ Novel cold pasteurization หรือ Cool wave processing เพื่อใช้เป็นคำที่ใช้บรรยายทางการตลาดของบริษัท ปัจจุบันได้ออกแบบเครื่องพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าระบบต่อเนื่องสามารถรองรับการผลิตที่ 350-1,200 ลิตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 5)



เครื่องพาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า Pure Pulse Company



เครื่องพาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า Pure Pulse Company

รูปที่ 5 เครื่องพาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์ PEF 2.0 ขนาดกำลังการผลิตที่ 350 ลิตรต่อชั่วโมง [12]

รายงานวิจัยของ Rahman [12] ได้ศึกษาต้นทุนการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐานได้แก่ ระบบขนส่งของเหลว ลำเลียงของเหลวไปยังห้องทำลายจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเพื่อทำลายจุลินทรีย์ จากนั้นของเหลวจะถูกลำเลียง

เข้าสู่ระบบหล่อเย็น และถูกลำเลียงเข้าสู่ถังเก็บเพื่อรอการบรรจุต่อไป ผลการเปรียบเทียบต้นทุนคงที่พบว่าเครื่องพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าขนาดต้นแบบ หรือขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 50 ลิตรต่อชั่วโมงมีต้นทุนคงที่ของเครื่องประมาณ 250,000 เหรียญดอลลาร์สหรัฐ และที่ขนาดเครื่องที่มีกำลังการผลิตมากขึ้น สำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมประมาณ 1,000-10,000 ลิตรต่อชั่วโมง ต้องใช้ต้นทุนการผลิตประมาณ 450,000 ถึง 2,000,000 เหรียญดอลลาร์สหรัฐ ในขณะที่ข้อมูลทางเศรษฐวิศวกรรมสำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนการผันแปรของการผลิตน้ำส้มอัตรการผลิตที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมงของเครื่องพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้ารุ่น PEF 2.0 ขนาดกำลังการผลิต 350 ลิตรต่อชั่วโมงของบริษัท Pure Pulse ที่ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากับ 50 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 2×10^{-6} วินาที ต่อการกระตุ้นด้วยพัลส์สนามไฟฟ้า 1 รอบ พบว่าต้นทุนมีค่าแปรผันประมาณ 0.2 เหรียญดอลลาร์สหรัฐต่อลิตร โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ (High voltage pulse generator) มีอายุการใช้งานประมาณ 4-5 ปี สำหรับการทำงาน 20 ชั่วโมงต่อวัน โดย 42 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนแปรผันในการผลิตทั้งหมดเป็นต้นทุนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำผลไม้ที่ผ่านการแปรรูปด้วยระบบการพาสเจอร์ไรส์เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า ใช้พลังงานความร้อนที่น้ำส้มได้รับเท่ากับ 1.3 จูลต่อมิลลิลิตร ในขณะที่การพาสเจอร์ไรส์โดยการให้ความร้อนน้ำส้มจะได้รับพลังงานความร้อนเท่ากับ 100 จูลต่อมิลลิลิตร [13]



รูปที่ 6 ภาพถ่ายเครื่องพาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์ระดับอุตสาหกรรมขนาด 1200 ลิตรต่อชั่วโมง [12]

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้ด้วยการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (การแปรรูปด้วยความร้อน และการใช้วิธีทางเคมี) และเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า ตารางที่ 2 สภาวะการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวชนิดต่างๆ ด้วย

เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบการ พาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าซึ่งรวบรวมโดย Barba et al [13]

ตารางที่ 1 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการพาสเจอร์ไรส์น้ำผลไม้ด้วยการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (การแปรรูปด้วยความร้อน และการใช้วิธีทางเคมี) และเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า

การพาสเจอร์ไรส์	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. การใช้วิธีการทางความร้อน และการใช้วิธีทางเคมีในการแปรรูป (Traditional thermal and chemical treatments)	- เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน และมีองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องครบถ้วน สามารถผลิตได้ทั้งแบบกะ และแบบต่อเนื่อง ปัจจุบันใช้ในการแปรรูปในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขนาดกลาง วิสาหกิจ มีต้นทุนคงที่ เช่น ราคาเครื่องมือการผลิตที่ถูกลง	- มีการสูญเสียสมบัติทางกายภาพ สี กลิ่น รส สารอาหารที่สำคัญทางโภชนาการ และมีการสูญเสียสมบัติทางประสาทสัมผัส ในระหว่างการแปรรูป ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค นอกจากนั้นไม่สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยของการแปรรูปอาหาร เช่น ผลของสารตกค้างของวิธีการใช้วิธีทางเคมี
2. เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า (Pulsed Electric Fields, PEF)	- สามารถประยุกต์กับการแปรรูปเพื่อทำลายจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ โดยไม่ใช้ความร้อน ส่งผลให้คุณภาพอาหารคงความสด และลดการสูญเสียสารอาหาร - ช่วยในการกระตุ้นเตรียมตัวอย่างสำหรับอาหาร เพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง และการสกัด เนื่องจากการแตกสลายของเซลล์ที่ผิวหน้า	- ต้นทุนของเครื่องแปรรูปด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้ามีราคาแพง - การใช้สนามไฟฟ้าที่สูงมากจะเกิดประกายไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าฟองอากาศเกิดขึ้น และเกิดสนิมที่ขั้วอิเล็กโทรด เป็นอันตรายด้านกายภาพ

ที่มา: ฤทธิชัย [6]

ตารางที่ 2 สภาวะการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้ารวบรวมโดย Barba et al [13]

PEF Treatmet E/ n/ τ / T(°C)	จุลินทรีย์	Log ₁₀ reduction	ผลิตภัณฑ์	เอกสารอ้างอิง
18.6 / 57.5/ 2.6/ 55	<i>Escherichia coli</i>	3.79	น้ำสตอเบอร์รี่	Gurtler, Bailey, Geveke, and Zhang (2011)
29 /43/ 4/ 172	<i>Escherichia coli</i> DH5 α	2.27	น้ำอุ่น	Huang, Yu, Wang, Gai, and Wang (2014)
40 /-/-/ 100	<i>Escherichia coli</i> k12	6.3	น้ำส้ม	McNamee et al. (2010)
28 /0.85 /20/ 17	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	5.0-6.0	น้ำนมดิบ	Cregenzán-Alberti et al. (2014)
45 /46.3 /1.5/ 70	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ascospores	2.1	เบียร์	Milani, Alkhafaji, and Silva (2015)

หมายเหตุ : เมื่อ E คือค่าสนามไฟฟ้า, n คือจำนวนพัลส์ของสนามไฟฟ้า, τ คือเวลาที่กระตุ้นโดยสนามไฟฟ้า และ T คืออุณหภูมิสูงสุดในการพาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า

5. สรุป

การแปรรูปด้วยความร้อนของการพาสเจอร์ไรส์เพื่อยับยั้งเอนไซม์และทำลายจุลินทรีย์ที่ทนทานต่อความร้อนต่ำ ไม่สามารถทำลายสปอร์ สภาวะที่ใช้ในการแปรรูป ความร้อนต่ำ-เวลานาน ที่อุณหภูมิที่ 63 องศาเซลเซียส (≤ 30 นาที) และที่ความร้อนสูง – เวลาสั้นที่อุณหภูมิที่ 71.1 องศาเซลเซียส (15 วินาที) ซึ่งทั้ง 2 สภาวะในการแปรรูปนั้นมีผลกระทบต่อการสูญเสียคุณภาพของอาหารเหลวเนื่องจากการได้รับความร้อนเป็นเวลานาน หรือได้รับความร้อนสูง การพาสเจอร์ไรส์อาหารเหลวด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ไม่ใช้ความร้อน (ต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส) แต่สามารถทำลายจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เทียบเท่าการพาสเจอร์

ไรส์ด้วยความร้อน แต่สามารถลดการสูญเสียคุณภาพอาหาร รส สี กลิ่น และสารสำคัญทางโภชนาการ เทียบเท่าอาหารสด และทำให้เกิดการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และสามารถเกิดผลสำเร็จทั้งในด้านวิศวกรรมการผลิตและเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมการผลิต การพาสเจอร์ไรส์อาหารเหลวด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าอาศัยองค์ความรู้ในลักษณะสหวิทยาการ และเป็นความรู้ใหม่ ดังนั้นจำเป็นจะต้องศึกษาและเข้าใจกลไกการทำลายจุลินทรีย์ของเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้า เพื่อนำไปสู่การพัฒนาระบบและสร้างเครื่องจักรการพาสเจอร์ไรส์ด้วยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าเพื่อใช้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารของประเทศไทยต่อไป

References

- [1] Assawarachan, R and A. Noomhorm. (2008). "Application Electromagnetic Radiation Technologies in Food Processing". **The 2nd R&DID International Conference - 2008 (Theme: Global Competitiveness Through, Research and Development, Innovation, Design)**. University of the Thai Chamber of Commerce, Bangkok, Thailand
- [2] Rittichai Assawarachan. (2011). "Ohmic Heating in Food Processing". **Journal of Food Technology, Siam University**. Vol 7 (1): 11-22. (In Thai).
- [3] Vikanda Panyamuangjai, Suwimon Janthara, Rattikarn Kusuya, Artit Yawootti and Panich Intra. (2555). "Application of Pulsed Electric Field for Milk Pasteurization". **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 35 (4): 469-484. (In Thai)
- [4] Tawiwat Kangsadan. (2011). "Food Preservation using High Electrical Field Pulse (HELP) Technique". **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok**. Vol. 21(1): 198-207. (In Thai).
- [5] <http://italianfoodmaterialsandmachinery.com>. Cited 11 November 2015.
- [6] Rittichai Assawarachan. (2015). "Food Processing using Electrical plus Technic". **FE. 482 Emerging of Thermal Processing**. Faculty of Engineering and Agro Industrial Program in Agricultural Engineering and Food Engineering. (In Thai).
- [7] Maged, E.A. Mohamed and Ayman H. Amer Eissa. (2012). [Online] **Pulsed Electric Field for Food Processing Technology**. Available: <http://cdn.intechopen.com>
- [8] Yashwan, K, Krishna, K.P and Vivek, K. (2015). "Pulsed Electric Field Processing in Food Technology". **International Journal of Engineering Studies and Technical Approach**. Vol.1 (2): 6-17.

- [9] Loeffler M. J. (2006). "Generation and application of high intensity pulsed electric fields". **Pulsed electric fields technology for the food industry fundamentals and applications**. ISBN 13: 978-0387-31053-4. pp 27-72
- [10] Yawootti, A., Asanavijit, V., Premrudeepreechacharn, S., and Intra, P. (2011). "A low-cost high-voltage pulse generator for electrostatic applications". **The 3rd Science Research Conference**. Phitsanulok, Thailand. 14 – 15 March. (In Thai)
- [11] Pan-klang, N., Biansoongnern, S., Apiratikul, P. and SubsinghaPreliminary, W. (2008). "Study of PEF Application for Energy-Save Preservation of Foods". **The 4th Conference on Energy Network of Thailand**. 14 - 16 May. (In Thai)
- [12] <http://www.purepulse.eu>. Cited 11 November 2015.
- [13] Barba, F.J. Parniakov, O. Pereira, S.A. Wiktor S.A, Grimi, N. Boussetta, N. Saraiva, J.A. Raso, J. Martin-Belloso, O. DorotaWitrowa-Rajchert, Lebovka, N and Vorobiev, Eugène. (2015). "Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry". **Food Research International**. Vol.77: 773-798.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ฤทธิชัย อัสวราชันย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประจำสาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290 โทรศัพท์: 081-7920946 โทรสาร: 0-5387-8123 อีเมล: assawarachan@gmail.com มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในรูปแบบของผลงานวิจัยที่พิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ ผลงานวิจัยที่พิมพ์เผยแพร่ในที่ประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ และเอกสารประกอบคำสอน เอกสารคำสอน ตำรา จำนวนมากกว่า 100 เรื่อง มีความเชี่ยวชาญด้านการออกแบบพัฒนาเครื่องจักรและสิ่งอำนวยความสะดวกในการแปรรูปในระดับอุตสาหกรรมอาหาร และนวัตกรรมแปรรูปสมัยใหม่