

การยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง Food Preservation using High Electrical Field Pulse (HELP) Technique

ทวิวรรณ กังสดาน¹

บทคัดย่อ

เทคนิคการยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้วิธีทางไฟฟ้า เป็นเทคนิคการยืดอายุอาหารโดยไม่ใช้ความร้อนที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระยะหลังนี้ เนื่องจากในปัจจุบันกระบวนการผลิตอาหาร โดยเฉพาะประเภทน้ำนม ซอส และน้ำผลไม้ นิยมใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง หรือกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ระยะสั้น (ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบเดียวกับผลิตภัณฑ์ UHT) เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อจุลินทรีย์อื่นๆ ที่มีในน้ำผลไม้ แต่กระบวนการนี้ทำให้คุณค่าทางอาหาร ลดลง รสชาติ สี และกลิ่นของอาหารเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานมาก ดังนั้นกระบวนการผลิตโดยไม่ใช้ความร้อนจึงเป็นทางเลือกที่ดีและเหมาะสมกว่า เทคนิคทางไฟฟ้าโดยใช้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงนี้ ทำการชะลออัตราการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร โดยใช้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงที่อุณหภูมิปกติ เป็นระยะเวลาอันสั้นน้อยกว่า 1 วินาที ส่งผลให้ ความสด และรสชาติยังคงอยู่โดยไม่ใช้สารปรุงแต่งและวัตถุกันเสีย เป็นการยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การลดปริมาณจุลินทรีย์ น้ำผลไม้ พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง

Abstract

Electrical technology can be used as a non-thermal food preservation processing technology that is currently investigated to inactivate microbial cells or microorganisms. To prolong the shelf life of food, pasteurization is mostly preferred. Heating is the most commonly used for short-time pasteurization method (similarly to UHT process) but it leads to deterioration of the taste and appearance of the food, texture and aroma, while it is an energy intensive method. Non-thermal process, such as High Electric Field Pulsed (HELP) or Pulsed Electric Field (PEF) treatment would be the alternative process and it is a potential technology to replace or partially substitute thermal processes due to the promising results obtained on the inactivation of microbial cells in liquid juices such as orange juice, lemon juice, apple juice, milk and beaten eggs. Microorganisms in liquid foods can be inactivated with pulsed electric fields at ambient or refrigerated temperatures for a short treatment time of less than a second. The fresh-like quality of food is preserved without the use of

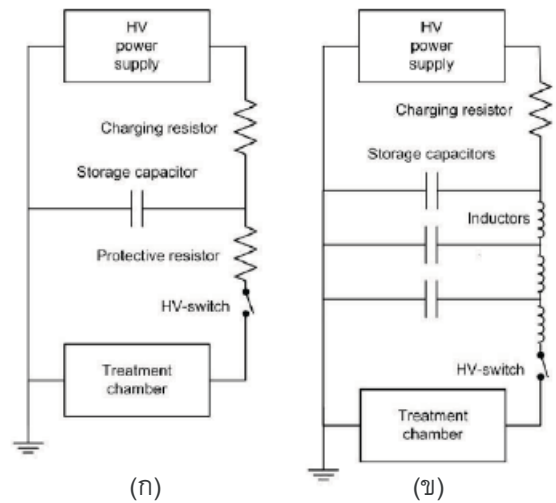
¹ อาจารย์ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โทรศัพท์ 0-2913-2500 ต่อ 2917 E-mail: tawiwan.k.cpe@tggs-bangkok.org

traditional preservatives. For food quality attributes, HELP or PEF technology may be superior to traditional heat treatment of foods.

Keyword: Inactivation of Microbial Cells, Fruit Juice, High Electrical Field Pulse

1. ความเป็นมาของเทคนิคการยืดอายุอาหารแบบพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง

การใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหารมีมานานตั้งแต่เริ่มมีการคิดค้นไฟฟ้า จากการให้ความร้อนกับน้ำนมด้วยกระแสไฟฟ้า บริเวณที่ผ่านกระแส ที่มีลักษณะเป็นรูปลิ่มเหลี่ยม และขั้วอิเล็กโทรดทำจากคาร์บอน โดยน้ำนมต้องผ่านการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 52°C ก่อนจะผ่านกระแสไฟฟ้า หลังจากผ่านกระแสไฟฟ้า 15 วินาที อุณหภูมิจะสูงขึ้นเป็น 71°C [1] ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในระดับต่ำกว่า Thermal Death Point (อุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์อย่างสมบูรณ์ใน Aqueous Solution ภายในเวลา 10 นาที) ต่อมาได้มีการศึกษาใช้คลื่นพัลส์ในการทำลายวัสดุทางชีวภาพ [2] และนำไปใช้กับการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ [3] หลังจากนั้นมีการศึกษาเรื่อยมา เทคนิคนี้นอกจากใช้กับอาหารแล้วยังมีการใช้กับของเสียอีกด้วย [4], [5] โดยใช้คลื่นพัลส์เพื่อสร้างความต่างศักย์สูงระหว่างสองขั้วอิเล็กโทรดในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ โดยอิเล็กโทรดถูกจุ่มอยู่ในน้ำ ซึ่งทั้งหมดอยู่ในถังความดันและใช้พัลส์ความต่างศักย์สูง ทำให้เกิดคลื่นความดัน (Pressure Shock Wave) สูงถึง 20 MPa และใช้ Ultraviolet Light Pure กระบวนการนี้เรียกว่า Electrohydraulic Treatment จากการศึกษาพบว่าสามารถลดปริมาณ *Escherichia coli*, *Streptococcus feacalis*, *Bacillus subtilis*, *Streptococcus cremoris* และ *Micrococcus radiodurans* ในน้ำกลั่นได้ถึงร้อยละ 95 [6] โดยระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.16-0.64 cm และความต่างศักย์สูงสุด 15 kV [7] Electrohydraulic Treatment เป็นกระบวนการที่เร็ว และได้ผลดีสำหรับการสแตอริไรส์น้ำและของเสียแต่มีราคาสูง



รูปที่ 1 วงจรกำเนิดคลื่นพัลส์ [12] (ก) Exponentially Decay (ข) Square-Wave

2. หลักการของเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง

เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง (High Electric Field Pulsed (HELP) หรือ Pulsed Electric Field (PEF) Treatment) มีหลักการดังนี้ คือใช้สนามไฟฟ้าพัลส์แรงสูงที่ประมาณ 20-80 kV/cm กับอาหารเหลวในห้องพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง หรือบริเวณผ่านสนามไฟฟ้า (Treatment Chamber) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Discharge Zone) และอยู่ระหว่างสองขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) วงจรพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงมีลักษณะดังรูปที่ 1 โดยให้อาหารเหลวไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วนี้ [8], [9] ลักษณะของพัลส์ที่ใช้มีหลายรูปแบบ แต่ที่ได้ผลมากที่สุด คือแบบคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-Wave) [8]-[10] โดยถูกส่งแบบสลับ ในอัตราการใช้ซ้ำที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง ในระยะเวลาที่สั้นมาก ปกตินับเวลาเป็น μs ในระหว่างที่ส่งสนามไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออน ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนได้ ดังนั้นกระบวนการนี้ ควรทำที่อุณหภูมิห้อง เพื่อลดการเกิดความร้อน กระแสไฟฟ้าพัลส์แรงสูงนี้เอง จะไปทำลายโครงสร้างเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ต่างๆ ภายในระยะเวลาที่สั้นมากทำให้เกิดรูพรุน ถ้ารูพรุนมีขนาดใหญ่



รูปที่ 2 เครื่องกำเนิดพัลส์ของ Department of Food Science and Technology, The Ohio State University ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ [11]

เซลล์ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เซลล์ก็จะเกิดการแตกตัวและไม่สามารถเจริญเติบโตได้อีกและตายในที่สุด การทำให้จุลินทรีย์ตายนั้นจำเป็นต้องใช้ ความถี่ของพัลส์และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซ่อมแซมสร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ เนื่องจากระบบการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและในระยะเวลาอันสั้น สารอาหาร ความสด และรสชาติ ยังคงอยู่โดยไม่ใช้สารปรุงแต่งและวัตถุกันเสีย ดังนั้นเทคนิคนี้เหมาะสำหรับอาหารและผลิตภัณฑ์อาหารที่อยู่ในรูปของเหลว เช่น นม โยเกิร์ต ชูรสชนิดต่างๆ น้ำผลไม้ และไข่ ตัวอย่างเครื่องกำเนิดพัลส์ของ Department of Food Science & Technology, The Ohio State University ที่ประสบความสำเร็จ และสามารถนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ [11] แสดงดังรูปที่ 2

ในการผลิตไฟฟ้าแรงสูงนั้น จำเป็นต้องมีเครื่องสะสมประจุไฟฟ้า (Capacitor) ขนาดใหญ่ เพื่อที่อัดประจุไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง (High Voltage) และปล่อยพัลส์สั้นๆ ในรูปแบบ Rectangular หรือ Exponentenially Decay (ในเวลาระดับไมโครวินาที ความเข้มของพลังงานในช่วง 101-104 J/kg) โดยส่วนมากพัลส์ 1-200 จะปล่อยออกมา [8]-[10], [12] และระยะเวลาระหว่างพัลส์ต้องมีมากกว่าระยะเวลาของพัลส์

ในห้องพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง ต้องมีของเหลวอยู่ในกระบวนการแบบกะ (Batch) หรือต้องมีของเหลวไหลผ่านตลอดเวลาสำหรับกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous) จึงทำให้อาหารเหลวเกิดการ Degassed เพราะ Dielectric เกิดการแตกตัวและทำให้เกิดการกระจายตัว (Dispersion)

3. ปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สนามไฟฟ้า

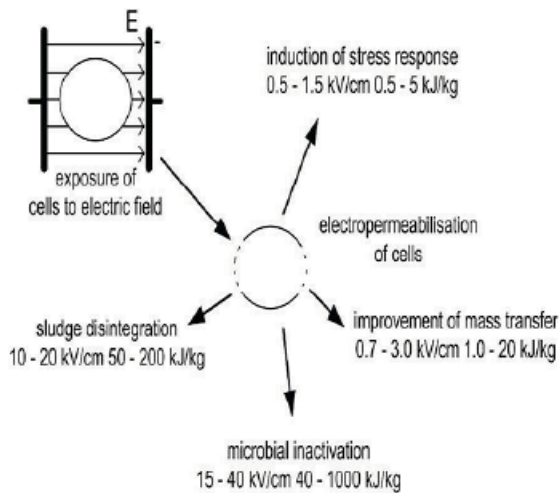
เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพทางพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ โดยเฉพาะในกระบวนการแบบต่อเนื่อง โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพัลส์สนามไฟฟ้า มีดังนี้

3.1 ความเข้มสนามไฟฟ้า

มีผลกับเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเซลล์ รวมถึงการหมุนของเซลล์เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เมื่อเซลล์มีขนาดลดลงจะต้องการความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ถ้าเซลล์มีรูปร่างที่ต่างกันจำเป็นต้องใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น [13] การเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับค่า Dielectric Strength (ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก) ของอาหาร [14] และมีขอบเขตอยู่ในช่วง 60-80 kV/cm นอกจากนี้ความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3 การใช้สนามไฟฟ้าที่สูงมากจะเกิดการทำลายเซลล์ แต่ก็มีข้อเสียคือเกิดประกายไฟจากกระแสมีฟองอากาศเกิดขึ้น เกิดสนิมที่ขั้วอิเล็กโทรด และอาจเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ไม่ต้องการได้

3.2 เวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า

การเพิ่มเวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า ทำให้ความกว้างของพัลส์และจำนวนของพัลส์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า จะมีผลต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น [3]



รูปที่ 3 การใช้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงกับจุลินทรีย์ กากของเสีย และพลังงานที่ต้องการในกระบวนการต่างๆ [12]

3.3 อุณหภูมิของกระบวนการ

อุณหภูมิมีผลต่อความเสถียรของเชื้อจุลินทรีย์ คือที่อุณหภูมิต่ำหนึ่งในส่วนประกอบของเซลล์เมมเบรนที่เรียกว่า Phospholipids นั้นจะมีลักษณะคล้ายเจล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นผลึกของของเหลว ซึ่งจะมีผลเสถียรน้อยกว่า Dunn และ Pearlman [15] พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 40°C เป็น 50°C สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *S. dublin* ในน้ำนมเพิ่มขึ้นและ Jayaram [16] สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ *L. brevis* เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสูงขึ้น (จาก 24°C เป็น 60°C) และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ Phospholipids

3.4 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

ผันกลับกับความต้านทาน มีหน่วยเป็นซีเมนต่อเมตร (S/m) การนำไฟฟ้าเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของอาหารและไฮโดรพลาสซึม [16] เยื่อหุ้มเซลล์จะอ่อนแอลงเมื่อความเข้มข้นของประจุสูงขึ้น และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง แต่ Hülshager

และคณะ [17] และ Vega-Mercado และคณะ [18] พบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นและค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ

3.5 ผลของฟองอากาศ

ฟองอากาศและอนุภาคฟองอากาศจะเกิดที่ความเข้มข้นไฟฟ้าสูง ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้นไฟฟ้า 30-50 kV/cm ไม่ควรมีอากาศในอาหาร เนื่องจากเมื่อมีการไหลของกระแสภายในช่องแคบจะเกิดฟองอากาศ และที่บริเวณผิวของฟองอากาศความเข้มข้นไฟฟ้าจะลดลง ความเข้มข้นไฟฟ้าในบริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้าลดลง ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก็ลดลงไปด้วย [12]

3.6 คุณสมบัติของเชื้อจุลินทรีย์

Sale และ Hamilton [3] พบว่าเซลล์ยีสต์จะไวต่อสนามไฟฟ้ามากกว่าแบคทีเรีย Hülshager และคณะ [17] อธิบายว่าจุลินทรีย์ที่ต่างชนิดกันมีส่วนประกอบของเมมเบรนที่ต่างกัน ดังนั้นความต้านทานจึงต่างกัน จุลินทรีย์แกรมบวกจะมีความไวต่อสนามไฟฟ้าต่ำกว่า แต่ไม่ได้มีการตรวจสอบถึงระยะของการเจริญที่ต่างกัน

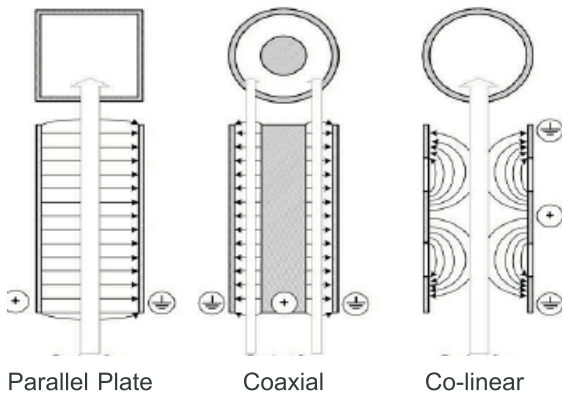
4. การออกแบบพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง

พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงสามารถสร้างได้โดยจ่ายไฟฟ้ารูปคลื่นพัลส์สู่ขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วที่ต่างกัน ค่าความต่างศักย์ที่ให้กระบบขึ้นอยู่กับระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรด การคำนวณความเข้มข้นไฟฟ้า (E) (โดยทั่วไปค่าความเข้มข้นไฟฟ้าแสดงหน่วยเป็น kV/cm) ที่ระยะห่างของอิเล็กโทรดสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$E = \frac{U}{d} \quad (1)$$

โดย U คือค่าความต่างศักย์มีหน่วยเป็น kV

d คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีหน่วยเป็น cm



รูปที่ 4 ลักษณะบริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้าหรือห้องพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง (Treatment Chamber) แบบต่างๆ [12]

บริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้าหรือห้องพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว ระยะห่างของบริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้ามีผลต่อสนามไฟฟ้าดังสมการที่ 1 ที่ค่าความต่างศักย์เท่ากัน ถ้าระยะห่างมากค่าความเข้มจะน้อย ลักษณะของบริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้าหรือห้องพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงมีหลายแบบ ดังรูปที่ 4 แต่แบบแผ่นคู่ขนาน (Parallel-Plate Electrode Configuration) จะให้สนามไฟฟ้าที่มีความเป็นแบบเดียวกันมากกว่าชนิดอื่น ตามที่มีวิจัยพบว่า จำนวนจุลินทรีย์ที่ตายเป็นไปตาม Function Linear Logarithmic โดยเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง ที่มีการวางขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วแบบแผ่นคู่ขนาน และการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ลดลงเมื่ออุณหภูมิและปริมาณความจุไฟฟ้าของเครื่องสะสมประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น [19] ชนิดของอิเล็กโทรดที่ใช้ทั่วไปส่วนมากจะเป็นสแตนเลสสตีล ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาในสแตนเลสสตีลเมื่อมีการไหลผ่านของสนามไฟฟ้าดังตารางที่ 1 ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้

เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงนี้เหมาะสำหรับอาหารที่เป็นของเหลว เนื่องจากอาหารที่เป็นของแข็งเมื่อผ่านสนามไฟฟ้าแล้วเกิดเซลล์แตก ทำให้เนื้อสัมผัสไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค จึงนิยมใช้กับอาหารที่เป็นของเหลวมากกว่าอาหารที่เป็นของแข็ง

ตารางที่ 1 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วอิเล็กโทรดสแตนเลสสตีล

Anode Electrode	Cathode Electrode
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$
$2\text{HO}^\circ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	
$4\text{OH} \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	
$2\text{Cl}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	
$\text{Fe}(\text{s}) \rightarrow \text{Fe}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$	
Oxidation Reaction	Reduction Reaction

Heinz และ Alvarez [20] ได้ศึกษาการใช้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงในการยืดอายุของอาหารเหลว การให้สนามไฟฟ้าที่ค่า Transmembrane Potential เป็นการทำลายและเปลี่ยนแปลงเซลล์เมมเบรนด้วยไฟฟ้า ทำให้เสียสมดุลของประจุไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ระหว่างของเหลวภายในเซลล์กับนอกเซลล์เมื่อเซลล์เมมเบรนไม่สามารถกลับมาอยู่ในสภาพเดิมได้ ทำให้เกิดการสูญเสียการควบคุม ดังนั้นการใช้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูง จะสามารถลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอาหารได้ สมการที่ใช้ในการทำนายคือสมการของ Neumann และคณะ [21] คือ

$$\Delta\phi_M = \frac{3}{2} E f(k) R \cos\alpha \quad (2)$$

โดย E คือค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

$\Delta\phi$ คือค่าความต่างศักย์

$f(k)$ คือค่า Factor ของค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

R คือรัศมีของเซลล์

α คือมุมระหว่างเซลล์กับสนามไฟฟ้า

โดยได้ศึกษากับเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิดด้วยกัน สำหรับ *Escherichia coli* พบว่าผลจากการทดลองค่าสนามไฟฟ้าน้อยที่สุดที่มีผลในการลดจำนวนจุลินทรีย์คือ 5 kV/cm ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ คือ 8 kV/cm

จุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหารมีทั้งแบคทีเรีย รา และยีสต์ จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารจะใช้แหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน และแหล่งพลังงานเพื่อการดำรงชีวิต ซึ่งมีผลทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง เน่าเสียหรือ ก่อให้เกิดอาหารเป็นพิษ

จุลินทรีย์ที่พบได้ในน้ำผลไม้เสียมีดังต่อไปนี้ *Saccharomyces cerevisiae*, *Listeria monocytogenes* *Salmonella typhimurium*, และ *Escherichia coli* ใน การที่จะควบคุมจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์เป็นไปตาม ลักษณะแบบ 5-Log Reduction ตามมาตรฐานความปลอดภัยของอาหารที่กำหนดไว้การยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าแรงสูง จำนวนพัลส์ อุณหภูมิและระยะเวลาของกระบวนการ [22]-[24] ระบบที่มีสนามไฟฟ้าแรงสูง และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการ เท่ากัน การลดจำนวนจุลินทรีย์โดยใช้พัลส์สนามไฟฟ้า แรงสูงแบบ Bipolar Mode จะได้ผลมากกว่าแบบ Monopolar Mode [23]

Elez-Martinez และคณะ [24] ศึกษาการยับยั้ง *Saccharomyces cerevisiae* ในน้ำส้มโดยเทคนิคพัลส์ สนามไฟฟ้าแรงสูง โดยศึกษาพารามิเตอร์ของสนาม ไฟฟ้าที่มีผลต่อการยับยั้งคือ ความเข้มสนามไฟฟ้า 5 15 25 30 และ 35 kV/cm ระยะเวลาและความกว้างของ พัลส์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า และเวลาของ กระบวนการการทำลายจุลินทรีย์ก็เพิ่มขึ้นด้วย และการ ยับยั้งสูงสุดที่ 5.1-Log Reduction โดยใช้ความเข้ม สนามไฟฟ้าที่ 35 kV/cm เวลา 1000 μ s จำนวนพัลส์ 4 และความถี่ 200 Hz ในแบบ Bipolar Mode อุณหภูมิ ของกระบวนการต่ำกว่า 39°C [24] แต่สำหรับ *Lactobacillus brevis* นั้นสามารถทำที่อุณหภูมิของ กระบวนการต่ำกว่า 32°C และยับยั้งสูงสุดที่ 5.8-Log Reduction [23]

แต่ในกระบวนการผลิตที่ใช้สนามไฟฟ้าแรงสูง 90 kV/cm จำนวนพัลส์ 20 และอุณหภูมิ 45°C จะไม่มีผล ต่อการรอดชีวิตหรือการตายของเซลล์ *Salmonella typhimurium* ในน้ำส้ม [25] แต่จุลินทรีย์จะตายเพิ่มขึ้น เมื่อที่จำนวนพัลส์ 50 และอุณหภูมิ 55°C สำหรับ

จุลินทรีย์ *Escherichia coli* ต้องส่งสนามไฟฟ้าแรงสูง 30 kV/cm เป็นเวลา 143 μ s และอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 25°C (Near Ambient) และจุดสูงสุดของสนามไฟฟ้าแรงสูง (Peak Field Intensity) อยู่ที่ 40 kV/cm เป็นเวลา 60 μ s จะทำให้จำนวนจุลินทรีย์ลดลงเป็นไปตามลักษณะแบบ 5-Log Reduction

นอกจากเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงสามารถ ลดจำนวนจุลินทรีย์ในของเหลวได้แล้ว ยังสามารถเก็บ ได้นานกว่าใช้เทคนิคด้วยความร้อน เช่น น้ำส้มที่ผ่าน สนามไฟฟ้าแรงสูง 32 kV/cm จำนวนจุลินทรีย์สามารถ ลดลงได้ถึง 3-4 -Log Reduction และสามารถเก็บได้ มากกว่า 5 เดือน ที่อุณหภูมิ 4°C ถ้าใช้กระบวนการ ทางความร้อนสามารถเก็บได้แค่ 3 เดือน [10]

น้ำผลไม้แต่ละชนิดใช้ค่าสนามไฟฟ้าแรงสูง จำนวน พัลส์ และระยะเวลาที่แตกต่างกัน เช่น สำหรับน้ำแอปเปิ้ล ใช้สนามไฟฟ้าแรงสูง 50 kV/cm และจำนวนพัลส์ 10 (2- μ s Pulse Width) ที่อุณหภูมิ 45°C ทำให้น้ำแอปเปิ้ล อยู่ได้นานถึง 28 วัน ที่อุณหภูมิ 22-25°C ซึ่งนานกว่า น้ำแอปเปิ้ลสดถึง 7 วัน [26]

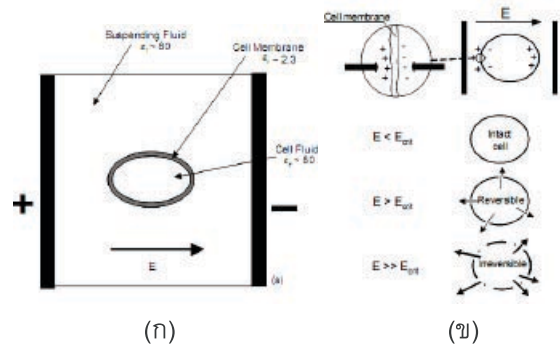
Torregrosa และคณะ [27] ทำการศึกษาการเก็บ รักษาผลไม้ผสมระหว่างส้มกับแครอท ความเข้มข้น 80:20 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร และวิเคราะห์ปริมาณ วิตามินเอในรูปแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) หลังผ่าน กระบวนการ โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ศึกษาคือ 25 และ 30 kV/cm พบว่าหลังผ่านกระบวนการปริมาณ วิตามินเอจะเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธีพาสเจอร์ไรส์ เนื่องจากการให้ความร้อนในระยะเวลาสั้นทำให้ Carotenoid เกิดการเปลี่ยนสูตรโครงสร้างจาก Trans-isomers เป็น Cis-isomers ทำให้ปริมาณของ Carotenoid ลดลง

นอกจากเทคนิคนี้ใช้กับน้ำผลไม้แล้วยังสามารถใช้ กับนมสดขาดมันเนย (Skim Milk) [28] และไข่ขาว [29] ได้อีกด้วย โดยใช้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง 36 kV/cm และจำนวนพัลส์ 30 เป็นเวลา 84 μ s ทำให้นมสดอยู่ได้ นานถึง 14 วัน ที่อุณหภูมิ 4°C แต่ถ้าต้องการให้อายุ ของนมสดอยู่ได้นานขึ้นจำเป็นต้องใช้ความร้อนเข้ามา ช่วยด้วย โดยผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ

65°C เป็นเวลา 21 วินาที หลังจากผ่านกระบวนการทางเทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง จะสามารถทำให้ยืดอายุของนมสดได้มากกว่า 30 วัน [28] เนื่องจากการให้ความร้อนจะเพิ่มประสิทธิภาพในการลดจำนวนจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ยังไม่มีความวิจัยที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงกับอุณหภูมิ

Bazhal และ Ngadi [29] ศึกษาการยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* O157:H7 ในไข่ขาว โดยใช้เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงร่วมกับการให้ความร้อน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว และการใช้เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงเพียงอย่างเดียว ที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ในช่วง 9 ถึง 15 kV/cm ผลคือการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวสามารถยับยั้งได้ 2-Log Reduction ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 นาที และเมื่อใช้ความร้อนพร้อมกับพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง 11 kV/cm และจำนวนพัลส์ 40 พบว่าสามารถยับยั้งได้ถึง 4-Log Reduction ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการให้ความร้อนสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้

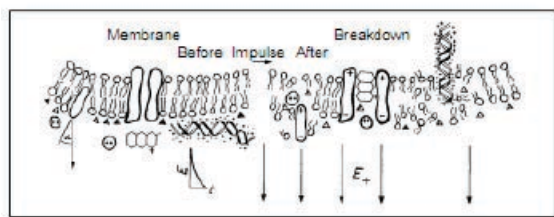
ถึงแม้ว่าเทคนิคนี้มีประโยชน์มากมายต่อผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของพลังงานที่ใช้ แต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมของอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเทคนิคนี้ไม่สามารถใช้กับอาหารประเภทที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-Homogeneous) เพราะค่า Dielectric ที่แตกต่างกันระหว่าง Phase ทำให้ค่า Electric Conductivity ลดลงหรือหยุดที่ค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้สูญเสียผลการต่อต้านผลกระทบของจุลินทรีย์ (Anti Microbial Effects) [30] ในปัจจุบันเทคนิคที่นิยมใช้กับอาหารเหลว เช่น ชูบ นม โยเกิร์ต น้ำผลไม้ และไข่ ยังคงเป็นการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) สำหรับอาหารประเภทเนื้อสัตว์และปลาสดซึ่งโครงสร้างของเนื้อสัตว์และปลาสามารถเปลี่ยนแปลงได้ อันเนื่องมาจากกระบวนการ Electroporation ของเซลล์เมมเบรน ดังนั้นเทคนิคนี้จึงไม่เหมาะกับการยืดอายุของเนื้อสัตว์และปลาสด [8]



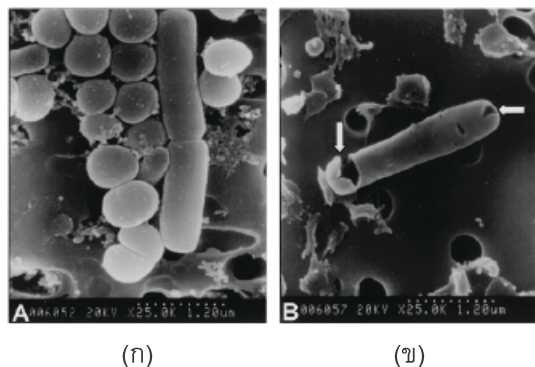
รูปที่ 5 กลไกการทำลายเซลล์เมมเบรนด้วยสนามไฟฟ้าโดย (ก) เซลล์อยู่ระหว่างขั้วสนามไฟฟ้าแรงสูง (ข) สนามไฟฟ้าแรงสูงผ่านไปยังเซลล์และทำลายเซลล์ [12]

5. กลไกการทำลายเซลล์เมมเบรนจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้า

เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง HELP หรือ PEF ใช้หลักการที่เกี่ยวกับการยอมให้ผ่านได้ (Permeability) ของผนังเซลล์ในสนามไฟฟ้าแรงสูง Critical Transmembrane Potential มีค่าประมาณ 0.7–2.2 V เป็นเวลาน้อยกว่า 1 มิลลิวินาที หลังจากให้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงเมื่อสนามไฟฟ้ากระทบกับเซลล์จุลินทรีย์จะเกิดการทำลายเซลล์เมมเบรน ดังรูปที่ 5 เนื่องจากเซลล์เมมเบรนของเชื้อจุลินทรีย์มีคุณสมบัติของสารที่ไม่นำไฟฟ้า (Dielectric Material) เมื่อปล่อยให้สัมผัสกับสนามไฟฟ้า ผ่านไปยังเซลล์เมมเบรนที่ความเข้มสูงกว่าความเข้มภายในเซลล์ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์มากกว่าภายในเซลล์ ค่าความแตกต่างของความเข้มไฟฟ้าเรียกว่า Transmembrane Potential ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าขึ้นบริเวณเซลล์เมมเบรนที่ประกอบด้วยโปรตีน ไขมัน ซึ่งมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงสะสมจุดของประจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6 ทำให้เกิดช่องโหว่ และแตกของเซลล์เมมเบรน หรือรูพรุนบนเซลล์เมมเบรนภายในระยะเวลาอันสั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Electrical Breakdown หรือ Disparity of Charges ถ้าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าไม่สูงมาก รูพรุนบนเซลล์เมมเบรนมีขนาดเล็ก เซลล์



รูปที่ 6 การทำลายเซลล์เมมเบรนด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง [16]



รูปที่ 7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของจุลินทรีย์ชนิด *Vibrio Parahaemolyticus* ในน้ำทะเลที่ถูกทำลายโดยกระแสไฟฟ้า 0.5 A ความเข้มสนามไฟฟ้า 12 V/cm เป็นเวลา 100 มิลลิวินาที อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีระยะห่าง 10 mm (ก) ก่อนผ่านกระแสไฟฟ้า (ข) หลังผ่านกระแสไฟฟ้า [31]

สามารถซ่อมแซมกลับมาเป็นเหมือนเดิมได้ (Endogenous Cell Repair Formation) เรียกว่า Reversible Electrical Breakdown แต่ถ้าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ เซลล์ไม่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เรียกว่า Irreversible Electrical Breakdown เซลล์ก็จะเกิดการแตกตัวและตายไม่สามารถเจริญเติบโตได้อีก [8], [12], [30], [31] ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยสุดที่มีผลต่อเซลล์เรียกว่า Threshold Field Strength ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของเซลล์ เซลล์ที่

มีขนาดใหญ่จะมี Threshold Field Strength ที่ต่ำกว่า เซลล์ที่มีขนาดเซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่าจึงมีโอกาสที่จะกระทบกับสนามไฟฟ้าก่อนทำให้มีโอกาสตายง่ายกว่า เซลล์ที่มีขนาดเล็ก ตัวอย่างความเสียหายของเซลล์จุลินทรีย์ที่ถูกทำลายด้วยไฟฟ้าดังรูปที่ 7 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

6. สรุป

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่าการใช้พัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง มีความสามารถสูงในการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหารที่มีลักษณะเป็นของเหลว และมีการทดลองกับน้ำผลไม้หลายชนิดด้วยกัน น้ำผลไม้ผ่านกระบวนการแล้วมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำผลไม้คั้นสดซึ่งยังมีความคุ้มค่าทางโภชนาการ แต่การสร้างคลื่นพัลส์สนามไฟฟ้านั้นมีต้นทุนสูง โดยเฉพาะเครื่องกำเนิดพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง และต้องมีผู้เชี่ยวชาญทางด้านไฟฟ้ากำลังสูงในการสร้างเครื่องดังกล่าว อย่างไรก็ตามทาง Department of Food Science and Technology, The Ohio State University ผู้ผลิตเครื่องพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง OSU-6 Commercial-Scale PEF-Processing System ที่มีความสามารถในการผลิตตั้งแต่ 1,000 ถึง 5,000 ลิตรต่อชั่วโมง ได้กล่าวว่าการราคาของอาหารที่ผ่านกระบวนการพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง จะมีราคาสูงกว่าอาหารที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ เพียง \$0.03–\$0.07 ต่อลิตร [11]

ดังนั้นการยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารโดยการใช้เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูงนั้นสามารถใช้ได้ในอุตสาหกรรมอาหารเหลวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและอาหารยังได้คุณภาพตามมาตรฐานอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] B.E. Getchell, “Electric pasteurization of milk,” *Agricultural Engineering*, vol.16, pp. 408–410, 1935.
- [2] H. Doevenspeck, *Verfahren und Vorrichtung*

- zur Gewinnung der einzelnen Phasenaus dispersen Systemen, German Patent, DE, 1960.
- [3] A. J. Sale and W. A. Hamilton, "Effect of high electric fields on micro-organisms. I. Killing of bacteria and yeast. II. Mechanism of action of the lethal effect," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, vol.148, no.3, pp. 781-800, 1967.
- [4] S. Jeyamkondan, D. S. Jayas, and R. A. Holley, "Pulsed electric field processing of foods: a review," *J. Food Prot.*, vol. 62, pp. 1008-1096, 1999.
- [5] F. Früngel, *Impulstechnik – Erzeugung und Anwendung von Kondensatorentladungen (Impulse Technology– Generation and Application of Capacitor Discharges)*, Leipzig. Akademische Verlagsgesellschaft Geest&Portig KG (1960) 573 pages.
- [6] S. E. Gilliland and M. L. Speck, "Inactivation of microorganisms by electrohydraulic Shock," *Applied Microbiology*, vol. 15, pp. 1031-1037, 1967.
- [7] Allen Merton and Soike Kenneth. "Sterilization by Electrohydraulic Treatement," *Science* 7, vol.154, no. 3745, pp. 155-157, 1996.
- [8] Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies. *U. S. Food and Drug Administration, Center for Food Safety and Applied Nutrition (2000)* [online] Available. www.unusualresearch.com/GovLab/FDA/ift/ift-exec.html
- [9] M. F. San Martín, G. V. Barbosa Cánovas, and B. G. Swanson, "Innovations in Food Processing," *Food Technology*, pp. 54-60, 2003.
- [10] Q. H Zhang, X. Qiu, and S. K. Sharma, *Recent development in pulsed electric field processing*, Washington, DC. National Food Processors Association. New Technologies Yearbook. pp. 31-42, 1997.
- [11] Clark, J. Peter, "Pulsed Electric Field Processing," *Food Technology*, vol. 60, no.1, pp. 66-67, 2006.
- [12] Töpfl, Stefan. "Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food- and Bioprocessing – Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis," Dr.-Ing. -genehmigte Dissertation. von der Fakultät III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades, Berlin, 2006.
- [13] V. Heinz, S. Toepfl, D. Knorr, "Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric fields treatment," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 167-175, 2003.
- [14] S. Ho and G. S. Mittal, "High voltage pulsed electrical field for liquid food pasteurization," *Food Reviews International*, vol. 16, no. 4, pp. 395-434, 2000.
- [15] J. E. Dunn and J. S. Pearlman, "Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid food products," *US Patent 4*, vol.695, no.472, 1987.
- [16] Jayaram, Shesha H. "Sterilization of Liquid Foods by Pulsed Electric Fields," *Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, pp. 17-25, 2000.
- [17] H. Hülshager, J. Potel, and E.G. Niemann, "Killing of bacteria with electric pulses of high field strength," *Radiat. Environ. Biophys.*, vol.20, pp. 53–65, 1981.
- [18] H. Vega-Mercado, U.R. Pothakamury, F.J. Chang, G.V. Barbosacanovas, and B.G. Swanson, "Inactivation of *Escherichiu coli* by combining pH, ionic strength and pulsed



- electric fields hurdles,” *Food Res. Intern*, vol. 29, no. 2, pp. 117-121, 1996.
- [19] M. Sato, N.M. Ishida, A.T.Sugiarto, T. Ohshima, and H. Taniguchi, “High-efficiency sterilizer by high-voltage pulse using concentrated-field electrode system,” *Industry Applications, IEEE Transactions*, vol. 37, no. 6, pp. 1646-1650, Nov/Dec, 2001.
- [20] V. Heinz and I. Alarez, “Preservation of Liquids Food by High Intensity Pulse Electric Fields basic concept for process design,” *Trend In Food Science and Technology*, vol. 12, pp. 103-111, 2001.
- [21] Eberhard Neumann, Arthur E. Sower, and Carol A. Jordan, “Electropolation and Electrofusion in Cell Biology,” *Herbert Acland Pohl*, New York, 1989.
- [22] B. Sen Gupta, F. Masterson, and T. R. A. Magee, “Inactivation of E. coli K12 in apple juice by high voltage pulsed electric field,” *European Food Research and Technology*, vol. 217, no. 5, pp. 434 – 437, 2003.
- [23] Pedro Elez-Martínez, Joan Escolà-Hernández, Robert C Soliva-Fortuny, and Olga. Martín-Belloso, “Inactivation of Lactobacillus brevis in orange juice by high-intensity pulsed electric fields,” *Food Microbiology*, vol. 22, pp. 311-319, 2005.
- [24] Pedro Elez-Martínez, Joan Escolà-Hernández, Robert C. Soliva-Fortuny, and Olga. Martín-Belloso, “Inactivation of Saccharomyces cerevisiae Suspended in Orange Juice Using High-Intensity Pulsed Electric Fields,” *Journal of Food Protection*, vol. 67, no. 11, pp. 2596-2602, 2004.
- [25] Z. Liang, G.S. Mittal, and M.W. Griffiths, “Inactivation of Salmonella Typhimurium in Orange Juice Containing Antimicrobial Agents by Pulsed Electric Field,” *Journal of Food Protection*, vol. 65, no. 7, pp. 1081-1087, 2002.
- [26] M. V. Simpson, G. V. Barbosa-Cánovas, and B. G. Swanson, “The Combined inhibitory effect of lysozyme and high voltage pulsed electric fields on the growth of Bacillus subtilis spores,” *IFT Annual Meeting: Book of Abstracts*, p. 267, 1995.
- [27] F. Torregrosa, C. Cortés, M. J. Esteve, and A. Frígola, “Effect of High Intensity Pulsed Electric Fields Processing and Conventional Heat Treatment on Orange-Carrot Juice Carotenoids” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 53, pp. 9519-9525, 2005.
- [28] J. J. Fernandez-Molina, E. Barkstrom, P. Torstensson, G. V. Barbosa-Cánovas, and B. G. Swanson, “The Combined Effect of Pulsed Electric Fields and Conventional Heating on the Microbial Quality and Shelf Life of Skim Milk,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 29, pp. 390-406, 2005.
- [29] M.I. Bazhal and M.O. Ngadi, “Inactivation of Escherichia coli O157:H7 in liquid whole egg using Combined pulsed electric field and thermal treatments”. *LWT*, vol. 39, pp. 419-425, 2006.
- [30] K. H. Schoenbach, F. E. Peterkin, R. W. Alden, and S. J. Beebe, “The effect of pulsed electric fields on biological cells: Experiments and applications,” *IEEE Trans Plasma Sci.*, vol. 25, no. 2, pp. 284-292, 1997.
- [31] Jong-Chul Park, Min Sub Lee, and Dong Hee. Lee, “Inactivation of Bacteria in Seawater by Low-Amperage Electric Current, *Applied and Enviromental Microbiology*, vol. 69, pp. 2405–2408, 2003.