

การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ ระดับอุตสาหกรรม

ชัชวาลย์ กันทะลา¹ นิติกร วงศ์จันทร์แก้ว² ผนุงศักดิ์ รัตนโคโซ³ และ พานิช อินทะ^{4*}

1 นักศึกษา ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

2 บริษัท ไดอิเล็กทริก เทคโนโลยี จำกัด อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

3 ศาสตราจารย์ ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

4* รองศาสตราจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ 50220

รับเมื่อ ตุลาคม 2560 ตอบรับเมื่อ ธันวาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ มีนาคม 2561

© 2018 Rajamangala University of Technology Lanna. All Right Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ระดับอุตสาหกรรม โดยออกแบบโครงสร้างให้ไม่ซับซ้อน มีจำนวนชิ้นส่วนประกอบน้อย ต้นทุนในการสร้างถูก การบำรุงรักษาค่า และมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน โครงสร้างทำจากสแตนเลส มีขนาด กว้าง 0.9 ยาว 1.4 และสูง 1.8 (เมตร) ระบบสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ประกอบด้วยระบบควบคุม (Control system), แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ (High voltage pulse generator), ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (Variacs), ตัวเก็บประจุ (Capacitor), ชุด Spark gaps, ไดโอด (Diode), ตัวต้านทาน (Resistor), ห้องฆ่าเชื้อ (Treatment chamber) แบบไหลต่อเนื่อง, ปั๊มควบคุมการไหลของอาหารเหลว (Pump), อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter), เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) และถังบรรจุอาหารเหลวทั้งก่อนและหลังกระบวนการ (Initial and treated liquid food) โดยคุณสมบัติของระบบที่สร้างขึ้นมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากกว่า 25 kV/cm แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วอิเล็กทรอนิกส์ไม่เกิน 20 kV กระแสไฟฟ้าสูงสุดด้านเอาต์พุต ไม่เกิน 2 kA ที่ความกว้างพัลส์ประมาณ 2.5 μ s ความถี่พัลส์อยู่ในช่วง 0.5 – 2 Hz ศักย์ไฟฟ้าชั้วบวก ความดันของอาหารเหลวประมาณ 1 bar อัตราการไหลของอาหารเหลวประมาณ 1 – 5 L/min อัตราการผลิต 60 – 300 L/hr และความหนาแน่นของพลังงาน 10n kJ/L (n ;จำนวนพัลส์)

คำหลัก: สนามไฟฟ้าพัลส์ อาหารเหลว ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์

*E-mail; panich_intra@yahoo.com

Design and Development of a Prototype of a Microbial Inactivation System by Pulsed Electric Field for Industrial Scale

Chatchawan Kantala¹ Nitikorn Wongjankeaw²
Phadungsak Rattanadecho³ and Panich Intra^{4*}

¹ Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Klong-Luang,
Pathumthani, 12120, Thailand

² Dielectric Technology Company Limited, Chiang Mai, 50200, Thailand

³ Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Klong-Luang,
Pathumthani, 12120, Thailand

^{4*} Associate Professor, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna,
Chiang Mai, 50220, Thailand

Received: October 2017 Accepted: November 2017 Published online: March 2018

© 2018 Rajamangala University of Technology Lanna. All Right Reserved.

Abstract

This research is mainly aimed to design and develop of a Prototype of a Microbial Inactivation System by Pulsed Electric Field for Industrial Scale in liquid food by designing the uncomplicated structure, fewer components, low cost of developing and maintenance and safe for operators. The structure was made of stainless steel which presented width = 0.9, length = 1.4 and height = 1.8 meter. The pulse-electric field system consists of a control system, high voltage pulse generator, variacs, capacitor, spark gaps, diode, resistor, continuous flow treatment chamber, pump for controlling liquid food flow, flow meter, thermometer, flow Meter, thermometer and Initial and treated liquid food containers. The developed system generated electric field intensity over 25 kV/cm, electrode polarity less than 20 kV, output current less than 2 kA at a pulse width 2.5 μ s approximately, Pulse Repetition Frequency (PRF) was in the range of 0.5 - 2 Hz, liquid pressure around 1 bar, liquid flow rate about 1 - 5 L/min, production rate is 60-300 L/hr and the energy density is 10n kJ/L (n; number of pulse).

Keywords: pulse electric field, Liquid food, Microbial Inactivation

*E-mail; panich_intra@yahoo.com

1. บทนำ

ต้นกำเนิดของกระบวนการ PEF มีมายาวนาน และหลากหลาย นักวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าสามารถทำลายกระบวนการของเซลล์ในทางชีววิทยาได้ ตั้งแต่ต้นปี ค.ศ.1960 วิธีการใช้กระแสไฟฟ้าหยุดการทำงานของจุลินทรีย์ (Microbial inactivation) ได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1967 และใช้เวลาอีกนานหลายปี ต่อมาว่าที่การวิจัยและการพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง และความสนใจในกระบวนการที่ไม่ผ่านความร้อนของ PEF จะมาบรรจบกันจนผลักดันให้เกิดการนำเอาเทคโนโลยี PEF จากห้องปฏิบัติการสู่ภาคธุรกิจในกลางปี ค.ศ. 1990 PEF ยังได้รับการค้นคว้าในฐานะที่เป็นเทคนิคในการที่ทำให้เนื้อเยื่อในพืช หรือสัตว์สามารถถูกแทรกซึมเข้าไปได้ ซึ่งนำไปใช้ได้หลากหลาย เช่น การสกัด การทำให้แห้ง หรือ การเตรียมเนื้อเยื่อ เพื่อใช้ในกระบวนการทางเคมี หรือ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ ไม่ว่าจะเป็นนำไปใช้ในกรณีใดๆ การทำให้เกิด การแทรกซึมโดย Electroporation ในเซลล์พืชหรือเซลล์ของสัตว์นี้ จะทำให้เกิดรอยแยกของเนื้อเยื่อเซลล์ที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนสารระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ การพัฒนา PEF มีการประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ได้แก่ การนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เทคนิคการแยกเนื้อเยื่อ กระบวนการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำผลไม้ เช่น น้ำส้ม น้ำแอปเปิ้ล^[2-3] และ การสกัดสารจากพืชหรือสารประกอบที่อยู่ในวัสดุอื่นๆ เช่น สกัดแคลเซียมในกระดูก เป็นต้น^[4] ถึงงานวิจัยต่างๆ จะถูกแยกกันทำ แต่ก็สามารถนำหลักการมาผสมผสานกันให้เกิดผลได้ กระบวนการฆ่าเชื้อโรคเป็นการประยุกต์ใช้ PEF สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเป็นหลัก โดยการใช้ PEF ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ในอาหารเหลว ซึ่งมีความต้องการที่จะให้ระดับการฆ่าเชื้อโรคใกล้เคียงกับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ โดยที่ไม่ให้เสียรสชาติ คุณค่า

ทางโภชนาการ และคุณลักษณะอื่นๆ ของของเหลวที่อาจถูกลดทอนลงไปได้โดยความร้อน มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากใน 20 ปีที่ผ่านมาที่แสดงให้เห็นว่า PEF สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้หลากหลายกลุ่ม และสายพันธุ์ โดยอยู่ในภาวะที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ รวมถึงให้ผลระดับการฆ่าเชื้อที่สูงได้ (มากถึง 9 logs ซึ่งหมายถึงมีเซลล์รอดชีวิตเพียงหนึ่งในพันล้าน) ในสภาวะกระบวนการที่เหมาะสม มาตรฐานของระดับการฆ่าเชื้อโรคของกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ถูกกำหนดไว้ที่ 5 logs ที่กฎหมายบังคับใช้ในการผลิตอาหารเหลวจะต้องมีจำนวนของจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 100,000 โคโลนี ต่อ ตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนน้ำส้ม ข้อมูลตาม (เฉพาะน้ำส้มแท้) (มผช. 275/2547) ^[1] ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า PEF สามารถมาใช้ทดแทนการฆ่าเชื้อแบบพาสเจอร์ไรซ์ได้ กล่าวโดยสรุป กระบวนการ PEF ได้มีความก้าวหน้ามากขึ้นมากในตลอดระยะเวลา 20 ปี ไม่ว่าจะเป็นจุลินทรีย์ก่อโรคหรือจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย เรื่องของผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้กระบวนการ PEF และอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในกระบวนการ PEF กระบวนการ PEF อุปสรรคสำคัญของการนำ PEF มาใช้ในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันเป็นเรื่องของความคุ้มค่าของการออกผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่มีคุณค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งในเรื่องของคุณค่าทางอาหารรสชาติและคุณภาพที่ได้เปรียบเทียบกับการลงทุนที่สูงในการติดตั้งระบบ PEF

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ระดับอุตสาหกรรมในเครื่องดื่มโดยใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ระดับภาคสนาม โดยใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ และระบบควบคุม ที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศ ทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

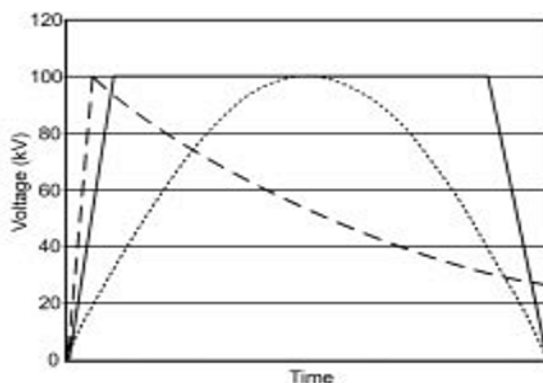
2.1 รูปร่างของพัลส์

โดยปกติการใช้งานของระบบ PEF จะขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันที่สูงพอและระยะเวลาที่เกิดสนามไฟฟ้ากำลังสูงต้องมากพอ เพื่อให้เกิดผลในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ รูปทรงในอุดมคติของแรงดันพัลส์จะมีระยะเวลาที่แรงดันเพิ่มสูงขึ้นและลดลงเป็นศูนย์ และยอดของแรงดันเป็นเส้นเรียบที่ให้แรงดันคงที่ตามระยะเวลาและพลังงานหรือค่าแรงดันที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติรูปทรงพัลส์แบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง โดยพัลส์ที่เกิดขึ้นนั้นจะใช้เวลาในการไต่หรือลดระดับความดันจนถึงค่าแรงดันสูงสุดที่ต้องการ และค่าแรงดันเป็นเส้นตรงคงที่ที่ยอดก็ไม่สามารถเกิดได้จริง ดังนั้นการกำหนดค่าและระยะเวลาของแรงดันพัลส์ในทางปฏิบัติจึงขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณคลื่นทั้ง 3 ดังรูปที่ 1 ที่ค่าสูงสุด ($V_{max} = 100$) และค่าความกว้างของพัลส์ที่เท่ากัน ค่าคัตออฟ (cut-off) ของกราฟเอ็กซ์โปเนนเชียลอยู่ที่ 25% ของ V_{max} พัลส์ทั้ง 3 รูปแบบนี้เป็นตัวอย่างที่นักวิจัยนำมาใช้โดยประมาณว่าเป็นลักษณะของพัลส์ที่มีค่าเดียวกัน ($V=100$, $t=100$)

อย่างไรก็ตามค่าพลังงานที่ได้ และระยะเวลาที่ค่าแรงดันอยู่เหนือค่าเทรชโซลด์จะแตกต่างกันอย่างมาก จากความแตกต่างที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ทำให้มีผลทางจุลชีววิทยาที่ถูกรายงานออกมาต่างๆ กัน

2.2 ค่าการนำไฟฟ้าและอัตราการไหล

ค่ากำลังที่ต้องใช้ในกระบวนการจะถูกกำหนดจากค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารเหลวและอัตราการไหลที่ต้องการค่าการนำไฟฟ้าจะถูกวัดโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสารที่ใช้ โดยการวัดว่ากระแสไฟฟ้าสามารถถูกส่งผ่านไปได้ง่ายแค่ไหน หน่วยของค่าการนำไฟฟ้าที่ใช้คือ ซีเมนต่อเมตร (S/m) ในงานวิจัยส่วนใหญ่ของ PEF จะใช้ค่าการนำไฟฟ้า (σ) เนื่องจากเป็นค่าที่เคยถูกวัดมาแล้วที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะของสารเหลว และสามารถนำมาใช้คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าตามกฎของโอห์มได้ ค่ากำลังที่ต้องการจะแปรผันตรงตามอัตราการไหลและค่าการนำไฟฟ้าในกระบวนการที่กำหนด และแปรผันตามค่ายกกำลัง 2 ของค่าความเข้มข้นไฟฟ้า ทำให้ค่าความเข้มข้นไฟฟ้าเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญที่สุดที่ต้องกำหนดให้ถูกต้องเพื่อที่จะคำนวณค่ากำลังที่ต้องการในกระบวนการ PEF ให้ได้ต่ำที่สุด



รูปที่ 1 รูปทรงของคลื่นแรงดันพัลส์ทั้ง 3 แบบที่ใช้งานจริง ที่ถูกนอร์มอลไลซ์มาเปรียบเทียบกัน ได้แก่ รูปทรงสี่ เหลี่ยม รูปทรงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และรูปทรงครึ่งของคลื่นรูปไซน์^[5]

2.3 ภาพรวมของระบบสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

2.3.1 แหล่งจ่ายไฟ

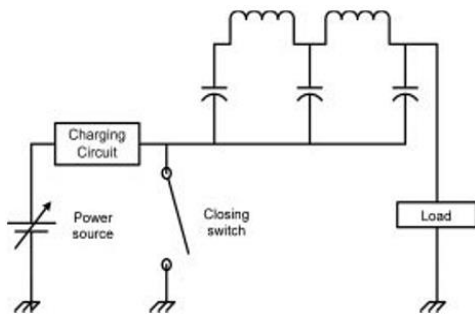
แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะแปลงไฟกระแสสลับที่ได้มาเป็นไฟกระแสตรงแรงดันสูง แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงโดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็นกำลังเฉลี่ยคือ วัตต์ (Watts) โครงสร้างระบบของแหล่งจ่ายไฟแบ่งออกเป็นหลักๆ 3 ประเภท ระบบแรกที่ย่อยที่สุดคือระบบที่ใช้หม้อแปลงเรียงกระแสไฟ (Transformer rectifier) ซึ่งทำงานที่ความถี่ 50-60 เฮิร์ตซ์ ระบบแหล่งจ่ายแบบนี้ เป็นระบบที่ถูกที่สุดแต่มีขนาดใหญ่ในเครื่องที่ทำให้กำลังไฟสูง ซึ่งเป็นข้อเสียในแง่ของการควบคุมแรงดันการรักษาระดับแรงดัน และผลกระทบต่อระบบกำลังไฟโดยรวมแต่อย่างไรก็ตามระบบแบบนี้เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ถ้าวัดเป็นจำนวนเงินต่อกำลังวัตต์ โดยเฉพาะจะถูกลงในระบบที่ให้ไฟกำลังสูงๆ (หลาย 100 กิโลวัตต์)

ระบบแบบที่ 2 เป็นระบบจ่ายไฟที่ใช้ระบบสวิตซ์ (Switching power supply) ในการออกแบบระบบนี้ กำลังไฟขาเข้าจะถูกเรียงและตัดที่ความถี่สูง (ประมาณ 10-50 กิโลเฮิร์ตซ์) ก่อนเข้าไปที่หม้อแปลงเรียงกระแสไฟ ขนาดของหม้อแปลงที่ใช้จะมีขนาดลดลงตามความถี่ในการตัดคลื่นที่สูงขึ้น ทำให้ขนาดของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงกำลังสูงที่มีขนาดไม่ใหญ่ ระบบสวิตซ์จะให้แรงดันที่รักษาระดับการควบคุมได้ดี และสามารถตั้งค่าแรงดันขาออกได้ ทำให้เหมาะสมในการควบคุมตัวแปรในกระบวนการ PEF ซึ่งเป็นอิสระกับส่วนของโมดูลเรเตอร์ ระบบแหล่งจ่ายแบบสวิตซ์โดยทั่วไปจะใช้กำลังมากถึง 500 กิโลวัตต์ ซึ่งสนับสนุนการทำงานของระบบ PEF ที่มีอัตราการไหลได้มากถึง 10,000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมากพอต่อการผลิตภาคอุตสาหกรรม ข้อเสียของระบบแหล่งจ่ายแบบสวิตซ์นี้คือราคาที่สูงซึ่งสูงกว่าแบบแรกประมาณ 2-5 เท่าที่กล่าวถึง และในระดับแรงดันที่สูงมากๆ (500 กิโลวัตต์ขึ้นไป) รูปแบบที่เหมาะสมจะเป็นการผสมผสานของหม้อแปลงเรียงกระแสไฟ (สำหรับกำลัง

ที่ไม่มีการรักษาระดับ) และตัวรักษาระดับแรงดันความถี่สูง เช่นตัวลดทอนแรงดัน Buck regulator ที่ฝังขาออกเพื่อควบคุมระดับแรงดันสุดท้าย ในระบบแหล่งจ่ายไฟแบบนี้ เป็นระบบที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในระบบ PEF ที่ต้องการกำลังสูงๆ เช่น ในสายการผลิตอุตสาหกรรมอาหารขนาดใหญ่ หรือ การบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่

2.3.2 โมดูลเรเตอร์

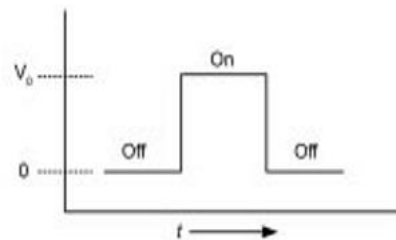
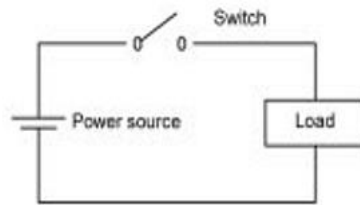
โมดูลเรเตอร์แบบพัลส์ในทุกรูปแบบขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำได้ในทางกลศาสตร์ถึงแม้ว่าจะช้าและยากในการใช้งานในที่ความถี่สูงและก็ไม่เหมาะกับระบบ PEF แต่ระบบสามารถออกแบบให้ถูกควบคุมโดยการลัดวงจรโดยอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ลัดวงจรผ่านช่องว่าง (Spark gap) ที่ชื่อไทรแตรอน (Thyratron) หรืออุปกรณ์ที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบ โซลิดสเตท (Solid state) เช่น ตัวเรียงกระแสไฟแบบซิลิคอนคอนโทล ระบบสวิตซ์นี้สามารถให้กระแสผ่านในทางกลับกันได้ และถูกตัดโดยหลอดสุญญากาศ เช่น เทตรอด (Tetrode) หรือ ทรานซิสเตอร์ (Transistor) เช่น อินซูเลตเกตไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์ (Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT) ในการเปิดปิดของสวิตซ์ กระแสสามารถจะถูกตัดหรือต่อได้ในทุกขณะซึ่งต้องใช้สวิตซ์ที่สามารถทนแรงกระแสในช่วงเปิดและทนแรงดันในช่วงปิดได้ ในสวิตซ์ทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวมา (สวิตซ์แบบปิด และสวิตซ์เปิดปิด) มีการออกแบบพื้นฐาน 3 แบบ ได้แก่ แบบวงจรก่อดั้วสร้างพัลส์ (PFN – Pulse Forming Network ตามรูปที่ 2) แบบฮาร์ดสวิตซ์ (Hard switch) ดังแสดงในรูปที่ 3 และแบบการเหนี่ยวนำผ่านหม้อแปลง (Transformer coupled system รูปที่ 4) การออกแบบทั้ง 3 นี้มีกำเนิดตั้งแต่ในช่วงที่ใช้โมดูลเรเตอร์แบบหลอดสุญญากาศ แต่ช่วงหลังได้เปลี่ยนมาใช้สวิตซ์โซลิดสเตทแทนหลอดสุญญากาศแบบในยุค



รูปที่ 2 วงจรโมดูเรเตอร์แบบ PFN
ด้วยสวิตช์แบบปิด [5]



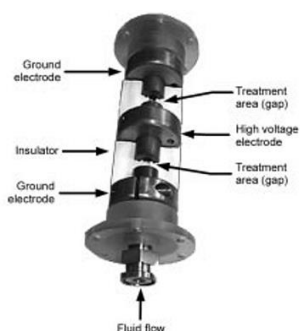
รูปที่ 4 วงจรโมดูเรเตอร์แบบการเหนี่ยวนำ
ผ่านหม้อแปลง [5]



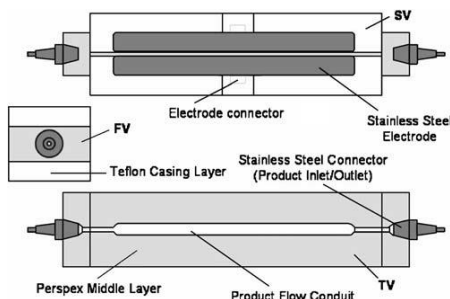
รูปที่ 3 วงจรโมดูเรเตอร์
แบบฮาร์ดสวิตช์ [5]

ทศวรรษก่อนหน้าวงจรแบบก่อดำสร้างพัลส์ (PFN) นั้น จะเก็บพลังงานไว้ในตัวคาปาซิเตอร์ และสามารถสร้างพัลส์ โดยการทำงานร่วมกันระหว่างตัวคาปาซิเตอร์และตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ในวงจร ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรของพัลส์ได้ เช่นระยะเวลาแรงดันขาขึ้นความกว้างพัลส์ โดยการปรับค่าของตัวคาปาซิเตอร์และตัวเหนี่ยวนำ ในระบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งระบบ PFN หรือ ระบบการเหนี่ยวนำผ่านหม้อแปลงต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับโหลด หมายถึงค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสเป็นค่าเดียวกัน หลังจากส่งพัลส์ออกไปลูกหนึ่งวงจร PFN ต้องชาร์จไฟจากแหล่งจ่ายไฟใหม่ ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องความถี่ของพัลส์ที่ส่งออกมา ตัวเลือกถัดไปคือแบบฮาร์ดสวิตช์ ที่สามารถสลับเปลี่ยนแรงดันเปิด-ปิดได้โดยตรง วงจรแบบนี้มีข้อดีในแง่ที่สามารถยืดหยุ่นทั้งในความถี่ของพัลส์และ

ความถี่ของพัลส์ และเนื่องจากวงจรฮาร์ดสวิตช์ มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำทำให้สร้างค่าสัญญาณได้มีแรงดันสม่ำเสมอในระดับของค่ากระแสสูงสุดตามที่ต้องการตามคุณลักษณะการนำไฟฟ้าของสารที่ใช้ การใช้โซลิต-สวิตช์เหมาะสำหรับความต้องการเหล่านี้ ข้อดีของวงจรแบบนี้คือระบบจ่ายไฟต้องทำงานเพื่อให้แรงดันที่เต็ม ยังมีตัวเลือกอีกแบบหนึ่งคือแบบลูกผสม (Hybrid) ซึ่งจะผสมผสานวงจรแบบฮาร์ดสวิตช์ที่แรงดันต่ำ แล้วเหนี่ยวนำแรงดันพัลส์ที่ได้ผ่านหม้อแปลง ในการออกแบบสวิตช์หลายตัวต่อแบบขนานจะอยู่ในฝั่งวงจร Primary และแต่ละชุดมีหม้อแปลงที่ต่อแบบอนุกรมในฝั่งวงจร Secondary เพื่อเพิ่มแรงดันที่ได้ การออกแบบวงจรแบบนี้ลดข้อจำกัดหลายอย่างที่มีในวงจรแบบ PFN เช่น ความถี่ของพัลส์ที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ หรือ ความถี่ที่ถูกจำกัด



รูปที่ 5 ภาพของทรีทเมนต์แชมเบอร์แบบโคฟิลต์โฟลว^[5]



รูปที่ 6 ทรีทเมนต์แชมเบอร์สำหรับใช้ฆ่าเชื้อในน้ำนม^[2]

2.3.3 ทรีทเมนต์ แชมเบอร์

ส่วนที่สำคัญส่วนที่ 3 ในระบบ PEF คือส่วนของทรีทเมนต์ แชมเบอร์ (ตามรูปที่ 5-6) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการส่งผ่านแรงดันสูงพัลส์ไปที่อาหารเหลว ตัวแปรที่สำคัญของทรีทเมนต์ แชมเบอร์ นี้คือจะต้องให้มีผลต่ออัตราการไหลของสารเหลวน้อยที่สุดโดยที่ยังคงค่าของสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอในทุกส่วนของทรีทเมนต์แชมเบอร์ ซึ่งค่าทั้ง 2 นี้มักจะไม่มีเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ทำให้การออกแบบจะต้องผ่านกระบวนการทดลองเพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมที่สุด การให้ค่าสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอในทุกกระยะของทรีทเมนต์แชมเบอร์นั้นเป็นเรื่องที่สำคัญ รวมถึงการออกแบบเพื่อให้ทนแรงดันเพื่อไม่ให้เกิดประกายไฟ ตัวแปร 2 ตัวที่มีผลต่อการออกแบบนี้คือค่าระยะทางกายภาพของช่องและวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรดและฉนวน และในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่รองรับอัตราการไหลที่มากขึ้นจะต้องใช้แรงดันพัลส์ที่สูงตามขึ้นไปด้วย เพื่อจะรักษาระดับของสนามไฟฟ้า ในการออกแบบโคฟิลต์โฟลวนี้ได้ผลดีที่สุดที่เส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด 5 เซนติเมตร

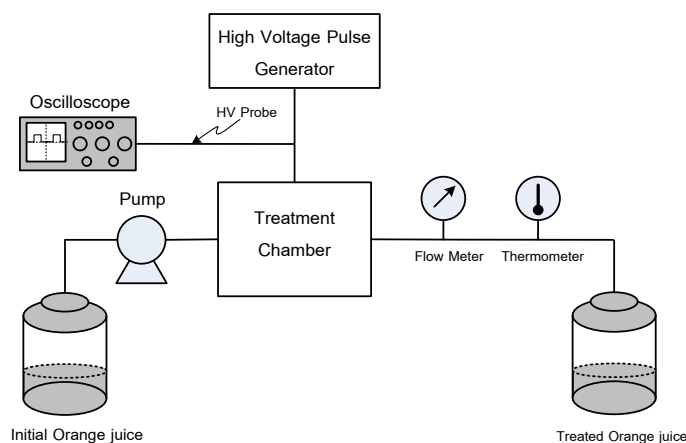
2.4 วิธีดำเนินการวิจัย

2.4.1 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ PEF

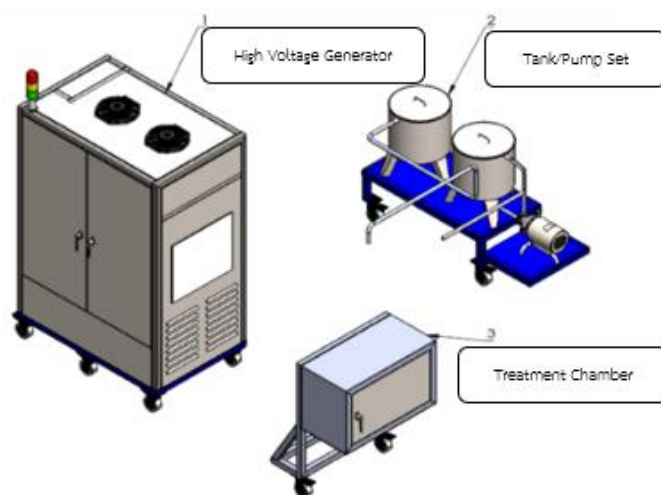
ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ระดับอุตสาหกรรมในเครื่องต้มโดยใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ระดับภาคสนาม โดยใช้ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ และระบบควบคุมที่สามารถพัฒนาและหาได้ภายในประเทศทดแทนชิ้นส่วนจากต่างประเทศ เหมาะสมต่อการทำงานระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ เทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายในประเทศ และลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ดังนั้น เพื่อให้บรรลุเป้าหมาย ห้องฆ่าเชื้อที่ออกแบบ จะต้องสามารถกำจัดเชื้อจุลินชีพในอาหารเหลวที่ทำให้เกิดโรคได้ และมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อจะต้องมีความมากกว่า 25 kV/cm และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงประมาณ 1 – 2,000 μ s ดังนั้น ในการศึกษาจะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วอิเล็กโตรดไม่เกิน 20 kV และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 1 kA จำกัดในช่วงเวลาพัลส์ 1 – 2,000 μ s และกำหนดให้มีอัตราการไหลของ

เครื่องตี้อยู่ในช่วง 1 – 5 L/min ที่ความดันของเครื่องตี้อยู่ในเท่ากับความดันบรรยากาศ คือ 1 bar ตันแบบถูกออกแบบโครงสร้างให้ไม่ซับซ้อน มีจำนวนชิ้นส่วนประกอบน้อย สามารถถอดล้างทำความสะอาดและประกอบติดตั้งได้ง่าย และราคาต้นทุนต่ำ และนอกจากนี้ห้องฆ่าเชื้อที่ออกแบบจะต้องมีความปลอดภัยในการใช้งานและมีการบำรุงรักษาต่ำ โดยอันตรายอันดับแรกจะเกิดขึ้นจากห้องฆ่าเชื้อ คือ ไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านในเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเครียดสูง ซึ่งอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำให้ลดลงได้โดยทำการฉนวนไฟฟ้าทั้งสายไฟฟ้าแรงสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใดๆ ออกจากกัน และการใช้วัสดุฉนวนที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟและการลัดวงจรไฟฟ้าในขณะปฏิบัติงาน และการป้องกันการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอื่นจากระบบสู่ผู้ปฏิบัติงานด้วยลูกกรงฟาราเดย์ และระบบกราวด์ที่โครงสร้างของเครื่องต้นแบบคณะผู้วิจัยได้ทำ

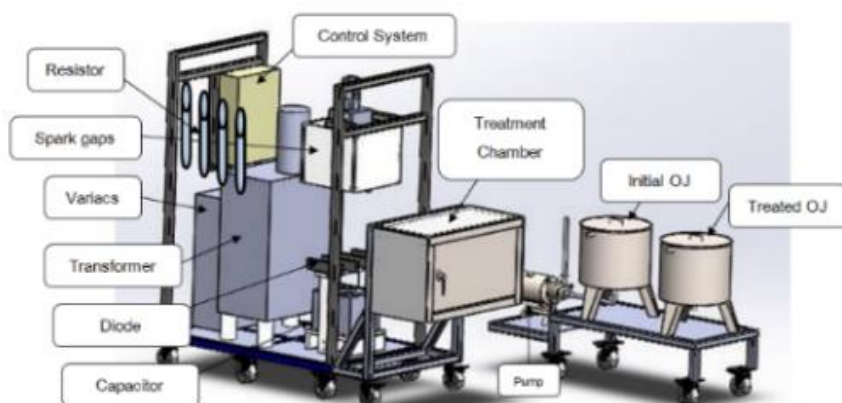
การออกแบบระบบการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์จะใช้ลักษณะการทำงานของระบบในรูปแบบการทำงานต่อเนื่อง ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ประกอบด้วย ระบบควบคุมแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ อุปกรณ์แสดงผลข้อมูล (Oscilloscope) ห้องฆ่าเชื้อ ป้อนควบคุมการไหลของน้ำส้ม อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำส้มเทอร์โมมิเตอร์ และถังบรรจุน้ำส้มทั้งก่อนและหลังกระบวนการทำงานของระบบจะเริ่มต้นโดยการใช้ปั๊มไหลเวียนเครื่องตี้อยู่ในถังเก็บผลผลิต เข้าสู่ห้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมและที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านในจะถูกจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงภายในห้องฆ่าเชื้อประมาณ 20 kV/cm ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในอาหารเหลวหรือเครื่องตี้อยู่ในเข้าไปในห้องฆ่าเชื้อถูกทำลายด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชันและหลังจากผ่านห้องฆ่าเชื้อแล้วเครื่องตี้อยู่จะถูกนำไปเก็บไว้ในถังเก็บผลผลิตดังแสดงในรูปที่ 7 - 8 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ระบบการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำส้มด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) ส่วนประกอบหลักเครื่องต้นแบบ PEF (ข) ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต้นแบบเครื่อง PEF สำหรับกระบวนการผลิตเครื่องดื่มสำหรับอุตสาหกรรมระดับภาคสนาม

2.4.2 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิด PEF

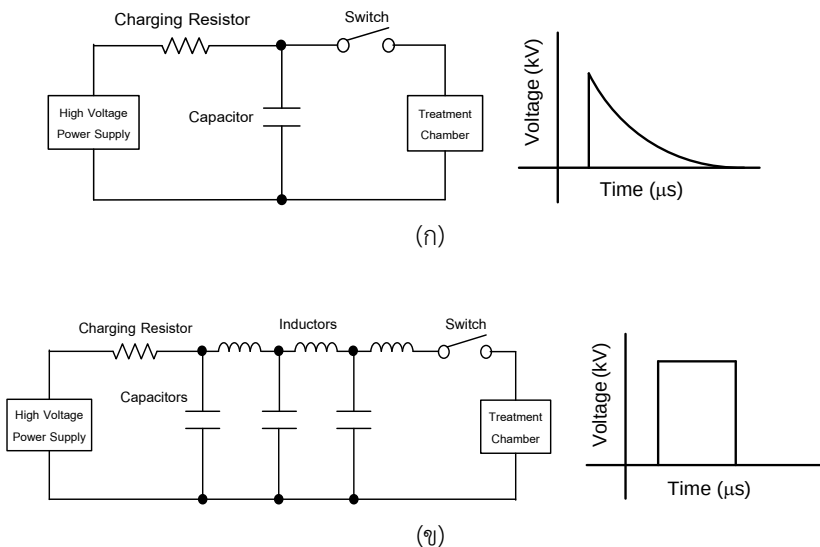
วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าสูงที่มีลักษณะเป็นแบบพัลส์เพื่อจ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อ ภายในวงจรประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสตรง (High voltage power supply) ตัวต้านทานไฟฟ้าที่ควบคุมการอัดประจุไฟฟ้า (Charging resistor) คาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน (Energy Storage capacitor) และอุปกรณ์ควบคุมที่มีความไวในการสวิตชิงสูงเช่น Spark gap, Thyatron หรือ Ignitron เป็นต้น โดยหลักการทำงานของวงจรคือจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงผ่านตัวต้านทานให้คาปาซิเตอร์เพื่ออัดประจุสะสมพลังงาน และเมื่ออุปกรณ์สวิตชิงทำงานจะทำให้คาปาซิเตอร์คายประจุพลังงานให้กับวงจรตามลักษณะการทำงานพื้นฐานของ

วงจรอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่อัดและคายประจุได้จากสมการที่ 1 และ สมการที่ 2 ตามลำดับ ^[6-8]

$$V_{c1} = V_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

$$V_{c2} = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

เมื่อ V_{c1} คือแรงดันไฟฟ้าจากการอัดประจุ V_{c2} คือแรงดันไฟฟ้าจากการคายประจุ V_0 คือแรงดันไฟฟ้าอินพุต t คือเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ R คือตัวต้านทาน Charging resistor และ C คือตัวคาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน



รูปที่ 9 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์แบบ (ก) Exponential pulse และ (ข) Square pulse

วงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์ที่มีลักษณะรูปคลื่นเป็นแบบ Exponential pulse และแบบ Square pulse ดังแสดงในรูปที่ 9 ความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse Width) ที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ความกว้างของสัญญาณพัลส์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องมีค่ามากกว่าช่วงเวลาวิกฤตหรือช่วงเวลาทีเซลล์ได้รับสนามไฟฟ้าแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลง (The membrane relaxation time) ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 10 ns จึงจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์เกิดการถ่ายเทศักย์ไฟฟ้าขึ้น โดยสามารถหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ได้จากสมการที่ 3 ^[6-8]

$$\tau = CR_{load} \quad (3)$$

เมื่อ τ คือความกว้างของสัญญาณพัลส์ C คือค่าความจุของคาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน และ R คือค่าความต้านทานของอาหารซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 4 ^[6-8]

$$R = \frac{d}{\sigma A} \quad (4)$$

เมื่อ d คือระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อ σ คือค่าสภาพความนำไฟฟ้า (Conductivity) ของอาหาร และ A คือพื้นที่ภายในทั้งหมดของห้องฆ่าเชื้อ ความกว้างของสัญญาณพัลส์จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแบบ Exponential pulse จะอยู่ที่ 37% ของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ความกว้างของรูปคลื่นแบบ Square pulse มีค่ามากกว่ารูปคลื่นแบบ Exponential pulse พลังงานในกระบวนการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ภายในอาหารโดยวิธี PEF นั้น จะใช้พลังงานของระบบไม่สูงมาก เนื่องจากเป็น

กรรมวิธีไม่ใช้ความร้อนจึงไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อนจากงานวิจัยพบว่าในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* จำนวน 4 log ด้วยสนามไฟฟ้าขนาด 25 kV/cm. สูญเสียพลังงานทั้งหมด 297 kJ/L ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปของระบบคือพลังงานที่ใช้สร้างสัญญาณรูปคลื่นแบบพัลส์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง โดยสามารถหาพลังงานจากการสร้างสัญญาณแบบ Exponential pulse ได้จากสมการที่ 5 ^[6-8]

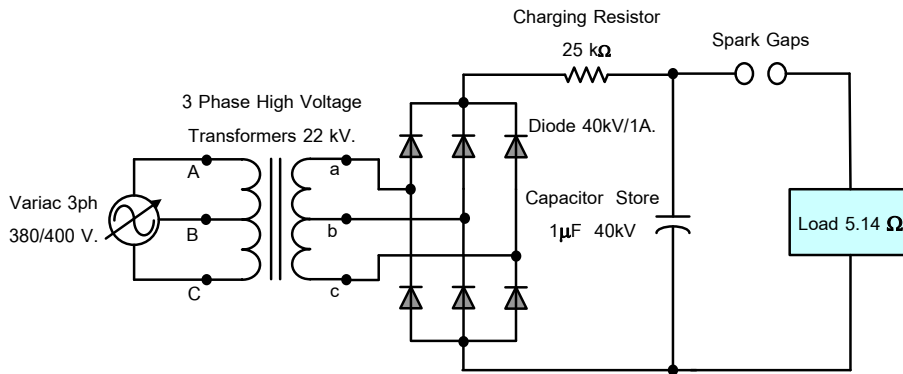
$$Q = \frac{V_0^2 C n}{2v} = \frac{V_0^2 t}{2Rv} \quad (5)$$

เมื่อ Q คือความหนาแน่นของพลังงาน V_0 คือแรงดันไฟฟ้าจากการชาร์จประจุ C คือค่าความจุของคาปาซิเตอร์สำหรับสะสมพลังงาน R คือค่าความต้านทานของอาหาร t คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ n คือจำนวนพัลส์ทั้งหมด และ v คือปริมาตรภายในห้องฆ่าเชื้อ สำหรับรูปคลื่นสัญญาณแบบ Square Pulse สามารถหาพลังงานที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 6 ^[6-8]

$$Q = \frac{VI\tau n}{v} = \frac{V^2 t}{Rv} \quad (6)$$

เมื่อ V คือพิกัดแรงดันไฟฟ้าภายในระบบ I คือพิกัดกระแสไฟฟ้าของระบบ และ τ คือความกว้างของสัญญาณพัลส์

ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อจะต้องมากกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (The Critical electric field strength) ของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต หรือค่าสนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกกับของเหลวภายในเชื้อจุลินทรีย์นั้น

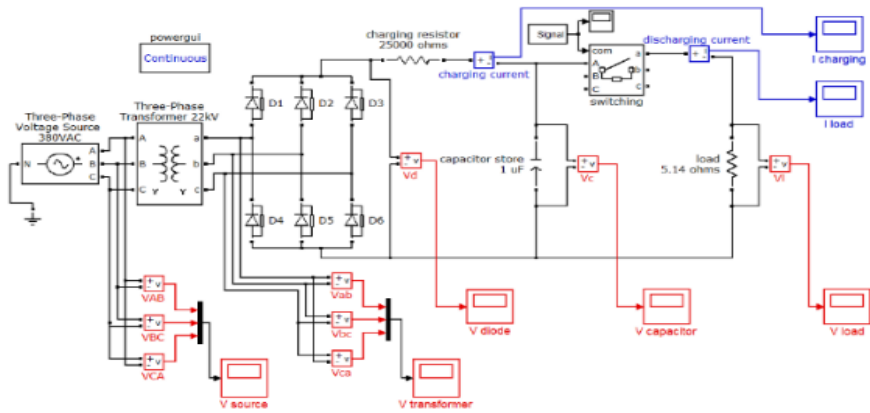


รูปที่ 10 วงจรการทำงานของระบบการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำส้มด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์

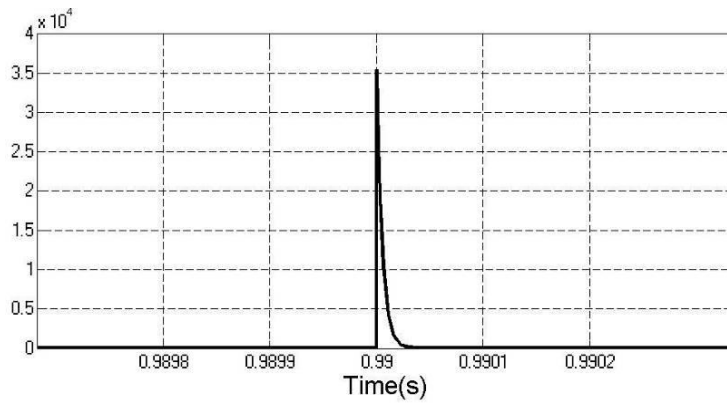
จะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะรูปร่างของเชื้อจุลินทรีย์ โดยจะอยู่ที่ประมาณ 3.8 – 14 kV/cm และปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารจะอยู่ที่ 20 – 80 kV/cm รูปที่ 10 แสดงวงจรการทำงานของระบบการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ในน้ำส้มด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ที่ออกแบบในระบบนี้จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรเท่ากับ 5500 วัตต์ โดยมีลักษณะของรูปคลื่นเป็นแบบ Exponential pulse ที่ ขนาด ความถี่ Repetitive pulses 5-7 Hz ส่วนประกอบที่สำคัญของแหล่งจ่ายประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 3 เฟส 22 kV ตัวต้านทานไฟฟ้า Charging resistor 29 k Ω ตัวเก็บประจุพิกัด 1 μ F อุปกรณ์สวิตช์ Spark gaps และวงจรเรกติไฟร์ (Rectifier) เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเวลาและแรงดันไฟฟ้าจากการอัดและคายประจุของวงจรโดยการคำนวณจากสมการที่ 1 และ 2 ค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์จากแหล่งจ่ายที่ออกแบบนี้จะต้องมีค่ามากกว่าช่วงเวลาวิกฤตที่สามารถทนต่อสนามไฟฟ้าได้ของเชื้อจุลินทรีย์ โดยจากสมการที่ 7 จะเห็นว่าค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์

จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำส้มที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อ ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ เท่ากับ 5.16 โอห์ม (ค่าสภาพความนำไฟฟ้าหรือ Conductivity ของน้ำส้ม pH 3.55 ได้เท่ากับ 0.156 S/m) ดังนั้นจากการคำนวณทั้งหมดนี้จะได้ค่าความกว้างสัญญาณพัลส์จากการคายประจุไฟฟ้าเท่ากับ 5.14 μ s

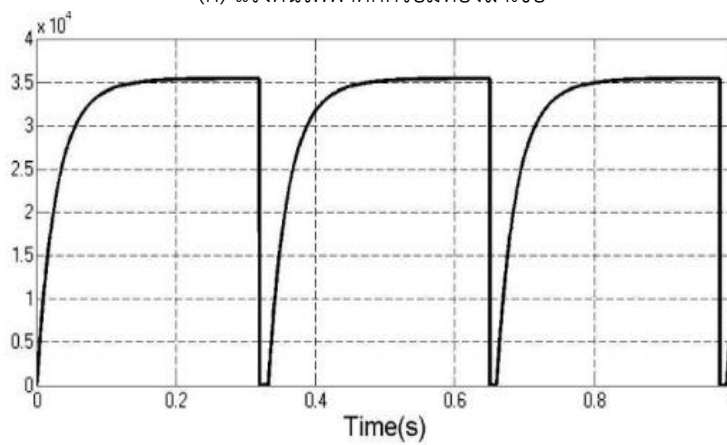
ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงพัลส์ 3 เฟส ในโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งวงจรจำลองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 11 ลักษณะการทำงานของวงจรจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขอลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ออกจากขอลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงจะผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น 3 เฟส แบบบริดจ์ และผ่านความต้านทานแรงสูงเพื่อชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุและมีอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จประจุในการสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงพัลส์ เพื่อจ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ในห้องฆ่าเชื้อ รูปที่ 12 แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB



รูปที่ 11 วงจรการจำลองใน Simulink/MATLAB



(ก) แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมห้องฆ่าเชื้อ



(ข) แรงดันไฟฟ้าขณะชาร์ตประจุ

รูปที่ 12 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB

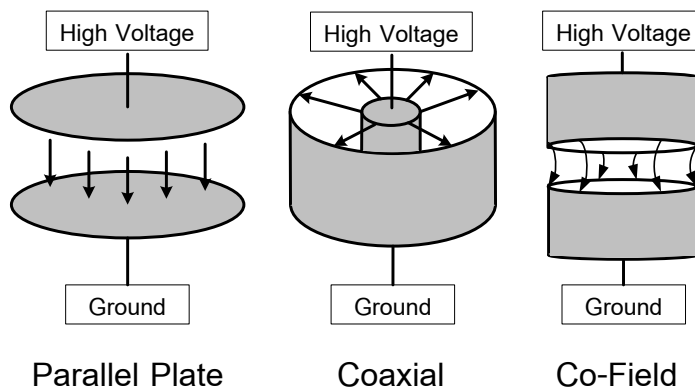
2.4.3 การออกแบบและสร้างห้องฆ่าเชื้อ

ห้องฆ่าเชื้อหรือห้องยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ PEF โดยทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าที่ใช้สำหรับยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ภายในห้องฆ่าเชื้อประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) สองขั้ว ขั้วหนึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ และอีกขั้วหนึ่งต่อเข้ากับขั้วกราวด์ของระบบเมื่ออิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อ โดยทั่วไปลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีอยู่ 3 ลักษณะคือ สนามไฟฟ้าตัดขวาง, สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้ารวมดังแสดงในรูปที่ 13 ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อจะต้องมีความเหมาะสม ถ้าระยะห่างระหว่าง

ขั้วอิเล็กโทรดมีค่ามากเกินไปสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย แต่ถ้าระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดน้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นระหว่างอิเล็กโทรด โดยสามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อได้จากสมการที่ 7 ^[6-8]

$$E = \frac{V}{d} \quad (7)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อ V คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรด และ d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดภายในห้องฆ่าเชื้อ ในกรณีที่มีการออกแบบห้องฆ่าเชื้อให้มีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (Coaxial) รัศมีภายในของขั้วอิเล็กโทรดจะต้องมากกว่ารัศมีภายนอกลบริศมีภายใน หรือ $r_1 > (r_2 - r_1)$



รูปที่ 13 ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อ

และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในห้องฆ่าเชื้อสามารถหาได้จากสมการที่ 8 ^[6-8]

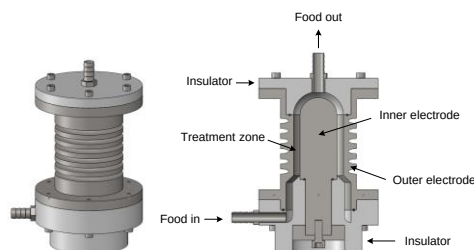
$$E = \frac{V}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (8)$$

เมื่อ r คือรัศมีภายในห้องฆ่าเชื้อ r_1 คือรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดภายใน และ r_2 คือรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดภายนอก รูปแบบการทำงานของห้องฆ่าเชื้อจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การทำงานแบบแบช (Batch) และแบบการทำงานต่อเนื่อง (Continuous) โดยการทำงานแบบแบชจะนำอาหารที่ต้องการทดสอบไปแช่ทิ้งไว้ในห้องฆ่าเชื้อแล้วจ่ายสนามไฟฟ้าเข้าไป ส่วนแบบการทำงานต่อเนื่องจะใช้วิธีป้อนอาหารไหลผ่านสนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อซึ่งอาหารที่เหมาะสมสำหรับรูปแบบการทำงานต่อเนื่องอาหารชนิดเหลวเนื่องจากไม่มีปัญหาในการป้อนอาหารเข้าสู่ห้องฆ่าเชื้อ ตัวอย่างของอาหารชนิดเหลวที่ผ่านกระบวนการ PEF เช่น น้ำผลไม้ น้่านม โยเกิร์ต ไข่ขาว และน้ำซุ๊ป เป็นต้น **รูปที่ 14** แสดงห้องฆ่าเชื้อแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอนที่ได้ออกแบบ

ในการศึกษานี้ โดยห้องฆ่าเชื้อ ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน (Coaxial) ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วภายในห้องฆ่าเชื้อทำมาจากสแตนเลส 316 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในด้านอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากมีความแข็งแรง แข็งแกร่ง ไม่เป็นสนิมได้โดยง่าย ไม่เกิดการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาทางเคมีภายในอาหาร และวัสดุที่ใช้ทำฉนวนภายในห้องฆ่าเชื้อทำมาจากวัสดุ Polyoxymethylene (Pom) Delrin ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อสารเคมี สามารถสัมผัสกับอาหารได้โดยไม่เกิดการละลายหรือปนเปื้อน และเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการทำฉนวนเนื่องจากมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่สูงมาก (ประมาณ $10^{21} \Omega \cdot m$) ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 6 mm โดยรัศมีของขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกเท่ากับ 17 และ 23 mm ตามลำดับ ความยาวของขั้วอิเล็กโทรดหรือความยาวของ Treatment zone มีขนาด 60 mm และปริมาตรภายในของห้องฆ่าเชื้อ เท่ากับ 45 ml นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้ปลายของขั้วอิเล็กโทรดมีความโค้งมนและพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะต้องขัดให้มีความเรียบอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้สนามไฟฟ้าภายในห้องฆ่าเชื้อสม่ำเสมอและไม่เกิดการเบรกดาวน์ได้ง่าย



(ก)



(ข)

รูปที่ 14 (ก) ห้องฆ่าเชื้อแบบแบช (ข) ห้องฆ่าเชื้อแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอนทั้งสองออกแบบในการศึกษานี้

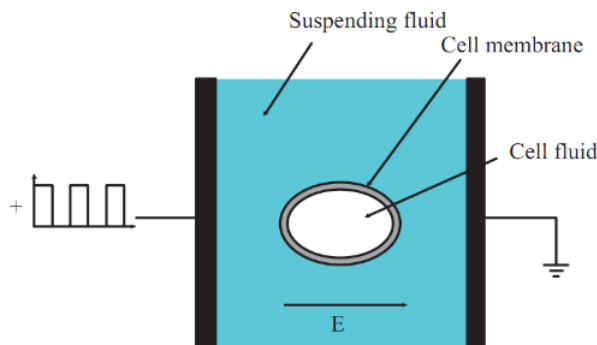
ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของห้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (Chamber)

รายการ	รายละเอียด
ระยะห่างระหว่างขั้วเล็กโทรด	6 mm
รัศมีขั้วเล็กโทรดภายใน	7.5 mm
รัศมีขั้วเล็กโทรดภายนอก	13.5 mm
ความยาว Treatment Zone	60 mm
ปริมาตรภายใน	24 mL
อัตราการไหล	60 mL/h
วัสดุขั้วเล็กโทรด	Stainless 316
วัสดุฉนวน	Pom Delrin

2.4.4 หลักการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์

การยับยั้งเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ววางซ้อนกันโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วหนึ่ง และอีกขั้วหนึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 15 โดยการยับยั้งเชื้อในอาหารเหลวด้วยด้วยสนามไฟฟ้าแบบพัลส์คือการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในอาหารเหลวด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโพรเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ โดยการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และค่าสภาพการยอมให้ไฟฟ้า (Permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์โดยการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าและสภาพการยอมไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์

สามารถทำได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์หรือเป็นช่วงเวลาเกิดจากการจ่ายพัลส์แรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดที่มีความเข้มข้นไฟฟ้า (Electric field strength) สูงประมาณ 40 kV/cm และมีลักษณะเป็นพัลส์ในช่วงประมาณ 10 ns และ 20 μ s^[9] ซึ่งสนามไฟฟ้าพัลส์ที่มีความเข้มข้นสูงในนี้จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าสูงเกินกว่าค่าความคงทนของไดโพลีทริกของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุนเล็กๆ จำนวนมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการของเซลล์ ซึ่งมีสองลักษณะคือ อะพอพโตสิส (Apoptosis) และ เนโครสิส (Necrosis) โดยลำดับขั้นของกระบวนการ

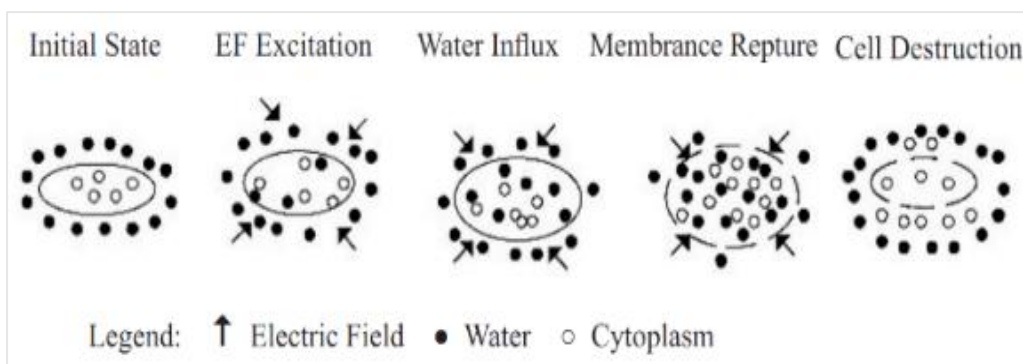


รูปที่ 15 หลักการยับยั้งเชื้อในอาหารเหลวด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์^[9]

อิเล็กโตรโพรเซชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์จุลินทรีย์แสดงไว้ในรูปที่ 16 โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 ^[10]

$$V_{cell} = f r_{cell} E_{cell} \quad (9)$$

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



รูปที่ 16 ลำดับขั้นของกระบวนการอิเล็กโตรโพรเซชันที่เกิดขึ้นกับเซลล์จุลินทรีย์ ^[11]

ตารางที่ 2 แสดงขนาดของเซลล์แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ ^[11]

เชื้อจุลินทรีย์	เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	ความยาว (μm)	แรงดันสูงสุด (V)
<i>E. coli</i>	1.15	6.9	0.26
<i>K. pseudomona</i>	0.83	3.2	1.26
<i>P. aeruginosa</i>	0.73	3.9	1.25
<i>S. aureus</i>	1.03	-	1.00
<i>L. momocytogenesl</i>	0.76	1.7	0.99
<i>C. albicans</i>	4.15	-	2.63

จากตารางที่ 2 แสดงขนาดของเซลล์และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เมื่อเยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุนจนทำให้เกิดการถ่ายเทระหว่างของเหลวภายนอกกับไซโทพลาซึม (Cytoplasm) ซึ่งเป็นของเหลวภายในเซลล์ทำให้เซลล์เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นและนำไปสู่การแตกตัวของเยื่อหุ้มเซลล์การเกิดรูพรุนที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้า โดยลักษณะของการเกิดรูพรุนแบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) และไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความนำไฟฟ้า อัตราการไหลของอาหารเหลว และความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูงสุด ($P_{\max}$) ที่ใช้ในการสร้างพัลส์ของสนามไฟฟ้าของห้องยับยั้งเชื้อได้จากสมการที่ 10 ^[12]

$$P_{\max} = 2k\pi\sigma E^2 (Q/\pi V)^{3/2} \quad (10)$$

$$k = L/D \quad (11)$$

เมื่อ	$P_{\max}$	คือกำลังไฟฟ้าสูงสุด
	Q	คืออัตราการไหลของอาหารเหลว
	E	คือความเข้มสนามไฟฟ้าของห้องยับยั้งเชื้อ
	σ	คือค่าความนำไฟฟ้าของอาหารเหลว
	V	คือความเร็วในการไหลอาหารเหลว
	k	คือสัดส่วนของความยาว (L) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของห้องยับยั้งเชื้อคือ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการออกแบบ

ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณในรูปที่ 10 ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์

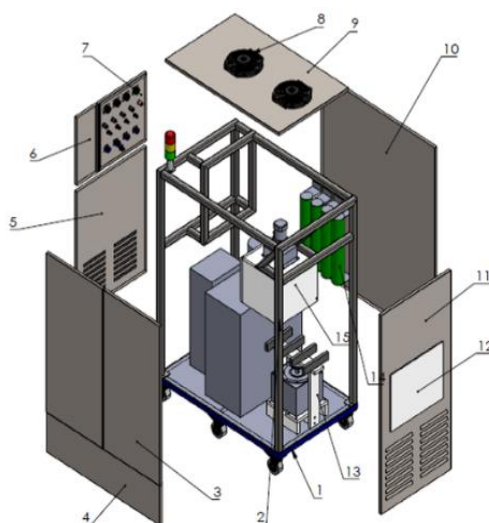
ตารางที่ 3 รายละเอียดการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์

พิกัดกำลังไฟฟ้า	5500 W
แรงดันอินพุต	22 kV
ความเข้มสนามไฟฟ้า	36 kV/cm
ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของน้ำส้ม	0.156 S/m
ค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำส้ม	5.14 Ω
ตัวเก็บประจุ	1 μF
ความกว้างสัญญาณพัลส์	5.15 μs
ความถี่สัญญาณพัลส์	5 - 7 Hz
ความหนาแน่นของพลังงาน (จำนวนพัลส์ 10)	100 kJ/L

3.2 ผลการประกอบและติดตั้งเครื่องต้นแบบ PEF

แสดงรูปถ่ายต้นแบบระบบฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตเครื่องดื่มสำหรับอุตสาหกรรม โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจะประกอบ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ หม้อแปลงแรงสูง ตัวเก็บประจุพัลส์ชุดช่องว่างหมุนจุดประกาย ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ สวิตช์เปิด/ปิดระบบ โวลต์มิเตอร์ หลอดไฟฟ้าแสดงการทำงาน ห้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ฯ ตัววัดอัตราการไหล ท่อสายใยลวด ปัมป์แบบหมุนเวียน ถังเก็บผลผลิต โครงสร้างของระบบต้นแบบทำจากโครงสร้างสแตนเลส

มีขนาดมิติเท่ากับ 90 1,400 1,800 cm (กว้าง ยาว และสูง) ด้านหน้าของเครื่องต้นแบบจะประกอบด้วย ส่วนควบคุมและแสดงการทำงานต่างๆ เช่น สวิตช์เปิด/ปิดระบบ โวลต์มิเตอร์ หลอดไฟฟ้าแสดงการทำงาน ออสซิลอสโคป ห้องฆ่าเชื้อ ตัววัดอัตราการไหล ท่อสายใยลวดและถังเก็บผลผลิตส่วนด้านหลังของเครื่องต้นแบบประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ หม้อแปลงแรงสูงตัวเก็บประจุพัลส์ ชุดช่องว่างหมุนจุดประกาย ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ดังแสดงใน **รูปที่ 17**



1. โครงฐาน

2. โครงบน

3. ประตู่

4. คานล่าง

5. แผ่นข้างซ้าย

6. แผ่นข้างตุ้

7. ตัวคอนโทรล

8. พัดลม

9. แผ่นบน

10. แผ่นหลัง

11. แผ่นข้างขวา

12. แผ่นฉนวน

13. ชุดไดโอด

14. ชุดตัวต้านทาน

15. Spark Gaps

รูปที่ 17 (ก) โมเดลชิ้นส่วนประกอบเครื่องต้นแบบ PEF **(ข)** ชิ้นส่วนประกอบเครื่องต้นแบบ PEF สำหรับกระบวนการผลิตเครื่องดื่มสำหรับอุตสาหกรรมระดับภาคสนาม



(ก) เครื่องต้นแบบ PEF



(ข) ชุดถังเก็บผลิตภัณฑ์



(ค) ตู้ห้องฆ่าเชื้อ

รูปที่ 18 ต้นแบบเครื่อง PEF ที่พัฒนาขึ้นในโครงการฯ

โดยโครงสร้างของระบบต้นแบบทั้งหมดได้ทำการฉนวนไฟฟ้าทั้งสายไฟฟ้าแรงสูงและจุดที่มีการเชื่อมต่อกัน การแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใดๆ ออกจากกัน และการใช้วัสดุฉนวนที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้าและการลัดวงจรไฟฟ้า ในขณะที่ปฏิบัติงาน และยังมีการป้องกันการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอื่นจากระบบสู่ผู้ปฏิบัติงานด้วยลูกกรงฟาราเดย์ (Faraday cage) และระบบกราวด์ที่โครงสร้างของเครื่องต้นแบบ โดยมีขนาดระดับภาคสนาม ใช้อาหารเหลวน้ำส้มสด มีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากกว่า 25 kV/cm แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดไม่เกิน 20 kV กระแสไฟฟ้าสูงสุดด้านเอาต์พุตไม่เกิน 2 kA ที่ความกว้างพัลส์ประมาณ 2.5 μ s ความถี่พัลส์อยู่ในช่วง 0.5 – 2 Hz ศักย์ไฟฟ้าขั้วบวก เชื้อจุลชีพที่กำลังกำจัด *E. coli*, *S. aureus*, *B. cereus*, และ *Salmonella spp.* (ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 364 ในกลุ่มผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภคชนิดเหลวที่มี pH มากกว่า 4.3 เฉพาะที่ผ่านกรรมวิธีฆ่าเชื้อด้วยความร้อนโดยวิธีพาสเจอร์ไรส์) ความดันของเหลวทำงาน 1 bar อัตราการไหล ของเครื่องต้ม 1 – 5 L/min กำลังการผลิต 60 – 300 L/hr ประสิทธิภาพ สามารถลดจำนวนของจุลินทรีย์ได้อย่างน้อยถึง 100,000 เท่า หรือ

0 CFU/ml ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ขาเย็น ที่กำหนดไว้ว่า โคลิฟอร์ม ต้องน้อยกว่า 1 Colony-forming unit ต่อน้ำส้มสด 100 มิลลิลิตร (มผช.๑๐๐๗/๒๕๔๘)

4. unsur

จากผลการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบและสร้างต้นแบบระบบการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าพัลส์ระดับอุตสาหกรรมในเครื่องต้มโดยใช้สนามไฟฟ้าพัลส์ระดับภาคสนาม ที่สามารถทำงานได้จริง ส่วนการประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และหรือสกัดสารจะเสนอในบทความต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และบริษัท ไดโอเล็กทริกเทคโนโลยี จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย และขอขอบคุณ หน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าสถิตในงานด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่ให้การเอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. 2558. น้ําสับ.
(ออนไลน์). แลล่งที่มา :
[http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0275_57\(น้ําสับ\).pdf](http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0275_57(น้ําสับ).pdf). 10 มิถุนายน 2560.
- [2] M. Walking-Ribeiro, F. Noci, J. Riener, D. A. Cronin, J. G. Lyng and D. J. Morgan, The Impact of Thermosonication and Pulsed Electric Fields on *Staphylococcus aureus* Inactivation and Selected Quality Parameters in Orange Juice, *Food Bioprocess Technology*, vol 2, October 2009, pp. 422–430
- [3] J. Mosqueda-Melgar, R. M. Raybaudi-Massilia and O. Martn-Belloso, “Non-thermal Pasteur-ization of Fruit Juices by Combining High-intensity Pulsed Electric Fields with Natural Antimicrobials,” *Innovative Food Science and Engineering Technologies*, vol. 9, 2008., pp. 328 – 340,
- [4] Yongguang Y and Guidan He. A fast high-intensity pulsed electric fields (PEF)-assisted extraction of dissoluble calcium form bone, *Separation and Purification Technology*, vol 61, October 2008 pp. 148–152
- [5] Kempkes M. A., Pulsed electric field (PEF) systems for commercial food and juice processing, Diversified Technologies, Inc., USA: Woodhead Publishing Limited, 2010
- [6] เฉษฐา ชนรุ่งเรือง, พิมพ์ครั้งที่3, 2557, บทที่ 5 เรื่อง วงจรอันดับหนึ่ง RL และ RC , ฤกษ์วิจจอร์ไฟฟ้าเบื้องต้น,สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย,ISBN 974-9941-06-3
- [7] Qinghua Z, Gustavo V, and Berry G.S, Engineering Aspects of Pulsed Electric Field Pasteurization, *Journal of Food Engineering*, vol 94, May 1995 pp. 261–281
- [8] Jose A.G, David R.S, Maria M.G, Barry S and Gustavo V.B, Milk thermization by pulsed electric fields (PEF) and electrically induced heat, *Journal of Food Engineering*, vol 100, March 2010 pp. 56–60
- [9] Intra P, Yawootti A, Asanavijit V, Manopian P, Pengmanee C, Somsri N. Inactivation of *E. coli* in Milk Tea Undergoing Pulsed Electric Field Pasteurization, *KMUTNB J.*2015; Vol. 25, No. 3, Sep. - Dec. Thai.
- [10] Panyamuangjai V, Janthara S, Kusuya R, Yawootti A., Intra P. Application of Pulsed Electric Field for Milk Pasteurization, *KMUTT Res and Dev J*, 2012; vol. 35, no. 4, 469-484, Thai.
- [11] Barbosa-canovas G.V, Pothakamury U.R. Palou E, Swanson B.G. Non-thermal Preservation of Food, New York: Marcel Dekker, 1998.
- [12] Addeo K. M. Process for the use of pulsed electric fields coupled with rotational retorting in processing meals ready to eat (MRE). U.S., US6083544A (Patent) 2000.

