



รายงานการวิจัย

เรื่อง

การออกแบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
สำหรับกระบวนการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนมที่อุณหภูมิต่ำ
Design and implement of radio frequency electric field
generator to eliminate microorganism in
low temperature milk

รหัสโครงการ IF7-716-66-12-03

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

กุมภาพันธ์ 2568



รายงานการวิจัย

เรื่อง

การออกแบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
สำหรับกระบวนการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนมที่อุณหภูมิต่ำ
Design and implement of radio frequency electric field
generator to eliminate microorganism in
low temperature milk

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
กุมภาพันธ์ 2568

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2566 ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่สำหรับการทดสอบงานวิจัย

ขอขอบคุณ คณะกรรมการผู้ตรวจสอบทางวิชาการ ที่ได้คำแนะนำข้อเสนอแนะต่อคณะผู้วิจัย ด้วยดีตลอดมา

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ

หัวหน้าโครงการวิจัย



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการออกแบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สำหรับกระบวนการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนมที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะในด้านการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและชีวภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและคุณภาพของน้ำนม เทคโนโลยีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือการใช้ คลื่นความถี่วิทยุร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อศึกษาผลของ ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า (300, 450 และ 900 kV/m) และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (45, 50 และ 55°C) ต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำนมดิบ ตัวอย่างน้ำนมถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลองที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำนมหลังการบ่มทั้งในแง่ของลักษณะทางกายภาพ การจับตัวเป็นก้อน และการเปลี่ยนแปลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของน้ำนมและชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ โดยเฉพาะที่ 900 kV/m ซึ่งให้ผลดีที่สุดในการรักษาสภาพของน้ำนมเมื่อเทียบกับความเข้มที่ต่ำกว่า (300 และ 450 kV/m) ที่พบว่าการตกตะกอนและการเปลี่ยนสีมากขึ้น ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือช่วยยืดอายุการเก็บรักษาน้ำนมดิบโดยไม่ต้องใช้สารเคมี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำนมเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์นม ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไปคือ การศึกษาผลกระทบของ RF ต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำนมอย่างละเอียด เช่น ค่า pH โครงสร้างโปรตีน และปริมาณจุลินทรีย์ รวมถึงการพัฒนากระบวนการที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับน้ำนมในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันโดยอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดในระดับอุตสาหกรรม

Abstract

This research focuses on the design and development of an electric field using radio frequency (RF) for microbial inactivation in milk at low temperatures, particularly in terms of physical and biological changes that influence milk's shelf life and quality. The technology employed in this study integrates radio frequency treatment with temperature control to investigate the effects of electric field intensities (300, 450, and 900 kV/m) and different temperatures (45, 50, and 55°C) on raw milk. The milk samples were divided into a control group and experimental groups subjected to RF treatment, followed by an analysis of their properties after incubation, focusing on physical characteristics, coagulation, and microbial changes on PDA culture media. The experimental results indicate that higher electric field intensities significantly reduce changes in raw milk and inhibit microbial growth, with 900 kV/m demonstrating the best preservation effect compared to lower intensities (300 and 450 kV/m), which exhibited increased coagulation and discoloration. The advantage of this technology is its ability to extend the shelf life of raw milk without the use of chemical preservatives, making it applicable to the dairy processing industry for improving product quality. Future research recommendations include a comprehensive study on the effects of RF on the chemical composition of milk, such as pH levels, protein structure, and microbial content, as well as the development of an adaptive system that can automatically adjust treatment parameters based on environmental conditions to enhance the accuracy and efficiency of the RF treatment process at an industrial scale.

สารบัญ

หน้า

กิตกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรัชศวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ปรัชศวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3 การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization)	6
2.4 หลักการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	9
2.4.1 คุณสมบัติของไดโอดีเล็คทริก.....	9
2.4.2 ระดับความลึกผิว	10
2.4.3 หลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า.....	11
2.5 สรุป	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	13
3.1 กล่าวนำ.....	13
3.2 การออกแบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ	13
3.2.1 หลักการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	13
3.2.2 การออกแบบและสร้างเครื่อง	14
3.3 สรุป	19
บทที่ 4 การวัดและผลการทดลอง.....	20
4.1 กล่าวนำ	20
4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ	20
4.3 สรุป	23
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	24
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์	24
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	25
ประวัตินักวิจัย	27



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสเจอร์ไรซ์.....	9
4.1 การออกแบบการทดสอบด้วยเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับน้ำนมสด.....	20
4.2 ตารางเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อผ่านไ 5 วัน	21
4.3 การเปลี่ยนแปลงของน้ำนมดิบบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA หลังการบ่มเป็นระยะเวลา 3 วัน	22



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบให้ความร้อนกับการใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 0.5 kV/cm.....	5
2.2 ผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำลายเชื้อจุลินทรีย์จุดสี่เหลี่ยม แทนอุณหภูมิที่ 60 °C และจุดวงกลมแทนอุณหภูมิที่ 50°C.....	5
2.3 การเปรียบเทียบการให้ความร้อนทำลายเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียวและใช้ความร้อนกับ สนามไฟฟ้าที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 25kV/cm ความถี่ 20kHz.....	6
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสเจอร์ไรซ์และ มาตรฐานที่ใช้ใน การพาสเจอร์ไรซ์.....	8
2.5 กระบวนการสร้างสปอร์ของจุลินทรีย์.....	9
2.6 รูปแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต.....	11
3.1 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ.....	14
3.2 แบบจำลองระบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยโปรแกรมด้านหน้า	14
3.3 แบบจำลองระบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยโปรแกรมด้านหลัง พร้อมการติดตั้งอุปกรณ์	15
3.4 ภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน	16
3.5 ภาคกำเนิดความถี่.....	16
3.6 ภาคตัวปล่อยสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต	17
3.7 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ	17
3.8 เครื่องการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้านหน้า	18
3.9 เครื่องการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้านหลัง.....	18
4.1 ผลของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำนมวัวดิบ.....	23

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

นมหรือน้ำนม คือ ของเหลวสีขาวที่มีสารอาหารที่จำเป็นสำหรับเด็กหรือสัตว์แรกเกิด ที่ผลิตออกมาจากเต้านมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม อาทิเช่น มนุษย์ โค แพะ แกะ กระบือ เป็นต้น โดยหากกล่าวถึงการบริโภคแล้ว นมจัดเป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพและมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อผู้คนทุกวัย เนื่องจากนมจัดเป็นแหล่งของสารอาหารตามธรรมชาติที่จำเป็นต่อการเสริมสร้างร่างกายและส่งเสริมการเจริญเติบโตของทารกและเด็กให้มีพัฒนาการที่เหมาะสมตามวัย ทั้งยังอุดมไปด้วยโปรตีน แร่ธาตุ และวิตามินต่างๆ ที่ช่วยซ่อมแซมส่วนของร่างกาย อีกทั้งผู้ใหญ่และคนชราก็สามารถบริโภคได้เนื่องจากเป็นอาหารที่ย่อยง่าย

ในอุตสาหกรรมอาหาร นมโค จัดเป็นวัตถุดิบที่มีการนำมาแปรรูปเพื่อการบริโภคอย่างแพร่หลายทั้งในรูปแบบผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่มที่มีหลากหลายรูปแบบ เช่น นมพาสเจอร์ไรส์ นมสเตอริไลส์ นม UHT นมเปรี้ยว โยเกิร์ตพร้อมดื่ม และผลิตภัณฑ์จากนมในรูปแบบอื่น เช่น เนย ชีส นมผง ไอศกรีม เป็นต้น ในน้ำนมนมสดจัดเป็นแหล่งอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของทั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อโรคและเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียจึงทำให้มีอายุการเก็บรักษาที่สั้น ดังนั้นการที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์นมมีความปลอดภัยในการบริโภค และสามารถเก็บรักษาได้ในระยะเวลานานเพื่อสะดวกต่อการขนส่งและจัดจำหน่าย จำเป็นจะต้องทำการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ในน้ำนมก่อนที่จะทำการบรรจุในภาชนะที่สะอาดและปิดสนิท ดังนั้นกระบวนการพาสเจอร์ไรส์(ฆ่าเชื้อ)จึงเป็นปัจจัยหลักสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันเป็นอย่างมาก ซึ่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในปัจจุบันได้มีกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ที่นิยมใช้อยู่ 3 แบบ คือ (1) การพาสเจอร์ไรส์แบบเป็นชุด (batch pasteurization) โดยการต้มในหม้อต้ม ซึ่งให้ความร้อนอาหารจนได้อุณหภูมิและเวลาตามที่ต้องการ ซึ่งการพาสเจอร์ไรส์วิธีนี้ ความร้อนจะถ่ายเท อย่างช้าๆ (2) การพาสเจอร์ไรส์ในภาชนะปิดผนึกสนิท (In-container pasteurization) วิธีนี้เป็นการพาสเจอร์ไรส์โดยบรรจุอาหารที่ต้องการพาสเจอร์ไรส์ลงในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดผนึกสนิท แล้วฆ่าจุลินทรีย์ด้วยความร้อนจากอุณหภูมิความร้อน อ่างน้ำร้อน เป็นต้น (3) การพาสเจอร์ไรส์แบบต่อเนื่อง (in-line pasteurization) เป็นการพาสเจอร์ไรส์โดยที่อาหารไหลอยู่ในท่ออย่างต่อเนื่อง ฆ่าจุลินทรีย์ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและนำมาบรรจุลงภาชนะในบริเวณที่ปลอดเชื้อ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการทั้งสามรูปแบบนั้น เป็นหลักการพาความร้อนหรือการนำความร้อนไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน จึงทำให้มีประสิทธิภาพน้อยใช้เวลานาน ซึ่งบางครั้งอาจทำให้ความร้อนไม่ทั่วถึงวัสดุทั้งหมดทำให้จุลินทรีย์ไม่ได้ถูกทำลายทั้งหมด ก่อให้เกิดการเสียหายเร็วกว่ากำหนดได้ แต่ยังเป็นที่ยอมรับใช้เนื่องจากให้กำลังการผลิตได้มาก แต่ในปัจจุบันได้มีการพาสเจอร์ไรส์อีกวิธีที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก คือ การประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าในการพาสเจอร์ไรส์ การใช้สนามไฟฟ้าแบบไม่ทำให้เกิดความร้อนใช้หลักการที่เรียกว่า “กระบวนการอิเล็กโตรโพรเซส (Electro permeabilization)” ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) โดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และค่าสภาพความยอม (Permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์ การเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าและค่าสภาพยอมทำได้โดยใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ มีความสูงเกินกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุนเล็กๆ

จำนวนมากที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ จากการศึกษาวิธีการนี้ ใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากกว่า 20kV/cm การที่จะให้สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงมากถึงขนาดนั้น จะต้องมีย่อว่าง (gap) ขั้วอิเล็กโทรดที่แคบมาก จึงเหมาะแก่การพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวและต้องเป็นแบบต่อเนื่องโดยไหลเป็นท่อขนาดเล็กผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ดังนั้น การสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมและน่าสนใจมาก เนื่องจากการสร้างสนามไฟฟ้ากระทำโดยตรงกับวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อช่วงความถี่การใช้งาน ซึ่งทำให้ไม่กระทบต่อวัสดุอื่นๆ เป็นการให้โมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกเกิดการสั่น เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลระหว่างขั้ว และทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุน ซึ่งจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ และการปล่อยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงแบบแผ่นเพลต ที่มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุที่เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก จึงเหมาะสมกับงานวิจัยนี้มากที่สุด ในอดีตเทคโนโลยีนี้ยังไม่ค่อยเป็นที่นิยม เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางด้านความถี่สูงมีราคาแพง แต่ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้มีราคาที่ถูกลงมาก

ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับกระบวนการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนมที่อุณหภูมิต่ำ ทำการวิเคราะห์ผลในภาชนะปิดที่มีนมไหลผ่าน (Chamber) จากนั้นทำการศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาต่อการยับยั้งจุลินทรีย์และอุณหภูมิภายหลังการฆ่าจุลินทรีย์เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมพร้อมดื่ม ที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำนม และสามารถประหยัดพลังงานในการลดอุณหภูมิภายหลังกระบวนการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยความร้อนเพื่อลดต้นทุนการผลิตให้กับโรงงานของฟาร์ม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อทดแทนวิธีการแบบเดิมและเป็นทางเลือกที่ดีกว่าสำหรับการใช้งานในโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์นมทั่วไป ที่ประหยัด คุ่มค่า และมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการยับยั้งจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านการแปรรูปด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพและโปรตีนในผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านการแปรรูปด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
- 1.2.4 เพื่อทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านการแปรรูปด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาวิเคราะห์กระบวนการที่เหมาะสมในการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมด้วยใช้สนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
- 1.3.2 ศึกษาวิเคราะห์ผลของการยับยั้งจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์นมที่แปรรูปใช้สนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุเปรียบเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนจากการพาสเจอร์ไรส์

1.3.3 ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์นมหลังกระบวนการแปรรูปด้วยใช้สนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุเปรียบเทียบกับกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการให้ความร้อนจากการพาสเจอร์ไรส์

1.3.4 ศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกในนมหลังกระบวนการแปรรูปใช้สนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุเปรียบเทียบกับกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการให้ความร้อนจากการพาสเจอร์ไรส์

1.3.5 ทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์นมหลังการแปรรูปด้วยใช้สนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงหลักการของการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

1.4.2 ได้ทราบถึงผลของการยับยั้งจุลินทรีย์ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านแปรรูปด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

1.4.3 ได้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพและโปรตีนในผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านการแปรรูปด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

1.4.4 ได้ทราบถึงการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์นมที่ผ่านการแปรรูปด้วยเทคนิคการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

1.4.5 ได้เทคนิคใหม่ที่ดีกว่า เพื่อทดแทนวิธีการแบบดั้งเดิมสำหรับโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์นมที่ประหยัด คุ่มค่า และมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้พลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ



บทที่ 2

ปรีทศวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ มีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน เพื่อให้เป็นพื้นฐานของความรู้และความเข้าใจในงาน สามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือกล่าวอ้างอิงถึงต่อดำเนินงานวิจัย โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา คือ การพาสเจอร์ไรซ์หลักการให้ความร้อนแก่อิเล็กทริกและการกระจายคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า โดยจะกล่าวถึงส่วนที่เป็นประโยชน์หรือกล่าวอ้างอิงต่อการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหา มีความกระชับและชัดเจน

2.2 ปรีทศวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาโดยอาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ สำหรับใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียง และได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE IEICE IEE ScienceDirect เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้แนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้นำถึงปรีทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญหลักสำหรับการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ รูปแบบของแหล่งจ่ายกำลังงานและ ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลการตอบสนองรูปแบบต่างๆให้มีความเหมาะสมและให้มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด โดยผลที่ได้จากการศึกษาข้อมูลมีดังต่อไปนี้

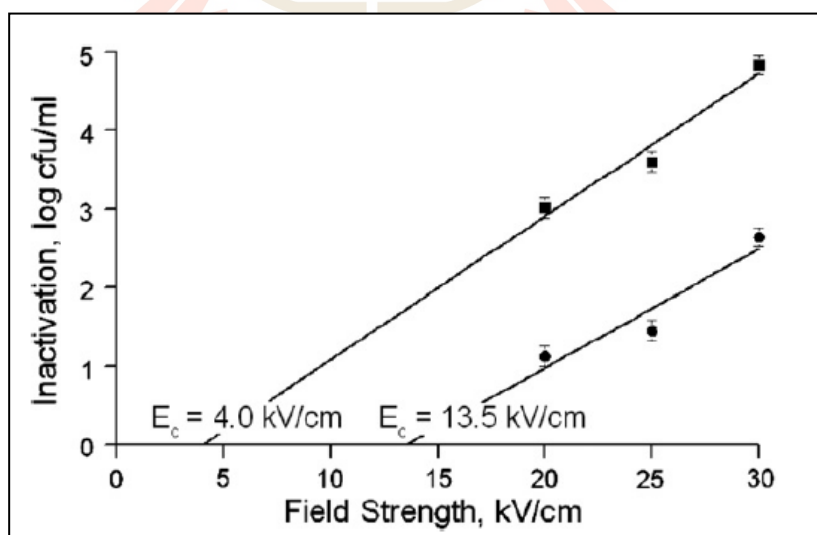
เทคโนโลยีการใช้สนามไฟฟ้าทำลายเชื้อจุลินทรีย์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสนามไฟฟ้าความถี่สูงหรือที่เรียกว่า “กระบวนการอิเล็กโตรโพรเซส” ซึ่งเป็นกระบวนการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Membrane) โดยการเพิ่มความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และค่าสภาพความยอม (Permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์ การเพิ่มความนำไฟฟ้าและค่าสภาพยอมทำได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูงส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเยื่อหุ้มเซลล์ มีความสูงเกินกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ของเยื่อหุ้มเซลล์และทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากที่เยื่อหุ้มเซลล์ รูพรุนดังกล่าวจะนำไปสู่กระบวนการตายของเซลล์ (Zimmermann U et al.1986, J Teissie et al.1999) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา การใช้สนามไฟฟ้าทำลายเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าความถี่ของสนามไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจากงานวิจัยของ D.J. Geveke et al. 2002-2012 ได้ทำการวิจัยเรื่องการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูง ได้ทดสอบการใช้สนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ โดยใช้ความถี่สนามไฟฟ้าที่ 0.5KV/cm และที่ความถี่ 18MHz ทำการเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม โดยให้ความร้อนกับอาหารเหลวที่ 50 องศาเซลเซียส และนำไปผ่านสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 0.5kv/cm พบว่าแทบจะไม่ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ตามรูปที่ 2.1 ต่อมา

ได้เพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า 20-30kV/cm ที่ความถี่ 21, 30 และ 41kHz โดยทำการทดสอบกับ เหล้าแอปเปิ้ล ที่อุณหภูมิของเหล้าแอปเปิ้ลอยู่ที่ 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าตามรูปที่ 2.2 ต่อมาได้ทำการ ทดลองเปรียบเทียบให้ความร้อนอย่างเดียว กับให้ความร้อนกับใช้สนามไฟฟ้าในการทำลาย เชื้อจุลินทรีย์ โดยใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 25kV/cm ที่อุณหภูมิ 25 55 และ 75 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้ทั้งสองวิธีให้ประสิทธิภาพทำลายจุลินทรีย์ได้ดีกว่าการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวแสดงได้จาก รูปที่ 2.3 จากงานวิจัยที่ใช้สนามไฟฟ้าในการลายเชื้อจุลินทรีย์จะใช้แบบไหลผ่านท่อขนาดเล็ก และไม่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่อาหารบรรจุอยู่ในภาชนะได้ จากงานวิจัยนี้พบว่าความเข้มสนามไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงให้ความสนใจในการใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าทำลาย เชื้อจุลินทรีย์โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในการออกแบบสร้างเครื่องในงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาลักษณะของการ เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุผ่านวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริก

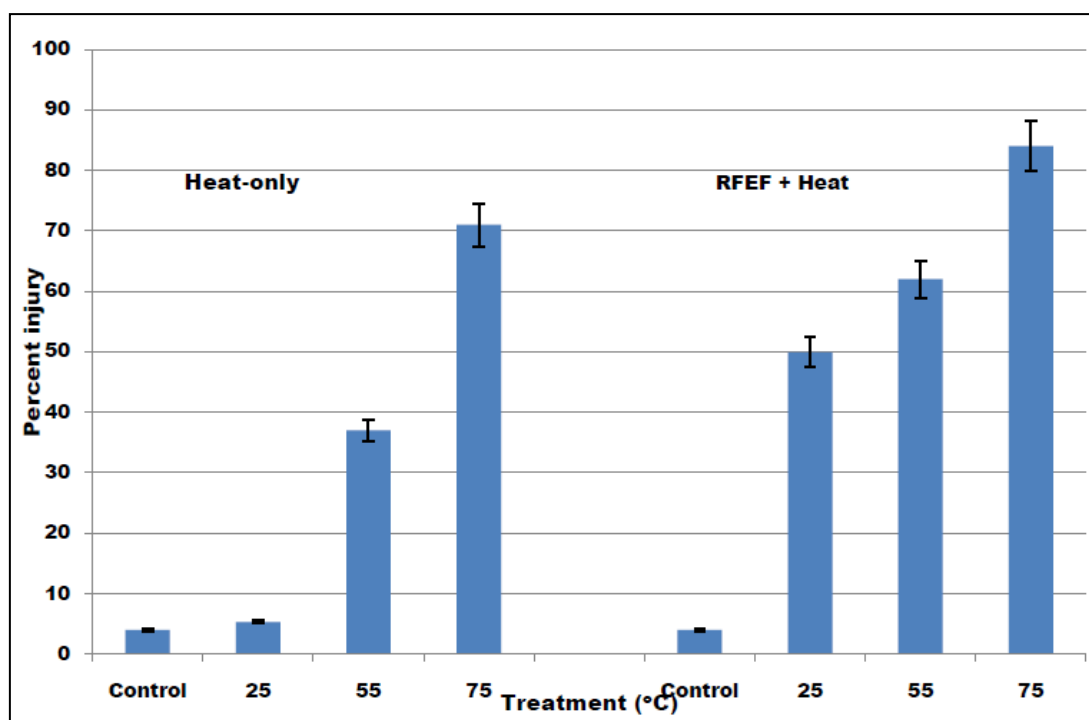
Material	Microorganism	Temperature °C	Energy source	Concentration ^a , log cfu/ml	
				Feed	Product
Apple cider	<i>L. innocua</i>	50.5	Thermal	5.9	4.5
Apple cider	<i>L. innocua</i>	50.5	RF	5.8	4.7
Beer	Naturally occurring	50.0	Thermal	6.3	4.4
Beer	Naturally occurring	50.0	RF	6.3	4.3
Deionized water	<i>L. innocua</i>	55.5	Thermal	5.9	4.4
Deionized water	<i>L. innocua</i>	55.5	RF	5.9	4.3

^aS.D. for all concentrations were ≤ 0.1 log cfu/ml.

รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบให้ความร้อนกับการใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 0.5 kV/cm



รูปที่ 2.2 ผลกระทบของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำลายเชื้อจุลินทรีย์จุดสี่เหลี่ยมแทนอุณหภูมิที่ 60 °C และจุดวงกลมแทนอุณหภูมิที่ 50°C



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบการใช้ความร้อนทำลายเชื้อจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียวและใช้ความร้อน กับ สนามไฟฟ้าที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 25kV/cm ความถี่ 20kHz

การให้ความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่ จำเป็นต้องมีตัวแปรหลักในการพิจารณาซึ่งประกอบด้วยย่านความถี่ที่ใช้งาน รูปแบบการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าเข้าสู่ตัวกลางวัสดุไดอิเล็กตริกที่มี การสูญเสียและกำลังงานที่ใช้ เป็นสิ่งที่ต้องนำมาวิเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การออกแบบวงจรกำเนิดความถี่ และตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้า ให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน ทำให้ได้เทคนิคใหม่ที่ดีกว่า เพื่อ ทดแทนวิธีการแบบดั้งเดิมสำหรับโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์นม ที่ประหยัด คุ่มค่า และมีประสิทธิภาพ สูงสุด จากการใช้พลังงานสนามไฟฟ้าจากคลื่นความถี่วิทยุ

2.3 การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization)

การปนเปื้อนของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในอาหาร ทำให้อาหารเปลี่ยนแปลงทางด้านสี กลิ่น รส ทั้งที่ต้องการและไม่ต้องการ รวมถึงการสร้างสารพิษ ดังนั้นการยืดอายุการเก็บของอาหาร ต้อง ควบคุมไม่ให้จุลินทรีย์เจริญในอาหารหรือลดปริมาณจุลินทรีย์ในอาหาร โดยการแยกหรือกำจัดสภาวะที่ ไม่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ออกไป หรือสร้างสภาวะขัดขวางการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์สำหรับอาหารเหลว วิธีการควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่นิยมได้แก่ การใช้ความร้อน เพื่อลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และทำลายเอนไซม์ในอาหาร หลักการใช้ความร้อนในอาหารนั้นขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิที่ใช้ระยะเวลาที่ใช้ และชนิดของอาหาร ความร้อนที่ใช้ในการทำลายสปอร์ของจุลินทรีย์นั้นต้อง ใช้ไอน้ำเดือดที่ความดันเพื่อให้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วบรรจุในภาชนะที่ปิดแน่น อาหารที่ผ่านความร้อนที่ระดับต่ำกว่าจะต้องใช้วิธีการถนอมอาหารอย่างอื่น เพื่อช่วยในการยืดอายุการ เก็บ เช่น เก็บที่อุณหภูมิต่ำ

การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) เป็นการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียส ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหาร การพาสเจอร์ไรซ์ตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส หลุยส์ปาสเตอร์ (Louis Pasteur) เพื่อให้เกียรติในฐานะที่เป็นบุคคลแรกในการคิดค้นการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในเหล้าไวน์ระหว่างปี พ.ศ.2407-2408 โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส การค้นพบของหลุยส์ ปาสเตอร์ ทำให้เราสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตเครื่องดื่ม ทำให้รสชาติ กลิ่น และสีของเครื่องดื่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก วัตถุประสงค์ของการทำพาสเจอร์ไรซ์อาหาร ได้แก่

- ทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในอาหาร ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคคนและสัตว์
- ลดปริมาณจุลินทรีย์ให้น้อยลง
- ทำลายเอนไซม์ต่างๆ ในน้ำผลไม้ นม เป็นต้น
- ยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น (ประมาณ 3 วัน ตามกฎหมาย)
- รักษาคุณสมบัติให้เหมือนอาหารสดตามธรรมชาติ

การพาสเจอร์ไรซ์เป็นการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้ความร้อน โดยความร้อนจะทำลายเอนไซม์ต่าง ๆ รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค อุณหภูมิที่ใช้ต้องไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส โดยส่วนใหญ่การพาสเจอร์ไรซ์อาหารเหลวจะใช้อุณหภูมิที่มากกว่า 63 องศาเซลเซียส และคงอยู่ที่อุณหภูมินี้ไม่น้อยกว่า 30 นาที (Low Temperature Time) จากนั้นอาหารเหลวจะถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า การพาสเจอร์ไรซ์เป็นการถนอมอาหารแบบชั่วคราว เพราะสามารถป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เจริญในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่สารอาหารยังอยู่ครบถ้วนหรือเกือบครบถ้วน ดังนั้นจึงมีประโยชน์ต่ออาหารที่รับประทานเป็นประจำแต่ไม่เก็บไว้นานๆ เช่น นม น้ำผลไม้ เป็นต้น อาหารเหลวที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ควรจัดเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิตู้เย็น เพื่อยับยั้งการเกิดของสปอร์ของจุลินทรีย์ วิธีการพาสเจอร์ไรซ์มี 2 วิธีคือ

วิธีใช้ความร้อนต่ำ-เวลานาน (LTLT : Low Temperature – Long Time) วิธีนี้ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 62.8-65.6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อผ่านความร้อนโดยใช้เวลาตามที่กำหนดแล้ว ต้องเก็บอาหารไว้ในที่เย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า 7.2 องศาเซลเซียส กรรมวิธีนี้นอกจากจะทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคแล้วยังยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ย่อยไขมันชนิดไลเปสซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในนม

วิธีใช้ความร้อนสูง-เวลาสั้น (HTST : High Temperature – Short Time) วิธีที่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าวิธีแรก แต่ใช้เวลาน้อยกว่าคืออุณหภูมิ 71.1 องศาเซลเซียสคงไว้เป็นเวลา 15 วินาที อาหารที่ผ่านความร้อนจะได้รับการบรรจุลงกล่องหรือขวดโดยวิธีปราศจากจุลินทรีย์แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 7.2 องศาเซลเซียส

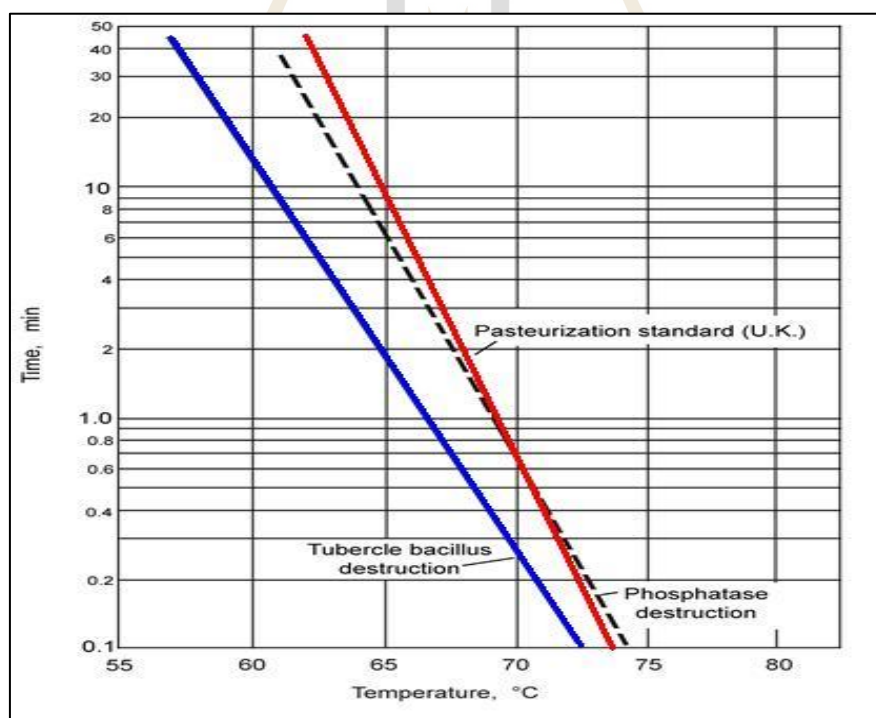
การพาสเจอร์ไรซ์จะแตกต่างจากการสเตอไรซ์และได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากสเตอไรซ์ทำให้รสชาติและคุณภาพของอาหารแย่ลง รวมถึงการสเตอไรซ์ทำให้สูญเสียสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่มีประโยชน์ต่อร่างกายอีกด้วย การพาสเจอร์ไรซ์จะทำลายเชื้อจุลินทรีย์เพียง 95-99% ในขณะที่การสเตอไรซ์จะทำลายจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด ประสิทธิภาพของการทำลายจุลินทรีย์ของการพาสเจอร์ไรซ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการพาสเจอร์ไรซ์ตามตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.4 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสเจอร์ไรซ์ และมาตรฐานที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสเจอร์ไรซ์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
68.2	30
71.7	15
88.4	0.1
97.6	0.05
100.0	0.01

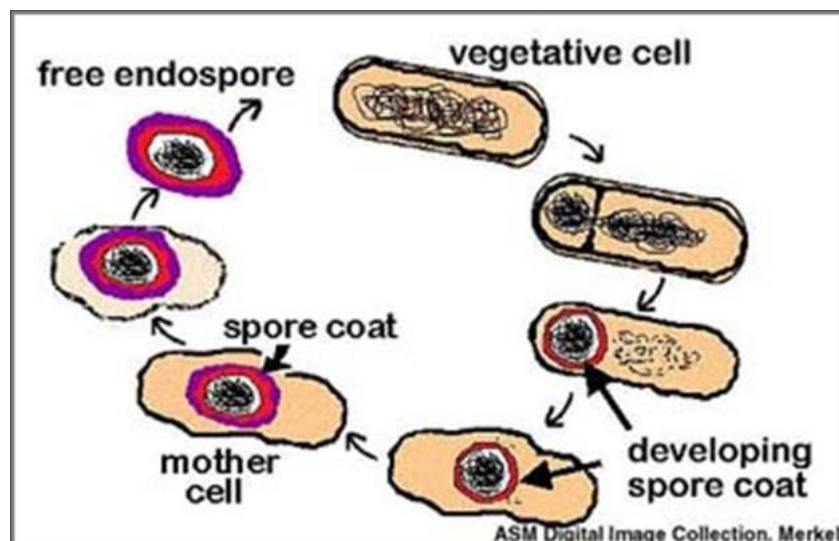
จุลินทรีย์ที่สร้างสปอร์ที่ก่อโรค (pathogen) ซึ่งเป็นอันตรายในอาหารได้แก่ *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens* และ *Bacillus cereus* เป็นต้น สปอร์ของจุลินทรีย์เกิดขึ้นเมื่อสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น ขาดอาหาร มีสารพิษ ร้อนเกินไป แห้งแล้ง เป็นต้น

กระบวนการสร้างสปอร์เริ่มจากการแบ่ง DNA ในเซลล์ปกติของจุลินทรีย์ (vegetative cell) ซึ่งเป็นเซลล์แม่ (mother cell) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่จะพัฒนาเป็นสปอร์ เรียกว่า forespore และจะเริ่มสร้างผนังหุ้ม (spore coat) ขึ้นภายใน หลังจากนั้นเซลล์แม่จะหุ้มสปอร์ไว้ภายในเซลล์ ผนังหุ้มสปอร์จะพัฒนาให้หนาและแข็งแรงขึ้น ตามลำดับ โดยแคลเซียมจากภายนอกเซลล์จะแพร่เข้าไปในเซลล์ และน้ำภายในเซลล์จะถูกขับออกมา เมื่อสปอร์พัฒนาเต็มที่ เซลล์แม่จะสลายไป สปอร์ที่เป็นอิสระ (free endospore) จะปล่อยออกมาจากเซลล์แม่ตามรูปที่ 2.5 และสามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมได้โดยไม่ต้องการน้ำหรืออาหารใด ๆ จึงทำให้สปอร์ของจุลินทรีย์ทนความร้อนได้สูงทน



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของการพาสเจอร์ไรซ์และมาตรฐานที่ใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์

สปอร์ของจุลินทรีย์ (bacteria spore) เป็นสภาวะพักตัวของจุลินทรีย์ที่สร้างสปอร์ (spore forming bacteria) จุลินทรีย์ที่สร้างสปอร์ ได้แก่ จุลินทรีย์ในวงศ์ Bacillus และ Clostridium



รูปที่ 2.5 กระบวนการสร้างสปอร์ของจุลินทรีย์

2.4 หลักการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

2.4.1 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก

จากความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของวัสดุใด ๆ ในการใช้งานเกี่ยวกับคลื่นความถี่ จะเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบตัวปล่อยคลื่นความถี่และระบบที่ใช้งานคลื่นความถี่ ซึ่งคุณสมบัติของลักษณะทั่วไปนั้น จะสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมภายใต้การใช้งานคลื่นความถี่ต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (Complex permittivity, ϵ^*) หรือที่เรียกว่า “ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล (dielectric constant)” ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของสมการที่ 1 (Wang1, et.al., 2003)

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

เมื่อ ϵ'' คือ ปัจจัยในการสูญเสียยังผล (Dielectric loss factor) สำหรับการพิจารณาค่าการสูญเสีย นั้น จะพิจารณาจากส่วนที่เป็นจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของคลื่นสามารถนิยามค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (Loss tangent) ได้ดังสมการที่ 2

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (2)$$

ซึ่งวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นอาหารเหล่านั้นจะแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ย่านความถี่วิทยุให้เป็นพลังงานสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการทำอันตรกิริยากันระหว่างพลังงานสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่และตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วและสามารถเหนี่ยวนำคลื่น

ความถี่วิทยุให้เกิดการสั่น เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลระหว่างข้อและทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุนและความร้อนได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 (Nelson, 1996)

$$P = \rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 5.563 \times 10^{-11} f E^2 \varepsilon'' \quad (4)$$

โดยที่	P	คือ พลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก (W / m^3)
	C_p	คือ ความร้อนจำเพาะ(specific heat) ($J / kg.^{\circ}C$)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg / m^3)
	E	คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (V / m)
	Δt	คือ ระยะเวลา (s)
	ΔT	คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในวัสดุ $^{\circ}C$
	f	คือ ความถี่ (Hz)

2.4.2 ระดับความลึกผิว

สำหรับความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นความถี่วิทยุนั้นพลังงานจะลดลง $1/e$ เมื่อ $e = 2.718$ ของพลังงานที่ป้อนเข้าไปในพื้นผิวของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพลังงานของคลื่นความถี่วิทยุจะสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในพื้นผิวของตัวกลางได้มากกว่าคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นวิทยุมีความถี่ต่ำและมีความยาวคลื่นมากกว่าคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นความถี่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในลำดับต้น ๆ ที่ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับเนื้อวัสดุที่ต้องการนำมาใช้งาน โดยสามารถพิจารณาได้จากการทะลุทะลวงของคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

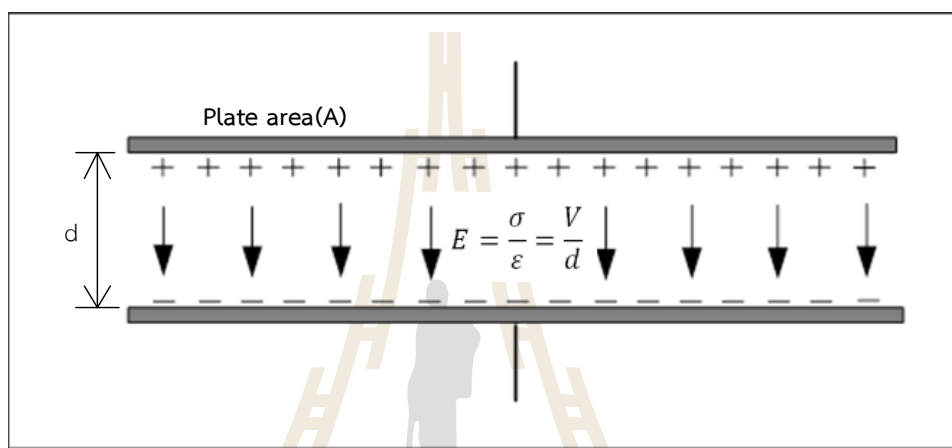
$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right]}} \quad (5)$$

โดยที่	d_p	คือ ความลึกของการทะลุทะลวง
	C	คือ ความเร็วแสงในอากาศว่าง ($3 \times 10^8 m / s$)

โดยงานวิจัยนี้วัสดุที่ใช้เป็นไดอิเล็กตริกคือนมหรือน้ำนม การส่งผ่านความเข้มสนามไฟฟ้าไปยังนมหรือน้ำนม เพื่อให้โมเลกุลเกิดการสั่นและเกิดการเสียดสีกัน ของโมเลกุลระหว่างข้อและทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เกิดรูพรุนและความร้อนได้ เป็นผลทำให้เชื้อจุลินทรีย์ตายลงในที่สุด

2.4.3 หลักการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

การพิจารณาตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าความถี่สูง ให้แก่ไดโอดีเลกทริก (nm หรือน้ำนม) ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่กระจายพลังงานสนามไฟฟ้าเข้าสู่วัสดุไดโอดีเลกทริก ให้ความเหมาะสม ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาถึงขนาดและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้า จากงานวิจัยที่ผ่านมาตัวสร้างสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต เป็นลักษณะรูปแบบที่มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีการกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลตมากและดีที่สุด โดยผ่านวัสดุตัวกลางที่มีการสูญเสียหรือวัสดุไดโอดีเลกทริกผ่านอยู่ระหว่างแผ่นเพลต โดยลักษณะของตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปแบบตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต

จากรูปที่ 6 เป็นตัวปล่อยคลื่นสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต โดยสามารถออกแบบได้จากสมการที่ 6

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d} \quad (6)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของไดโอดีเลกทริก
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลต (m^2)
 ϵ คือ $8.857 \times 10^{-12} F/m$
 d คือ ระยะห่างระหว่างเพลต (m)

ลักษณะของการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจะมีการกระจายตัวจากแรงดันขั้วบวกไปยังขั้วลบของแผ่นเพลต โดยความเข้มสนามไฟฟ้า E ที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

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

โดยที่ ϵ	คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก
V	คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต (Voltage)
d	คือ ระยะห่างระหว่างเพลต (m)
σ	คือ ค่าความนำของวัสดุไดอิเล็กตริก

โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการพิจารณาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลต (V) และ ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลต (d) ดังนั้นการวิเคราะห์แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างแผ่นเพลตจึงเป็นส่วนสำคัญ สำหรับการพิจารณาเพื่อทราบถึงความเข้มของสนามไฟฟ้า และนำไปสู่การวิเคราะห์การให้ความร้อนต่อวัสดุไดอิเล็กตริกต่อไป

2.5 สรุป

สำหรับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกหรือการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ สิ่งสำคัญคือต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำมาออกแบบ รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและกลไกการให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งได้อธิบายถึงโครงสร้างพื้นฐาน การให้ความร้อนด้วยความถี่วิทยุ จะอธิบายถึงสมการการเกิดความร้อนและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อน ทั้งนี้เพื่อนำมาซึ่งการวิเคราะห์ ออกแบบ และทดสอบให้มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

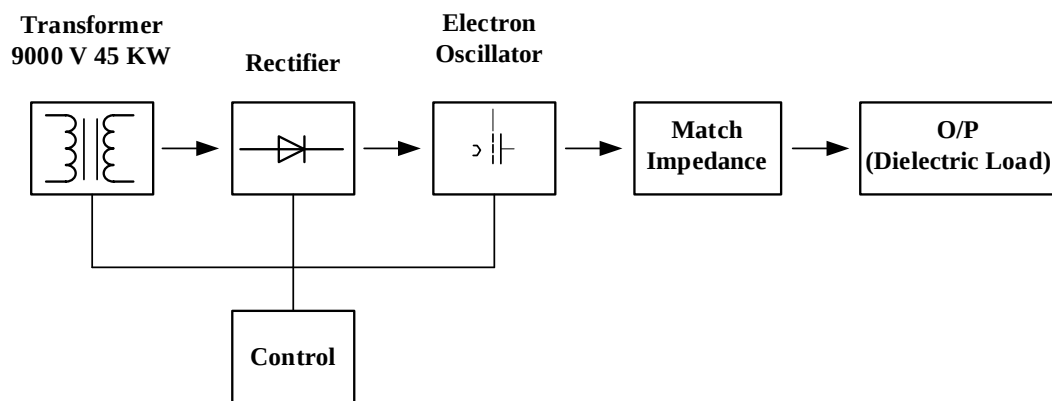
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุในการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนม โดยเริ่มจากการอธิบายหลักการทำงานของสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุและวิธีการที่สนามไฟฟ้าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากนั้นจะนำเสนอขั้นตอนการออกแบบเครื่องมือดังกล่าว โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการสร้างแบบจำลอง ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการสร้างเครื่องจริง รายละเอียดเพิ่มเติมจะถูกอธิบายในส่วนถัดไป

3.2 การออกแบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

ในส่วนนี้จะอธิบายหลักการสร้างสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนม โดยจะเริ่มจากแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อส่งพลังงานไปยังน้ำนม โดยอาศัยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ที่สามารถทำลายโครงสร้างของจุลินทรีย์ได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง ซึ่งช่วยรักษาคคุณค่าทางโภชนาการของน้ำนม หลังจากกำหนดหลักการทำงานแล้ว กระบวนการออกแบบเครื่องต้นแบบจะดำเนินการผ่านซอฟต์แวร์ SolidWorks เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D Model) ที่ช่วยให้เห็นโครงสร้างและส่วนประกอบของระบบได้อย่างละเอียด เมื่อการออกแบบเสร็จสมบูรณ์ จึงเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างเครื่องจริงตามแบบที่ออกแบบไว้ เพื่อทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำนมต่อไป

3.2.1 หลักการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

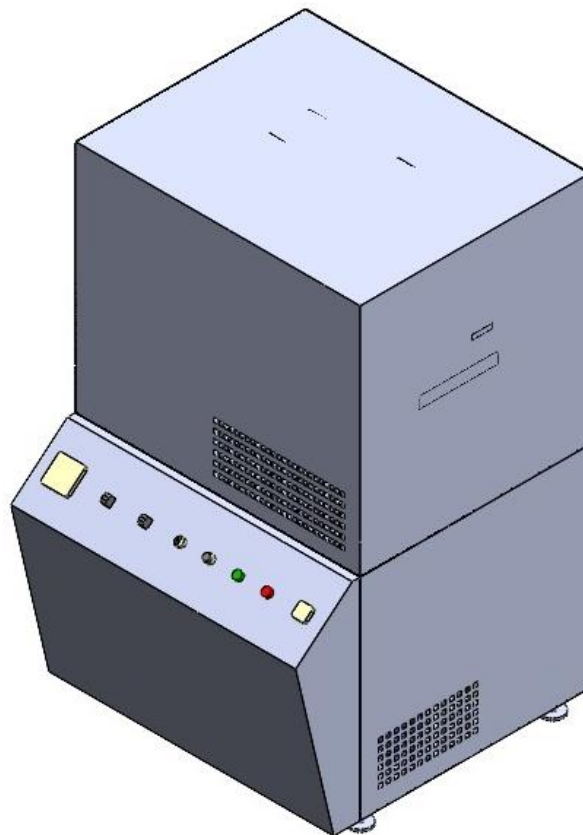
ระบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) สำหรับฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนมทำงาน โดยเริ่มจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าผ่านหม้อแปลง 9000V 45KW เพื่อให้เหมาะสมกับระบบกำเนิดสัญญาณ RF จากนั้นวงจรเรียงกระแส (Rectifier) จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและส่งไปยังวงจรออสซิลเลเตอร์หลอดอิเล็กตรอน (Electron Oscillator) ซึ่งใช้หลอดอิเล็กตรอน เช่น 7T69RB ในการสร้างสัญญาณ RF ที่มีความถี่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฆ่าจุลินทรีย์ จากนั้นสัญญาณ RF จะถูกส่งผ่านวงจรปรับอิมพีแดนซ์ (Match Impedance) เพื่อให้พลังงานถูกส่งไปยังโหลดไดอิเล็กตริก (เช่น น้ำนม) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสะท้อนกลับของพลังงาน เมื่อพลังงาน RF ถูกส่งเข้าสู่สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะทำให้โมเลกุลของน้ำและโปรตีนเกิดการสั่นสะเทือน ส่งผลให้โครงสร้างของจุลินทรีย์ถูกทำลายโดยไม่ต้องเพิ่มอุณหภูมิสูง ซึ่งช่วยรักษาคคุณค่าทางโภชนาการของน้ำนมได้ดีกว่าการพาสเจอร์ไรส์แบบใช้ความร้อน โดยมีระบบควบคุม (Control) ที่ช่วยปรับค่าแรงดันไฟฟ้า กระแส และความถี่ของคลื่น RF ให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าจุลินทรีย์สูงสุด



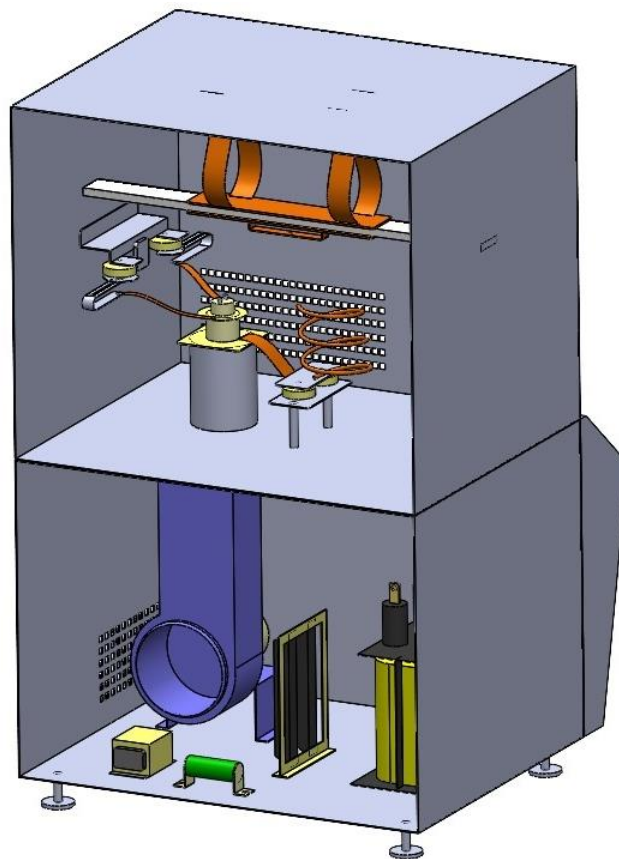
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

3.2.2 การออกแบบและสร้างเครื่อง

ในการออกแบบและสร้างเครื่องสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนมเริ่มต้นด้วยกระบวนการออกแบบโดยใช้ โปรแกรม SolidWorks เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติของระบบและส่วนประกอบต่างๆ ก่อนเข้าสู่การผลิตจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3

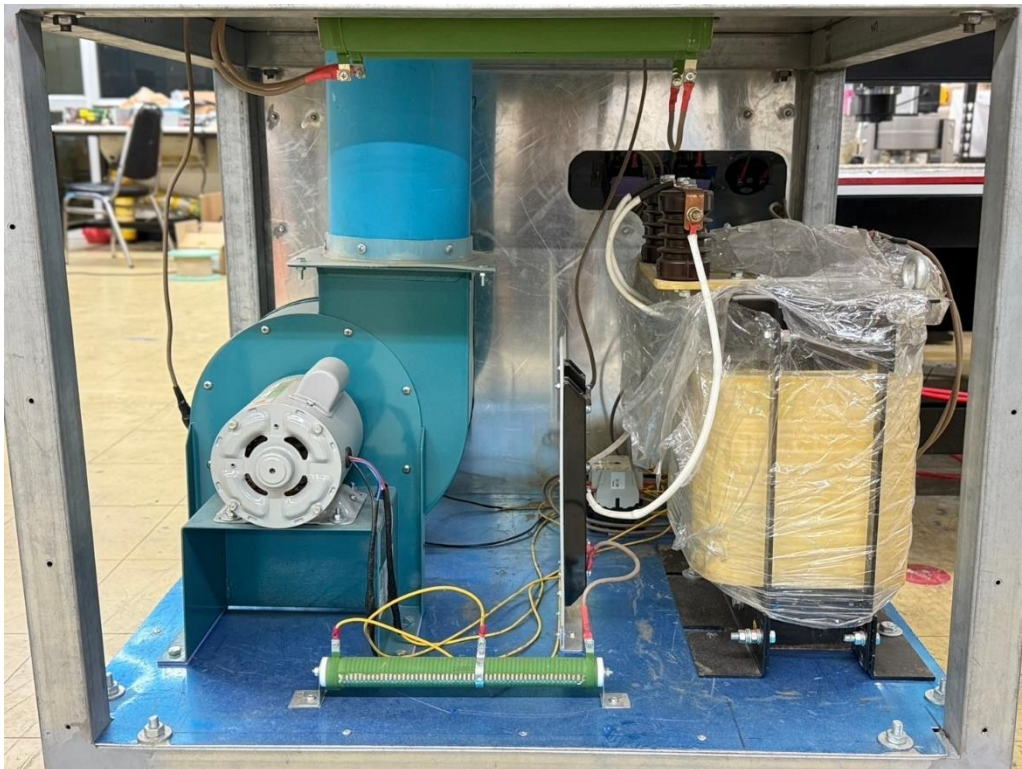


รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยโปรแกรมด้านหน้า



รูปที่ 3.3 แบบจำลองระบบสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยโปรแกรมด้านหลังพร้อมการติดตั้งอุปกรณ์

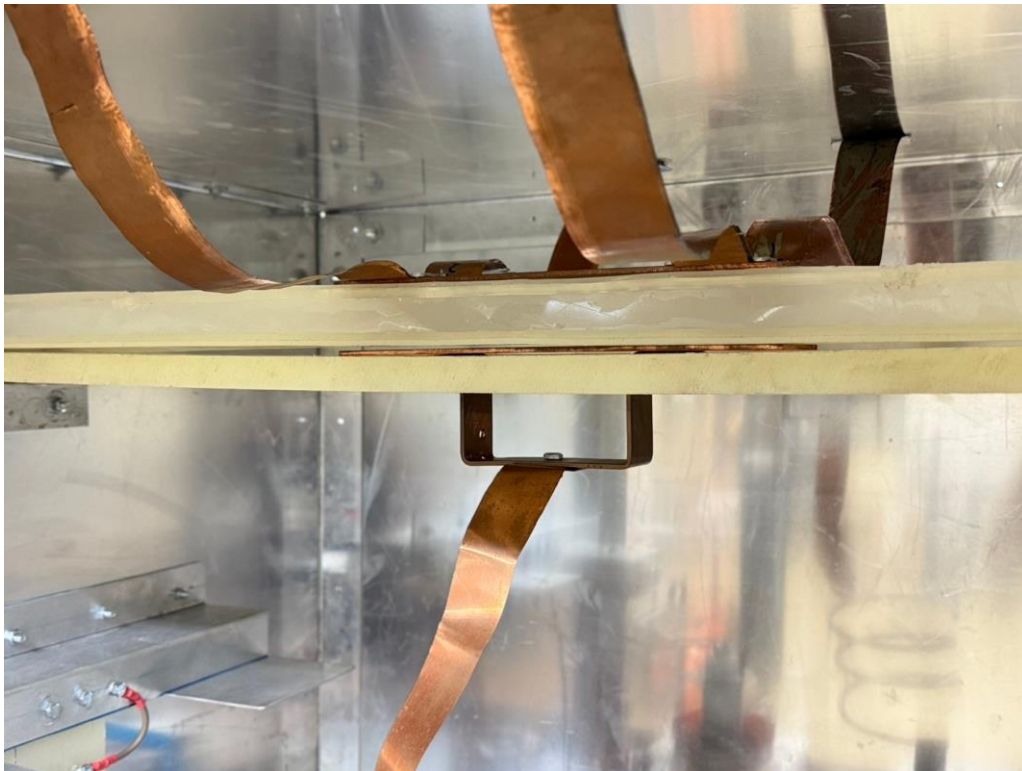
สำหรับการออกแบบเครื่องสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) เพื่อฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนมโดยไม่ใช้ความร้อน ประกอบด้วยสาม แหล่งจ่ายพลังงาน ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ขนาด 9,000 โวลต์ กระแส 1 แอมป์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับระบบ ดังแสดงรูปที่ 3.4 ภาคกำเนิดความถี่ ออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ด้วยหลอดอิเล็กทรอนิกส์ 7T69RB เพื่อสร้างสัญญาณความถี่วิทยุที่มีความถี่เหมาะสมสำหรับการสร้างสนามไฟฟ้า ดังแสดงรูปที่ 3.5 และ ภาคปล่อยสนามไฟฟ้า ใช้แผ่นเพลตเป็นอิเล็กโทรดในการสร้างสนามไฟฟ้า โดยมีระบบสายพานลำเลียงน้ำนมผ่านระหว่างแผ่นเพลต เพื่อให้สนามไฟฟ้าสัมผัสกับน้ำนม ดังแสดงรูปที่ 3.6 ซึ่งในกระบวนการนี้ สัญญาณความถี่วิทยุจากออสซิลเลเตอร์จะถูกส่งผ่านวงจรแมตชิ่งอิมพีแดนซ์ เพื่อปรับความต้านทานระหว่างวงจรกำเนิดความถี่กับอิเล็กโทรดแผ่นเพลต ลดการสะท้อนกลับของสัญญาณ และป้องกันความเสียหายของวงจร เมื่อสัญญาณความถี่วิทยุถูกส่งไปยังแผ่นเพลต จะสร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้โมเลกุลในน้ำนมสั่นสะเทือน ส่งผลให้จุลินทรีย์ถูกทำลายโดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง ช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการของน้ำนมได้ดีกว่าการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม



รูปที่ 3.4 ภาคแหล่งจ่ายกำลังงาน



รูปที่ 3.5 ภาคกำเนิดความถี่



รูปที่ 3.6 ภาควัสดุสลายสนามไฟฟ้าแบบแผ่นเพลต



รูปที่ 3.7 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 3.8 เครื่องการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้านหน้า



รูปที่ 3.9 เครื่องการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้านหลัง

3.3 สรุป

การออกแบบและสร้างเครื่องสร้างสนามไฟฟ้าด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำนม โดยไม่ใช้ความร้อน เริ่มจากการอธิบายหลักการทำงานของสนามไฟฟ้าที่สามารถทำลายโครงสร้างของจุลินทรีย์โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง ซึ่งช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการของน้ำนม จากนั้นดำเนินการออกแบบเครื่องต้นแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D Model) ของระบบ เมื่อการออกแบบเสร็จสมบูรณ์จึงเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างเครื่องจริงตามแบบที่ได้ออกแบบไว้เพื่อทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำนม



บทที่ 4

การวัดและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดลองเกี่ยวกับ ผลกระทบของคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ต่อคุณสมบัติของ น้ํานมดิบ โดยมุ่งเน้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและชีวภาพภายหลังการบำบัดภายใต้ ระดับความเข้มสนามไฟฟ้า (300, 450 และ 900 kV/m) และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (45, 50 และ 55°C) ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ในสองส่วนหลัก ได้แก่ (1) ผลกระทบของกระบวนการให้ความร้อน ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของน้ํานมดิบ และ (2) การเปลี่ยนแปลงของน้ํานมดิบบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA เพื่อตรวจสอบอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หลังผ่านการบำบัด ข้อมูลที่ได้รับจะถูกนำมาอภิปรายเพื่อประเมิน ประสิทธิภาพของเทคโนโลยี RF ในการยืดอายุการเก็บรักษา น้ํานมดิบ ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการแปรรูปและถนอมอาหารในอนาคต

4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

ในการศึกษาครั้งนี้ น้ํานมดิบที่ใช้เป็นตัวอย่างทดลองได้มาจากฟาร์มโคนมของมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) จังหวัดนครราชสีมา โดยมีปริมาณรวมทั้งสิ้น 1.4 กิโลกรัม น้ํานมดิบดังกล่าว ได้รับการเก็บรักษาในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อคงสภาพทางกายภาพและชีวเคมี ก่อนนำมาผ่าน กระบวนการทดสอบตามที่กำหนดไว้ในแผนการวิจัย เพื่อให้การศึกษาเป็นไปตามหลักวิธีวิทยาที่กำหนด ตัวอย่างน้ํานมดิบทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็น 28 หน่วยตัวอย่างย่อย แต่ละตัวอย่างถูกจัดบรรจุลงใน ภาชนะพลาสติกแก้วที่ผ่านการฆ่าเชื้อ โดยแต่ละหน่วยตัวอย่างมีปริมาณน้ํานมดิบ 50 กรัม ทั้งนี้ เพื่อให้ สามารถประเมินผลกระทบของการบำบัดด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) ได้อย่าง ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งในจำนวนนี้ ประกอบด้วยตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทดสอบด้วย คลื่นความถี่วิทยุ (RF) จำนวน 1 ตัวอย่าง และตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทดสอบด้วยคลื่นความถี่วิทยุ จำนวน 27 ตัวอย่าง รายละเอียดของการจัดกลุ่มตัวอย่างและเงื่อนไขในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดสอบด้วยเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับน้ํานมสด

รายการ	ปริมาณ (กรัม)
Control	50
ความเข้มสนามไฟฟ้า 300kV/m อุณหภูมิ 45°C, 50°C และ 55°C	450
ความเข้มสนามไฟฟ้า 450kV/m อุณหภูมิ 45°C, 50°C และ 55°C	450
ความเข้มสนามไฟฟ้า 900kV/m อุณหภูมิ 45°C, 50°C และ 55°C	450

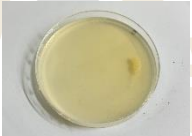
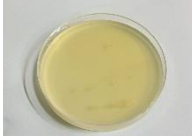
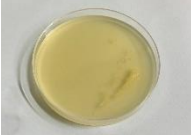
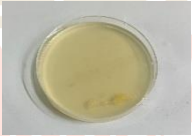
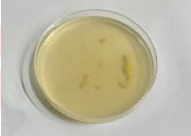
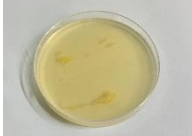
น้ำมันดิบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส) จังหวัดนครราชสีมา โดยมีปริมาณรวมทั้งสิ้น 1.4 กิโลกรัม น้ำมันสดดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็นตัวอย่างย่อยจำนวน 28 ตัวอย่าง โดยบรรจุในภาชนะพลาสติกแก้ว แต่ละตัวอย่างมีน้ำหนัก 50 กรัม ซึ่งในจำนวนนี้ประกอบด้วยตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทดสอบด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) จำนวน 1 ตัวอย่าง และตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการทดสอบด้วยคลื่นความถี่วิทยุจำนวน 27 ตัวอย่าง รายละเอียดของการจัดกลุ่มตัวอย่างและเงื่อนไขในการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อผ่านไป 5 วัน

วันที่	Control	Temperature (°C)	900kV/m	450kV/m	300kV/m
1		45			
		50			
		55			
5		45			
		50			
		55			

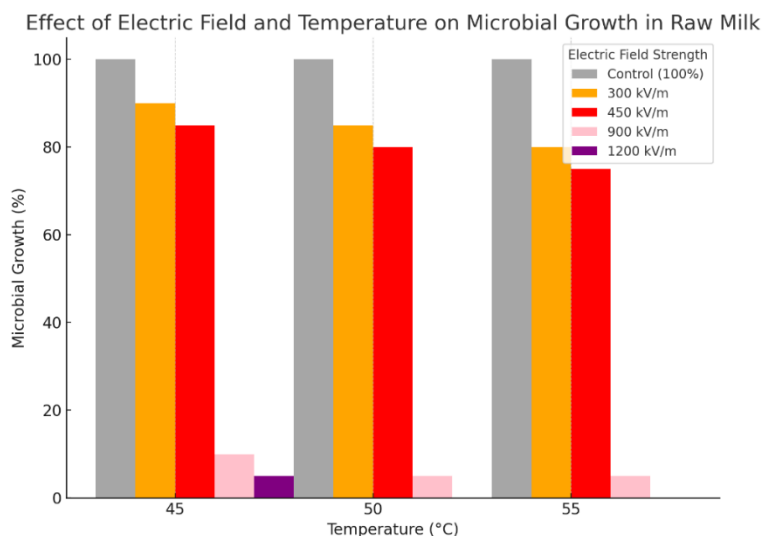
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบทางกายภาพของน้ำนมดิบภายหลังการบ่มเป็นระยะเวลา 5 วัน พบว่า ตัวอย่างที่ได้รับการบำบัดด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า 300 kV/m ที่อุณหภูมิ 45°C และ 50°C มีลักษณะการ จับตัวเป็นก้อน (coagulation) ชัดเจนมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า 450 kV/m และ 900 kV/m ในทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่อาจเกิดจากกระบวนการเสื่อมสภาพของโครงสร้างโปรตีนภายในน้ำนม การจับตัวกันของน้ำนมดิบในลักษณะนี้อาจเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี เช่น การสลายตัวของเคซีน (casein degradation) หรือการเปลี่ยนแปลงของค่า pH อันเป็นผลจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตภายหลังการบ่ม ทั้งนี้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็น สัญญาณเริ่มต้นของกระบวนการเน่าเสีย (spoilage process) ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพและความปลอดภัยของน้ำนมดิบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้รับการบำบัดด้วยสนามไฟฟ้าที่มีค่าความเข้มต่ำ การค้นพบนี้จึงเน้นย้ำถึง บทบาทของความเข้มสนามไฟฟ้าต่อเสถียรภาพทางกายภาพของน้ำนมดิบ โดยค่าความเข้มสูงอาจช่วยยับยั้งกระบวนการเน่าเสียได้ดีกว่า เนื่องจากสามารถลดอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือช่วยรักษาโครงสร้างโปรตีนให้อยู่ในสภาพที่เสถียรได้นานขึ้น

ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของน้ำนมดิบบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA หลังการบ่มเป็นระยะเวลา 3 วัน

Control	Temperature (°C)	900kV/m	450kV/m	300kV/m
	45			
	50			
	55			

จากตารางที่ 4.3 ตัวอย่างน้ำนมดิบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยสนามไฟฟ้า (Control) แสดงให้เห็นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อย่างชัดเจน โดยพบ การเกิดโคโลนีของเชื้อราและแบคทีเรียในปริมาณมาก ซึ่งแสดงถึงกระบวนการเน่าเสียที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ อันเป็นผลจากจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำนมดิบตั้งแต่แรก ในขณะที่ 300 kV/m และ 450 kV/m พบว่า มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระดับที่ใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม โดยมีการปรากฏของจุดสีเหลืองและการตกตะกอนของน้ำนมดิบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าที่ระดับต่ำนี้อาจมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และที่ 900 kV/m พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยสนามไฟฟ้าสูงสุด (900 kV/m) มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำนมดิบค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ไม่พบการเติบโตของจุลินทรีย์ในระดับที่ชัดเจน ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่สนามไฟฟ้าสูงสามารถ ลดปริมาณจุลินทรีย์ หรือ ชะลอการเจริญเติบโต ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของสนามไฟฟ้าในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำนมวัวดิบ ได้มีการทดลองโดยปรับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ต่างกัน จากนั้นทำการวัดเปอร์เซ็นต์การเจริญของจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ภายหลังการบำบัด ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มการลดลงของการเจริญของจุลินทรีย์เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิร่วมกัน



รูปที่ 4.1 ผลของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิต่อการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำนมวัวดิบ

จากกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในน้ำนมวัวดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกลุ่มควบคุมที่ไม่ผ่านการบำบัด ยังคงมีการเจริญของจุลินทรีย์เต็ม 100% ในทุกอุณหภูมิ ขณะที่กลุ่มที่ได้รับการบำบัดด้วยสนามไฟฟ้า 300 และ 450 kV/m ลดการเจริญลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้สนามไฟฟ้าระดับ 900 และ 1200 kV/m ร่วมกับอุณหภูมิ 50–55°C การเจริญของจุลินทรีย์ลดลงเหลือเพียง 10% หรือต่ำกว่านั้น และในบางกรณีไม่พบการเจริญของเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อเลย นั่นอาจแสดงถึงศักยภาพของเทคโนโลยีนี้ในการพัฒนาแนวทางฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่ำเพื่อคงคุณภาพของน้ำนมในเชิงโภชนาการ

4.3 สรุป

จากผลการทดสอบพบว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น (900 kV/m) มีแนวโน้มช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดีกว่า ในขณะที่ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า (450 kV/m และ 300 kV/m) ไม่สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของน้ำนมดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังพบการเน่าเสียในระดับที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยความเข้มสูง นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำนมดิบ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยทางเคมีและจุลชีววิทยาที่เกี่ยวข้อง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (900 kV/m) อาจเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาน้ำนมดิบ โดยลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของงานวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของ คลื่นความถี่วิทยุ (RF) ต่อ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและชีวภาพของน้ำนมดิบ พบว่า ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น (900 kV/m) สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของน้ำนมดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับค่าความเข้มที่ต่ำกว่า (450 และ 300 kV/m) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 45°C และ 50°C ซึ่งพบว่า การบำบัดด้วยความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ อาจไม่สามารถยับยั้งการเกิดการตกตะกอนและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นว่า การบ่มน้ำนมดิบบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการบำบัดด้วย RF โดยกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดมีการเติบโตของจุลินทรีย์อย่างชัดเจน ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดที่ 900 kV/m มีลักษณะของน้ำนมที่คงสภาพได้ดีกว่า จากผลการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ค่าความเข้มสูงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาน้ำนมดิบ อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น ค่า pH ปริมาณโปรตีน และองค์ประกอบทางเคมีของน้ำนม เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของเทคนิคนี้ในระดับอุตสาหกรรม รวมถึงการประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์นมประเภทอื่น ๆ ในอนาคต

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหาสำคัญของการ การควบคุมอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าแม้ว่าจะมีการกำหนดอุณหภูมิและความเข้มสนามไฟฟ้าไว้อย่างชัดเจน แต่การกระจายของสนามไฟฟ้าภายในตัวอย่างอาจไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนบางส่วนเล็กน้อย และการทดสอบเฉพาะด้านกายภาพและจุลินทรีย์ ซึ่งการศึกษานี้เน้นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและชีวภาพของน้ำนมดิบ แต่ไม่ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล เช่น โครงสร้างโปรตีนหรือองค์ประกอบทางเคมีที่ได้รับผลกระทบจากคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งอาจส่งผลต่อผลลัพธ์ของการทดลองได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Engineering Aspects of Thermal Food Processing, Edition: Contemporary Food Engineering Series, Chapter: Chapter 2 . Principles of Thermal Processing: Pasteurization, Publisher: CRC Press, Taylor and Francis Group, USA, Editors: Ricardo Simpson, pp.13-48
- [2] Wang, S., Tang, J., Johnson, J.A., Mitcham, E., Hansen, J.D., Hallman, G., Drake, S.R., and Wang, Y. (2003). Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments, Biosystems Engineering, Vol. 85, p. 201-212. 2003.
- [3] Zimmermann, U. (1986). Electrical breakdown, electroporation and electrofusion. Reviews of Physiology Biochemistry and Pharmacology, 105,176–256.
- [4] J Teissié, N Eynard, B Gabriel, M.P Rols (1999). Electroporation of cell membranes. Volume 35, Issue 1, Enhanced Drug Delivery Using High-voltage Pulses, pp. 3–19
- [5] Gevecke D.J, Kozempel M, Scullen OJ, Brunkhorst C. (2002). Radio frequency energy effects on microorganisms in food. Innovation Food Science & Emerging Technologies 3:pp.133-138.
- [6] Gevecke D.J, Brunkhorst C. (2004). RFEF pilot plant for inactivation of Escherichia coli in apple juice. Fruit Processing 14: 167-170.
- [7] Gevecke D.J, Brunkhorst C. and Fan X. (2007). Radio frequency electric field processing of orange juice. Innovative Food Science and Emerging Technologies 8 pp.549–554
- [8] Gevecke D.J, Brunkhorst C. (2008). Radio frequency electric fields inactivation of Escherichia coli in apple cider. Innovative Food Science and Emerging Technologies 8 pp.215-221
- [9] Gevecke D.J., Ukuku DO, Cooke PH (2012). Effect of Thermal and Radio Frequency Electric Fields Treatments on Escherichia coli bacteria in Apple Juice. J Microb Biochem Technol 4, pp. 076-081.
- [10] Nelson S O (1996). Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. Transactions of the ASAE, 39, 1475–1484.
- [11] Zurina Zainal Abidin, Fatin Nordalila Omar, Pavithiran Yogarajah, Dayang Radiah Awang Biak and Yaakob Bin Che Man (2014) DIELECTRIC CHARACTERIZATION OF LIQUID CONTAINING LOW ALCOHOLIC CONTENT FOR POTENTIAL HALAL AUTHENTICATION IN THE 0.5 - 5.0 GHz RANGE. American Journal of Applied Sciences 11 (7), pp 1104-1112.

- [12] Xinhua Zhu, Wenchuan Guo and Xiaoling Wu (2012). Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating. *Journal of Food Engineering* 109, pp.258–266



ประวัติผู้วิจัย

- 1.ชื่อ (ภาษาไทย) รศ.ดร. ชัญชัย ทองโสภ
(ภาษาอังกฤษ) Assoc. Prof. Dr. Chanchai Thongsopa
เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน xxxxx 00098 92 5
2. รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ : 00040671
3. ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์
อดีต : หัวหน้าสถานวิจัยสำนักวิศวกรรมศาสตร์
: หัวหน้าสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์
: ผู้อำนวยการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
: ผู้อำนวยการศูนย์คอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
: ผู้อำนวยการศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และE-mail :
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์: 0-4422-4397 โทรสาร: 0-4422-4392 E-mail: chan@sut.ac.th

5. ประวัติการศึกษา:

ปีการศึกษา	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถานศึกษา	ประเทศ
2545	Doctors	D.Eng	Electrical Engineering	Telecommunication Engineering	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Thailand
2539	Masters	M.Eng	Electrical Engineering	Electrical and Communications	Kasetsart University	Thailand
2534	Bachelors	B.Eng (1 st class Honor)	Electronics Engineering		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Thailand

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ(แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)ระบุสาขาวิชาการ:
RF and Microwave circuit design, Active antenna, Heating application, Network Design.
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ:
หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

1. Design Systems Air Traffic control
 2. Design transmitters VHF-UHF (AM) 25W (on 24 Hour)
 3. Design Transmitters HF (AM) 1KW (on 24 Hour)
 4. Developing the wideband antenna for 2.4 GHz WLAN
 5. Design Network Systems
 6. เครื่องกำเนิดและกรองอากาศด้วยระบบพลาสมาเพื่อควบคุมการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส
 7. เครื่องกำเนิดไอออนกำลังสูงสำหรับฆ่าเชื้อไวรัส
 8. เครื่องกำเนิดลูกน้ำยุงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงกำลังงานสูง
 9. เครื่องฆ่ามอดมะขามหวานด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
 10. เครื่องกำจัดตะกอนในท่อส่งน้ำบาดาล
 11. เครื่องกำจัดแมลงศัตรูพืชสำหรับเกษตรแม่นยำผ่านระบบสื่อสารไร้สาย
 12. เครื่องควบคุมวงจรกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อลดการเกิดตะกอนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
 13. เครื่องตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
 14. เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบตั้งเวลาได้โดยใช้แหล่งพลังงานจากการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
 15. ออกแบบสร้างนวัตกรรมระบบกำจัดขยะติดเชื้อโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาความถี่สูงกำลังสูงสำหรับพื้นที่เสี่ยงต่อการแพร่ระบาดของเชื้อโรค
 16. การออกแบบสร้างระบบกำจัดวงจรชีวิตยุงในแหล่งน้ำชุมชนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง
 17. การออกแบบและสร้างเครื่องป้องกันเปรียงโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงสำหรับแบร็งรับเพลารือ
 18. การพัฒนาต่อ ยอดระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงพร้อมแจ้งเตือนผ่านระบบสื่อสารไร้สายสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลเพื่อความมั่นคงของกองทัพ
 19. ผลกระทบของคลื่นความถี่วิทยุต่อการปรับปรุงข้าวแข็งให้เป็นข้าวนุ่มเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมข้าวไทย
 20. การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดเห็บโคโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โครงการยกระดับงานวิจัยเพื่ออนาคตสู่ภาคอุตสาหกรรม
 21. การออกแบบและสร้างเครื่องป้องกันเปรียงโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงสำหรับตัวเรือ
 22. รั้วอิเล็กทรอนิกส์ไร้สาย (Doppler Radar) ป้องกันแนวชายแดน
- รางวัลเกียรติคุณ :**
- 2540:** รางวัลวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 2546:** รางวัลโรงเรียนช่างฝีมือทหาร ในฐานะบุคคลดีเด่น
- 2551:** โล่เกียรติคุณ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในฐานะบุคคลดีเด่น
- 2558:** รางวัลเกียรติยศผลงานเด่น สวก. เครื่องให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกสำหรับฆ่ามอดข้าว
- 2560:** รางวัลนักวิจัยดีเด่น จากกระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 2562:** รางวัลรองชนะเลิศระดับภาค ประเภทนวัตกรรมเชิงพาณิชย์ ผลิตภัณฑ์นวัตกรรม (NESP Innovation Awards 2019) Science Park

8. ผลงานวิจัยทางวิชาการ

- 1 C. Thongsopa, S. Kotchapradit, S. Santalunai and T. Thosdeekoraphat, "Breast Cancer Detection by Using Microwave Ultra- Wideband Antenna," 251ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, ENGINEERING & TECHNOLOGY - ICSET, Sydney, 2018
- 2 Supawat Kotchapradit, Thanaset Thosdeekoraphat, Samran Santalunai, and Chanchai Thongsopa (2018). Analysis of High Frequency Curved Plate Applicator for Deep Hyperthermia in Breast Cancer Treatment by Using Dielectric Heating, International Symposium on Antennas and Propagation, 23-26 Oct. 2018, Paradise Hotel Busan, Busan, Korea
- 3 Adisak Rattananamlom, Supawat Kotchapradit, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Phichet Moungnoul, and Chanchai Thongsopa (2018). Design of High Power Transmission Line Transformer for RF Heating Generator, International Symposium on Antennas and Propagation, 23-26 Oct. 2018, Paradise Hotel Busan, Busan, Korea
- 4 Kachaporn Lhathum, Supawat Kotchapradit, Thanaset Thosdeekoraphat, Samran Santalunai, and Chanchai Thongsopa (2018). Analysis and Design of Microwave Plasma for Ozone Generator System by Using Magnetron Tube, International Symposium on Antennas and Propagation, 23-26 Oct. 2018, Paradise Hotel Busan, Busan, Korea
- 5 MONTREE BUAPHUEAN, SAMRAN SANTALUNAI, THANASET THOSDEEKORAPHAT, CHANCHAI THONGSOPA, NUCHANART FHAFHIEM (2019) DUAL-BAND AND HIGH GAIN U-SHAPED ANTENNA FOR JAMMING THE UNPRECEDENTED UAV. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication, Volume-7, Issue-9, PP.16-19.
- 6 Montree Buaphuean, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2019). Dual-Band and High gain U-Shaped Antenna for Jamming the Unprecedented UAV. International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET), 9th - 10th May, 2019, Amsterdam, Netherlands.
- 7 Supawat KOTCHAPRADIT, Chanchai THONGSOPA, Thanaset THOSDEEKORAPHAT (2019). "Analysis and Design of Microwave Dielectric Heating with Curved Plate Applicator for Deep Hyperthermia in Breast Cancer Treatment," Radioengineering, Vol. 28, No.4, December 2019.
- 8 Worawut Boonpeang, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa (2020). A new Modeling of IGBT and Freewheeling Diode based on Electric Behavioral with Independently of Time Condition, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY. Vol 2020, Nr 8, PP. 10-16
- 9 Wittawat Wasusathien, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, and Chanchai Thongsopa (2020). Rice Types Classification by Using Dielectric Properties

- Measurement with Saline Water Increasing Technique, 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 13- 17, virtual web conference, alternative to Waseda University, Tokyo, Japan, PP.433-438.
- 10 Supatinee Kornsing, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, and Chanchai Thongsopa (2020). Dielectric Property Measurement of Freshwater Fishes and Parasite Affecting Infection *Opisthorchis Viverrini* for Dielectric Heating Application, 9th International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 13- 17, virtual web conference, alternative to Waseda University, Tokyo, Japan, PP.439-442.
 - 11 Samroeng Santalunai, Weerawat Charoensiri, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, Nuchanart Fhafhiem, (2020). Electric Fields Distribution of Optimized Waveguide Potrs Power Position for Grains Drying Applications, Proceedings of International Video Conference on Science Technology and Management, Paris, France, 21st – 22nd October, 2020, PP. 31-35.
 - 12 Weerawat Charoensiri, Samran Santalunai, Samroeng Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa, Nuchanart Fhafhiem, (2020) . The Optimization of Electric Field Distributions with Rectangular Plates Parallel for Dielectric Heating Applications, Proceedings of International Video Conference on Science Technology and Management, Bangkok, Thailand, 29th – 30th September, 2020, PP. 6-10.
 - 13 Kotchapradit, S., Jokpudsa, M., Thosdeekoraphat, T., Mapato, M., Thongsopa, C. 126 Treatment (2020) IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference, IMBioC 2020
 - 14 K. Tanthai, T. Thosdeekoraphat, C. Thongsopa and S. Santalunai, “Design a High-Frequency Sound Wave Receiving and Transmission System Mimicking Real Signals from The Source by an Ultrasonic Transduced,” in 2021 The 15th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), Indonesia, Feb. 2021.
 - 15 W. Bunpradit, T. Thosdeekoraphat, C. Thongsopa and S. Santalunai, “High Frequency Plasma Generator for Electronic Waste Disposal,” in 2021 The 15th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), Indonesia, Feb. 2021.
 - 16 W. Pongtham, T. Thosdeekoraphat, C. Thongsopa and S. Santalunai, “Modification of Time Attendance Devices to Use as IOT Using Raspberry Pi 4 Board,” in 2021 The 15th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), Indonesia, Feb. 2021.
 - 17 Kotchapradit, S., Siribunkun, S., Thodsdeekorapat, T., Thongsopa, C., "Analysis of High-Frequency Dielectric Plates Applicator Effects to Accelerate Ripening in Fruit Using NIR Hyperspectral Imaging (2021) IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2021, pp. 16-19.

- 18 Nuchanart Santalunai, Samran Santalunai, Piyaporn Meesawad, Chanchai Tongsopa, Samroeng Santalunai, (2021). Plus-Shape of Mushroom-Like EBG with Square Microstrip Emitter to Expand the Working Space in Dielectric Heating Applications. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.14, No.3, PP., 189-200.

